

**USO DEL SOFTWARE LIBRE Y DE CÓDIGO ABIERTO SIG PARA LA
ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA A
ESCALA 1:25000 EJEMPLO MANIZALES – CALDAS.**

Jhonathan Fabian Uribe Patiño

Facultad de Ciencias Exactas y naturales, Universidad de Caldas

601221999: Geología

Geólogo, Esp Computacion Diego Alberto Arango Arcila

29 de noviembre del 2022

Nota de aprobación:

APROBADO

Diego A. Arango A.

DEDICATORIA

A mis padres Nestor Dario Uribe y Martha Patiño, con gran cariño y gratitud, pues ellos me enseñaron el valor del trabajo y la dedicación para lograr los objetivos, a Juan José Castro Vargas por su apoyo siempre desinteresado y por supuesto a Fernando De Jesús Sánchez Zapata, partiste de este mundo antes de que cumpliera este sueño, pero tu legado sigue vivo.

A mi hija Iris Samara Uribe Perea por ser todo lo bueno de este mundo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primero a mi hija que es el pilar de mi vida y sin ella darse cuenta me brindo la energía y las ganas en el camino para seguir adelante, a las personas que me impulsaron a realizar este sueño, en especial a Anyela Patricia Perea Lasso por sus consejos y apoyo incondicional.

A Diego Alberto Arango Arcila por confiar en esta propuesta.

RESUMEN

Este trabajo presenta una serie de productos cartográficos obtenidos con software (SIG) libre y de código abierto, cuya naturaleza está ligada al servicio de la comunidad académica y de la sociedad en general sin costo alguno, por lo que al ser una herramienta flexible en el ámbito de los derechos de reproducción y copia, le otorga un valor palpable para los que requieran de software de calidad para la solución de problemas vinculados con la identificación de amenazas y problemas relacionados con el análisis del terreno.

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) publicó la Guía Metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000, esta metodología se ejecuta con el fin de tener un mejor conocimiento del territorio y la caracterización de estos movimientos en zonas rurales de municipios, el análisis utilizado para la zonificación de la susceptibilidad consiste en el método estadístico bivariado; este método evalúa patrones de asociación entre los factores condicionantes y las áreas inestables mediante pesos.

Los resultados presentados en este trabajo fueron validados según la metodología para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 del (SGC) con una Curva de éxito ABC cuyo resultado fue igual al 71.60%.

Este documento contiene doce (12) capítulos, que reflejan la investigación, metodología, análisis de susceptibilidad por movimientos en masa, escala 1:25000 y sus respectivas conclusiones y recomendaciones, se espera que esta tesis aporte a la solución de problemas relacionados con los movimientos en masa en las diferentes regiones y territorios colectivos, ancestrales y reservas campesinas de Colombia.

Palabras clave: Software libre, SIG, Susceptibilidad, Movimientos en masa.

ABSTRACT

This work presents a series of cartographic products obtained with free and open source software (GIS), whose nature is linked to the service of the academic community and society in general, at no cost, so being a flexible tool in The field of reproduction and copy rights gives it a palpable value for those who require quality software to solve problems related to the identification of threats and problems related to terrain analysis.

The Colombian Geological Service (SGC) published the Methodological Guide for the zoning of threats due to mass movements at a scale of 1:25,000. This methodology is carried out in order to have a better knowledge of the territory and the characterization of these movements in rural areas of municipalities, the analysis used for the zoning of susceptibility consists of the bivariate statistical method; this method evaluates patterns of association between conditioning factors and unstable areas using weights.

The results presented in this work were validated according to the methodology for hazard zoning due to mass movements at a scale of 1:25,000 of the (SGC) with an ABC success curve whose result was equal to 71.60%.

This document contains twelve (12) chapters, which reflect the research, methodology, susceptibility analysis for mass movements, scale 1:25000 and their respective conclusions and recommendations. It is expected that this thesis contributes to the solution of problems related to movements. en masse in the different regions and collective, ancestral territories and peasant reserves of Colombia.

Keywords: Free software, GIS, Susceptibility, Mass movements.

índice

1. Introducción.....	8
2. Justificación.....	9
3. Objetivos.....	11
3.1. Objetivo General.....	11
3.2. Objetivos específicos.....	12
4. Antecedentes.....	12
5. Metodología.....	15
5.1. Revisión documental.....	16
5.2. Antecedentes históricos de la zona de estudio.....	16
5.3. Elaboración de la cartografía temática.....	16
5.4. Evaluación y Resultados.....	17
6. Localización.....	18
7. Marco conceptual.....	19
7.1. Acumulación De Flujo.....	19
7.2. Amenaza.....	20
7.3. Amenaza Antrópica.....	20
7.4. Amenaza Natural.....	20
7.5. Capa Ráster.....	21
7.6. Capa Vectorial.....	21
7.7. Caracterización Geoambiental.....	21
7.8. Curvatura De Plano.....	22
7.9. Dem.....	22
7.10. Geomorfología.....	23
7.11. Índice De Relieve Relativo.....	23
7.12. Inventario De Movimientos En Masa.....	23
7.14. Modelo De Sombras (Hillshade).....	24
7.15. Movimientos En Masa.....	25
7.16. Orientación.....	25
7.17. Pendiente.....	26
7.18. Relieve.....	26
7.19. SIG.....	26
7.20. Susceptibilidad.....	27
7.21. Susceptibilidad De Deslizamiento.....	27
7.22. Uso Del Suelo.....	27
7.23. Zonificación.....	28
8. Aspectos geológicos.....	28
8.1. Geología.....	30
8.1.1. Complejo Cajamarca.....	30
8.1.2. <i>Milonita Granítica Del Guacaica (PINM)</i>	32

8.1.3. Neis De Chinchiná.....	33
8.1.4. Complejo Arquía.....	33
8.1.5. Complejo Quebradagrande.....	35
8.1.6. Stock de Manizales (KTCDM).....	37
8.1.7. Formación Amagá Miembro Inferior (TOI).....	37
8.1.8. Pórfidos De Neira (TADN).....	38
8.1.9. Flujos Andesíticos porfiríticos (TQA).....	38
8.1.10. Formación Manizales.....	39
8.1.11. Formación Casabianca.....	40
8.1.12. Depósitos de Flujos de Escombros o depósitos Volcanoclásticos de La Enea.....	40
8.1.13. Depósitos De Lluvia Piroclástica.....	41
8.1.14. Domos de Tesorito.....	41
8.1.15. Domo Sancancio.....	42
8.1.16. Lavas de Lusitania.....	42
8.2. Marco tectónico regional.....	43
8.3. Marco tectónico local.....	43
8.3.1 Falla Romeral.....	45
8.3.2. Falla Samaná Sur.....	46
8.3.3. Falla Villamaria – Termales.....	46
8.3.4. Falla Manizales.....	47
8.3.5. Falla de Chipre.....	47
8.3.6. Falla El Cementerio.....	48
8.3.7. Falla Mangabonita.....	48
8.3.8. Falla Gallinazo.....	48
8.3.9. Falla La Oliva.....	49
8.3.10. Sistema De Fallas El Solferino.....	49
8.3.11. Falla El Perro.....	49
9. Alcance y Limitaciones.....	50
9.1. Alcance.....	50
9.2. Limitaciones.....	50
10. Metodología Para La zonificación Por Movimientos En Maza Escala 1:25000.....	51
11. Caracterización Geoambiental.....	52
11.1. Inventario De Procesos.....	54
11.2. Factores Condicionantes.....	60
11.2.1. <i>Altura</i>	60
11.2.2. Orientación “Aspecto”.....	62
11.2.3. <i>Curvatura</i>	64
11.2.4. Dirección De Flujo.....	65
11.2.5. Pendientes.....	67
11.2.6. Distancia a Drenajes.....	68
11.2.7. Distancia a Vías.....	70
11.2.8. <i>Distancia a Fallas</i>	71
11.2.9. Formaciones Superficiales.....	72
11.2.10. <i>Geomorfología</i>	75

11.2.11. <i>Ocupación y Uso De Suelos</i>	77
11.3. Análisis de susceptibilidad.....	79
11.3.1. Procesamiento Estadístico Para El Factor Condicionante Altura.....	85
11.4. Cálculo de susceptibilidad.....	87
11.5. Curva de éxito.....	88
11.6. <i>Mapa de susceptibilidad</i>	91
11.6.1. Susceptibilidad muy alta.....	93
11.6.2. Susceptibilidad alta.....	93
11.6.3. <i>Susceptibilidad media</i>	94
11.6.4. <i>Susceptibilidad Baja</i>	94
12. Conclusiones.....	96
13. Recomendaciones.....	97
14. Bibliografía.....	99

Índice de figuras

Figura 1.....	56
Figura 2.....	83
Figura 3.....	89
Figura 4.....	90
Figura 5.....	95

Índice de tablas

Tabla 1.....	14
Tabla 2.....	52
Tabla 3.....	55
Tabla 4.....	59
Tabla 5.....	61
Tabla 6.....	67
Tabla 7.....	82
<i>Tabla 8</i>	85
Tabla 9.....	86
Tabla 10.....	92

Índice de mapas

Mapa 1.....	18
-------------	----

Mapa 2.....	29
Mapa 3.....	44
Mapa 4.....	57
Mapa 5.....	60
Mapa 6.....	63
Mapa 7.....	64
Mapa 8.....	66
Mapa 9.....	68
Mapa 10.....	69
Mapa 11.....	70
Mapa 12.....	72
Mapa 13.....	73
Mapa 14.....	75
Mapa 15.....	77
Mapa 16.....	91

1. Introducción

Colombia posee una geografía diversa y compleja, el sector del área andina es constituida por tres grandes cordilleras, las cuales cubren gran parte del territorio nacional; Los accidentes geográficos como montañas, sierras, cañones, son relativamente comunes en el área andina, los cuales surgen como consecuencia de esta complejidad geológica. El departamento de Caldas se ha caracterizado por su alto riesgo a generar movimientos en masa, y su capital Manizales no es ajena a esta realidad, esto hace necesario prevenir y mitigar el riesgo ya existente; es de aclarar que estos movimientos en masa, afectan tanto a áreas urbanas como rurales, y debemos tener presente que un deslizamiento puede ser detonado por varios factores como puede ser la saturación de agua, pendientes altas, usos inadecuados del suelo, movimientos sísmicos y zonas de fallas geológicas.

En 2017 el Servicio Geológico Colombiano (SGC) publicó la Guía Metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000, con un desarrollo técnico y científico, esta metodología se ejecuta con el fin de tener un mejor conocimiento del territorio y la caracterización de estos movimientos en zonas rurales de municipios, esta información de amenazas y riesgos puede ser incorporada en el ordenamiento territorial de los diferentes municipios y territorios utilizando instrumentos como los Esquemas de Ordenamiento Territorial (EOT), Planes Básicos de Ordenamiento Territorial (PBOT) y Planes de Ordenamiento Territorial (POT), entre otros.

El uso de herramientas de software de código abierto alrededor del mundo en cartografía, cartografía geológica, zonificación de variables sociales, económicas y del riesgo demuestra que

estos recursos están listos para la aplicación práctica, presentando varias ventajas como: flexibilidad de licencias, gran soporte de software a escala global y la facilidad de uso.

2. Justificación

Según el Decreto 1807 del 2014 la susceptibilidad corresponde a la fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad a sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente; En este trabajo se busca analizar la susceptibilidad por movimientos en masa, teniendo en cuenta, área y distribución espacial de los deslizamientos; el cual se enfoca en los procesos geomorfológicos que actúan sobre el terreno sumado a la elaboración de mapas temáticos que asumen valores ya establecidos en la guía metodológica para zonificación de amenazas por movimientos en masa escala 1:25.000 del Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Los registros de movimientos en masa en muchos lugares están restringidos a reportes realizados por entidades oficiales o directamente por la población afectada; Esto limita la información sobre eventos ocurridos en regiones de difícil acceso, lo que configura una limitante para la caracterización cartográfica de las zonas afectadas (Martha, Kerle, Jetten, Van Westen, & Vinod Kumar, 2010 y Metternicht, Hurni, & Gogu, 2005) en (Beltrán Rincón, 2019).

Según el estudio de (Lince et al., 2017) las susceptibilidades “muy alta” y “alta” de deslizamientos y procesos relacionados, en el eje cafetero se encuentran en las regiones central y occidental del departamento de caldas, con influencia parcial o total en los municipios de Aguadas, Aranzazu, Pácora, Salamina, Chinchiná, Manizales, Neira, Palestina, Villamaría, Filadelfia, La Merced, Marmato, Riosucio, Supía, Anserma, Belalcázar, Risaralda, San José y

Viterbo, además plantean que esta susceptibilidad de la región central se atribuye al sistema de fallas de Romeral y de la región oriental a la naturaleza de los materiales, la inclinación de la pendiente y longitud de las laderas.

Teniendo en cuenta lo anterior se hace pertinente hablar de la necesidad de acceso a los datos abiertos vinculados a la zonificación de amenazas para la comunidad en general, los Software especializados en SIG por lo general permiten acceso a los datos de entidades como el IGAC en sus servidores mientras estos sean de uso público, la única exigencia es citar adecuadamente a la hora de utilizar estos datos, es necesario recalcar que estos datos pueden ser usados en un alto grado de compatibilidad en software libre y de código abierto siendo un ejemplo el software libre Qgis.

Como afirman algunos autores:

Uno de los principales problemas que se presentan al realizar la planeación en los municipios del país es primero, que toda la carencia de una herramienta poderosa que ayude a la toma de decisiones, en conjunto con la baja capacidad de las administraciones locales para definir el perfil de la información estratégica necesaria, producirla, manipularla y mantenerla actualizada". Palacios (2005) en (Molina et al., 2005)

Es decir, con el fin de coordinar el trabajo entre los niveles ejecutivo y operativo del municipio, se requiere una movilidad entre la perspectiva general y el análisis del detalle, que permita a los tomadores de decisiones establecer prioridades de atención e inversión en salud, educación, red vial, por ejemplo, y al personal operativo ejecutar las labores cotidianas de interacción con los habitantes, control y mantenimiento de la información del municipio.

En Colombia, a partir de la expedición de la ley de gestión del riesgo de desastres (Ley 1523 de 2012), los municipios del país deben hacer estudios de riesgos naturales como parte esencial de las políticas de planificación del desarrollo seguro y gestión ambiental territorial sostenible (Ávila et al., 2015).

Esto conlleva que los municipios con menos recursos puedan hacer uso del software libre y de código abierto para cumplir con las obligaciones de ley, además que las comunidades con jurisdicción especial sobre el territorio, como las poblaciones afrocolombianas, campesinas y poblaciones indígenas, puedan también hacer uso de los datos y del software libre y de código abierto para determinar amenaza de origen natural en los territorios y/o cabildos.

El software libre y de código abierto plantea una amplia posibilidad para las regiones e institutos del país que no cuentan con los recursos suficientes para pagar una licencia, la posibilidad de manejar gran volumen de datos de diferentes tipos y la compatibilidad con los datos de diferentes software del mercado hacen al software libre y de código abierto especializado en SIG una alternativa para las comunidades de todos los tipos.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General.

- Usar Software libre y de código abierto (SIG) para el análisis y zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 para el municipio de Manizales, utilizando la guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25000 del servicio geológico colombiano.

3.2. Objetivos específicos.

- Recopilar información necesaria para el levantamiento y consecución de la información temática y los datos de entrada requeridos para obtener la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa.
- Realizar un análisis de susceptibilidad, los métodos probabilísticos recomendados en la guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25000 del servicio geológico colombiano y herramientas SIG.
- Realizar el mapa de zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 y confrontarlo con otros mapas de temática igual o similar generados por otras instituciones, para el municipio de Manizales.

4. Antecedentes

En los últimos 30 años se ha llevado a cabo una gran cantidad de investigación sobre la zonificación del riesgo de deslizamientos de tierra como consecuencia de la demanda urgente de información sobre el riesgo de inestabilidad de laderas con fines de planificación.

En Hansen (1984) y Varnes (1984) se pueden encontrar descripciones generales de las diversas técnicas de zonificación de riesgos de inestabilidad de taludes (C. J. V. Westen & Terlien, 1996).

Colombia es un país expuesto a diferentes dinámicas geológicas, geomorfológicas y climáticas que llevan a una alta ocurrencia de movimientos en masa de diferentes tipos que pueden afectar a la población directa e indirectamente, el Servicio Geológico Colombiano (SGC), generó en el año 2001 el Mapa nacional de amenaza relativa por movimientos en masa a

escala 1:1.500.000, con el fin de mostrar la distribución espacial de los movimientos en masa en el territorio colombiano.

Al mismo tiempo, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), decide actualizar el mapa de susceptibilidad a los deslizamientos de tierra, efectuado en el año 2000, de tal manera que las dos entidades decidieron aunar sus esfuerzos mediante el convenio interinstitucional firmado en el año 2009, para realizar la actualización de los dos mapas, obteniéndose el Mapa de susceptibilidad y el Mapa de Amenaza relativa por movimientos en masa a escala 1:500.000. (Estepa Rojas y Talero Rodriguez 2016)

Para el año 2010, el Servicio Geológico Colombiano, comenzó a hacer la zonificación de amenaza por movimientos en masa en escala 1:100.000, teniendo como producto el libro “Las Amenazas por Movimientos en Masa en Colombia”.

Igualmente, se han realizado diferentes guías y metodologías para zonificación de amenaza por movimientos en masa en el país, entre las cuales se encuentran:

La Guía Técnica para la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa (1999) desarrollada por Germán Vargas Cuervo en colaboración con la Cooperación Colombo-Alemana GTZ en el marco del Proyecto Río Guatiquía, Evaluación del Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa – Guía Metodológica (2001) por INGEOMINAS y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y la Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa (2015). (Martínez Muñoz & García Idarraga, 2020)

Luego de lo anterior, en el 2017 el Servicio Geológico Colombiano (SGC) publicó la Guía Metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000, con un desarrollo en diferentes frentes tanto técnicos como científicos, con el fin de tener una mejor resolución del detalle de los procesos vinculados a los movimientos en masa en las regiones del territorio colombiano.

Los procesos de remoción en masa son los más extendidos en el área del municipio de Manizales y afectan principalmente a las vertientes, donde se desarrollaron en forma de reptaciones lentas debidas al exceso de saturación en pendientes empinadas o en forma de deslizamientos activos de tipo rotación o traslación, según la extensión y los limitantes de la pendiente afectada (Alcadía de Manizales (2017-2033)).

Observando la información de OMPAD-Manizales que podemos encontrar en el trabajo de (Londoño Linares, (2007), entre el año 1948 y 2003, en el periodo que más deslizamientos se presentaron es entre 1995 – 1998 con 195 eventos, mientras que en el 2002 se reportan 2 eventos; esta información no está directamente relacionada con el número de muertos y heridos, pues entre 1963 - 1977 se presentaron 163 eventos con 170 muertos y 49 heridos ver “Tabla 1”.

Tabla 1

Eventos de deslizamientos en la ciudad de Manizales a lo largo de su historia hasta el 2003.

Período	Deslizamientos	Muertos	Heridos	Deslizamientos por año	Muertos por año	Heridos por año
1948-1962	25	45	65	1.79	3.21	4.64
1963-1977	163	170	49	11.64	12.14	3.50
1978-1982	85	95	154	6.07	7.00	11.00
1983-1989	78	35	65	13.00	5.67	10.67

Período	Deslizamientos	Muertos	Heridos	Deslizamientos por año	Muertos por año	Heridos por año
1990-1994	149	21	11	37.25	5.25	2.75
1995-1998	195	1	0	65.00	0.33	0.00
2002	4	2	1	4.00	2.00	1.00
2003	90	16	32	90.00	16.00	32.00
Total	789	387	376	13.84	6.79	6.60

Nota. En esta tabla se puede observar una estadística breve de los diferentes procesos gravitacionales registrados desde 1948 hasta el 2003, Fuente Oficina Municipal para la Prevención y Atención de Desastres OMPAD Manizales en (Londoño Linares 2007).

Según lo anterior, en palabras del el autor:

Es evidente un incremento en el número de eventos en años recientes; entre los años 1948 a 1989 (41 años) se tiene un total de 32 eventos, mientras que para el período comprendido entre 1990 y 2003 (13 años) se registran 196 eventos, lo que muestra una tendencia al aumento en la frecuencia de los deslizamientos que pone en peligro la sostenibilidad en el tiempo de la ciudad y sus habitantes. ((Londoño Linares, 2007)

Desde esta perspectiva, resulta fundamental la implementación de metodologías que permitan identificar los fenómenos de origen gravitacional y zonificarlos para generar una adecuada prevención de desastres.

5. Metodología

Este trabajo se realizó en 4 fases que partieron desde la revisión bibliográfica hasta la evaluación y resultados, cada una de las etapas desarrolladas se describe a continuación.

5.1. Revisión documental

En esta fase, se realizó la revisión de la documentación relacionada con el servicio geológico colombiano (SGC), sobre zonificación y evaluación de amenazas y los autores relacionados con la guía metodológica para la zonificación de amenazas por deslizamiento, escala 1:25.000, además de consultar el plan de ordenamiento territorial del municipio de Manizales POT 2017-2033 y otros elementos como el uso del suelo y la normativa vigente.

Se realiza la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 para el municipio de Manizales - Caldas, con base en la guía metodológica publicada por el Servicio Geológico Colombiano y utilizando software libre y de código abierto, teniendo en cuenta las siguientes tres etapas:

- Caracterización Geoambiental.
- Análisis de susceptibilidad.
- Caracterización de la amenaza categorizada.

5.2. Antecedentes históricos de la zona de estudio.

Se realizó con la información recolectada del POT municipal, el sistema de información de movimientos en masa (SIMMA), Corpocaldas y diferentes fuentes que han reportado movimientos en masa, para poder crear un inventario de procesos morfodinámicos, base fundamental para el método que se quiere exponer en este manuscrito.

5.3. Elaboración de la cartografía temática.

Para la ejecución de esta fase, se utilizó el software QGIS, GRASS GIS, SAGA GIS, los cuales se presentan con licencias ligadas al software libre y de código abierto, GRAAS GIS y

SAGA GIS son software independientes con sus propios módulos, pero en QGIS, los módulos de procesamiento de estos software aparecen como herramientas de geoprosesos por lo que no sería raro decir que QGIS son tres software en 1.

Se implementó Google Earth Pro para la teledetección multitemporal de movimientos en masa en el municipio de Manizales.

El sistema de georreferenciación fue Magna Sirgas, Colombia, Bogotá oeste, y la escala de trabajo determinada fue de 1:25.000, siguiendo la normativa indicada por la guía metodológica, Con los diferentes software utilizados, se realizó el análisis de los datos teniendo de base un DEM a 12.5 m obtenido del servicio Alaska Satellite Facility específicamente utilizando el producto de “ALOS PALSAR”.

Se recomienda que el área mínima cartografiable sea de 4 x 4 mm para la representación de información temática (geología, geomorfología, cobertura de la tierra y uso del suelo), con el fin de garantizar operatividad y adecuada lectura de los mapas, esto quiere decir que para la escala 1:25.000 el área mínima cartografiable de las temáticas será de 10.000 m², en la elaboración del inventario de procesos morfodinámicos se debe hacer una excepción a esta medida, para (E. A. Rodríguez et al., 2017), la justificación recae en que es necesario representar todos los movimientos en masa identificados en el área de estudio, incluso los que tengan áreas menores que la mínima cartografiable.

5.4. Evaluación y Resultados.

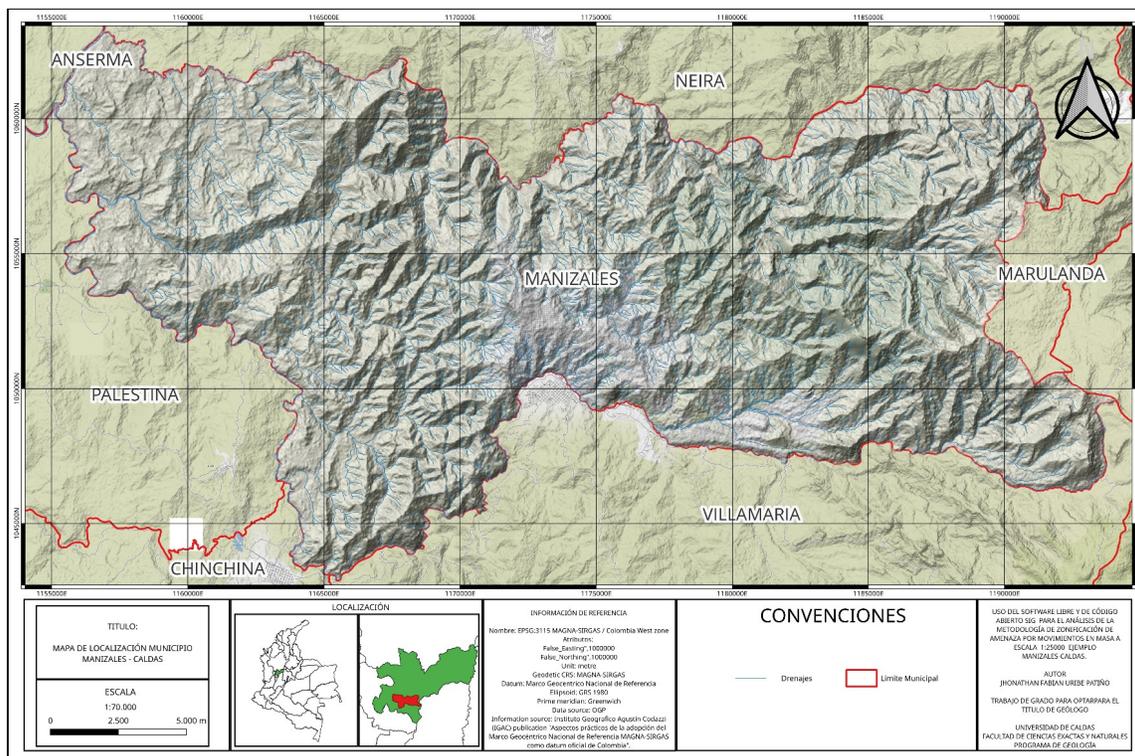
En esta etapa se presenta una serie de mapas temáticos ligados a las diferentes etapas de la zonificación de la susceptibilidad de amenazas por movimientos en masa escala 1:25000, las

cuales se fundamentan en el método estadístico Pesos de Evidencia (WoE por sus siglas en inglés) el cual hace parte de los métodos cuantitativos para el estudio y cálculo de la susceptibilidad por movimientos en masa propuestos por la guía metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos en masa escala 1.25,000 del servicio geológico colombiano.

6. Localización

Mapa 1

Mapa de localización del municipio de Manizales – Caldas



Nota. Se presenta de manera general la ubicación espacial del municipio de Manizales en relación con otros municipios, el departamento de Caldas y el país.

El área de estudio se encuentra ubicada en la Cordillera Central, la más elevada y masiva de las tres cordilleras en que se subdividen los Andes en territorio colombiano (González 2001). Capital del Departamento de Caldas - Colombia, Manizales es una ciudad que se localiza en el sur del Departamento de Caldas, en la zona centro occidente del país o región Andina, sobre el flanco occidental de la Cordillera Central, cerca del Nevado del Ruiz, cuenta con un área de 571.8 km² y una altura 2150 metros sobre el nivel del mar “MSNM”, Limita al norte con el municipio de Neira, al este con el municipio de Marulanda, al oeste con el municipio de Palestina y al sur con el municipio de Villamaría Ver “Mapa 1”.

7. Marco conceptual

7.1. Acumulación De Flujo

Después de las lluvias, el agua fluye desde áreas de curvatura convexa y se acumula en áreas de curvatura cóncava.

Según Dahal et al., (2008) este proceso se conoce como “acumulación de flujo y suele ser notable en el segmento aguas arriba de la cuenca. La acumulación de flujo es una medida del área de tierra que aporta agua superficial a un área donde se puede acumular agua superficial”.

Este parámetro se consideró relevante para este estudio, ya que define los lugares de concentración de agua después de la lluvia y es probable que esos lugares tengan una alta incidencia de deslizamientos.

La acumulación de flujo se puede explicar como el número de píxeles, o área, que contribuye a la escorrentía de un píxel en particular. La acumulación de flujo mide el área de una

cuenca hidrográfica que aporta escorrentía al píxel, Según Ruiz y Torres (2010) en (Rodríguez Minaya, 2018) “la acumulación de flujo es una matriz en la cual se calcula para cada celda un valor de acumulación de peso proveniente de las celdas que fluyen hacia ella”.

7.2. Amenaza

Se refiere a la probabilidad de que durante cierto periodo ocurra un fenómeno con una magnitud capaz de causar daño a los elementos que en el sitio se encuentran expuestos a él, (Estepa Rojas & Talero Rodriguez, 2016)

7.3. Amenaza Antrópica

Se puede definir como:

Peligro latente generado por la actividad humana en la producción, distribución, transporte y consumo de bienes y servicios y en la construcción y uso de infraestructura y edificios. Comprenden una gama amplia de peligros como lo son las distintas formas de contaminación de aguas, aire y suelos, los incendios, las explosiones, los derrames de sustancias tóxicas, los accidentes en los sistemas de transporte, la ruptura de presas de retención de agua, etc. (Lavell, 2007) en (UNGRD, 2017)

7.4. Amenaza Natural

Podemos entenderlo como:

Peligro latente asociado con la posible manifestación de un fenómeno físico cuya génesis se encuentra totalmente en los procesos naturales de transformación y modificación de la tierra y el ambiente, por ejemplo, un terremoto, una erupción volcánica, un tsunami o un

huracán y que puede resultar en la muerte o lesiones a seres vivos, daños materiales o interrupción de la actividad social y económica en general. Suelen clasificarse de acuerdo con sus orígenes terrestres, atmosféricos, o biológicos, permitiendo identificar, entre otras, amenazas geológicas, geomorfológicas, climatológicas, hidrometeorológicas, oceánicas y bióticas. (Lavell, 2007) en (UNGRD, 2017)

7.5. Capa Ráster

El formato Raster se fundamenta en la división de estudio en una matriz de celdillas, generalmente cuadradas. Cada una de estas celdillas recibe un único valor que se considera representativo para toda la superficie abarcada por la misma. Este formato, por tanto, cubre la totalidad del espacio, este hecho supone una ventaja fundamental, ya que pueden obtenerse valores de forma inmediata para cualquier punto del mismo. (Avendaño-Cipagauta & Cadena-Melo, 2014).

7.6. Capa Vectorial

“En el formato vectorial la representación de un objeto espacial se representa por su geometría y cada objeto espacial tiene integrado un conjunto de atributos. Las capas vectoriales pueden representarse por: puntos, líneas y polígonos” (Avendaño-Cipagauta & Cadena-Melo, 2014).

7.7. Caracterización Geoambiental

Para (Rodríguez et al. 2017) “esta etapa comprende el levantamiento y obtención de la información temática y los datos de entrada requeridos para obtener la zonificación de

susceptibilidad y amenaza” es decir, en esta etapa la información de la geología, geomorfología, cobertura de tierra, clima, información ráster y vectorial la debemos tener a la mano, para identificar sus particularidades y poder generar hipótesis en relación con los factores que condicionan el terreno y pueden generar la ocurrencia de fenómenos amenazantes.

7.8. Curvatura De Plano

La curvatura según indica la forma de las laderas. “Puede obtenerse como una variable cuantitativa continua que se deriva del DEM y permite determinar el grado de Concavidad/Convexidad mediante el radio de curvatura de una celda según un plano vertical”. (E. A. Rodríguez et al., 2017)

Un valor positivo indica que la superficie es lateralmente convexa hacia la celda. Un valor negativo indica que la superficie es lateralmente cóncava hacia la celda. Un valor alrededor de cero indica que la superficie es lineal.

7.9. Dem

El Modelo Digital de Elevaciones es la pieza clave del análisis geomorfométrico. Es el equivalente informatizado de la cartografía clásica de elevaciones tradicionalmente representada mediante curvas de nivel.

El MDE supone un enorme salto cualitativo frente a sus predecesores, ya que la utilización de un modelo numérico en lugar de uno gráfico da lugar a una diferencia conceptual en el ámbito del análisis superior a la que tiene lugar con otras capas de información. El MDE se convierte así en una fuente de información de primer orden para el estudio del medio. (Olaya, 2022)

7.10. Geomorfología

El estudio de la forma de la tierra, la arquitectura geológica y climática.

Para (Diaz Villarraga 2013) la geomorfología explica en sí la génesis del terreno tipificando sus geoformas. (Explica fuerzas, procesos y clasifica resultados.)

7.11. Índice De Relieve Relativo

El relieve relativo o relieve local se define como la diferencia vertical en elevación entre los puntos más altos y los puntos más bajos dentro de una región dada o a lo largo de un perfil o línea en el terreno. (labSCN, 2022)

Dicha variable está directamente relacionada con la resistencia de los materiales a nivel superficial, asociados a la recurrencia de eventos de inestabilidad en materiales más erosionados o en aquellos que por su resistencia desarrollan un relieve con intervalos de altura extremadamente altos y pendientes escarpadas y abruptas. (CORANTIOQUIA-EAFIT, 2015a) en (Duran Ferreira, 2018)

7.12. Inventario De Movimientos En Masa

El inventario de movimientos en masa es una herramienta necesaria para la evaluación de la susceptibilidad a través de métodos estadísticos, (Aristizábal-Giraldo et al., 2019).

Es la recopilación de movimientos en masa de un área o sector de interés, para su inventariado se tiene en cuenta la ubicación (como punto o polígono), fecha de ocurrencia (donde se conozca) y tipo de movimiento en masa que ha dejado rastros caracterizables y/o identificables a nivel geomorfológico.

7.13. Método Estadístico Bivariado (WofE) Para La Zonificación De Movimientos En Masa

Este método evalúa patrones de asociación entre los factores condicionantes (evidencias) y las áreas inestables mediante pesos. El peso de cada factor se calcula aplicando un enfoque bayesiano que considera la probabilidad incondicional y condicional de que ocurra un movimiento en masa. (Bonham, 1994)

La probabilidad incondicional (previa) se calcula con los mismos tipos de movimientos en masa que ocurrieron en el pasado en un periodo determinado y puede ser modificada de modo que al agregar una nueva evidencia la probabilidad cambia y se genera entonces una probabilidad (condicionada) llamada probabilidad posterior (Bonham, 1994). La probabilidad posterior se calcula sumando los pesos de cada factor en una función aditiva. Por cada mecanismo analizado se puede generar una función de probabilidad. (E. A. Rodríguez et al., 2017)

Este método brinda un soporte para la validación de las hipótesis planteadas sobre los factores condicionantes más importantes para la ocurrencia de los movimientos en masa en un área de estudio, las cuales son elaboradas a partir del análisis del inventario de movimientos en masa y el conocimiento experto.

7.14. Modelo De Sombras (Hillshade)

Es un modelo cuya función es la representación de sombras y niveles de radiación solar sobre el terreno, mediante un Dem, podemos simular este tipo de modelos dando sensación de profundidad en la zona por medio de sombras.

El grado de iluminación se da con base en las posiciones relativas de los píxeles, una respecto a la orientación o ángulo acimutal, y otra respecto al ángulo de elevación solar o cenital, que por defecto suelen usarse 45 grados de Elevación Solar y 315° de orientación, Este ráster generado con base a ese análisis, podrá ser usado como componente cartográfico que facilitará la representación del terreno. (Sánchez Osorio, 2016)

7.15. Movimientos En Masa

Según (Cruden, 1991) en (UNGRD, 2017) un movimiento de masa se puede definir como “todo movimiento de ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad”.

7.16. Orientación

La orientación en el análisis del terreno se puede interpretar como la exposición del relieve respecto al medio circundante, es decir, calcular la orientación de las laderas según su exposición a las vertientes Norte, Este, Sur y Oeste. Este tipo de mapas informa a cerca de la dirección de pendiente descendente que presenta cada una de las celdas, la orientación en un punto se mide en el sentido de las agujas del reloj en grados de 0 (hacia el norte) a 360 (hacia el norte, nuevamente), formando un círculo completo.

Las áreas planas no tienen dirección de pendiente descendente, por lo que tomarán el valor de -1.

7.17. Pendiente

Podríamos definir la pendiente del terreno en un punto dado como el ángulo que forma el plano horizontal con el plano tangente a la superficie del terreno en ese punto. Es, en definitiva, la inclinación o desnivel del suelo. La pendiente es una forma de medir el grado de inclinación del terreno. A mayor inclinación mayor valor de pendiente. La pendiente se mide calculando la tangente de la superficie.

La tangente se calcula dividiendo el cambio vertical en altitud entre la distancia horizontal.

7.18. Relieve

Los conceptos de relieve y modelado están basados en la definición que se da comúnmente a ambos términos en la literatura geomorfológica francesa. Consiste en geoformas determinadas por la topografía, geología y por estructuras; geoformas determinadas por condiciones morfoclimáticas o por procesos morfogénéticos. (Viers, 1967) en (Sánchez Osorio, 2016)

7.19. SIG

Un SIG es una herramienta para trabajar con información georreferenciada.

Un SIG ha de permitir la realización las siguientes operaciones: Lectura, edición, almacenamiento y, en términos generales, gestión de datos espaciales. Esto puede incluir desde consultas sencillas a la elaboración de complejos modelos, y puede llevarse a cabo tanto sobre la componente espacial de los datos (la localización de cada valor o elemento) como sobre la componente temática (el valor o el elemento en sí). Generación de

resultados tales como mapas, informes, gráficos, etc. un SIG es un conjunto de software y hardware diseñado específicamente para la adquisición, mantenimiento y uso de datos cartográficos. (Olaya, 2020)

7.20. Susceptibilidad

Grado de propensión que tiene una zona a que en ella se genere o resulte afectada por un fenómeno de remoción en masa (Diaz Villarraga, 2013).

7.21. Susceptibilidad De Deslizamiento

Evaluación cuantitativa o cualitativa de una región en la que existen o pueden existir deslizamientos. Esta evaluación considera la clasificación, volumen (o área) y distribución espacial de los movimientos en masa; también puede incluir una descripción de la velocidad e intensidad de los movimientos potenciales o existentes. Aunque se espera que los movimientos en masa ocurran con más frecuencia en la mayoría de las zonas susceptibles, en los análisis de susceptibilidad, no se tiene en cuenta el tiempo de recurrencia. La susceptibilidad a movimientos en masa incluye movimientos en masa originados en la zona de estudio o pueden tener su fuente fuera de esta, pero pueden viajar de regreso hacia o desde esta área. Fell, et al. (2008) en (Estepa Rojas & Talero Rodriguez, 2016)

7.22. Uso Del Suelo

Según (Van Beek y Van Asch, 2004) en (C. J. van Westen et al., 2008) el uso del suelo “se considera con demasiada frecuencia como un factor estático en los estudios de riesgo de

deslizamientos de tierra, y pocas investigaciones involucran cambios constantes en el uso del suelo como un factor en el análisis”

Los cambios en la cobertura del suelo y el uso del suelo resultantes de las actividades humanas, como la deforestación, la tala de bosques, la construcción de carreteras, los incendios y el cultivo en pendientes pronunciadas, pueden tener un impacto importante en la actividad de deslizamientos de tierra. (Cannon, 2000; Glade, 2003) en (C. J. van Westen et al., 2008)

7.23. Zonificación

Para SGC, (2013) “Se define como la división de la superficie del terreno en diferentes áreas y la clasificación de acuerdo a un grado de susceptibilidad por movimientos en masa “

8. Aspectos geológicos

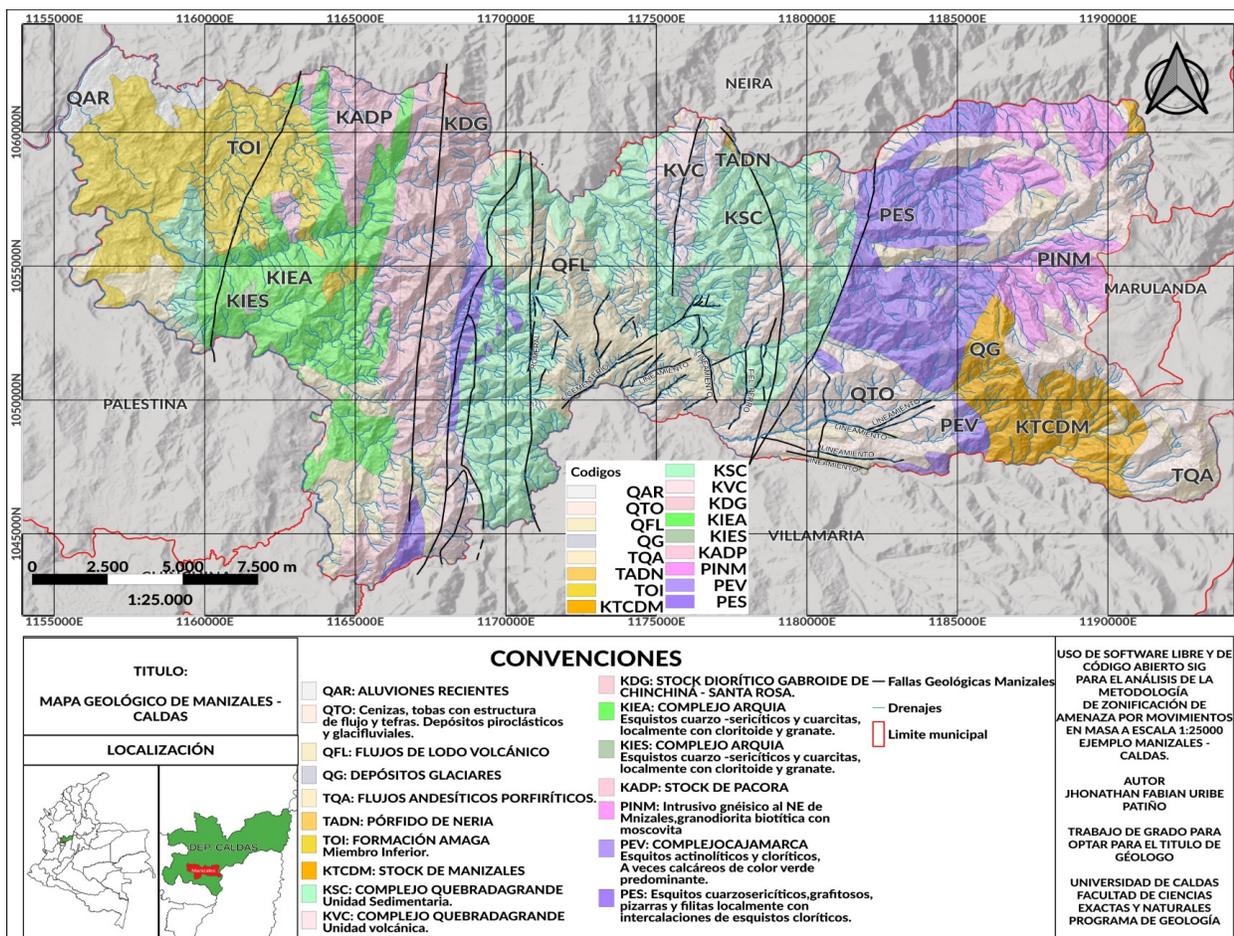
Se encontró que la unidad denominada Stock de Pacora no corresponde con los registros de dichos estudios, en su lugar la geología mapeada corresponde al Complejo Arquía Esquistos de Lisboa-palestina descritos como rocas metamórficas de media presión asociadas con peridotitas serpentinizadas.

- Kiea: Esquistos verdes; incluye esquistos anfibólicos, anfibolitas y esquistos cloríticos.
- Kies: Esquistos negros y sericíticos con grafito.

Tomado en cuenta lo anterior y que la geología de la ciudad de Manizales tampoco incorpora dicha unidad, se omitirá en la descripción de la geología del municipio.

Mapa 2

Mapa geológico de Manizales adaptado del mapa generalizado del departamento de caldas



Nota. Mapa geológico de Manizales adaptado del mapa generalizado del departamento de caldas

Compilado por: Humberto González I, 1990 y de la información del servicio Rest-Arcgis de

Corpocaldas “ <https://corpocaldas.geoambiental.co:6443/arcgis/rest/services/servicios/>

SERVICIO_SUELO/MapServer/16.”

8.1. Geología.

De manera general, el entorno de la ciudad de Manizales lo constituyen unidades de roca que se han establecido en distintos períodos de tiempo y cuya historia está contenida dentro de la misma evolución de la Cordillera Central.

Las características geológicas de la zona son complicadas debido a varios factores, entre los que predomina la cobertura volcánica que cubre las demás unidades, la abundante vegetación en algunos lugares y el fuerte tectonismo que ha afectado las diferentes formaciones geológicas. Los contactos entre las unidades aflorantes a nivel regional son fallados, siguiendo una tendencia Norte-Sur asociados al Sistema de Fallas Romeral, exceptuando los depósitos aluviales y los flujos volcánicos, los cuales yacen discordantemente sobre unidades Mesozoicas. (Quiroga Quiroga, 2021)

8.1.1. Complejo Cajamarca.

Según (González 2001) “Complejo Cajamarca es el nombre utilizado por González (1989) para el conjunto de rocas metamórficas que constituyen el núcleo de la Cordillera Central”.

A su vez se afirma que:

En el área de las planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruíz Escala 1:100.000 aflora al este de la Falla San Jerónimo y corresponde a una secuencia sin techo ni base determinados, donde no es posible estimar con precisión el espesor debido al intenso plegamiento y ausencia de capas guías; varía ampliamente en composición y es el

resultado de varios episodios metamórficos regionales a los cuales se superponen efectos térmicos o dinámicos locales de intensidad variable.(González 2001)

En el “mapa 2” se presenta dos unidades de este complejo.

- Grupo Pelítico: Constituido por filitas, esquistos sericíticos y micáceos (Pes).
- Grupo Básico: Esquistos verdes y anfibolitas (Pev).

Según (González 2001) aunque tienen edades en el rango del Paleozoico, es difícil asignar una edad segura correspondiente a un evento orogénico determinado.

(Maya, 1992) en (Celis et al., 2016), con dataciones isotópicas disponibles para el norte del Complejo Cajamarca, a pesar de la dispersión de fechas, muestran un marcado evento metamórfico Pérmico. Villagómez et al. (2011) en (Celis et al. 2016), presenta una edad 236 ± 6 Ma U/Pb en circón procedente de un ortogneis mapeado como parte del Complejo Cajamarca al este de la falla de Palestina, mostrando otro evento metamórfico regional para el Complejo Cajamarca de edad Triásica. Las edades isotópicas y radiométricas muestran una gran dispersión entre el Neoproterozoico y el Mesozoico temprano (Maya, 1992; Vinasco et al., 2006; Villagómez et al., 2011; Villagómez & Spikings, 2013; Blanco-Quintero et al., 2014; Cochrane et al., 2014) en (Bonilla et al., 2021).

En resumen podemos decir que el rango de edad va desde el Neoproterozoico - Mesozoico temprano.

8.1.2. Milonita Granítica Del Guacaica (PINM).

Según (López et al., 2007) “La Milonita Granítica del Guacaica, que aflora en el flanco occidental de la Cordillera Central de Colombia por encima de los 4° Norte, corresponde a un cuerpo intrusivo sintectónico predominantemente peraluminico, de afinidad calcoalcalina y composición granítica con andalucita, sillimanita y cordierita”, “Mapa 2”.

La Milonita Granítica del Guacaica; un cuerpo granítico lenticular, de facies heterogéneamente variables, desde granodiorita a adamellita y monzogranito, predominantemente conformada por milonitas de monzogranito, con deformación de estado sólido de moderada a baja temperatura ampliamente extendida. Cuellar et al. (2003) en (Parra Arias & Quintero Londoño, 2016)

Además, Con base en la descripción de las evidencias de campo y petrográficas, se definen tres estados de deformación, los cuales incluyen deformación en el estado magmático, en el estado submagmático y en el estado sólido de alta, moderada y baja temperatura, y se determinan tres dominios que registran el cambio gradual en el comportamiento ante la deformación, los cuales incluyen procesos predominantemente dúctiles con ausencia de evidencias frágiles como la protoclasis. Estas estructuras sugieren una intrusión forzada sintectónica en una fase de deformación continua heterogénea, en el que la componente de acortamiento general es Este–Oeste con levantamiento tectónico Noreste–Este sobre Suroeste–Oeste, y corroboran el emplazamiento en un segmento transpresivo de una zona de cizalla rumbo deslizante, que

es generada durante el evento colisional de edad Pérmico afín a la formación del supercontinente Pangea. (López et al., 2007)

8.1.3. Neis De Chinchiná.

Este cuerpo no se evidencia en el “mapa 2”, puede ser porque la escala en la que basa Corpocaldas - Corporación Autónoma Regional de Caldas para este mapa es la misma escala utilizada por Humberto González I, 1990 en el mapa generalizado del departamento de caldas, cuya escala es 1:250.000.

Este cuerpo fue denominado por Mosquera (1978) “Intrusivo Néisico de Chinchiná”, basado en su textura protoclástica y aparente carácter intrusivo; aflora en el extremo sur-oriental de la plancha; forma una franja delgada de unos 14 km de largo por un kilómetro de ancho, limitada tectónicamente por la Falla de Silvia – Pijao. (Estrada et al., 2001)

(Estrada y Viana, 1994) en (González 2001) “afirma que su extremo NE se encuentra en la Plancha 206 Manizales; en total, tiene 60 km en dirección N-S y 5 km en dirección E-W; se encuentra en contacto fallado con rocas del Complejo Quebrada grande al este y con anfibolitas del Complejo Arquía al oeste”.

Según (Estrada et al., 2001), “la edad del neis de Chinchiná sería Paleozoica, pero reconoce que sería necesario explicar su presencia al oeste del Sistema de Fallas Romeral”.

8.1.4. Complejo Arquía.

El complejo Arquía es el nombre utilizado para agrupar las metamorfitas localizadas al occidente del Complejo Quebradagrande y separado de esta unidad por la falla Silvia-Pijao, según (González 2001), comprende en el área la plancha 206 y áreas vecinas las unidades

denominadas Esquistos de Lisboa Palestina (Mosquera, 1978), Esquistos Anfibolíticos del Río Cauca (Gonzales, 1980) y Grupo Arquía (Restrepo y Toussaint, 1975).

El Complejo Arquía, a la latitud de Manizales, incluye los litodemas que Mosquera (1978) en (Arango-escobar et al., 2021) describe en los sectores de Palestina, La Manuela, Alto de Lisboa y Chinchiná, y que denominó Esquistos de Lisboa-Palestina. Esta faja metamórfica incluye intercalaciones de esquistos cuarzo grafitosos y esquistos anfibólicos con asociaciones mineralógicas que indican metamorfismo de media presión y baja temperatura Ver “Mapa 2”.

Se presentan dos cuerpos en el “Mapa 2”.

- KIES: Esquistos curzo - sericíticos y cuarcitas localmente con cloritoide y granate.
- KIEA: Esquistos curzo - sericíticos y cuarcitas localmente con cloritoide y granate.

Según (González 2001), las rocas del Complejo Arquía sería de edad cretácica, pero para (G. Rodríguez & Arango, 2013), Las edades del Complejo Arquía se agrupan principalmente en dos intervalos: 100 a 113 Ma y 203 a 229 Ma. Las edades entre 100 y 113 Ma corresponden a datos radiométricos obtenidos mediante el método K/Ar, que coinciden con el inicio del Arco Barroso – Sabanalarga que afectó la zona de sutura y las dos cortezas, siendo interpretadas como posibles edades de calentamiento. Las edades entre 203 y 229 Ma se obtuvieron por el método Ar-Ar y se interpretan como la posible edad de metamorfismo, concordantes con la edad de metamorfismo del Complejo Cajamarca, que es el basamento de la Cordillera Central de Colombia.

En Conclusión, las edades pueden ser interpretadas como Triásico superior – Cretácico inferior.

8.1.5. Complejo Quebradagrande

Es el nombre que se le da a un conjunto de rocas volcánicas y sedimentarias que constituyen gran parte del flanco occidental de la Cordillera Central, al occidente de la Falla San Jerónimo, el nombre fue propuesto por Maya y González (1995) en (González 2001).

Esta unidad tiene como límite oriental la Falla San Jerónimo, que lo separa de rocas Paleozoicas continentales del Complejo Cajamarca, y como límite occidental la Falla Silvia – Pijao que lo separa del Complejo Arquía.

Cuellar (2003) en (Parra Arias & Quintero Londoño, 2016) realizo dataciones sobre milonitas de este complejo asociadas a la falla San Jerónimo presentando como edad de deformación cretáceo superior o paleoceno inferior.

Complejo Quebradagrande Conjunto Volcánico (KVC): Según Estrada et al., (2001) el Complejo Quebradagrande aflora en el extremo sureste de la plancha, al oriente de Chinchiná; forma cuerpos pequeños, menores de 2 km², elongados en el sentido de las estructuras regionales. El cuerpo oriental está en contacto fallado al occidente con el Neis de Chinchiná y se extiende al este en la Plancha 206 Manizales (Grosse, 1926; Botero, 1963; González, 1980, 1993; Alvarez, 1987; Etayo et al., 1983) en (González 2001), plantean que la parte norte de la Cordillera Central, las rocas volcánicas básicas del flanco occidental, sean agrupadas en la Formación Quebradagrande, aunque en (González 2001), se habla de complejo siguiendo el estudio de Maya y González (1995), considerando una unidad de rango estratigráfico mayor como unidad tectonoestratigráfica; es posible que con estudios más detallados se le pueda efectuar una subdivisión en unidades litoestratigráficas formales de menor rango Ver “Mapa 2”.

En general una descripción de estas rocas volcánicas según Estrada et al., (2001) plantea que son :

De color verde que varía de oliva a grisáceo y ocurren en flujos masivos, localmente con diaclasamiento columnar y horizontes de lavas almohadilladas con márgenes de enfriamiento rápido, en las cuales se ha formado palagonita y material inter-almohadillas, constituido por brechas de fragmentos de composición basáltica cementados con calcita, clorita, epidota y cuarzo.

Complejo Quebradagrande Conjunto Sedimentario (KSC): Las rocas sedimentarias que constituyen el Conjunto Sedimentario del Complejo Quebrada grande afloran en el extremo sureste de la plancha 205 y son fundamentalmente limolitas, arenitas, chert negro y limolitas laminadas de color negro ricas en materia orgánica.

Constituyen dos pequeños cinturones con orientación general norte – sur limitadas tectónicamente por fallas del Sistema Romeral (Estrada, Viana y González 2001), “Ver Mapa 2”.

El Miembro Sedimentario del Complejo Quebradagrande son las sedimentitas que se encuentran intercaladas concordantemente con las rocas volcánicas, lo cual permite en parte definir la edad de éstas, aunque en muchas áreas los contactos son tectónicos debido, probablemente, a la diferencia en el comportamiento mecánico entre ambos tipos de roca, donde el contacto actúa como una zona de debilidad a lo largo de la cual se transmiten esfuerzos, afectando más intensamente las sedimentitas por su menor competencia.(González 2001)

8.1.6. Stock de Manizales (KTCDM)

Según Parra Arias y Quintero Londoño (2016), es un Cuerpo “ubicado en el flanco Occidental de la Cordillera Central, al este del Municipio de Manizales, el cual se encuentra intruyendo rocas metamórficas del Complejo Cajamarca y rocas de la Milonita Granítica del Guacaica” Ver “Mapa 2”.

El Stock de Manizales es un cuerpo de rocas granitoides que aflora al norte del Volcán Nevado del Ruiz y al este de la ciudad de Manizales, de donde recibe su nombre. En el área de la Plancha 206 tiene una extensión aproximada de 60 km² y en gran parte se encuentra cubierto por depósitos piroclásticos provenientes de la acción pliocuaternaria del Complejo Volcánico Ruiz – Tolima. (González 2001),

Este cuerpo es de edad Paleoceno (Jaramillo, 1978; McCourt et al., 1984) en (Montenegro Rippe, 2017).

8.1.7. Formación Amagá Miembro Inferior (TOI)

En el flanco occidental de la Cordillera Central Colombiana se encuentra localizada la Formación Amagá, de edad Oligoceno tardío – Mioceno tardío, con un espesor de 750 m, dividida en los Miembros Inferior y Superior, (Sierra et al., 2003); Ver “Mapa 2”.

El Miembro Inferior se subdivide en las unidades 1 y 2, que presentan asociaciones faciales de ríos trezados y de ríos meándricos respectivamente, así como aumentos en el grado de preservación de los elementos morfológicos, en la diversidad de facies sedimentarias y en la madurez textural y composicional de las arenitas; presenta arenitas

conglomeráticas cuarzosas (Unidad 1) y sublitoarenitas bien seleccionadas con altos contenidos de cuarzo acompañadas de mantos de carbón (Unidad 2).(Sierra et al., 2003).

8.1.8. Pórfidos De Neira (TADN)

(Mosquera, 1978) en (González 2001), plantea que los Pórfidos de Neira son cuerpos de rocas porfíricas hipoabisales que afloran con una extensión de 18 km² al noreste y sureste de la población de Neira, de donde reciben su nombre, se encuentran parcialmente cubiertos por el flujo piroclástico de Neira y por depósitos de cenizas volcánicas recientes ver “Mapa 2”.

Se plantea que el Sistema de Fallas Romeral sirvió de canal para la migración del magma que originó estos cuerpos. La edad para los que están localizados cerca al área varía entre $7,1 \pm 0,2$ Ma para el cuerpo de La Felisa y $6,3 \pm 0,7$ Ma para el de Marmato (González, 1980). Este mismo rango de edad se ha considerado para los cuerpos de Neira, tanto por su composición, como por su localización tectónica y estructural en el Sistema de Fallas Romeral.(González 2001)

Podemos deducir en una edad Messiniense – Zancliense.

8.1.9. Flujos Andesíticos porfíricos (TQA)

La parte central y este de la Plancha 206 y la central y oeste de la Plancha 225 se caracterizan por la presencia de una capa de gran espesor de rocas extrusivas, que descansan sobre las rocas ígneas y metamórficas del basamento de la Cordillera Central ver “Mapa 2”.

Estas coladas están relacionadas con la intensa actividad volcánica que se inicia en el Mioceno y se extiende hasta épocas recientes, la composición de estos flujos es

relativamente homogénea, pero por su relación con los depósitos glaciares se han determinado dos períodos de emisión: uno del Mioceno tardío - Plioceno, flujos denominados NgQa en las planchas y otro del Holoceno (Qa) que son flujos de posglaciación y terminan con emisión de piroclastos (Qto) de gran magnitud. (González 2001).

En González (2001), se explica que parte de estos flujos en la Plancha 206 se “originan en el volcán Cerro Bravo, un estrato volcán andesítico - dacítico localizado en la región del Páramo de Letras, que corresponde al edificio volcánico activo más septentrional de la cadena andina”.

(van Houten, 1976) en (González 2001), plantea que las edades más antiguas corresponden al inicio de la actividad volcánica a finales del Oligoceno, además (González 2001), dice que estos tienen su mayor expresión en el Mioceno tardío-Plioceno.

Las unidades a continuación no se representan de una manera precisa en el “Mapa 2”, debido a la escala que este maneja, como se presentó en la introducción de este capítulo, la escala en la que está basada es 1:250.000, Pero teniendo en cuenta el análisis que se hace en este manuscrito se les hace referencia, ya que en los datos analizados del POT 2017-2031 de la ciudad de Manizales se tienen en cuenta.

8.1.10. Formación Manizales

Se da este nombre a un conjunto de rocas sedimentarias volcanogénicas derivadas del complejo volcánico Ruiz- Tolima depositadas en un intervalo de tiempo de 8 a 4 Ma; Que afloran en la carretera que de Manizales conduce al pueblo de Arauca, así como

también en el cauce del río Chinchiná, cerca al pueblo del mismo nombre. (Naranjo Henao & Ríos Alzate, 1989).

Según (Naranjo Henao & Ríos Alzate, 1989), la edad sería Mioceno tardío – Plioceno temprano.

8.1.11. Formación Casabianca

Bajo la denominación Formación Casabianca, se agrupa sedimentitas volcanogénicas de grano grueso y en menor proporción tobas y sedimentitas volcánicas retrabajadas, producidas como resultado de una agradación en cauces fluviales inducidas por el vulcanismo de la cadena Cerro Bravo - Ruiz y localizadas sobre ambos flancos de la Cordillera Central. En la zona de estudio, el control de depositación para esta formación fue principalmente la cuenca de los ríos Gualí y Guarinó, tributarios del Magdalena. Borrero y Naranjo (1990) en (González 2001)

Según (Naranjo Henao & Ríos Alzate, 1989), la edad de esta formación es Plioceno-pleistoceno.

8.1.12. Depósitos de Flujos de Escombros o depósitos Volcanoclásticos de La Enea

Descrita por Naranjo y Ríos (1989) en (Parra Arias & Quintero Londoño, 2016), como “depósitos volcaniclásticos que rellenan el valle de la Enea y los cuales representan los últimos 100.000 años del periodo cuaternario”.

Estos depósitos no presentan un tectonismo fuerte, pero forman llanuras con una leve inclinación en dirección corriente abajo del Río Chinchiná. De estos depósitos se

reconocen depósitos de flujos de escombros, depósitos de flujos de lodo, depósitos de flujos piroclásticos y varios niveles de turberas. Naranjo y Ríos (1989) en (Parra Arias & Quintero Londoño, 2016)

Para (Naranjo Henao & Ríos Alzate, 1989), la edad de cuerpo es Cuaternario.

8.1.13. Depósitos De Lluvia Piroclástica

Descrita por (Naranjo Henao & Ríos Alzate, 1989), como depósitos compuestos por fragmentos rotos de pómez y escorias de composición dacítica, así como de fragmentos de rocas (dacitas y andesitas porfídicas), que forman niveles de cenizas y lapilli, interestratificados con depósitos de piedemonte como en La Enea y Maltería.

Según (Naranjo Henao & Ríos Alzate, 1989), representan las últimas manifestaciones de actividad volcánica explosiva del complejo Ruiz-Tolima. En la zona de Manizales Hay por lo menos 7 erupciones piroclásticas registradas.

8.1.14. Domos de Tesorito

Descrito por (Naranjo Henao & Ríos Alzate, 1989), como dos pequeños cuerpos hipoabisales que forman sendos domos al sureste de Manizales, estos domos forman los labios del cráter de un volcán dormido.

El domo más occidental presenta una morfología típica de un domo colada, mientras que el otro es un domo simple, este último se caracteriza por el empaquetamiento espectacular de las andesitas basálticas columnares que lo forman. En análisis

petrográfico ellos la clasifican como una andesita basáltica porfirítica. (Naranjo Henao & Ríos Alzate, 1989)

THOURET Et al. (1985) en (Naranjo Henao & Ríos Alzate, 1989) plantea que la datación del domo Tesorito presenta una edad de $1.2 \pm 0,2$ Ma

8.1.15. Domo Sancancio

Ubicado en las cercanías de los barrios La Playita y Aranjuez, los cuales están asentados hacia su base Sur. La composición consiste de un basalto porfirítico hipersténico; se presenta como rocas macizas muy diaclasadas y en algunos sectores, con disposición columnar (Naranjo Henao & Ríos Alzate, 1989).

(Naranjo Henao & Ríos Alzate, 1989) hacen un análisis detallado y concluyen que se trata de un basalto hipersténico. Estos autores lo clasifican como un criptodomo formado como consecuencia de la inyección de magma basáltico a lo largo de estructuras controladas por el sistema de fallas Manizales – Villamaria y reportan una edad de 1.2 ± 0.08 Ma.

8.1.16. Lavas de Lusitania

Descrita por (Naranjo Henao & Ríos Alzate, 1989), como un derrame de lava que aflora en la quebrada Manizales, de color gris oscuro y textura afanítica de las rocas, así como el fracturamiento concoideo espectacular.

Geomorfológicamente es diferenciable de los cuerpos subvolcánicos vecinos por el hecho de no tener estructura cómica, sino más bien por tener características de derrame lávico bastante fluida que aprovecho la zona de debilidad del sistema de fallas, Manizales –

Villamaria para su emplazamiento como un derrame de fisura que petrográficamente corresponde a una andesita. (Naranjo Henao & Ríos Alzate, 1989)

8.2. Marco tectónico regional

En la región de Manizales se encuentran dos sistemas principales de fallas de carácter regional: Romeral con tendencia Norte – Sur conformado de oeste a este por las fallas Cauca-Almaguer, Silvia Pijao y San Jerónimo y Palestina con tendencia Noreste; también existen fallas y lineamientos locales que cruzan la ciudad en diferentes direcciones (Quiroga Quiroga, 2021).

Según (González 2001) Estas estructuras, dentro del área urbana, se evidencian solo con algunos rasgos geomorfológicos como: drenajes rectos, silletas, escarpes y cambios de pendiente.

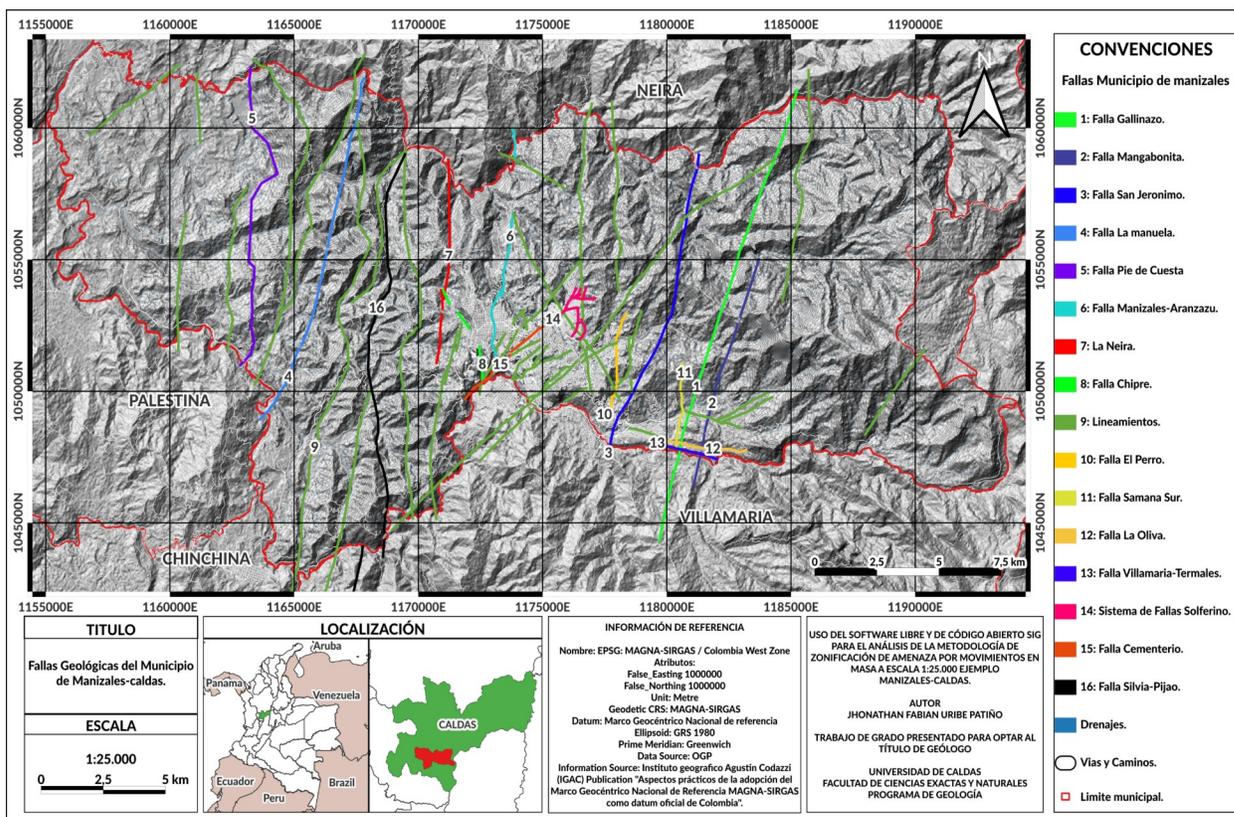
El área de estudio se encuentra afectada tectónicamente por dos sistemas principales de fallas de carácter regional, Romeral con tendencia Norte – Sur conformado de oeste a este por las fallas Cauca-Almaguer, Silvia Pijao y San Jerónimo y Palestina con tendencia Noreste; también existen fallas y lineamientos locales que cruzan la ciudad en diferentes direcciones. (González 2001)

Los cuales poseen una gran continuidad regional e imprimen fuertes rasgos de tectonismo en las rocas del área (González 2001). Evidenciados por un gran fracturamiento, diaclasamiento y levantamiento del basamento rocoso (Formación Quebradagrande), lo que tiene alta incidencia en los movimientos de masa presenten en la zona Ver “Mapa 3”.

8.3. Marco tectónico local

Mapa 3

Mapa de algunas de las fallas y lineamientos del Municipio de Manizales-Caldas



nota. Se presentan los diferentes lineamientos y fallas identificados para este trabajo de manera generalizada con numero y color para su fácil identificación en el “Mapa 3” modificado de la geología de las planchas 205 y 206 INGEOMINAS 1998; Ver carpeta de anexos, Anexos_mapas, Fallas_manizales.

Se presentan dos sistemas de lineamientos con tendencias predominantes Este – Oeste, Noreste y Noroeste, con una persistencia menor en su delineación y una evidencia geomorfológica menos relevante; se debe comprender que estos lineamientos acentúan su

expresión geomorfológica dependiendo de los variables condicionantes y factores erosivos, por lo cual la menor expresión en el paisaje de dichos lineamientos no implica necesariamente que estos sean menos importantes.

8.3.1 Falla Romeral

El Sistema de Fallas Romeral está compuesto por numerosas fallas paralelas a subparalelas de dirección N-S predominante, anastomosadas al occidente de Manizales y entre Neira, Aranzazu y Filadelfia; las fallas individuales tienen diferentes nombres:

Manizales - Aranzazu, La Merced, Neira, Salamina y sus longitudes varían entre unos pocos kilómetros y más de 50 km, prolongándose algunas de ellas, tanto al sur, como al norte del área considerada. La falla principal del sistema, denominada Romeral por Grosse (1926), ha sido nombrada Silvia - Pijao para no utilizar el mismo nombre para el sistema y una de sus fallas (González 2001).

Naranjo y Ríos (1989) en (González 2001) consideran que:

Las características generales de la zona de falla del Sistema Romeral en los alrededores de Manizales indican que en ella se manifiestan dos estilos estructurales: bloques y cabalgamientos compresionales que corresponden a estructuras con basamento involucrado; y pliegues de cabalgamiento que corresponden a estructuras sin basamento y que afectan fundamentalmente litologías cenozoicas. Los estilos estructurales superpuestos son característicos de zonas de alta presión donde se forman cinturones orogénicos como consecuencia de la compresión cortical producida en la zona de convergencia de litosfera oceánica y litosfera continental, Ver “Mapa 3.”

8.3.2. Falla Samaná Sur

La Falla Samaná Sur recibe su nombre del río homónimo en la Plancha 187 (González, 1980); su trazo en la Plancha 206 tiene una longitud de 10 km con rumbo N 30° E; localmente, en la Plancha 187, marca el contacto entre cuarcitas biotíticas del Complejo Cajamarca y la tonalita del Batolito de Sonsón y entre las formaciones Valle Alto (Jurásico) y Abejorral (Cretácico Inferior). Su prolongación, tanto al norte, como al sur, está enmascarada por una gruesa cubierta de cenizas volcánicas.(González 2001)

Se puede observar esta falla en el “Mapa 3”.

8.3.3. Falla Villamaria – Termales

Se considera como una estructura de dirección NWWSEE, quienes la dividieron en 7 segmentos, basados en la expresión geomorfológica y la longitud de las trazas de fallas limitadas por barreras estructurales definidas por fallas N-S y NE-SW, que forman bloques o cuñas relacionadas con la alta sismicidad del área. Su carácter normal es evidenciado por el fuerte alineamiento de rasgos geomorfológicos tales como valles longitudinales, depresiones lineales, escarpes de fallas, trincheras, sag-ponds, ríos lineales y obstruidos, silletas y el emplazamiento de los domos Sancancio, Tesorito y Gallinazo. González y Jaramillo (2002) en (Parra Arias & Quintero Londoño, 2016)

Esta falla tiene una orientación general N50°-65°W con buzamiento al SW, afecta rocas del Stock de Manizales y Lavas Antiguas, ejerce control sobre el cauce del río Termales, tiene asociado a su trazo domos y fuentes termales, generando zonas delgadas de brechas y el cual facilita el tránsito de fluidos hidrotermales, evidentes sobre

la vía El Arbolito-Hotel Termales del Ruíz. Esta falla además parece ejercer control estructural en el cauce de la quebrada Tolda Fría con deflexiones de cauces en sentido lateral izquierdo. Mejía (2012) en (Parra Arias & Quintero Londoño, 2016)

Se puede observar una expresión general de esta falla en el “Mapa 3”.

8.3.4. Falla Manizales

Según James (1986) en (Parra Arias & Quintero Londoño, 2016), la denominó como una falla de tipo inverso-sinextral presentando una dirección N15°E. (Naranjo Henao & Ríos Alzate, 1989), la denominan como Falla Manizales clasificándola como una falla de tipo inverso de ángulo alto de carácter dextral, la cual afecta la Formación Manizales. Martínez y Rodríguez (2015) en (Parra Arias & Quintero Londoño, 2016), esta falla presenta una dirección general de N8°E y una longitud aproximada de 110 Km., la cual va desde el Municipio de Villamaria hasta el Municipio de Aguadas, Caldas, Ver “Mapa 3”.

8.3.5. Falla de Chipre

Conforma hacia el sector Oeste de la ciudad un escarpe de falla con una altura aproximada de 200 metros y afecta los depósitos volcanodetríticos de la Formación Manizales. Se encuentran ligados a ésta, procesos de reptación y erosión laminar, generando coluviones sobre estos sectores. Esta falla posee una dirección dominante N-S, aunque en la parte norte se quiebra hacia el NW (sector donde se observa el escarpe de Chipre). (M. Aguirre & Gutierrez, 1993), Ver “Mapa 3”.

8.3.6. Falla El Cementerio

Es una falla definida que cruza el área de influencia en sentido SW-NE. Atraviesa la parte central de ciudad y la evidencia geomorfológica se encuentra por fuera del área de influencia hacia el Sur de la ciudad, a través del cauce de la quebrada Única y Solferino en el sector Norte, controlando sus cauces (Aguirre, 1993) en (Gálvez Orozco, 2015). Tiene una longitud de 0,58 Km en el área de influencia (Gálvez Orozco, 2015), Ver “Mapa 3”.

8.3.7. Falla Mangabonita

Definida por (O. R. Aguirre & López, 2003), donde la clasifican como una falla de carácter inverso que marca el límite entre el Complejo Cajamarca y la Milonita Granítica del Guacaica, asociado a estos rasgos geomorfológicos muy dominantes como control de cauces, cambios altimétricos, hombreras y silletas de falla y fracturación y cizallamiento intenso en algunos sectores afectando los esquistos del Complejo Cajamarca. Según estos autores se observa claramente en la vía que va de la vereda Gallinazo conduce al Hotel Termal del Ruiz, Ver “Mapa 3”.

8.3.8. Falla Gallinazo

Definida por Gonzales y Jaramillo (2002) y descrita por Aguirre y López (2003) y Montoya y Torres (2005) en (Parra Arias & Quintero Londoño, 2016), como una falla de rumbo sinestrolateral con una dirección aproximada de N20°E, la cual afecta principalmente rocas del complejo Cajamarca, la Milonita Granítica del Guacaica y de la tonalita del Guacaica con rasgos geomorfológicos como escarpe de falla (O. R. Aguirre & López, 2003), donde también presenta

rasgos geomorfológicos como drenajes deflectados tributarios del río Chinchiná en el sector de Gallinazo (Montoya y Torres, 2005) en (Parra Arias & Quintero Londoño, 2016), Ver “Mapa 3”.

8.3.9. Falla La Oliva

Definida por Betancourt et al. (1998) y descrita en Aguirre y López (2003) y Montoya y Torres (2005) en (Parra Arias & Quintero Londoño, 2016), como una falla de rumbo paralelo a la Falla Villamaria-Termale, donde el trazo de esta falla se encuentra al este de la zona de estudio. El rasgo geomorfológico más característico de esta falla es control de drenajes y el rasgo geológico más característico consta de cataclasis soldadas que se encuentran por todo el cauce de la quebrada donde está ubicada la planta de tratamiento de aguas Luis Prieto en la vereda de Gallinazo (Aguirre y López 2003), Ver “Mapa 3”.

8.3.10. Sistema De Fallas El Solferino

Corresponden a dos trazos de fallas de dirección N-S, paralelos entre sí Ver “Mapa 3”, e interceptados por otro sistema de fallas E-W que las desplazan. Las evidencias geomorfológicas están representadas por facetas triangulares y silletas alineadas, cambios abruptos de pendiente y una notoria disección de los cauces menores que conforman el paisaje del sector urbano de los barrios Comuneros, El Porvenir, La Carola y Solferino; en su tramo más septentrional. Guzmán (1991), detecta en campo un plano de falla que afecta un nivel piroclástico con matriz alterada. (M. Aguirre & Gutierrez, 1993),

8.3.11. Falla El Perro

Reportada por (Naranjo Henao & Ríos Alzate, 1989); atraviesa el extremo Oriental de la ciudad de Manizales, controlando linealmente el cauce de la quebrada El Perro, “Mapa 3 “con

dirección N-S; continúa hacia el norte atravesando los barrios La Sultana, Minitas y La Cumbre, donde su expresión geomorfológica es evidenciada por un grupo de silletas y facetas triangulares alineadas. En el sector Nor-Este del barrio La Sultana,(Naranjo Henao y Ríos Alzate 1989) establecen que afecta rocas de la Formación Quebradagrande de edad Cretácica.

9. Alcance y Limitaciones

9.1. Alcance

Evaluar los movimientos en masa en el municipio de Manizales, realizando una zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 con el método estadístico bivariado de Pesos de Evidencia presentado en la guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25000 del servicio geológico colombiano.

9.2. Limitaciones

- Banco de datos incompletos y no actualizados del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del Servicio Geológico Colombiano y de los servicios ligados al municipio de Manizales como la información del POT 2017-2033.
- La información de precipitación histórica para el municipio de Manizales, tanto para su área rural como para su área urbana, de las fuentes oficiales del municipio tiene acceso limitado.
- La información sísmica para el municipio de Manizales, tanto para su área rural como para su área urbana, de las fuentes oficiales del municipio tiene acceso limitado.

10. Metodología Para La zonificación Por Movimientos En Maza Escala 1:25000

La evaluación y zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa es una herramienta fundamental para la ordenación del territorio en ambientes montañosos y condiciones tropicales.

Como apoyo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial de los municipios, el Servicio Geológico Colombiano ha elaborado una guía metodológica para realizar zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000. Para analizar amenazas por movimientos en masa es necesario incluir conocimientos sobre geología, geofísica, climatología, hidrología y geotecnia al igual sobre la zona de estudio. (Rodríguez Contador, 2019)

Según (Aristizábal-Giraldo et al., 2019) “la susceptibilidad por movimientos en masa es definida como la probabilidad de ocurrencia en un área específica, de acuerdo con las condiciones intrínsecas del terreno”.

Para (Quintero Betancurth & Velez Franco, 2016)“la importancia de caracterizar un fenómeno amenazante a partir de herramientas de análisis de Sistemas de Información Geográfica (SIG), radica en generar argumentos sólidos que permitan un mejor uso y ocupación del territorio, ejecutando obras pensadas para el mejoramiento de las comunidades”

La guía metodológica sugiere realizar el análisis en tres pasos “Figura 2”:

- Caracterización geoambiental.
- Análisis de susceptibilidad.

Dado que el análisis de amenaza debe llevar a la zonificación del territorio, cada etapa de la metodología propuesta implica el manejo de datos espaciales mediante el levantamiento de información en campo y uso de herramientas SIG (E. A. Rodríguez et al., 2017).

11. Caracterización Geoambiental

Según (E. A. Rodríguez et al., 2017) Esta etapa comprende el levantamiento y consecución de la información temática y los datos de entrada requeridos para obtener la zonificación de susceptibilidad y amenaza “geología, geomorfología, cobertura de la tierra y uso del suelo, clima y sismicidad”.

Es decir, en esta etapa la información de la geología, geomorfología, cobertura de tierra, clima, información ráster y vectorial la debemos tener a la mano “Tabla 2” para identificar sus particularidades y poder generar hipótesis en relación con los factores que condicionan el terreno y pueden generar la ocurrencia de fenómenos amenazantes.

Tabla 2

Representación esquemática de los principales datos de caracterización geoambiental para zonificación de amenaza por movimientos en masa.

DATOS		ESCALA (1:25.000)
TIPO	SUBTIPO	
Inventario de procesos morfodinámicos	Inventario de procesos morfodinámicos	I
	Actividad de movimientos en masa	VI
	Monitoreo de movimientos en masa	MI
Factores	DEM	VI
	Morfología de las laderas	I

condicionantes	Relieve interno	MI
	Acumulación de Flujo	MI
	Litología	I
	Estructura	I
	Fallas	I
	Tipos de suelo	I
	Profundidad del suelo	PI
	Hidrología de la ladera	-
	Principales unidades geomorfológicas	I
	Unidades geomorfológicas detalladas	I
	Tipos de uso del suelo	I
Cambios en el uso del suelo	I	
Factores detonantes	Lluvia	MI
	Temperatura / Evapotranspiración	-
	Catálogo de sismos	MI
	Aceleración del terreno	PI

Nota. La importancia de cada factor está indicada según la siguiente nomenclatura: VI (Muy Importante), I (Importante), MI (Moderadamente Importante), PI (Poco Importante), - (Irrelevante). Fuente: adaptada y modificada de van Westen et al. (2008) en (E. A. Rodríguez et al., 2017).

Se debe tener en cuenta los factores y temáticas considerados en la “Tabla 2” con el fin de realizar una completa y correcta caracterización geoambiental.

Como se ha mencionado, la selección de los factores para el análisis depende del conocimiento de la zona de estudio y disponibilidad de información, por lo que los factores recomendados en esta propuesta no restringen la posibilidad de usar más datos, siempre y cuando estén orientados a explicar la ocurrencia actual y futura de movimientos en masa. (E. A. Rodríguez et al., 2017)

11.1. Inventario De Procesos

El inventario de procesos morfodinámicos se presenta como una capa de información independiente de acuerdo con la metodología propuesta en la Guía Metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000.

Se propone este manuscrito seguir la recomendación de (E. A. Rodríguez et al., 2017), la cual consiste en incluir, dentro del inventario de procesos morfodinámicos, tanto los movimientos en masa, como los rasgos o características geomorfológicas indicativas de inestabilidad.

En zonas donde se identifiquen evidencias de inestabilidad del terreno asociada con procesos de asentamientos, subsidencia o comportamientos geotécnicos especiales (por ejemplo expansión o colapso), pueden ser incluidas y representadas en el inventario de procesos morfodinámicos.

De acuerdo con la guía metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos en masa escala 1:25.0000 y siguiendo las recomendaciones para la elaboración del inventario de procesos morfodinámicos, se deben considerar todas las fuentes de información disponibles.

Los datos del inventario de procesos morfodinámicos, se obtuvo de diferentes fuentes y de imágenes satelitales, como las ofrecidas por Google earth.

La fuente inicial de obtención de datos fue el portal SIMMA(<https://simma.sgc.gov.co>) del Servicio geológico colombiano, el cual cuenta inicialmente con un inventario de 26 procesos morfodinámicos detallados, pero en su catálogo existe un registro de 316 procesos en el municipio de Manizales Ver “Tabla 3”.

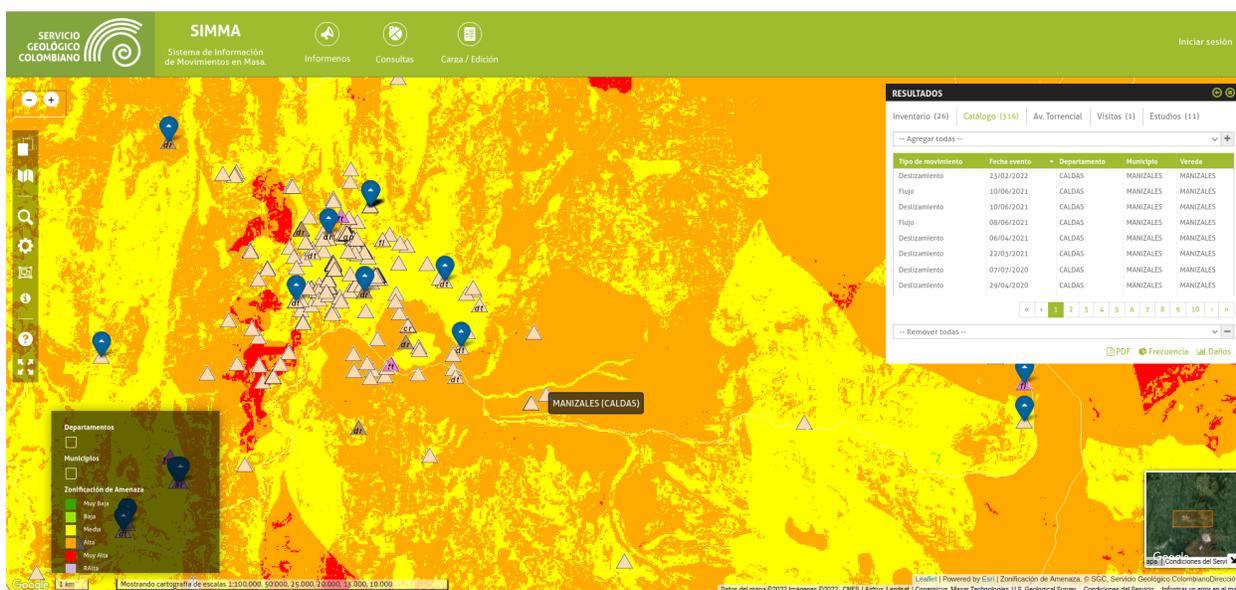
Tabla 3*Inventario de 26 procesos morfodinámicos obtenidos del portal SIMMA*

Tipo movimiento	Fechas, eventos	Departamento	Municipio	Altura (msnm)	Latitud (°)	Longitud (°)
Flujo	01/10/2012	CALDAS	MANIZALES	3.600	5,039711	-75,526583
Flujo	01/10/2012	CALDAS	MANIZALES	3.600	5,040256	-75,525411
Deslizamiento	01/10/2012	CALDAS	MANIZALES	1.997	5,038928	-75,540239
Caida	05/11/2011	CALDAS	MANIZALES	0	5,063611	-75,510833
Caida	17/10/2011	CALDAS	MANIZALES	0	5,081667	-75,513611
Caida	01/10/2009	CALDAS	MANIZALES	1.761	5,049867	-75,53126
Caida	01/10/2009	CALDAS	MANIZALES	3.600	5,052747	-75,5161
Caida	01/10/2009	CALDAS	MANIZALES	1.508	5,096916	-75,567697
Flujo	01/10/2009	CALDAS	MANIZALES	1.503	5,052685	-75,567563
Deslizamiento	01/10/2009	CALDAS	MANIZALES	1.975	5,117133	-75,465052
Deslizamiento	01/10/2009	CALDAS	MANIZALES	2.267	5,109357	-75,476691
Caida	24/08/2009	CALDAS	MANIZALES	0	5,059633	-75,492336
Flujo	20/05/2009	CALDAS	MANIZALES	0	5,063828	-75,513306
Flujo	20/05/2009	CALDAS	MANIZALES	0	5,068706	-75,519303
Flujo	15/04/2009	CALDAS	MANIZALES	0	5,042433	-75,535525
Flujo	22/11/2006	CALDAS	MANIZALES	0	5,073275	-75,488858
Flujo	07/10/2000	CALDAS	MANIZALES	0	5,065219	-75,476633
Deslizamiento	15/11/1999	CALDAS	MANIZALES	0	5,073889	-75,466111
Deslizamiento	15/11/1999	CALDAS	MANIZALES	0	5,050278	-75,538889
Deslizamiento	15/12/1993	CALDAS	MANIZALES	0	5,080278	-75,477222
Deslizamiento	01/01/1990	CALDAS	MANIZALES	0	5,058611	-75,565278
Deslizamiento	01/01/1990	CALDAS	MANIZALES	0	5,058889	-75,565278
Volcamiento	01/06/1989	CALDAS	MANIZALES	0	5,059633	-75,492336
Deslizamiento	15/04/1975	CALDAS	MANIZALES	0	5,0775	-75,525833
Flujo	15/03/1969	CALDAS	MANIZALES	0	5,0175	-75,560556
Deslizamiento	01/01/1969	CALDAS	MANIZALES	0	5,071389	-75,522778

Nota. En esta tabla se presentan varios procesos SIMMA "<https://simma.sgc.gov.co>" obtenidos con su ubicación y fecha de evento, se puede notar que aún es muy incompleta, pues las alturas están sin conocer en su mayoría.

Figura 1

Página web SIMMA, Registro Catalogo.

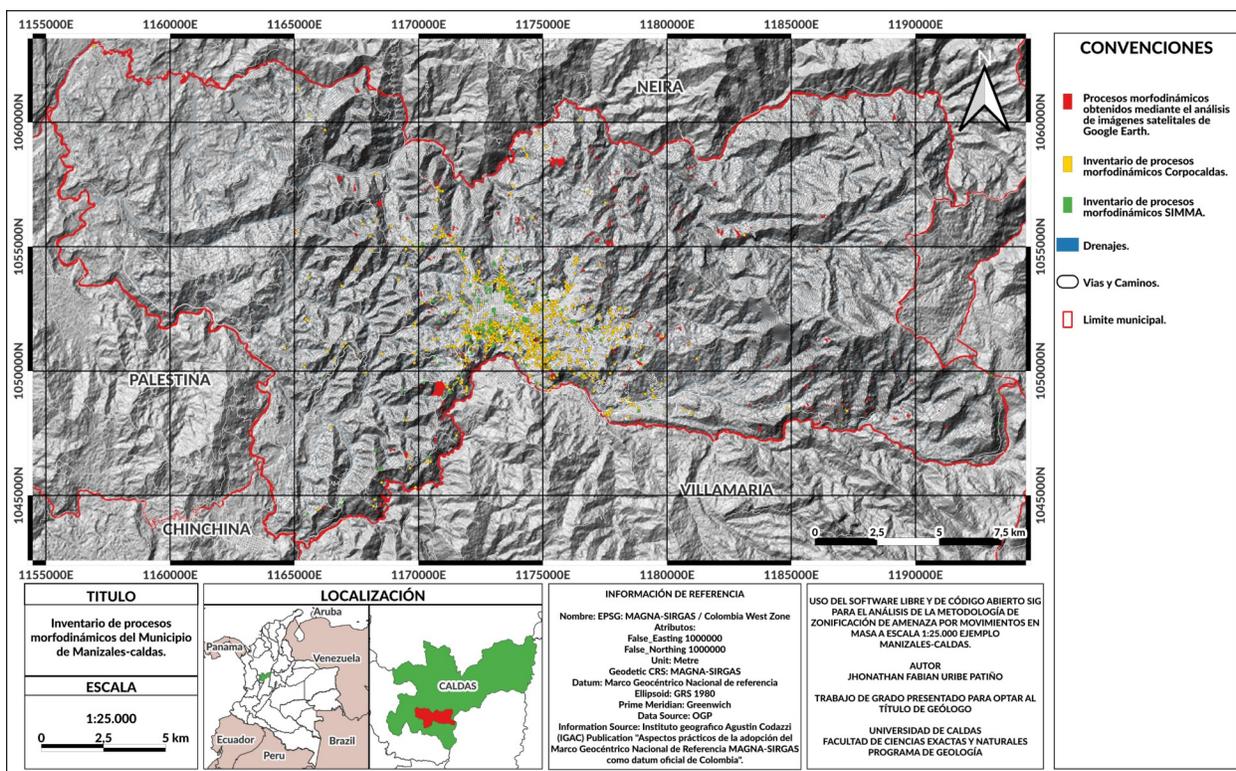


Nota. La fuente SIMMA, "<https://simma.sgc.gov.co>" la cual es el portal del inventario de procesos del servicio geológico colombiano.

Teniendo en cuenta que el inventario de 26 procesos morfodinámicos se encuentra dentro del Catálogo de 316 procesos "Figura 1", se decide obtener los 316 puntos registrados para el análisis. La segunda fuente de datos fue obtenida de Corpocaldas, específicamente del servicio de datos abiertos de esta entidad, "https://corpocaldas.geoambiental.co:6443/arcgis/rest/services/servicios/SERVICIO_SUELO/MapServer/11", Ver "Mapa 4".

Mapa 4

Mapa de Inventario de procesos morfodinámicos



Nota. Se presenta en el “Mapa 4” los diferentes punto y polígonos que simbolizan los diferentes procesos morfodinámicos obtenidos para este estudio; Ver carpeta de anexos, Anexos_mapas, Mapa_procesos_punto_poligono .

La tercera fuente de datos, se obtuvo con las imágenes satelitales de Google Earth, interpretando la geomorfología del terreno y siguiendo la recomendación de la guía metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos en masa escala 1:25.000 del servicio geológico colombiano.

Se obtuvieron 584 polígonos que se relacionan con 584 interpretaciones de procesos morfodinámicos interpretados en imágenes satelitales de diferentes fechas, siendo esta fechas 2007-2014-2015-2017-2018-2019-2020-2021, Ver “Mapa 4”.

Se procuró usar las imágenes de mejor calidad en las áreas donde fuera posible, pues no todas las áreas del municipio tienen las mismas imágenes satelitales o la misma calidad en estas, dependiendo también del año a las que están vinculadas.

De acuerdo con Guzzetti et al. (2012) en (E. A. Rodríguez et al., 2017), “en el inventario de movimientos en masa se registra la ubicación (como punto o polígono), fecha de ocurrencia (donde se conozca) y tipo de movimiento en masa que ha dejado señales o rastros identificables en un área” se puede mostrar otras características geomorfológicas relacionadas o indicativas de inestabilidad, tales como:

- Escarpes donde se generaron movimientos tipo caída o flujos.
- Conos de abanicos aluviales y zonas donde los productos de movimientos tipo flujo o caída de rocas pueden viajar y depositarse.
- Hondonadas (tierras malas) y otras características de erosión hídrica superficial y fluvial que pueden dar origen a movimientos en masa. Estas incluyen surcos, cárcavas, deslaves y socavación lateral, que no son fácilmente representables como un área cartográfica por la escala de trabajo.

Uno de los principales problemas en la obtención de la información de los movimientos en masa, fue el formato, es decir, las capas obtenidas de Corpocaldas y el portal SIMMA, presentan la información en una geometría vectorial de puntos “Tabla 4”, pero la guía

metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos en masa escala 1:25.0000 requiere la obtención de información con geometría tipo polígono lo cual tiene mucho sentido, pues determinar área o volumen es más elocuente si tenemos un polígono de X dimensiones.

Tabla 4

Geometría de las capas de movimientos en masa obtenidas.

Fuente	Geometría	Autor
SIMMA	Punto	(SIMMA, 2022)
Corpocaldas	Punto	https://corpocaldas.geoambiental.co:6443/arcgis/rest/services/servicios/SERVICIO_SUELO/MapServer/11
Google earth pro	Poligono	Fuente:propia.

Nota. Esta tabla muestra los orígenes de la información de los diferentes procesos gravitacionales utilizados para el inventario de procesos morfodinámicos de este trabajo.

Para solucionar lo anterior, se procede a generar un Buufer de 60 metros para los movimientos en masa registrados como puntos, y de cada punto generar polígonos como representación de los movimientos en masa asociados a la información geográfica.

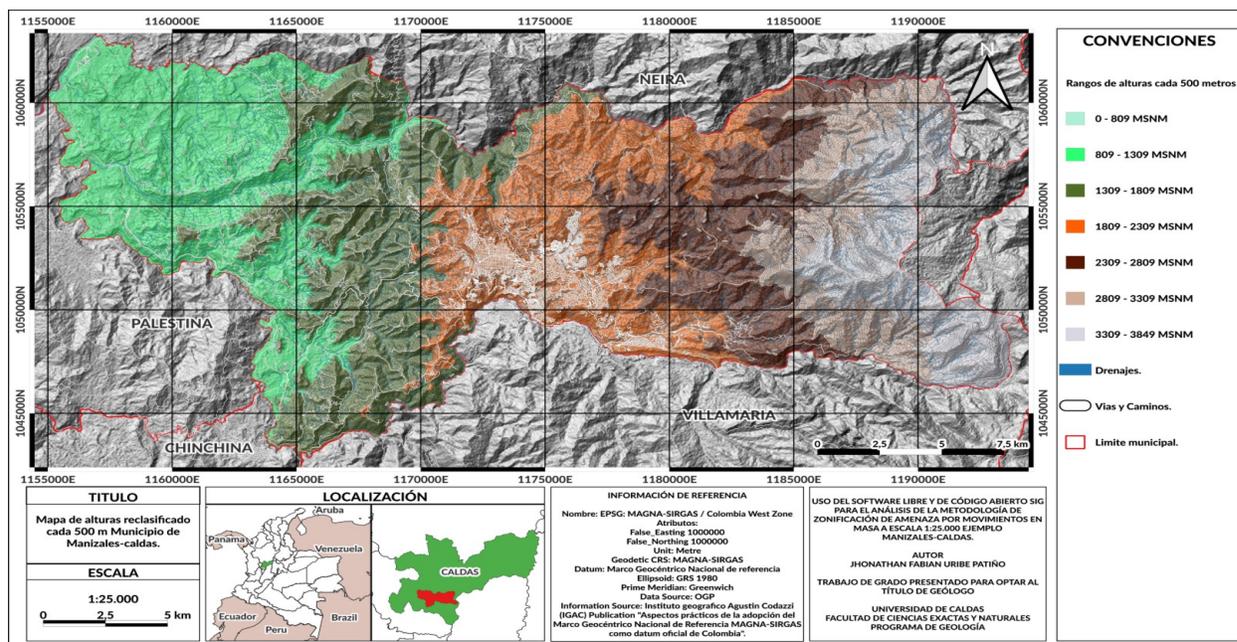
11.2. Factores Condicionantes

Los factores condicionantes tenidos en cuenta para la caracterización geoambiental y análisis de susceptibilidad fueron: Altura, cobertura y uso de suelos, curvatura (geoforma), distancia a drenajes, distancia a la vía, Distancia a Falla, Formaciones superficiales, geomorfología, orientación, dirección de flujo y pendientes, según (Khoshtinat et al., 2019), son Diez los factores condicionantes, los cuales son: la pendiente del terreno, la altitud, el aspecto “orientación”, curvatura, distancia desde el río, distancia desde la falla, litología, Se consideran el uso de la tierra, la lluvia y los medios del suelo.

11.2.1. Altura

Mapa 5

Mapa de alturas reclasificado cada 500 metros



Nota. Ver carpeta de anexos, Anexos_mapas, Mapa_de_alturas_reclasificado.

Tabla 5*Clasificación de las alturas*

Alturas	Símbolo	Área (M ²)	%
0 – 809 MSNM		4068	0,01
809 - 1.309 MSNM		109475995	24,76
1.309 - 1.809 MSNM		93646278	21,18
Alturas	Símbolo	Área (M ²)	%
1.809 - 2.309 MSNM		93369014	21,12
2.309 - 2.809 MSNM		60975424	13,79
2.809 - 3.309 MSNM		40132107	9,08
3.309 - 3.849 MSNM		44471635	10,06
TOTAL		442074521	100

Nota. Podemos notar en esta tabla que la zona con mayor área comprende los rangos 1.309 – 1.809 MSNM y 2.309 – 2.809 MSNM que suman en total 42.30% del territorio municipal.

A partir del modelo de elevación del terreno DEM de la zona de estudio tomado de la misión satelital Alaska Satellite Facility (ASF) de la NASA y la Universidad de Alaska Fairbanks. “<https://search.asf.alaska.edu/#/?zoom=3.000¢er=-97.494,39.673>” .

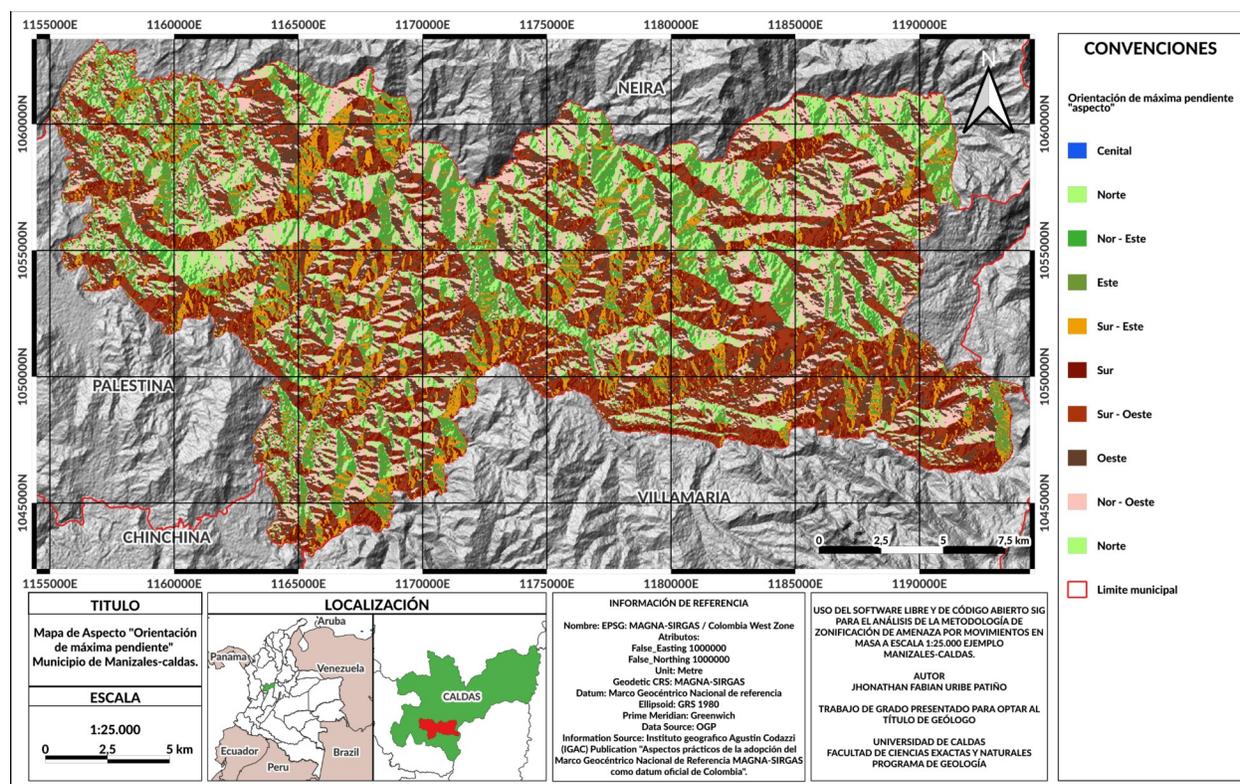
Se genera una reclasificación del DEM de la zona de estudio, con intervalos de altura de 500 m teniendo en cuenta que le registro del DEM obtenido marca una altura mínima de 809 metros y una máxima de 3849 metros sobre el nivel del mar, Ver “Mapa 5”, los rangos generados tendrán un valor de peso a tener en cuenta en el análisis estadístico bivariado, ver Tablas “5” “8” y “9”.

11.2.2. Orientación “Aspecto”

Similar a la pendiente, el aspecto también es un factor importante en los deslizamientos de tierra. Mapeo de susceptibilidad (Guzzetti et al. 1999; Cevik y Topal 2003; Lee et al. 2004) en (Chen et al., 2016). La orientación “Aspecto” se hace especialmente relevante si tenemos en cuenta que, según (Dahal, Hasegawa, Nonomura, Yamanaka, Masuda, et al., 2008), El aspecto es referido como la dirección de máxima pendiente del terreno.

Mapa 6

Mapa de Aspecto "Orientación de máxima pendiente"



Nota. En este mapa es necesario resaltar que los colores aplicados obedecen a la intención de generar un contraste entre las direcciones Norte- Sur, Este-Oeste; Ver carpeta de anexos, Anexos_mapas, Mapa_de_Aspecto_Orientación_de_máxima_pendiente.

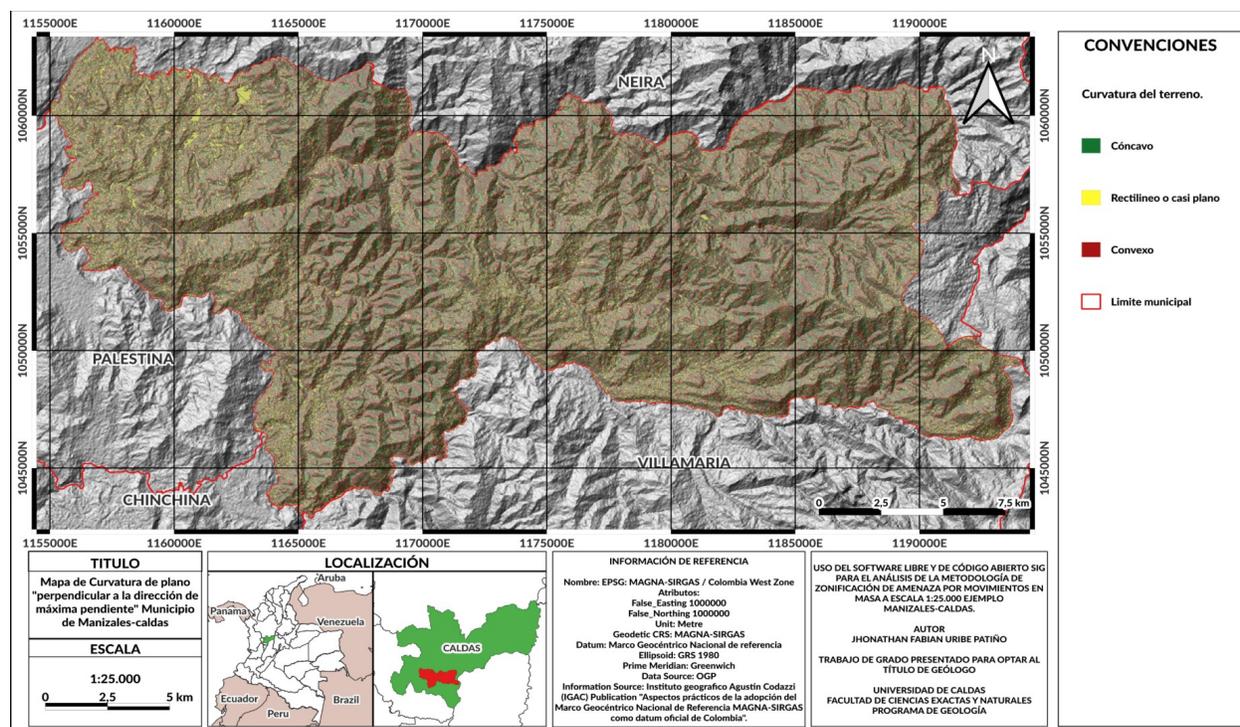
Para este estudio en cuestión, las direcciones seleccionadas, se divide en nueve clases, N, NE, E, SE, S, SW, W, NW y plano o cenital, Ver "Mapa 6", las relaciones área y dirección se pueden evidenciar en Anexos, Anexo1 "Tabla 1".

11.2.3. Curvatura

Según Londoño Linares, (2007), este factor hace parte del grupo de factores de amenaza y lo define como Convexidad/concavidad espacial del terreno.

Mapa 7

Mapa de Curvatura de plano "perpendicular a la dirección de máxima pendiente



Nota. En este mapa se puede notar que el factor rectilíneo o casi plano se presenta en las zonas que tienen pendientes bajas y homogéneas ayudándonos a entender y a calibrar el modelo; Ver carpeta de anexos, Anexos_mapas, Mapa_de_Curvatura_de_plano_perpendicular_a_la_dirección_de_máxima.

En general este factor representa las características de forma del terreno diferenciado las laderas cóncavas, convexas y superficies rectilíneas, Según (Cardona Noreña & Serna Yepes, 2019) plantea que es un parámetro importante en este tipo análisis ya que permite entender los procesos de erosión y escorrentía. Se estima como la variación del ángulo de inclinación del terreno respecto a una línea recta de pendiente promedio.

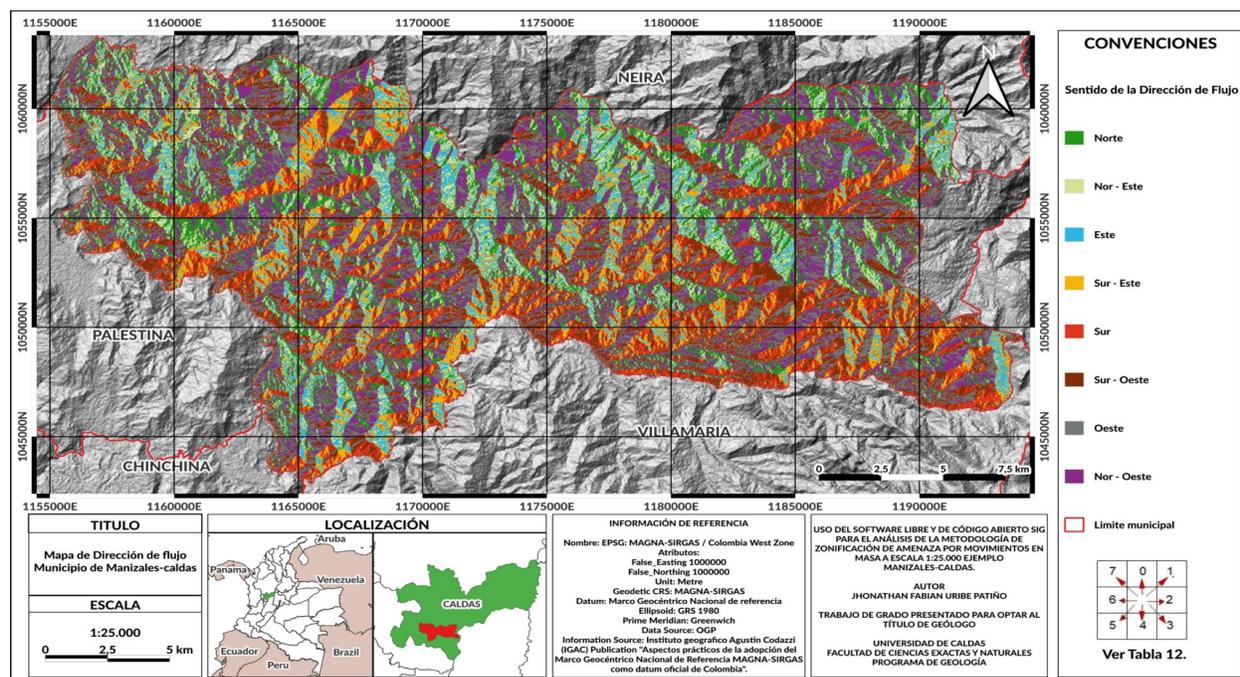
En el “Mapa 7”, los datos correspondientes a valores positivos simboliza que la superficie es convexa, por otra parte, si los datos corresponden a valores negativos plantea que la superficie es lateralmente cóncava y por último si los valores son 0 o alrededor de 0, quiere decir que la superficie es plana o rectilínea, en la carpeta Anexos, Anexo 1 “Tabla 2” se plantea la relación del factor condicionante con el área de la zona de estudio en M^2 .

11.2.4. Dirección De Flujo

La topografía es de fundamental importancia para el análisis del comportamiento hidrológico de un sistema fluvial, (Moore et al. 1993, Band 1999, Garbrecht y Martz 2000) en (Wang & Liu, 2006)afirman que “en las últimas décadas, los modelos digitales de elevación (DEM) se han utilizado ampliamente en el análisis hidrológico automatizado de la topografía superficial”. La acumulación de flujo determina todas las celdas que drenan a una en particular, la cual se obtiene a partir de la dirección de flujo, Según Venkatachalam et al. (2001) en (Rodríguez Minaya, 2018) , la acumulación de flujo en una celda se establece en función a la suma de los valores de acumulación de flujo de las celdas vecinas que desembocan en ella.

Mapa 8

Mapa de Dirección de flujo



Nota. Las direcciones de flujo se generan siguiendo el algoritmo de SAGA GIS; Ver carpeta de anexos, Anexos_mapas, Mapa_direccion_de_flujo.

En este apartado se utiliza el módulo de Saga Gis que utiliza un algoritmo propuesto por Wang & Liu en (SAGA-GIS, 2022) para identificar y rellenar depresiones superficiales en modelos digitales de elevación “Mapa 8”.

Los productos generados por el algoritmo son:

- *Filled DEM*, un modelo digital de terreno corregido.
- *Flow Direction*, un modelo de dirección de flujo .
- *Watershed Basins*, las cuencas hidrográficas.

De lo anterior nos interesa el producto Flow Direction, que presenta un modelo de dirección de flujo con 9 clases que van desde -1 hasta 7, Ver “Tabla 6”.

Tabla 6

Categorías generadas en el modelo de dirección de flujo producido mediante el algoritmo Fill sinks (Wang & Liu) del modulo SAGA-GIS en QGIS.

Direcciones de flujo								
-1	0	1	2	3	4	5	6	7
Corresponde a zonas donde no hay flujo	Corresponde a zonas donde el flujo va al norte	Corresponde a zonas donde el flujo va al Nor-Este	Corresponde a zonas donde el flujo va al Este	Corresponde a zonas donde el flujo va al Sur-Este	Corresponde a zonas donde el flujo va al Sur	Corresponde a zonas donde el flujo va al Sur-Oeste	Corresponde a zonas donde el flujo va al Oeste	Corresponde a zonas donde el flujo va al Nor-Oeste

Nota. Las zonas donde no hay flujo no se tienen en cuenta para el cálculo del factor, adaptado de (SAGA-GIS 2022).

La clasificación del “mapa 8” se encuentra en, Anexos, Anexo 1 “Tabla 3”

11.2.5. Pendientes.

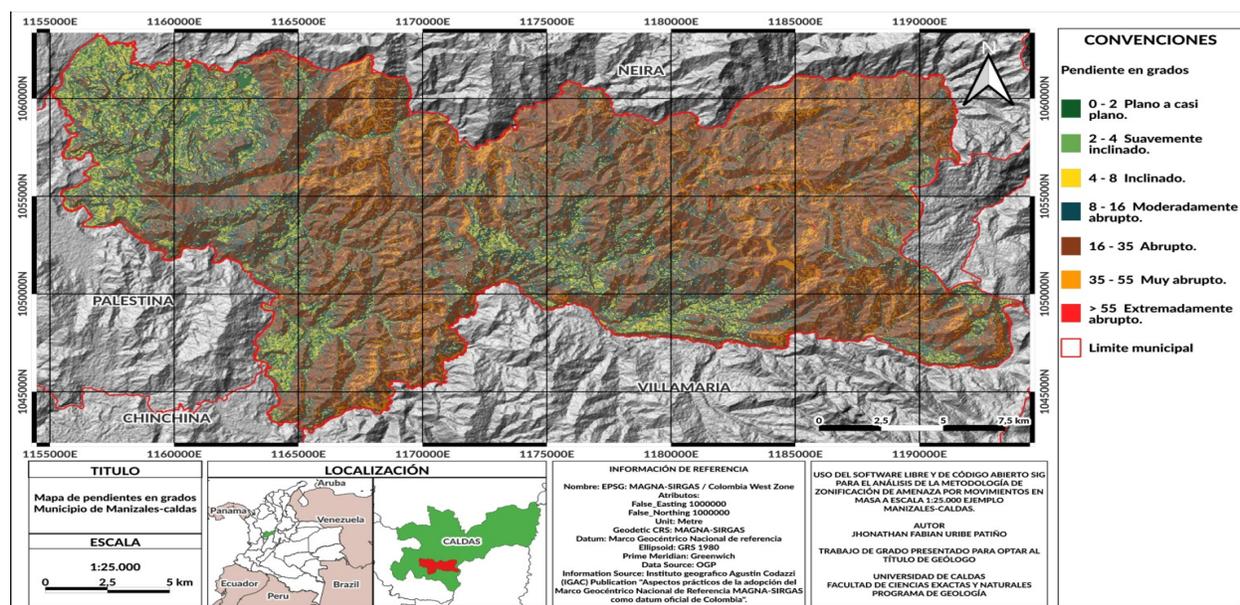
La pendiente, un parámetro importante en la evaluación de la estabilidad de taludes (Dahal, Hasegawa, Nonomura, Yamanaka, Dhakal, et al., 2008).

Variable relacionada con el ángulo que se genera entre la superficie del terreno y la horizontal, sus valores van de 0° a 90° y es una variable de gran importancia para el análisis de la susceptibilidad, ya que en su gran mayoría los movimientos en masa se relacionan con esta, debido a la relación entre el ángulo de las pendientes y los deslizamientos, dado que estos constituyen un fenómeno de tipo gravitacional y donde las

pendientes muy altas y escarpadas corresponden a zonas con un mayor grado de aceleración, generando así la propagación de estos (Chen et al., 2016).

Mapa 9

Mapa de pendiente en grados



Nota. En este mapa podemos encontrar una relación de las zonas de menor pendiente con la zonas rectilíneas del “mapa 7”, en el “Mapa 9”; Ver carpeta de anexos, Anexos_mapas, Mapa_pendiente. La mayoría del territorio municipal tiene una pendiente que va desde los rangos moderadamente abrupto y abrupto lo que permite pensar en la posibilidad de que los movimientos en masa se concentren en estas zonas, la clasificación del “Mapa 9” se encuentra en Anexos, Anexo 1 “Tabla 4”

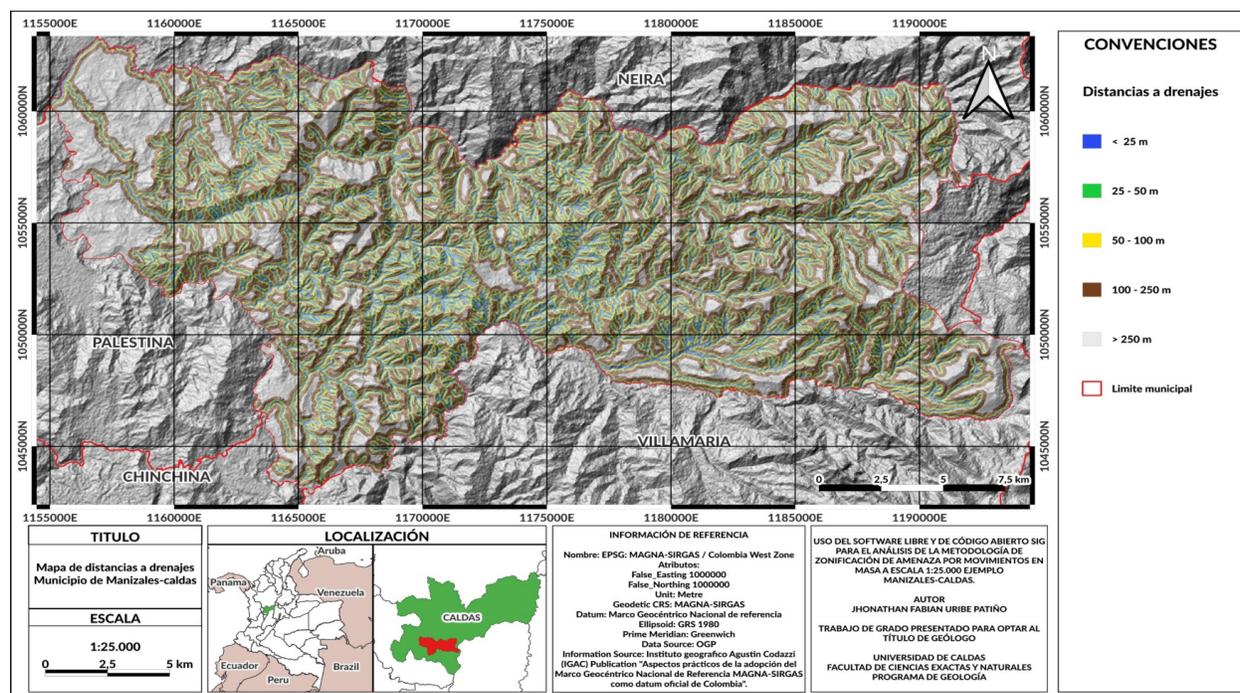
11.2.6. Distancia a Drenajes

Los cuerpos de agua tanto superficiales como subsuperficiales son uno de los factores que más tienen peso en el momento de generar un deslizamiento debido a su capacidad de erodar y de infiltrarse en el terreno, esto sumado con la topografía y el tipo de material

disponible, puede dar lugar a un movimiento en masa ya sea a pequeña o gran escala dependiendo de las condiciones iniciales, también la escorrentía juega un papel importante para la remoción en masa, ya que es un mecanismo de gran importancia para la generación de los mismos sobre todo en regiones montañosas (Chen, Niu y Jia 2016).

Mapa 10

Mapa de distancias a drenajes



Nota. Ver carpeta de anexos, Anexos_mapas, Mapa_de_distancia_a_drenajes.

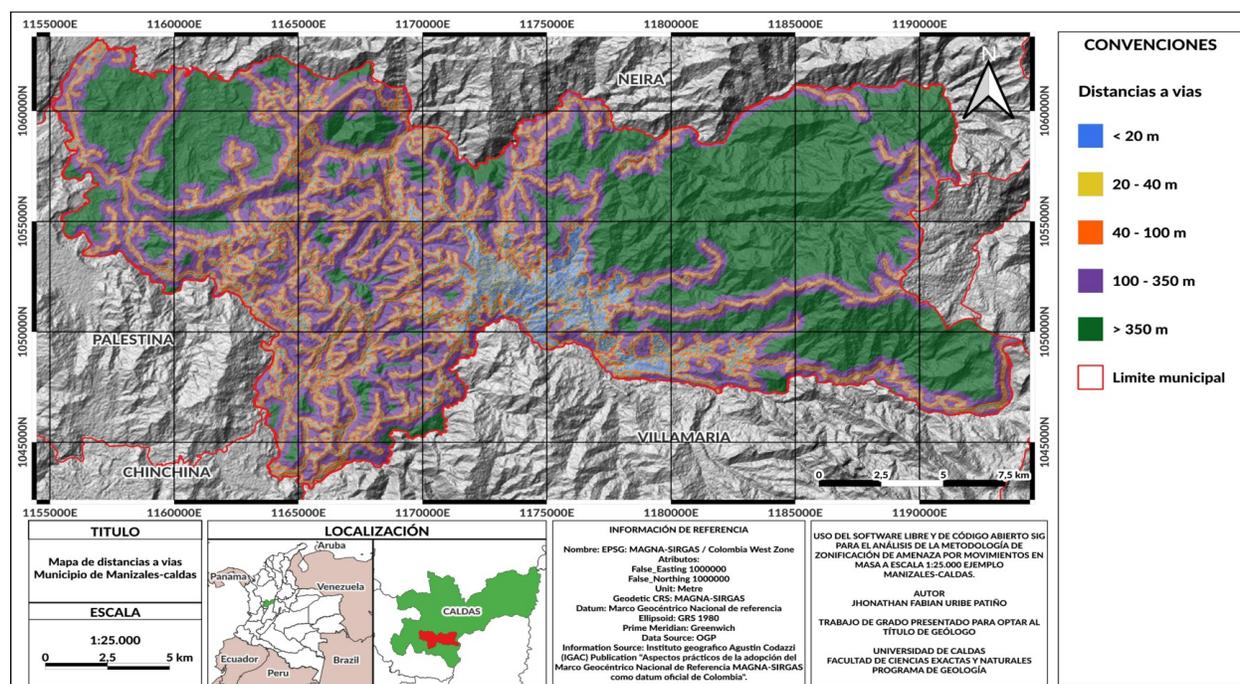
Por lo tanto, el mapa de distancia drenajes “Mapa 10” se basó en la clasificación dada por Regmi et al (2010) en (Duran Ferreira, 2018), teniendo en cuenta que para dicho mapa los valores con rango 0-25 m y 25-50 m Ver Anexos, Anexo 1 “Tabla 5” corresponde a los valores más cerca al afluente o drenaje y en este caso corresponderían a las zonas más propensas a la

generación de movimiento en masa, mientras que los valores con rango >250 corresponde a las zonas más alejadas a los afluentes y son las zonas con menor propensión a eventos en remoción en masa.

11.2.7. Distancia a Vías

Mapa 11

Mapa de Distancia a Vías



Nota. Ver carpeta de anexos, Anexos_mapas, Mapa_distacia_a_vias.

La Excavación de taludes para la construcción de caminos y frecuentes las vibraciones generadas por los vehículos predisponen a fallas en las laderas (Ayalewand Yamagishi, 2005; Mittal et al., 2008) en (Regmi et al., 2010).

Uno de los factores que controlan la estabilidad de taludes es actividad de construcción de carreteras. Este mapa de factores fue generado según la hipótesis de que los deslizamientos pueden ser más frecuentes a lo largo de caminos, debido a cortes de taludes y drenaje inadecuados desde la carretera, (Dahal, Hasegawa, Nonomura, Yamanaka, Masuda, et al., 2008).

Esta variable está relacionada con las intervenciones antrópicas que pueden generar inestabilidad, factores antrópicos como la construcción de vías condicionan directa e indirectamente la estabilidad de taludes, ver “Mapa 11”.

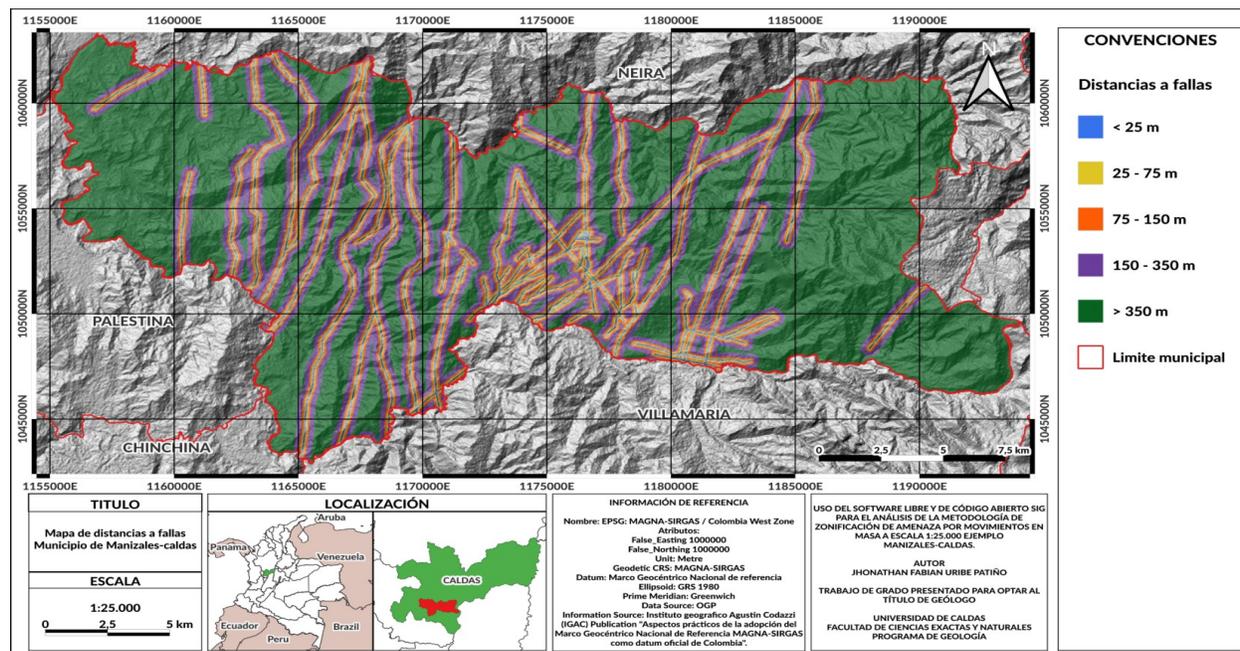
Los valores de reclasificación para esta variable se basaron en los valores aportados por (Regmi et al., 2010) los cuales generaron 5 rangos Ver Anexos, Anexo 1 “Tabla 6”, donde los rangos con menos distancia (0-20 m, 20-40 m) corresponderían a los valores más susceptibles a la generación de movimientos en masa, mientras que los rangos con mayor (>350 m) distancia corresponderían a los valores menos susceptibles a la generación de movimientos en masa.

11.2.8. Distancia a Fallas

Es un factor de gran importancia debido a que tiene en cuenta la tectónica y cómo puede afectar a una zona determinada “Mapa 12”, según (SGC, 2012) en (Duran Ferreira, 2018)“las fallas geológicas van a tener un factor de incidencia dependiendo de su distancia euclidiana, es decir, que a mayor cercanía a esta, va a ser más susceptible un lugar para desencadenar un deslizamiento o movimiento en masa”.

Mapa 12

Mapa de distancia a Fallas



Nota. Ver carpeta de anexos, Anexos_mapas, Mapa_distancias_a_Fallas.

Se generan 5 categorías basadas en el documento de (Regmi et al., 2010) Ver Anexos, Anexo 1 “Tabla 7”, se propone que las zonas que van a ser más afectadas en caso de deslizamientos, son las que se encuentran en un radio comprendido entre los 0-25 m ya que en este radio se genera un mayor movimiento de bloques, las zonas que menos se ven perjudicadas son las que se encuentran a partir de los 350 m.

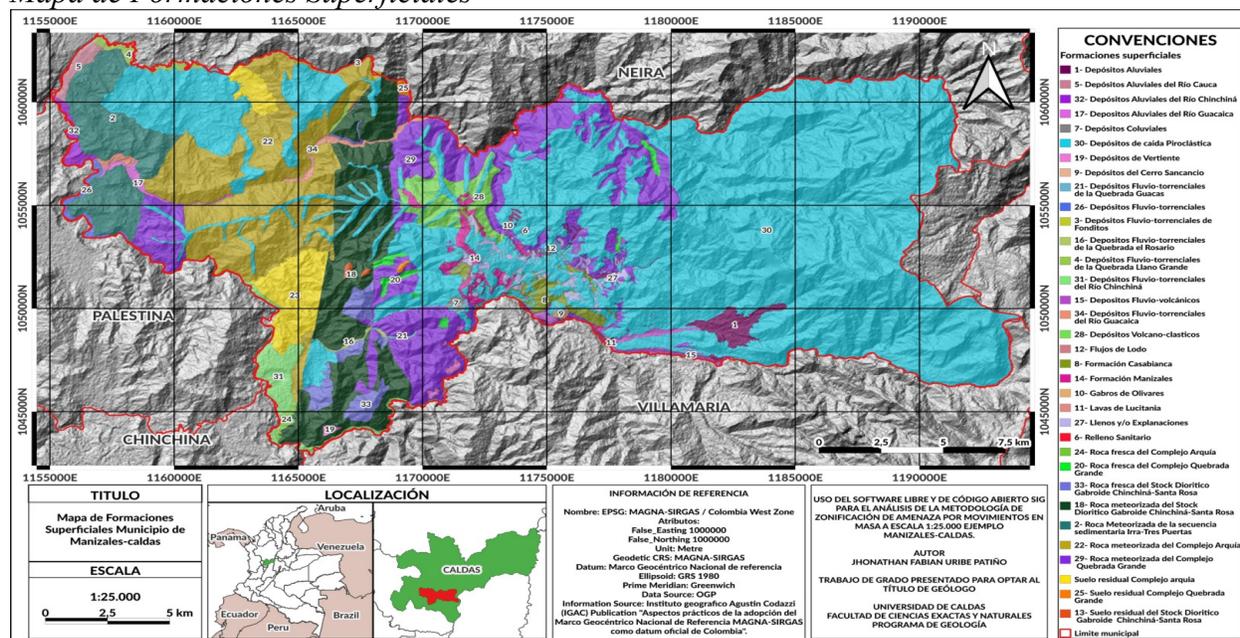
11.2.9. Formaciones Superficiales

Según Campy y Macaire (1989) en (Dionne, 1991) Las formaciones superficiales están constituidas de sedimentos y de rocas exógenas o volcánicas, residentes en la interfase litosfera - atmósfera desde su depositación sobre los continentes, también afirman que están dispuestas en

una o muchas unidades de espesor métrico o decamétrico, con o sin relación genética con el sustrato, pero estrechamente asociadas a la evolución del relieve actual de la cual ellas son la expresión litológica.

Mapa 13

Mapa de Formaciones Superficiales



Nota. Modificado de la cartografía rural y urbana presentada en el plan de ordenamiento territorial de la ciudad de Manizales 2017-2031, de las planchas D-9 formaciones superficiales_rural_2017 y D-2d formaciones superficiales _ perímetro urbano_2017; Ver carpeta de anexos, Anexos_mapas, Mapa_formaciones_superficiales.

El “Mapa 13” de formaciones superficiales presentadas en este trabajo es una modificación y unión de la cartografía rural y urbana presentada en el plan de ordenamiento

territorial de la ciudad de Manizales 2017-2031, en su apartado Cartografía, diagnóstico, Formaciones superficiales rural y urbano cuyas planchas corresponden a:

- D-9 FORMACIONES SUPERFICIALES_RURAL_2017 .
- D-2D FORMACIONES SUPERFICIALES_PERÍMETRO_URBANO_2017.

Dirección de enlace en

[“https://drive.google.com/drive/folders/1KutQt6olsiKoKV2x_EL2N5hiMEZV9xxZ”](https://drive.google.com/drive/folders/1KutQt6olsiKoKV2x_EL2N5hiMEZV9xxZ)

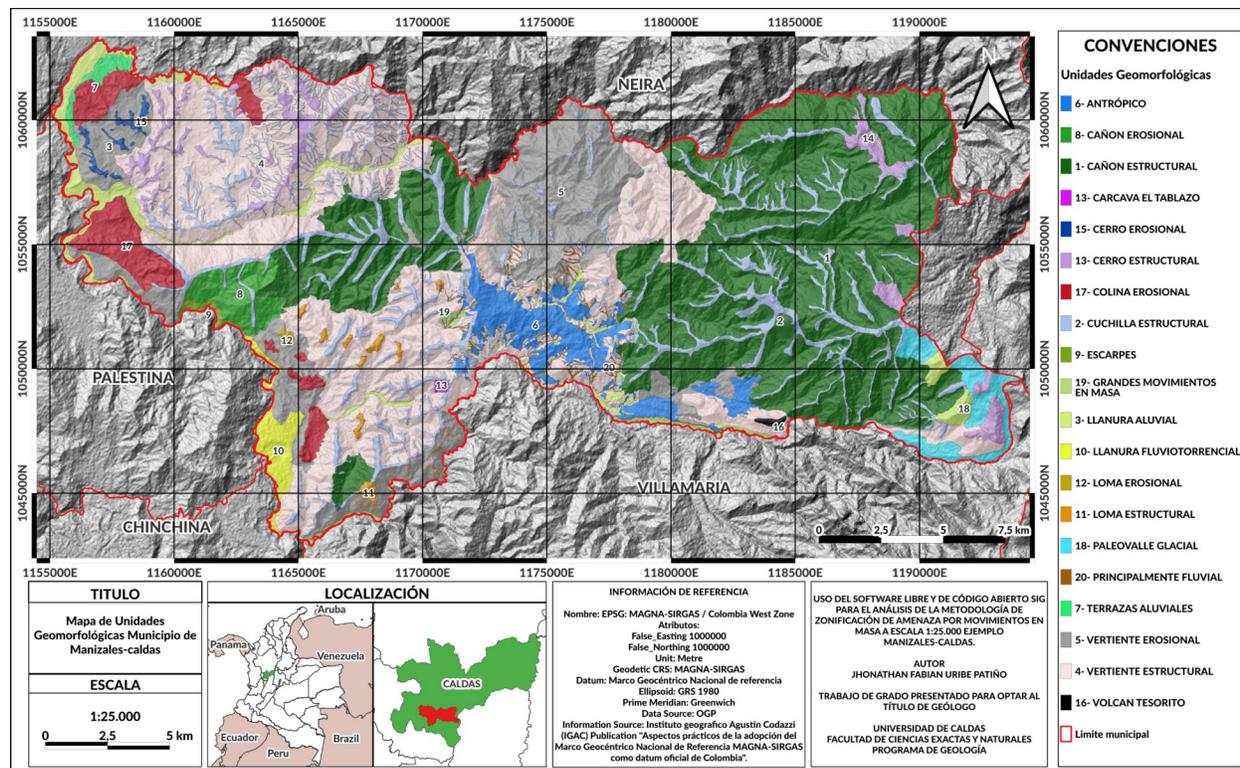
Originalmente, estas planchas tienen una escala de trabajo 1:10.000 y 1:2000 respectivamente, por lo que al adecuar la información a una escala superior podemos decir que las extensiones de las unidades superficiales son ampliamente variables y no todas cumplen con una extensión de terreno ocupada por un depósito superficial de dimensión suficiente para ser cartografiable a escala 1:25,000.

En general la distribución de las unidades superficiales es amplia y variable Ver Anexos, Anexo 1 “Tabla 8, 9, 10, 11 y 12”, de lo anterior podemos resaltar los depósitos de caída piroclástica con un porcentaje de extensión del 53,76%, lo que significa que esta unidad cubre un poco más de la mitad del territorio del municipio de Manizales y las unidades derivadas de rocas meteorizadas cubren el 31,74 % Anexos, Anexo 1 “Tablas 9 y 10”, de las superficies del municipio; Estas unidades deberían de influenciar ampliamente como factor en la susceptibilidad de amenaza por movimientos en masa en el municipio.

11.2.10. Geomorfología

Mapa 14

Mapa de Geomorfología



Nota. modificado de la cartografía rural y urbana presentada en el plan de ordenamiento territorial de la ciudad de Manizales 2017-2031, de las planchas D-6 unidades geomorfológicas rurales_rural_2017 y D-2A unidades geomorfológicas_perímetro_urbano_2017; Ver carpeta de anexos, Anexos_mapas, Mapa_geomorfologia.

El “Mapa 14” de unidades geomorfológicas presentadas en este trabajo es una modificación y unión de la cartografía rural y urbana presentada en el plan de ordenamiento

territorial de la ciudad de Manizales 2017 -2031, en su apartado Cartografía diagnóstico, unidades geomorfológicas rurales y urbano cuyas planchas corresponden a:

- D-6 UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS RURALES_RURAL_2017.
- D-2A UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS_PERÍMETRO_URBANO_2017.

Dirección de enlace en

[“https://drive.google.com/drive/folders/1KutQt6olsiKoKV2x_EL2N5hiMEZV9xxZ”](https://drive.google.com/drive/folders/1KutQt6olsiKoKV2x_EL2N5hiMEZV9xxZ)

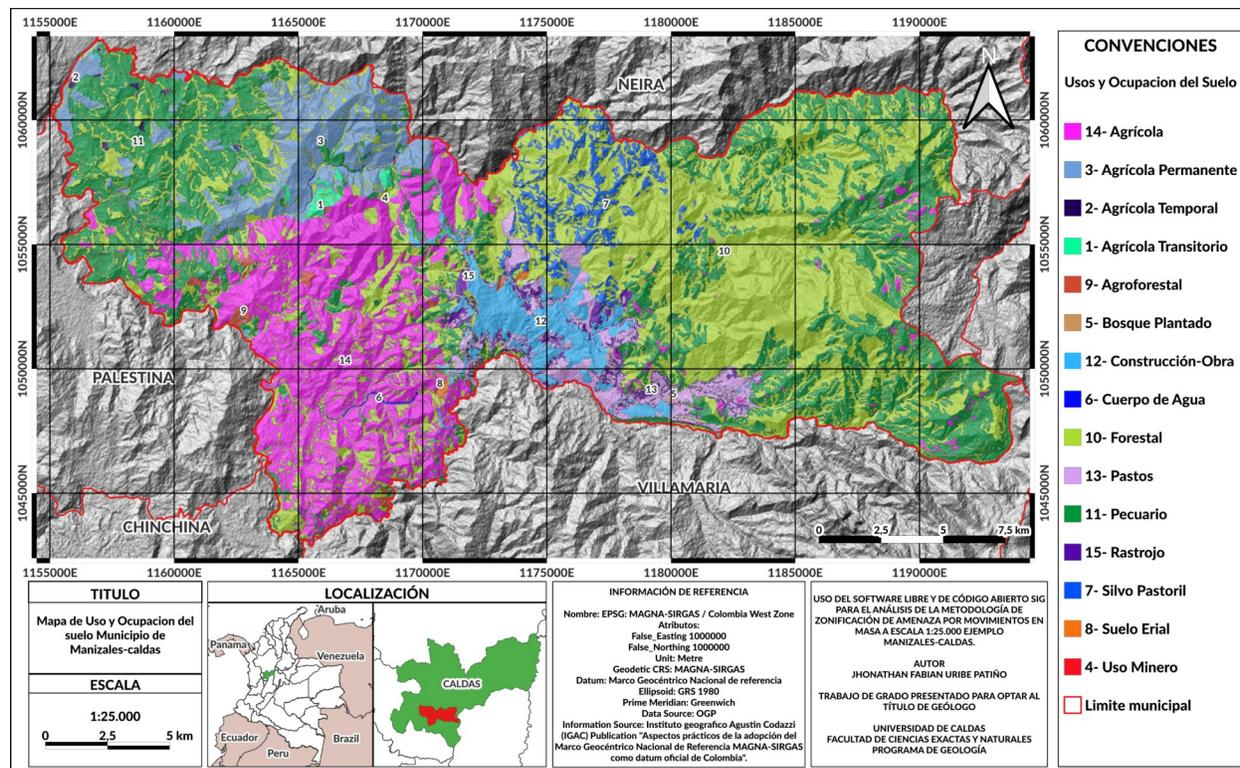
Originalmente, estas planchas tienen una escala de trabajo 1:10.000 y 1:5000 respectivamente, por lo que al adecuar la información a una escala superior podemos decir que las extensiones de las unidades geomorfológicas son ampliamente variables y no todas cumplen con una extensión de terreno de dimensión suficiente para ser cartografiable a escala 1:25,000, Se encontró una limitante en la caracterización de estas unidades, pues la información de la cartografía que se encuentra en los Datos Abiertos - Geoportal Alcaldía de Manizales, más específicamente en los códigos que definen las unidades está incompleta o no cumplen con la nomenclatura sugerida en (Ávila et al., 2015) en el formato del anexo A-4 y en (Robertson et al., 2013), tanto para la cartografía rural y urbana respectivamente.

La geomorfología de la fuente municipal está en diferentes rangos, ya que el área urbana está en el rango de componente y la cartografía rural está en el rango de unidad, por lo que en la generación del “Mapa 14” solo se adecuaron las unidades que cumplían con un rango cartografiable a escala 1:25,000, su clasificación como factor condicionante se encuentra en Anexos, Anexo 1 “Tabla 13”

11.2.11. Ocupación y Uso De Suelos

Mapa 15

Mapa de usos y ocupación del suelo



Nota. Las unidades que mas ocupan el territorio son las relacionadas con las actividades Agroforestal y la pecuaria; Ver carpeta de anexos, Anexos_mapas, Mapa_uso_de_suelo.

El Mapa 15 de ocupación y uso del suelo presentado en este trabajo es una modificación y unión de la cartografía rural y urbana presentada en el plan de ordenamiento territorial de la ciudad de Manizales 2017 -2031, en su apartado Cartografía, diagnóstico, unidades geomorfológicas rural y urbano cuyas planchas corresponden a:

- D-8 USOS DEL SUELO RURAL_2017 .
- D-2C COBERTURA Y USO DEL SUELO_PERÍMETRO_URBANO_2017.

Dirección de enlace en

[“https://drive.google.com/drive/folders/1KutQt6olsiKoKV2x_EL2N5hiMEZV9xxZ”](https://drive.google.com/drive/folders/1KutQt6olsiKoKV2x_EL2N5hiMEZV9xxZ)

Originalmente, estas planchas tienen una escala de trabajo 1:10.000 y 1:2000 respectivamente, por lo que al adecuar la información a una escala superior podemos decir que las extensiones de la cartografía que representa la cobertura y del uso del suelo son ampliamente variables y no todas cumplen con una extensión de terreno de dimensión suficiente para ser cartografiable a escala 1:25,000.

La cobertura del suelo corresponde a aquellos elementos que se encuentran sobre la superficie del terreno, ya sean naturales o artificiales generados por el hombre, por lo tanto, esto quiere decir que corresponde a toda la vegetación presente y todo tipo de construcción destinada al desarrollo de actividades relacionadas con las necesidades humanas, para (C. J. van Westen et al., 2008) “el cambio en la cobertura de la tierra, en general son considerados factores estáticos dentro de los análisis de amenaza y pueden ser incluidos como capas de información independientes que representan las condiciones actuales de vegetación o la dinámica antrópica dentro del territorio” su clasificación como factor condicionante se encuentra en Anexos, Anexo 1 “Tabla 14”.

11.3. Análisis de susceptibilidad

Según (Corominas et al., 2013), “un mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra, subdivide el terreno en zonas con diferentes probabilidades de que ocurran deslizamientos de tierra de cierto tipo”

La evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra puede considerarse el paso inicial hacia una evaluación de peligros y riesgos de deslizamientos de tierra, pero también puede ser un producto final en sí mismo que se puede utilizar en la planificación del uso de la tierra y la evaluación del impacto ambiental. Este es especialmente el caso en los análisis a pequeña escala o en situaciones en las que no se dispone de información suficiente sobre la ocurrencia de deslizamientos de tierra en el pasado para permitir la evaluación de las probabilidades espaciales y temporales de los eventos. (Corominas et al., 2013)

Lo anterior enfatiza la necesidad de tener inventarios detallados de deslizamientos de tierra antes de realizar cualquier procedimiento de evaluación de susceptibilidad.

Los métodos sugeridos en la guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000 no restringen la posibilidad de usar otro tipo de técnicas y análisis más rigurosos de acuerdo con la información disponible y el conocimiento experto del área de estudio.

Existen diferentes métodos que permiten establecer a escalas regionales la susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa, para (Aristizábal-Giraldo et al., 2019). Entre los

métodos más utilizados se encuentran los métodos estadísticos bivariado y multivariado, los cuales exigen un inventario de procesos de remoción en masa.

El método estadístico que se busca aplicar se denomina “pesos de evidencia – WofEel” el método Pesos de Evidencia (WoE por sus siglas en inglés) hace parte de los métodos cuantitativos para el estudio y cálculo de la susceptibilidad por movimientos en masa.

WoE está sustentado en el teorema de Bayes y en los conceptos de probabilidad conocida y posterior (Pamela et al., 2018; Regmi et al., 2010) en (Goyes-Peñañiel & Hernandez-Rojas, 2021). A través de su implementación, es posible calcular la importancia relativa de los factores condicionantes con un significado estadístico (Ilia y Tsangaratos, 2016) en (Goyes-Peñañiel & Hernandez-Rojas, 2021). Este método evalúa patrones de asociación entre los factores condicionantes (evidencias) y las áreas inestables mediante pesos.

El peso de cada factor se calcula aplicando un enfoque bayesiano que considera la probabilidad incondicional y condicional de que ocurra un movimiento en masa (Bonham, 1994). La probabilidad incondicional (previa) se calcula con los mismos tipos de movimientos en masa que ocurrieron en el pasado en un periodo determinado y puede ser modificada de modo que al agregar una nueva evidencia la probabilidad cambia y se genera entonces una probabilidad (condicionada) llamada probabilidad posterior (Bonham, 1994) .

El fundamento matemático según (Bonham, 1994) asume que el deslizamiento L ha sucedido en un área p veces; si el área total es q , entonces la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento es:

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

Donde n representa el número de veces que se repite L; si W_i representa un factor condicionante donde se tienen clases de $i = 1 \dots m$ entonces (Bonham, 1994).

$$p\langle L|W_i \rangle = \frac{p(W_i \cap L)}{p(W_i)}$$

Según Bonham (1994) se expresa la ecuación anterior en función de las proporciones en lugar de la probabilidad, se tiene que:

$$O(L) = \frac{p(L)}{p(L)} = \frac{p(L)}{1-p(L)} = \frac{p}{q-p}$$

$$O\langle L|W \rangle = \frac{p\langle L|W_i \rangle}{p\langle L|W_i \rangle}$$

Por lo tanto, se llamará pesos de evidencia a las siguientes ecuaciones:

$$+W_i = \ln \frac{p\langle W_i|L \rangle}{p\langle W_i \rangle} \quad -W_i = \ln \frac{p\langle W_i \rangle}{p\langle W_i|L \rangle}$$

El detalle de esta formulación matemática se presenta en (Bonham, 1994). (Van Westen, 1993) plantea que en términos de píxeles el área q está compuesta por un número total de píxeles $N = N_{pix1} + N_{pix2} + N_{pix3} + N_{pix4}$, y que se cumplen las relaciones presentadas en la “Tabla 25”. En términos gráficos, la relación deslizamiento y factor condicionante se muestra en la “Figura 4”.

Tabla 7

Relación deslizamientos L y factor condicionante w.

		w: Factor condicionante con potencialidad de deslizamientos		
		Presente	Ausente	
L:	Presente	Npix1	Npix2	Área total deslizada
Deslizamientos	Ausente	Npix3	Npix4	Área total no deslizada
		Área total con unidad w	Área total sin unidad w	Área total del mapa

Nota. Relación en en análisis de los factores condicionantes por pixeles Modificado de (E. A.

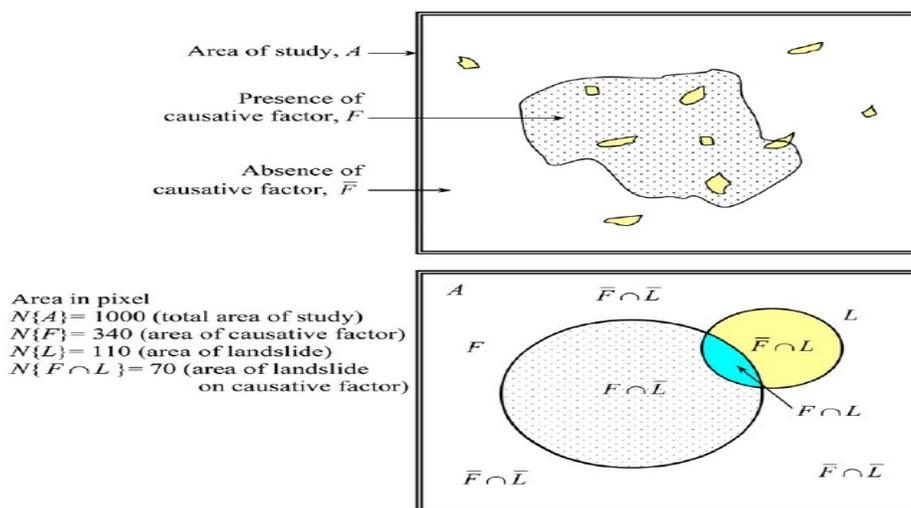
Rodríguez et al., 2017).

La “Figura 2” y la “Tabla 7” se puede interpretar de la siguiente forma según (E. A. Rodríguez et al., 2017):

- Npix1 = hay presencia del factor condicionante (Npix3) en el deslizamiento (Npix2).
Lo cual es indicativo de una muy alta significancia de ese factor en el deslizamiento.
- Npix2 = no hay presencia del factor condicionante (Npix3) en el deslizamiento (Npix2).
Lo cual es indicativo de una significancia alta por efecto de la presencia del deslizamiento.
- Npix3 = factor condicionante.
Lo cual es indicativo de una significancia media por efector del factor que alguna vez contribuyó al deslizamiento.
- Npix4 = no hay deslizamiento ni factor condicionante. Lo cual es indicativo de una significancia baja.

Figura 2

Representación gráfica de la relación deslizamiento y factor condicionante



Nota. Fuente (Modified after Bonham-Carter, 2002 en (Dahal, Hasegawa, Nonomura, Yamanaka, Dhakal, et al., 2008)

Los pesos se pueden expresar en términos de píxeles como:

- Para el peso positivo:

$$W_i^+ \text{ peso positivo} = \ln \frac{\frac{N_{pix 1}}{N_{pix 1} + N_{pix 2}}}{\frac{N_{pix 3}}{N_{pix 3} + N_{pix 4}}}$$

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

- $W_i + > 0$: Positivo, indica que la presencia del factor contribuye a la presencia del deslizamiento, su magnitud indica el grado de correlación directa o el grado de contribución.
- $W_i + < 0$: Negativo, indica que la presencia del factor contribuye a la ausencia del deslizamiento, su magnitud indica el grado de correlación inversa.
- $W_i + = 0$: Indica que el factor no es relevante.
- Para el peso negativo:

$$W_i^- \text{ peso negativo} = \ln \frac{\frac{N_{pix 2}}{N_{pix 1} + N_{pix 2}}}{\frac{N_{pix 4}}{N_{pix 4} + N_{pix 3}}}$$

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

- $W_i - > 0$: Positivo, indica que la ausencia del factor contribuye a la presencia del deslizamiento.
- $W_i - < 0$: Negativo, indica que la ausencia del factor contribuye a la ausencia del deslizamiento.
- $W_i - = 0$: Indica que el factor no es relevante.

Los pesos de evidencia $W_i +$ y $W_i -$ se deberán calcular para cada clase del factor.

Peso final W_f , el cual da una medida de correlación entre el factor condicionante y los movimientos en masa.

El peso final W_f será cero cuando la distribución espacial de los movimientos en masa es independiente del factor considerado, es positivo cuando existe una asociación positiva (la presencia del factor contribuye a la ocurrencia del movimiento en masa) y negativo cuando existe una asociación negativa (la ausencia del factor contribuye a la ocurrencia del movimiento en masa) (E. A. Rodríguez et al., 2017).

$$W_f \text{ peso final} = W_f = W_{\text{positivo}} - W_{\text{negativo}}$$

La función final de susceptibilidad o LSI (Landslide susceptibility index) corresponde a la sumatoria de cada W_f calculado para cada factor contribuyente incluido en el análisis:

$$LSI = W_f \text{Pendiente} + W_f \text{Curvatura} + W_f \text{UGS} + W_f \text{Geomorfología} + W_f \text{Uso y Cobertura} + W_f \dots$$

11.3.1. Procesamiento Estadístico Para El Factor Condicionante Altura.

Tabla 8

Procesamiento estadístico para el factor condicionante altura.

1	2	3	4	5
Categoría	Movimiento (pix)	% Movimiento	Clase (pix)	% Clase
0 – 809 MSNM	0	0	26	0
809 - 1.309 MSNM	796	1,23	699663	24,76
1.309 - 1.809 MSNM	7549	11,71	598495	21,18
1.809 - 2.309 MSNM	50438	78,24	596723	21,12
2.309 - 2.809 MSNM	3593	5,57	389695	13,79
2.809 - 3.309 MSNM	1476	2,29	256485	9,08
3.309 - 3.849 MSNM	615	0,95	284219	10,06
TOTAL	64467	100%	2825306	100%

Nota. El rango de altura 1.809 - 2.309 MSNM contienen 78,24 % de los movimientos en masa de este factor condicionante.

Tabla 9

Pesos finales para la variable Altura aplicando el método WofE.

6	7	8	9	10	11	12
Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	Wi+	Wi-	Wf
0	64614	26	0	0,0000000	0,0000000	0,0000000
796	63818	698867	2061825	-17,3675722	0,2794940	-17,6470663
7549	57065	590946	2169746	-10,0301041	0,1166311	-10,1467352
50438	14176	546285	2214407	-1,2517009	-1,2963840	0,0446831
3593	61021	386102	2374590	-20,6599909	0,0934435	-20,7534345
1476	63138	255009	2505683	-40,9119615	0,0738117	-40,9857732
615	63999	283604	2477088	-45,3090151	0,0988340	-45,4078492
TOTAL						-134,896175272

Nota. El Wf fina para el rango de altura 1.809 - 2.309 MSNM es cercano a cero “0” lo que significa que la distribución espacial de los movimientos en masa es independiente del factor considerado.

Para las tablas de procesamiento estadístico de los factores condicionantes se hacen las siguientes observaciones:

- Se Anexa al documento las tablas en referencia que son soporte del proceso investigativo “Anexos, Anexo 1 Tablas de clasificación de factores y procesamiento estadístico de los factores condicionantes”.
- Las cantidades de la tabla se expresan en número de píxeles.
- El tamaño del pixel utilizado en los cálculos fue de 12.5 x 12.5 m.
- El mapa de alturas y todos los demás se realizaron a partir del DEM ALOS-PALSAR DE 12,5
- En la columna 1 se presentan las categorías de Altura en metros.

- En la columna 2 se presenta el número de píxeles con deslizamientos que corresponden a cada clase del factor Altura.
- En la columna 3 se presenta el porcentaje de deslizamientos correspondiente a cada clase del factor Altura.
- En la columna 4 se presenta el número de píxeles correspondiente a cada clase del factor Altura.
- En la columna 5 se presenta el porcentaje de cada clase del factor Altura.
- En la columna 6 Npix1 representa el número de píxeles con deslizamientos que corresponden a cada clase del factor Altura.
- En la columna 7 Npix2 representa el Total Mov – Npix1
- En la columna 8 Npix3 representa la “Clase – Npix1”
- En la columna 9 Npix4 representa el “Total Clase – Npix3”
- En la columna 10 se presenta los valores para el peso positivo aplicando WofE.
- En la columna 11 se presenta los valores para el peso negativo aplicando WofE.
- En la columna 12 se presenta el peso final o contraste.

11.4. Cálculo de susceptibilidad.

Una vez obtenidos los pesos finales para cada clase y variable, se realiza una suma algebraica para el cálculo de la función final de susceptibilidad o LSI (Landslide Susceptibility Index).

$$\text{LSI} = (\text{Wf Pendiente}) + (\text{Wf Curvatura}) + (\text{WfUGS}) + (\text{Wf Geomorfologia}) + (\text{Wf Uso y cobertura del suelo}) + (\text{Wf Distancia a Vias}) + (\text{Wf Distancia a Fallas}) + (\text{Wf Distancia a drenajes}) + (\text{Wf Direccion de máxima pendiente "aspecto"}) + (\text{Wf Alturas}) + (\text{Wf Dirección de flujo})$$

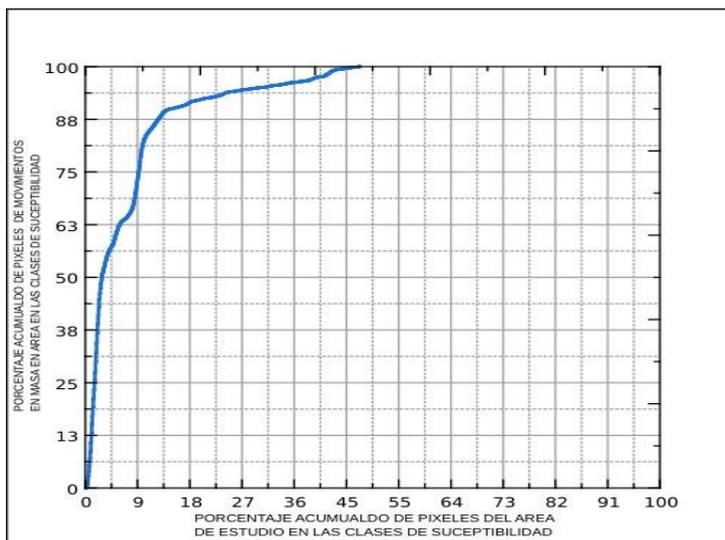
11.5. Curva de éxito.

La curva de éxito “Figura 3” mide la bondad de ajuste de la función de susceptibilidad a los movimientos en masa inventariados y para su construcción se deben ordenar los valores de la LSI en orden descendente y dividirlos en percentiles de 100 categorías y su respectiva área acumulada, el porcentaje de área deslizada en cada una de ellas con la muestra usada para el cálculo de la función de susceptibilidad. (Dahal, R. K., y otros, 2008) en (E. A. Rodríguez et al., 2017).

Cada grupo de 1% se deberá cruzar con la variable de agrupamiento para determinar con cuántos pixeles de la variable tiene relación. Para la elaboración de la curva de éxito se trazan en el eje X los grupos percentiles del LSI de menor a mayor cada 1%, de forma que a la izquierda se ubique el percentil 1 (susceptible), a la derecha el percentil 100 (no susceptible) y en el eje Y se ubican los valores porcentuales cada 1% de los movimientos en masa correspondientes con el percentil del LSI (Blahut et al., 2010) en (E. A. Rodríguez et al., 2017).

Figura 3

Curva de éxito



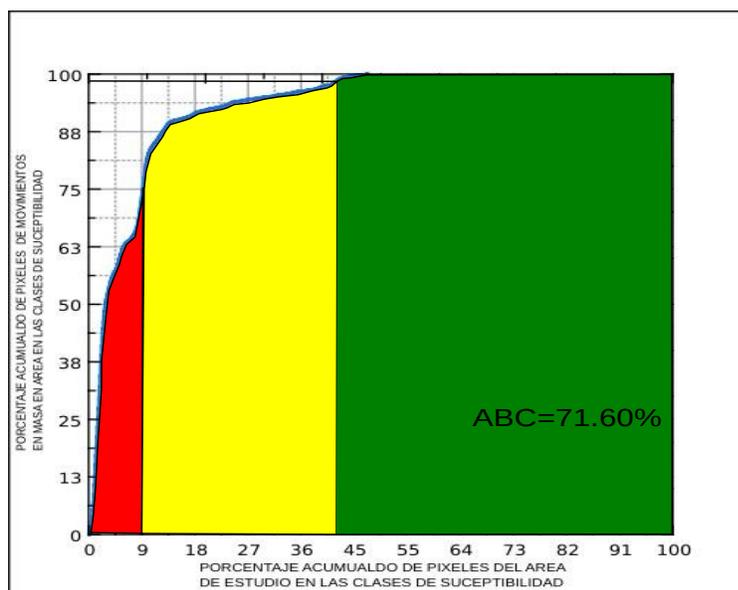
Nota. Esta curva se construyó en términos del área total de la zona de estudio y el área total de los movimientos en masa considerados.

Posteriormente a la realización de la curva de éxito y el cálculo del área bajo la curva, es necesario establecer las categorías de susceptibilidad, “Figura 4” para esto como lo señala la guía se debe marcar en la ordenada el 75% hasta llegar al punto de intercepción con la curva, en este se debe medir el valor de la abscisa en este punto, este valor es el correspondiente al percentil límite de la susceptibilidad alta; en este trabajo la intercepción en el eje x dio 9,9 % correspondiente la representación en rojo. Para determinar el límite entre susceptibilidad media y baja se hace el mismo procedimiento, pero en la ordenada se marca el 98%; la intercepción de este valor con la curva, marcó en la abscisa 42 % y corresponde la representación en color

amarillo para susceptibilidad media. El resto de la curva representa la susceptibilidad baja y se representa en verde.

Figura 4

Curva de éxito categorizada



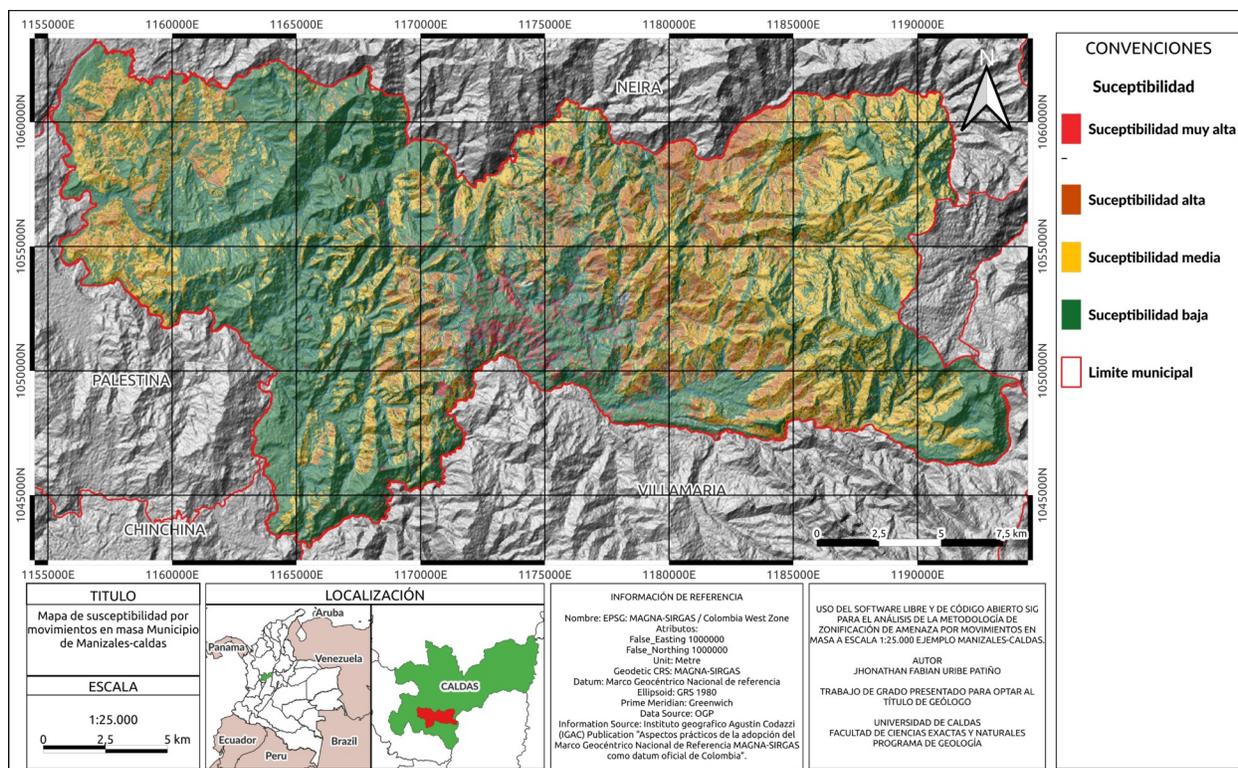
nota. límite de la susceptibilidad alta; en este trabajo la intersección en el eje x dio 9,9 % correspondiente la representación en rojo.

El mapa de susceptibilidad por deslizamiento en el municipio de Manizales, según el método estadístico bivariado, “Mapa 16” se categorizó en 4 rangos muy alto, el rango muy alto corresponde a los movimientos de masa en el inventario de procesos, alto, medio y bajo y se muestra a continuación.

11.6. Mapa de susceptibilidad.

Mapa 16

Mapa de Susceptibilidad generado a partir de la metodología aportada por el SGC, 2017



Nota. Ver carpeta de anexos, Anexos_mapas, Mapa_susceptibilidad.

Tabla 10*Descripción de las categorías de susceptibilidad*

Susceptibilidad	Descripción	Área m ²	Porcentaje
Muy alta	Movimientos en masa del inventario de procesos morfodinámicos, tipo flujo, avenidas torrenciales y deslizamientos	10086875	2,34%
Alta	Corresponden laderas con valores de inclinación muy abruptos, y/o zonas de alta erosión por poca o nula cobertura vegetal, o su actividad productiva puede ser pecuaria o de cultivos.	42139375	9,78%
Media	Corresponden a laderas con valores de inclinación abruptas a Muy abruptas ya geformas residuales donde la cobertura del suelo es forestal y de usos múltiples.	131006718	30,4%
Baja	Corresponden a laderas con topografía medianamente regular, pendientes medias a bajas y a zonas buena cobertura boscosa o silvopastoril y de actividad agrícola.	247742343	57,48%
Total		430975311	100%

Nota. La categoría baja y media ocupan 87.52 % del territorio municipal, lo que nos indica al menos en este estudio que la susceptibilidad a deslizamientos alta en el municipio de Manizales ocupa el 12,12 % del área total

11.6.1. Susceptibilidad muy alta

En el municipio la susceptibilidad muy alta ocupa una extensión de 2,34 % del área total y se encuentra distribuida en la zona central (casco urbano), esto se debe a que la mayoría de reportes de movimientos en masa de las fuentes consultadas (SIMMA, Corpocaldas), se han concentrado en esta área.

Esta susceptibilidad muy alta principalmente tiene una correlación con las zonas cercanas al trazo de las fallas Chipre, el Perro, Cementerio, Manizales-Aranzazu y el sistema de fallas solferino Ver “Mapa 3” también podemos relacionarla con los depósitos caída piroclástica y los volcano-detríticos de las formaciones Casabianca y Manizales Ver “Mapa 13”.

11.6.2. Susceptibilidad alta

Para Manizales se encuentra distribuida en la parte más Nor-Occidental y centro oriental del municipio, la susceptibilidad Alta ocupa un 9.78 % del área total y se encuentra con mayor presencia en las veredas (Colombia, guacas, Arenillo, Manzanares, La Argelia, alto Tablazo, El Rosario, Buena Vista, El Porvenir, Alto del Guamo, Alto Bonito, Río blanco, Minitas).

Estas zonas de susceptibilidad Alta se asocian a pendientes Fuertes, y a un uso de suelo agrícola, pecuario y forestal Ver “Mapa 15”, en la zona Nor-occidental del municipio las podemos correlacionar al sistema de falla Romeral – Cauca y a la roca meteorizada del complejo Quebrada Grande, roca meteorizada del stock diorítico Gabroide Chinchiná – santa Rosa, Roca meteorizada de la secuencia Irra -Tres Puertas Ver “Mapa 13”, en la zona oriental pueden estar relacionadas fuertemente con los depósitos caída piroclástica y a un uso de suelo pecurio-forestal.

11.6.3. Susceptibilidad media

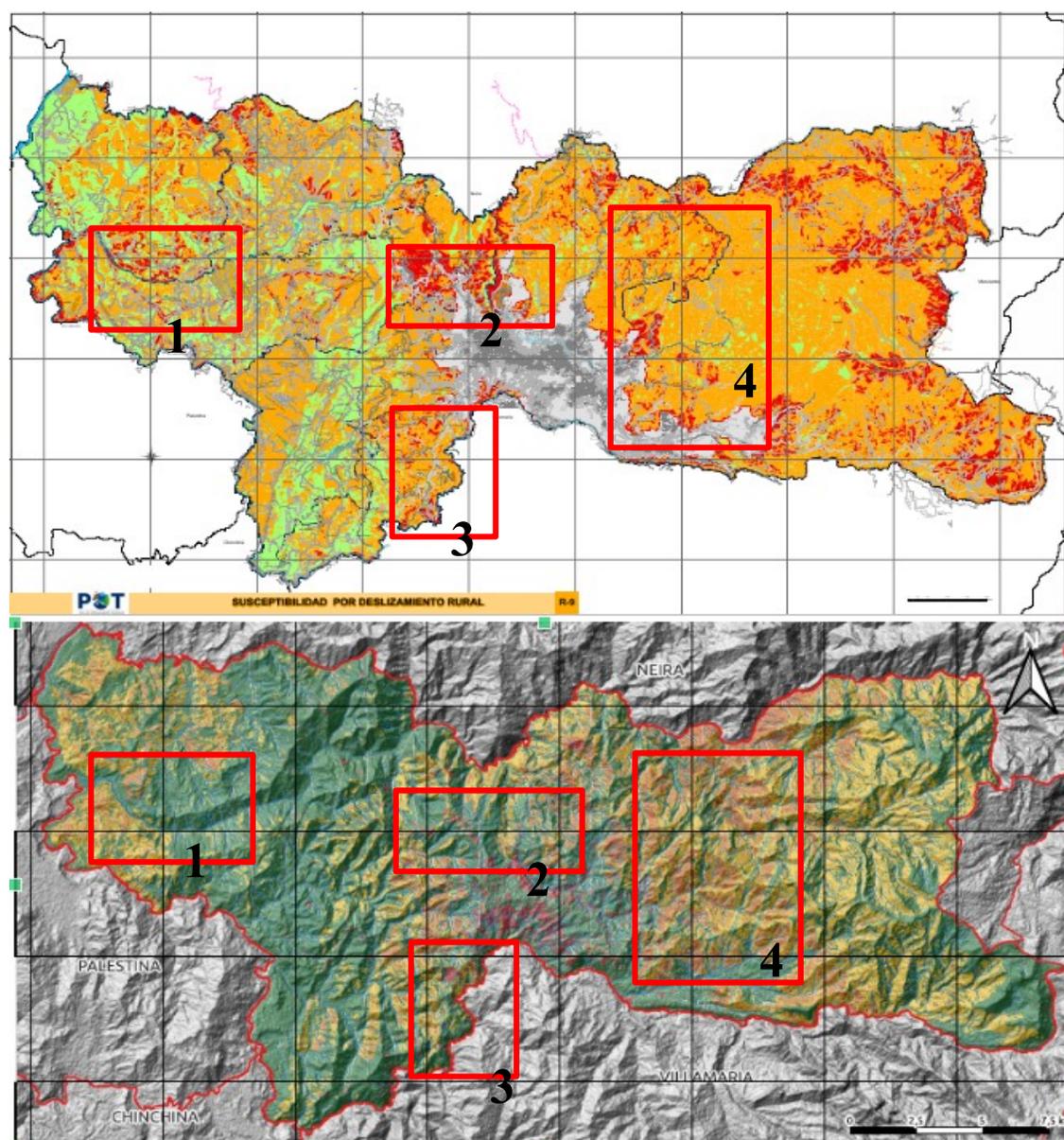
Para el municipio de Manizales la susceptibilidad media ocupa un 30,4 % del área total y se encuentra distribuida en todo el municipio pero con mayor presencia en la zona occidental y centro oriental (veredas el paraizo , Chupaderos, El desquite, La Esperanza, La Cabaña, La Pola, Bajo tablazo, San Perigrino, El Chuzo, Colombia, Santa Clara, Cuchilla del Salado, Guacas y El Avertino). Estas zonas de susceptibilidad media se asocian a pendientes moderadas a fuertes y geomorfológicamente se asocian a geoformas de ambiente estructural Mapa “14”; esta susceptibilidad esta influenciada por usos de suelo Agrícolas en el centro occidente y pecuario al oriente “Mapa 15”, en la zona Cento-occidental del municipio las podemos correlacionar al sistema de fallas Romeral – Cauca “Mapa 3” y a la roca meteorizada del complejo Quebrada Grande, roca meteorizada del stock diorítico Gabroide Chinchiná – santa Rosa.

11.6.4. Susceptibilidad Baja

La susceptibilidad baja Para el municipio de Manizales es predominante para el municipio al menos en este trabajo ocupando 57.48 % del área total, se encuentra distribuida principalmente en el occidente del municipio (veredas Lisboa, La Trinidad, Cascarero y La Cabaña) pero también está presente en todo el municipio en pequeños sectores. Geomorfológicamente responde vertientes estructurales “Mapa 14”. El uso de suelo correlacionable esta casi específicamente relacionado con la agricultura Ver “Mapa 15”, y influenciado especialmente por los suelos residuales de la secuencia sedimentaria Irra-Tres Puertas, complejo Aquia, y stock diorítico gabroide Chinchina-Santa Rosa, además de las rocas meteorizadas de estas unidades.

Figura 5

Figura comparativa entre el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del municipio de Manizales POT-2017-2031 y el mapa obtenido en este trabajo de grado



Nota. Los recuadros incrustados en la figura, representan las zonas donde la susceptibilidad alta de los dos productos cartográficos, tiene mayor similitud.

12. Conclusiones

- Los resultados de la implementación de la guía metodológica aplicada en esta investigación proporcionaron ubicaciones espaciales de las categorías de susceptibilidad coherentes con las condiciones geológicas y geomorfológicas y de uso de suelo, presentes en el municipio de Manizales, acercándose a los mapas oficiales del POT-2017-2031, teniendo en cuenta que los factores condiciones utilizados por el municipio se desconocen lo cual puede ser la diferencia entre las áreas de susceptibilidad media y alta presentes en los mapas “Figura 5”.
- La información existente de los factores condicionantes y la cartografía de procesos morfodinámicos existentes permitieron implementar el método estadístico bivariado y hacer un cálculo probabilístico de la susceptibilidad.
- Al medir la bondad de ajuste de la función de susceptibilidad con la curva de éxito, el área bajo la curva (ABC) dio un valor de 71.60 %, el cual suficiente para la validación del método.
- El software libre y de código abierto utilizado en esta tesis (QGIS, GRASS GIS, SAGA GIS, LABPLOT), permitieron llegar a una conclusión cercana a los mapas oficiales del municipio de Manizales, lo cual afirma que estos software están aptos para utilizar la metodología estadística planteada en la guía metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos en masa escala 1:25000 del servicio geológico colombiano (SGC) en su apartado de análisis de la susceptibilidad.

- La falta de datos abiertos y de uso civil para de los diferentes factores condicionantes que requiere el método para la zonificación de amenazas por movimientos en masa escala 1:25000 del servicio geológico colombiano (SGC) limito de gran manera la obtención de resultados más completos en el análisis de susceptibilidad para Manizales-caldas.
- El enfoque del uso de software libre y de código abierto SIG para la obtención de resultados para el análisis de la susceptibilidad a nivel cartográfico refuerzan la idea de la madurez del software libre para el uso institucional en diferentes áreas para la aplicación en diversos campos y genera una verdadera alternativa para las instituciones y municipios que no tiene los recursos para pagar licencias privativas de software especializado..

13. Recomendaciones

- Se recomienda a las autoridades e instituciones relacionadas con la gestión del riego del municipio de Manizales – Caldas, especial atención a las zonas que en la “Figura 5” aparecen con un recuadro rojo, los cuales zonifican las áreas con mayor similitud en los productos contrastados siendo estos el mapa de susceptibilidad de deslizamiento del POT-2017-2031 y el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa generado en este trabajo de grado.

Las veredas del municipio vinculadas a los recuadros son:

Recuadro 1. Colombia, La Cabaña, Lisboa.

Recuadro 2. La Linda, La cuchilla Del Salado, la palma, Alto corinto y Bajo Corinto.

Recuadro 3. El Arenillo, Alto Tablazo, Guacas, El Avertino, Bajo Tablazo, Java y La

Siria.

Recuadro 4. Hoyo Frío, Sinaí, Buenavista, Minitas, Belmira, San Juan, Alto Del guamo, La Enea parte rural.

- Se recomienda a las autoridades e instituciones relacionadas con la gestión del riego del municipio de Manizales – Caldas, poner a disposición del público en general los datos cartográficos y productos relacionados con la topografía, la geología, la geomorfología, el clima y demás datos de temática cartográfica para la zonificación de riesgo y amenaza, ya que una de las limitantes para la generación de estudios académicos y civiles de este tipo, es el poco acceso a los datos de manera pública.
- Se recomienda continuar con las etapas del proceso de zonificación planteados en la guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000 del (SGC), en este caso la caracterización de la amenaza, ya que en este trabajo solo se caracterizo la susceptibilidad a deslizamientos utilizando las herramientas de software libre y de código abierto sig, el análisis de la amenaza básicamente se vio limitada por la escasa información publica sobre los factores detonantes planteados en la guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000, los cuales consisten en la información relacionada con sismos y lluvias, siendo estos los factores detonantes recomendados para el análisis y la zonificación de la amenaza por movimientos en masa según la guía del “SGC”, por lo cual se invita a continuar con la zonificación de la amenaza a movimientos en masa utilizando software libre y de código abierto siempre y cuando la información de los factores detonantes para el municipio de Manizales este al alcance.

14. Bibliografía

- Aguirre, M., & Gutierrez, J. C. (1993). Modelo tridimensional de las formaciones superficiales de Manizales. *Universidad de Caldas Facultad de Geología y Minas–PADEM, Manizales.*
- Aguirre, O. R., & López, J. A. (2003). Cartografía geológica y petrografía del Stock de Manizales y su relación con sus rocas encajantes. *Manizales, Colombia. Trabajo de grado (Geólogo). Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Programa de Geología.*
- Alcadía de Manizales. (2017). *PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL MUNICIPIO DE MANIZALES 2017-2031.* 184.
- Arango-escobar, J. E., Toro-toro, L. M., Moreno-sánchez, M., & Arango-escobar. (2021). *Petrografía y evolución tectónica de los esquistos del Complejo Arquía , al occidente de Manizales en el sector de La Manuela , vías Palestina y Chinchiná , Colombia.* 43, 63-86.
- Aristizábal-Giraldo, E., Vasquez Guarin, M., & Ruíz, D. (2019). Métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa. *TecnoLógicas*, 22(46), 39-60. <https://doi.org/10.22430/22565337.1247>
- Avendaño-Cipagauta, A. Z., & Cadena-Melo, Y. K. (2014). *Uso de Sistemas de Información Geográfica en la determinación de amenazas por inundación en el municipio de Chía.* UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.
- Ávila, G. E., Cubillos, C. E., Granados, A. E., Bello, E., Rodríguez, É., Rodríguez, C. E., & Ruiz, G. L. (2015). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. *Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.*

- Beltrán Rincón, L. C. (2019). *ELABORACIÓN DE UN INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA MEDIANTE TÉCNICAS GEOMÁTICAS EN EL MUNICIPIO DE VILLETA CUNDINAMARCA*. UNIVERSIDAD DE CIENCIAS APLICADAS Y AMBIENTALES.
- Bonham, c. c. (1994). *Geographic Information System for Geoscientists: Modelling with GIS* (vol.13). Ottawa: Pergamon Press.
- Bonilla, M. C., Benjumea, S., Restrepo-Echavarría, J. L., & Toro-Toro, L. M. (2021). Análisis petrográfico y condiciones P-T para las rocas de media presión del Complejo Cajamarca reportadas al este de la ciudad de Manizales. | Sociedad Colombiana de Geología. *sociedad colombiana de geologia*. <https://sociedadcolombianadegeologia.org/analisis-petrografico-y-condiciones-p-t-para-las-rocas-de-media-presion-del-complejo-cajamarca-reportadas-al-este-de-la-ciudad-de-manizales/>
- Cardona Noreña, N., & Serna Yepes, M. (2019). *ANÁLISIS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LA GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA, ESCALA 1:25000 DEL SGC EN LA VEREDA KERMAN, MUNICIPIO DE QUIMBAYA, QUINDÍO*. Universidad Católica de Manizales.
- Celis, S. A., Giraldo Villegas, C. A., Toro Toro, L. M., & Osorio Granada, E. (2016). PETROGRAFÍA Y CARTOGRAFÍA DE LA AUREOLA DE CONTACTO DE LA GRANODIORITA DE MARIQUITA (DEPARTAMENTO DEL TOLIMA, CORDILLERA CENTRAL COLOMBIANA). *Boletín de Geología*, 38(2), 31-40. <https://doi.org/10.18273/revbol.v38n3-2016002>
- Chen, T., Niu, R., & Jia, X. (2016). A comparison of information value and logistic regression models in landslide susceptibility mapping by using GIS. *Environmental Earth Sciences*, 75(10), 867. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5317-y>
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.-P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M. G., Pastor,

- M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., & Smith, J. T. (2013). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Dhakal, S., & Paudyal, P. (2008). Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology*, *102*(3-4), 496-510. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.041>
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Masuda, T., & Nishino, K. (2008). GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*, *54*(2), 311-324. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0818-3>
- Diaz Villarraga, J. A. D. (2013). *USO DE SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA SIG PARA ANÁLISIS DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA DENTRO DE ZONAS DE ALTA VULNERABILIDAD, SECTOR CIUDAD BOLÍVAR, BOGOTÁ*. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.
- Dionne, J.-C. (1991). Campy, M et Macaire, J. J. (1989) Géologie des formations superficielles (Géodynamique—Faciès—Utilisation). Masson, Paris, 433 p., 304 fig., 5 tabl., 17 x 24 cm, 78 \$ can. *Géographie physique et Quaternaire*, *45*(1), 118. <https://doi.org/10.7202/032851ar>
- Duran Ferreira, H. Y. (2018). *Zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25000, mediante métodos estadísticos bivariado y multivariado para el municipio de Heliconia, Departamento de Antioquia*. UNIVERSIDAD EAFIT.
- esri. (2022). *Función de curvatura—Ayuda | ArcGIS for Desktop*. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>

- Estepa Rojas, J. C., & Talero Rodriguez, Y. A. (2016). *ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA PARA EL MUNICIPIO DE CUÍTIVA BOYACÁ A ESCALA 1:25.000*. UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA.
- Estrada, J. J., Viana, R., & González, H. (2001). *Geología de la Plancha 205 Chinchiná, Escala 1:100000, Memoria Explicativa*. 90.
- Gálvez Orozco, A. F. (2015). *ZONIFICACIÓN DE MANEJO AMBIENTAL BAJO CRITERIOS DE EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LA LADERA DEL BARRIO BAJO VILLA JARDÍN, MUNICIPIO DE MANIZALES, DEPARTAMENTO DE CALDAS*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- González, H. (2001a). Geología de las Planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruíz Escala 1:100.000 Memoria Explicativa. *Ingeominas*, 93.
- González, H. (2001b). Geología de las Planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruíz Escala 1:100.000 Memoria Explicativa. *Ingeominas*, 93.
- Goyes-Peñañiel, P., & Hernandez-Rojas, A. (2021). Doble evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa basada en redes neuronales artificiales y pesos de evidencia. *Boletín de Geología*, 43(1). <https://doi.org/10.18273/revbol.v43n1-2021009>
- Khoshtinat, S., Aminnejad, B., Hassanzadeh, Y., & Ahmadi, H. (2019). Application of GIS-based models of weights of evidence, weighting factor, and statistical index in spatial modeling of groundwater. *Journal of Hydroinformatics*, 21(5), 745-760. <https://doi.org/10.2166/hydro.2019.127>
- labSCN. (2022). *Análisis del relieve relativo y mapas sombreados de relieve · Laboratorio de Sistemas Complejos Naturales*. <https://labscn-unalmed.github.io/cartografia-digital/clases/clase-03.html>

- Lince, L., Castro, A., Castaño, W., & Torres, F. (2017). Zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa de suelo en la región cafetera de Caldas. *Revista Cenicafé*.
- Londoño Linares, J. P. (2007). Evaluación holística de riesgos frente a movimientos en masa en áreas urbanas andinas. Una propuesta metodológica. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 20, 55-72.
- López, J. A., Cuéllar, M. A., Aguirre, R., Valencia, M., & Sánchez, C. A. (2007). EVIDENCIAS PETROGRÁFICAS Y DE CAMPO DE UNA INTRUSIÓN SINTECTÓNICA EN LA CORDILLERA CENTRAL DE COLOMBIA: EL CASO DE LA MILONITA GRANÍTICA DEL GUACAICA. *memorias del XI Congreso Colombiano de Geología*, 17. <https://doi.org/10.13140/2.1.2115.5201>
- Martínez Muñoz, L. M., & García Idarraga, S. (2020). “*EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, ESCALA 1:25000, EN LA ZONA RURAL DEL MUNICIPIO DE RESTREPO, VALLE DEL CAUCA.*” Universidad Católica de Manizales.
- Molina, A. M., López, L. F., & Villegas, G. I. (2005). Los sistemas de información geográfica (SIG) en la planificación municipal. *Revista EIA*, 4, 21-31.
- Montenegro Rippe, C. A. (2017). *CARACTERIZACIÓN PETROLÓGICA DEL STOCK DE MANIZALES*. Universidad Nacional de Colombia.
- Naranjo Henao, J. L., & Ríos Alzate, P. A. (1989). Geología de Manizales y sus Alrededores y su Influencia en Los Riesgos Geológicos. *Revista Universidad de Caldas*, 10(1-3), 1-113.
- Olaya, V. (2020). *Sistemas de Información Geográfica*.
- Olaya, V. (2022). *Sistemas de Información Geográfica*.
<https://volaya.github.io/libro-sig/chapters/Geomorfometria.html>

- Parra Arias, A. M., & Quintero Londoño, J. S. (2016). *Cartografía, Petrografía y Análisis Deformativo de las Unidades Aflorantes al SE de Manizales entre los Sectores de Maltería y Gallinazo*. Universidad de Caldas.
- Quintero Betancurth, D., & Velez Franco, A. (2016). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE UNA ESCALA DE TRABAJO CARTOGRÁFICO 1:25000 FRENTE A UNA 1:1000, PARA LA ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA EN LOS ALREDEDORES DE LA CABECERA DEL MUNICIPIO DE SALAMINA*. UNIVERSIDAD DE MANIZALES.
- Quiroga Quiroga, S. (2021). *Evaluación de la amenaza por deslizamiento en el lote 17001010800310001000, urbanización Juanchito, sector de Maltería, km 4 vía al Magdalena,(Manizales-Caldas)*. Universidad de Caldas.
- Regmi, N. R., Giardino, J. R., & Vitek, J. D. (2010). Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology*, 115(1-2), 172-187. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.10.002>
- Robertson, K. G., Jaramillo, O., & Castiblanco, M. A. (2013). *Guía metodológica para la elaboración de mapas geomorfológicos a escala 1: 100.000*. IDEAM, Bogotá.
- Rodríguez Contador, D. S. (2019). *ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA A ESCALA 1:25.000 PARA EL MUNICIPIO DE CHINCHINÁ, CALDAS* [UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA]. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23887/1/ZONIFICACION%20DE%20AMENAZAS%20POR%20MOVIMIENTOS%20EN%20MASA%20A%20ESCALA%201-25.000.%20CHINCHIN%20CALDAS%20.pdf>
- Rodríguez, E. A., Sandoval, J. H., Chaparro, J. L., Medina, E., Ramírez, K. C., Castro, E., Castro, J. A., & Ruiz, G. L. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza*

- por movimientos en masa escala 1: 25.000* (Servicio Geológico Colombiano).
<https://doi.org/10.32685/9789585978225>
- Rodríguez, G., & Arango, M. I. (2013). REINTERPRETACIÓN GEOQUÍMICA Y RADIOMÉTRICA DE LAS METABASITAS DEL COMPLEJO ARQUÍA. *Boletín de Geología*, 35(2), 65-81.
- Rodríguez Minaya, Y. E. (2018). *Determinación de las relaciones entre los parámetros geomorfológicos de las subcuencas de la cuenca marañón mediante Gis, 2016* [Ms]. UNIVERSIDAD NACIONAL “SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO”.
- SAGA-GIS. (2022). *Module Fill Sinks (Wang & Liu) / SAGA-GIS Module Library Documentation (v2.2.1)*.
https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc/2.2.1/ta_preprocessor_4.html
- Sánchez Osorio, V. (2016). *APLICACIÓN DE PRODUCTOS DE SENSORES REMOTOS Y SIG EN LA GENERACIÓN DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS [ESPECIALIZACIÓN]*. UNIVERISDAD DE MANIZALES.
- Sierra, G. M., Silva, J. C., & Correa, L. G. (2003). Estratigrafía secuencial de la Formación Amagá. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 15, 9-22.
- SIMMA. (2022). *Sistema de Información de Movimientos en Masa*. SIMMA.
<http://simma.sgc.gov.co/>
- UNGRD. (2017). Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes. En *Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo SNGRD*.
- Van Westen, C. J. (1993). *Application of geographic information systems to landslide hazard zonation*.
- van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3-4), 112-131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>

Wang, L., & Liu, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(2), 193-213.

<https://doi.org/10.1080/13658810500433453>

Westen, C. J. V., & Terlien, M. J. T. (1996). AN APPROACH TOWARDS DETERMINISTIC LANDSLIDE HAZARD ANALYSIS IN GIS. A CASE STUDY FROM MANIZALES (COLOMBIA). *Earth Surface Processes and Landforms*, 21(9), 853-868.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199609\)21:9<853::AID-ESP676>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199609)21:9<853::AID-ESP676>3.0.CO;2-C)