

Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa en el barrio Chipre, Manizales, Caldas utilizando herramientas geoinformáticas.

Juan Sebastián Grisales Noreña

Miller Anderson Pérez Rubiano

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Especialista en Sistemas de Información Geográficos

Director (a):

(Msc. En ciencia de la tierra) Carlos Marcelo Jaramillo

Universidad de Manizales

Facultad de ciencias e ingeniería

Especialización en sistemas de información geográficos

Manizales, 2022

RESUMEN

La gestión de riesgo y desastre junto con el Decreto 1807 de 2014, expresan de manera clara la importancia de realizar estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa, en donde se establecen los lineamientos, lo primero es el conocimiento del riesgo, seguido por la reducción del mismo y el manejo de los desastres. Al aunar esfuerzos con los SIG la identificación e interpretación de estos se hace mucho más sencilla.

Para conocer el riesgo en el área a intervenir primero se debe identificar y zonificar la amenaza y la vulnerabilidad con el fin de relacionar ambas, realizando una intersección en donde de acuerdo al grado de amenaza y vulnerabilidad se calcula el riesgo. La metodología utilizada se basó en el uso de perfiles de estabilidad de taludes los cuales son divididos en una malla, dando así un valor de factor de seguridad a cada cuadro de la malla, para después ser interpolados por medio de ArcMap usando el inverso de la distancia ponderada (IDW).

El proceso de interpolación se llevará a cabo para cuatro modelos, los cuales se dividen en análisis de susceptibilidad, escenario de lluvia, escenario de sismo y finalmente un escenario crítico que cuenta con la combinación de lluvia y sismo.

Si la información que se obtuvo se acerca a la realidad se cumplirá con los objetivos de la gestión del riesgo, la cual busca una mejorar la calidad de vida para las personas y su entorno.

Palabras clave: Susceptibilidad, amenaza, vulnerabilidad, riesgo, gestión del riesgo, factor de seguridad, SIG.

ABSTRACT

Risk and disaster management together with Decree 1807 of 2014, clearly express the importance of carrying out studies of threat, vulnerability and risk due to mass movement, where the guidelines are established, the first thing is the knowledge of the risk, followed by its reduction and disaster management by joining forces with GIS, the identification and interpretation of these becomes much easier.

To know the risk in the area to be intervened, the threat and vulnerability must first be identified and zoned in order to relate both, making an intersection where the risk is calculated according to the degree of threat and vulnerability.

The methodology used was based on the use of slope stability profiles which are divided into a mesh, this giving a safety factor value to each square of the mesh, to later be interpolated by means of ArcMap using the inverse of the distance weighted (IDW).

The interpolation process will be carried out for four models, which are divided into susceptibility analysis, rain, scenario, earthquake scenario and finally a critical scenario that has the combination of rain and earthquake.

If the information obtained is close to reality, the objectives of risk management will be met, which seeks to improve the quality of life for people and their environment.

Keywords: Susceptibility, threat, vulnerability, risk, disaffection, risk management, safety factor, GIS.

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	8
2.	Planteamiento del problema de investigación y su justificación	9
2.1	Descripción del área problemática y formulación del problema	9
2.2	Justificación	11
3.	Objetivos	13
3.1	Objetivo general	13
3.2	Objetivos específicos	13
4.	Antecedentes	14
5.	Referente normativo y legal	20
6.	Referente teórico	22
7.	Metodología	30
7.1	Enfoque metodológico	30
7.2	Tipo de estudio	30
7.3	Procedimiento	31
8.	Resultados	36
8.1	Localización	36
8.2	Área a intervenir	37
8.3	Procesos morfodinámicos e inventarios	40
8.3.1	Procesos morfodinámicos	40
8.4	Aspectos topográficos	43
8.4.1	Topografía	43
8.4.2	Pendientes	44
8.5	Aspectos geológicos	47
8.5.1	Geología local	47
8.5.2	Perfil del suelo	47
8.6	Unidades de geología para ingeniería	48
8.7	Aspectos geomorfológicos y morfometría	50
8.8	Cobertura del suelo, usos del suelo	54
8.8.1	Cobertura del suelo	54
8.8.2	Usos del suelo	58
8.9	Aspectos geotécnicos	60
8.9.1	Prospección geotécnica	60
8.9.2	Caracterización de la columna estratigráfica	61
8.9.3	Estabilidad de taludes	63
8.9.3.1	Perfiles de análisis	63
8.9.3.2	Análisis de susceptibilidad	65

8.9.4	Escenarios de amenaza	68
8.9.4.1	Escenario de lluvia	68
8.9.4.2	Análisis de amenaza en escenario de lluvia	71
8.9.4.3	Escenario de sismo	73
8.9.4.4	Análisis de amenaza en escenario de sismo	79
8.9.4.5	Análisis bajo escenario simultaneo: lluvia y sismo.	81
8.9.5	Caracterización y zonificación de la vulnerabilidad	83
8.9.5.1	Tipología	83
8.9.5.1.1	<i>Edificaciones</i>	83
8.9.5.1.2	<i>Red vial</i>	84
8.9.5.1.3	<i>Sistema de acueducto</i>	84
8.9.5.1.4	<i>Sistema de alcantarillado</i>	85
8.9.5.1.5	<i>Sistema de redes eléctricas</i>	85
8.9.5.2	Exposición	86
8.9.5.3	Fragilidad	87
8.9.5.3.1	<i>Fragilidad de edificaciones</i>	87
8.9.5.3.2	<i>Fragilidad de líneas vitales</i>	87
8.9.5.3.3	<i>Fragilidad de personas</i>	90
8.9.5.4	Escenarios de vulnerabilidad	90
8.9.5.4.1	<i>Movimientos de baja deformación (movimientos lentos)</i>	90
8.9.5.4.2	<i>Movimientos de alta velocidad de deformación (movimientos rápidos)</i>	92
8.9.5.5	Cálculo y zonificación de la vulnerabilidad	95
8.9.6	Caracterización y zonificación del riesgo	97
8.9.6.1	Evaluación del riesgo	99
8.10	Estructuración geodatabase	103
9.	DISCUSIÓN	105
10.	CONCLUSIONES	107
11.	RECOMENDACIONES	111
12.	REFERENCIAS	113

Lista de figuras

Figura 1	21
Figura 2	23
Figura 3	36
Figura 4	38
Figura 5	39
Figura 6	39
Figura 7	40

Figura 8	41
Figura 9	47
Figura 10	55
Figura 11	83
Figura 12	86
Figura 13	99
Figura 14	104

Lista de tablas

Tabla 1	45
Tabla 2	46
Tabla 3	48
Tabla 4	51
Tabla 5	52
Tabla 6	52
Tabla 7	53
Tabla 8	55
Tabla 9	59
Tabla 10	65
Tabla 11	66
Tabla 12	70
Tabla 13	70
Tabla 14	71
Tabla 15	74
Tabla 16	75
Tabla 17	76
Tabla 18	77
Tabla 19	77
Tabla 20	78
Tabla 21	79
Tabla 22	81
Tabla 23	84
Tabla 24	85
Tabla 25	85
Tabla 26	86
Tabla 27	88
Tabla 28	89
Tabla 29	89
Tabla 30	91
Tabla 31	93
Tabla 32	94
Tabla 33	98
Tabla 34	100
Tabla 35	101

Lista de mapas

Mapa 1.....	41
Mapa 2.....	44
Mapa 3.....	45
Mapa 4.....	49
Mapa 5.....	53
Mapa 6.....	57
Mapa 7.....	60
Mapa 8.....	61
Mapa 9.....	64
Mapa 10.....	67
Mapa 11.....	72
Mapa 12.....	80
Mapa 13.....	82
Mapa 14.....	96
Mapa 15.....	97
Mapa 16.....	102

1. INTRODUCCIÓN

En el territorio colombiano se puede apreciar una gran variabilidad en cuanto a suelos, topografía y clima, desde el oriente, en donde se cuenta con grandes llanos, un clima cálido con lluvias y vientos promedio, a diferencia del Occidente en donde se presenta una topografía quebrada, lluvias intensas y vientos fuertes. Manizales se encuentra ubicado en el departamento de Caldas, el cual se encuentra en la Cordillera Central. Está ubicado en el centro occidente de Colombia. En donde desde diciembre de 2020 se ha visto una mayor ocurrencia de movimientos en masa, estos generados por un aumento en la precipitación en todo el territorio, por causas naturales y por efectos antrópicos.

Con base en lo anterior en este documento se pretende identificar la amenaza a través de un método que combina el cálculo de factores seguridad con interpolaciones en el software ArcGIS, los cálculos de factores se efectuarán en diferentes escenarios con el fin de observar el comportamiento de la amenaza. Se calculará la vulnerabilidad y cuando se obtengan ambos datos se realizará la adecuada superposición para generar el producto final.

2. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

Se localiza e identifica el área a intervenir con el fin de dar claridad sobre cual es problema presente, cuáles son sus causas y consecuencias, para así analizar e interpretar cual es el mejor método de identificación, y explicar de manera clara y concisa la razón por la cual se toma esta área como objeto de estudio.

2.1 Descripción del área problemática y formulación del problema

El área a intervenir se ubica en el departamento de Caldas en la ciudad de Manizales, más exactamente en un sector del barrio Chipre. A lo largo de los últimos años, en todo el departamento de Caldas se han presentado fuertes lluvias, lo que ha desencadenado una serie de deslizamiento o movimientos en masa. El área a intervenir se encuentra dentro de los sitios en donde se han presentado estos eventos y además de esto, en los estudios básico de amenaza y Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad de Manizales, esta zona se encuentra en condición de amenaza media por movimiento en masa.

Por esto se hace necesario el estudio de la amenaza ante problemas de estabilidad y de remoción en masa en el área de estudio, la naturaleza de cada caso depende de variables como topografía, geología, geomorfología, usos del suelo e hidrología, acción antrópica, entre otras, las cuales deben ser consideradas para realizar un correcto diseño urbanístico, así

como para formular medidas correctivas y prospectivas que generen una notable mitigación del riesgo ante eventos que se puedan generar posteriormente.

En las visitas de campo realizadas e interacción con los vecinos se pudo notar el gran desconocimiento en cuanto a eventos de tipo remoción en masa en épocas pasadas, además del desconocimiento de planes de emergencia y manejo de desastres, es notable el desconocimiento del peligro o la justificación de tal con el simple dicho: “aquí nunca ha pasado nada”.

Para mitigar los daños generados por un deslizamiento es necesidad de disponer de información que ofrezca un panorama integral de la probabilidad de ocurrencia de fenómenos por movimiento en masa que afectaría esta zona poblada del municipio de Manizales.

Para ello se realizarán diferentes actividades que permiten recolectar la información necesaria para realizar una correlación de elementos, las actividades a realizar se dividen en varias fases, una fase de campo en donde se reconoce la zona de manera preliminar, en la misma fase se realizara un vuelo con sistema de aeronaves remotamente pilotadas, después la información obtenida en campo es procesada, estructurada y analizada en diferentes sistemas de información geográfica (SIG), los cuales nos generaran capas de información ya sean tipo ráster o tipo vector dependiendo su naturaleza y sus necesidades, finalmente se realizara una superposición de todas estas capas para alcanzar el producto final que serán los mapas de riesgo.

¿Es posible zonificar el riesgo por movimiento en masa para un área en específico del barrio Chipre, Manizales, Caldas, a través de métodos de interpolación utilizando un SIG?

2.2 Justificación

Este estudio acerca de la identificación y zonificación de manera precisa del riesgo por movimiento en masa es realmente necesario porque en el último año se ha presentado un notable aumento en este fenómeno (deslizamientos) en el departamento de Caldas, enfocándose en los diferentes barrios del municipio de Manizales, en este caso en un sector del barrio Chipre. Estos movimientos generan afectaciones sobre las edificaciones, habitantes (muertos o heridos) que se pueden disminuir conociendo e informando a la respectiva comunidad que viven en el sector.

Mediante la identificación y definición de las zonas que se encuentran en amenaza o riesgo por movimiento en masa en el área mencionada, se tendrá certeza de los puntos que deben tomar medidas correctivas o en su defecto medidas prospectivas, y a su vez categorizar cuales estructuras, edificaciones, vías, redes eléctricas, acueducto y alcantarillado existentes se encuentran dentro de las zonas de amenaza identificando así, su grado de vulnerabilidad frente a estos fenómenos naturales.

Con la identificación de la amenaza y vulnerabilidad se zonificaran las áreas en riesgo por movimiento en masa mediante la integración novedosa de herramientas tecnológicas a la vanguardia como lo son los drones, toma de muestras del terreno a su vez con los datos históricos climáticos y antecedentes de emergencia por estos deslizamientos, esto es de gran utilidad para la población que habita en el sector porque ellos podrán tener conocimiento acerca de las zonas con mayor condición de riesgo, y así poder tomar mejores decisiones a la hora de querer realizar proyectos de construcción.

Dentro del área de estudio hay un grupo de personas que cuentan con un predio, las cuales se encuentran muy interesadas en conocer cuál es el mejor sitio para poder llevar a cabo la construcción de su vivienda, el estudio es de gran utilidad para garantizar una mejor calidad de vida y seguridad de la edificación vecinas, así como la población establecida en dicho sector.

Para llevar todo esto acabo el equipo quiere probar y mostrar que por medio del uso de diferentes herramientas SIG y el uso de sistemas de aeronaves remotamente pilotadas se puede alcanzar esta meta.

El uso de las aeronaves permite realizar un reconocimiento de la zona, ver en que sitios se observan signos indicativos de deslizamientos o cicatrices, para luego ser verificadas en campo, y el uso de herramientas SIG es el que permitirá diseñar y estructurar de manera correcta toda la información recolectada y generada de la zona y así generar mapas de riesgo de sencilla interpretación para los interesados en el estudio, es de aclarar que gran parte de la información generada se hará por medio de las aeronaves no tripuladas las cuales no permitirán generar a través de diferentes programas un Modelo digital de elevación del terreno de gran calidad, el cual podrá alcanzar hasta 5cm/px, lo que se traduce en mejores resultado, resultado de muy buena calidad.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar un SIG para Zonificar el riesgo por movimiento en masa a través de herramientas tecnológicas en un predio del barrio Chipre, Manizales, Caldas para conocer cuáles son las áreas que se encuentran en amenaza.

3.2 Objetivos específicos

- Búsqueda de información bibliográfica y recolección de muestras del terreno para hacer ensayos de laboratorio.
- Crear modelo digital de elevación y ortofotomosaico por medio de las fotos tomadas por la aeronave remotamente pilotada.
- Generar diferentes escenarios de amenaza por movimiento en masa, identificar zonas expuestas a la amenaza interpretando la información obtenida y categorizar las zonas de amenaza y vulnerabilidad.
- Estructurar una geodatabase que almacene toda la información digitalizada obtenida en campo, mostrarla y presentarla en un SIG.

4. Antecedentes

La presencia de erosión en los suelos es un problema de carácter ambiental, por lo cual se convierte en un problema para todo el mundo (Zhang, Li, Bin Lin, Qiang Yu, & Li, 2018) (Xu, y otros, 2017). Los procesos que generar erosión en el suelo se encuentran fuertemente ligados con los rasgos de esorrentía e infiltración, estos afectan más a los depósitos poco profundos (Wu, L; Zhou, Y; Sun, P; Shi, J; Liu, G; Bai, L;, 2017).

La ceniza volcánica se caracteriza por presentar textura de grano fino, en otras palabras por ser un suelo compuesto de limos que varían su plasticidad y con pequeñas cantidades de material orgánico de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (Uyeturk, Huvaj, Bayraktaroglu, & Huseyinpasaoglu, 2020).

(Fepuleai & Németh, 2019) llegaron a la conclusión de como las lluvias influyen en la baja estabilidad de pendientes compuestas por material volcánicos en ambientes tropicales, las formas de la ladera, su longitud y la lluvia alteran la conducta hidrológica de una pendiente.

(Cano, 2021) Para poder tener una estimación de la amenaza se debe saber dónde y cuándo se genera un deslizamiento a partir de la combinación de algunos factores contribuyentes que se analizan frente a la influencia de un factor detonante (Vasu, y otros, 2016). Además de las fuertes lluvias, se debe tener en cuenta que otros factores desfavorables como la altura de las laderas, la pendiente, condiciones topográficas, litología, tipo y espesor del suelo, y la contenido de agua son otros factores a tener en cuenta a la hora de generasen

movimientos en masa (Zêzere, y otros, 2018). La precipitación atenúa la resistencia al corte de algunos suelos cuando desaparece la presión negativa de los poros. (Wu, y otros, 2018).

A nivel regional se puede destacar que las condiciones atmosféricas y climáticas son las que conducen a las lluvias extremas que crean fuerzas que intensifican el riesgo por deslizamientos (Vaz, y otros, 2018).

La recopilación de información es el primer paso a llevar a cabo y por dicha razón es muy importante tener claro sobre que se busca información, en este caso en particular se evalúa la susceptibilidad, análisis de peligros y las consecuencias por deslizamientos, por ellos la recolección de información se centra en un inventario de movimientos de masa detallados en donde se describan todas sus características del deslizamiento, tipo de deslizamiento, actividad, profundidad y dato exacto de la pendiente, ya que se quiere conocer con exactitud las causas que hicieron volver las pendientes inestables (Erener & Duzgun, 2012).

A la hora de analizar la susceptibilidad por movimiento en masa de un área de estudio se deben tener en cuenta todos los factores que puedan generar un deslizamiento, y también todas las unidades que se encuentran en la distribución espacial, estas unidades son; topografía, geología, propiedades geotécnicas, clima, vegetación, y factores antropogénicos que afecten los suelos naturales. (Robin, y otros, 2008).

Realizar un inventario de movimientos en masa de la zona de interés es muy importancia, ya que con esto podemos conocer la frecuencia con la cual ocurren de movimientos en masa en la zona y a su vez conocer cuáles son los movimientos en masa que

predominan en la zona por esta razón (Galli, Ardizzone, Cardinali, Guzzetti, & Reichenbach, 2007), hicieron la comparación de dos mapas de movimientos en masa uno elaborado por guzzetti y cardinali entre los años 1987 y 1988, y el segundo mapa fue elaborado por Antonini et al 2002, el inventario de movimientos en masa fue realizado a través de la interpretación de fotografías aéreas y con el soporte del reconocimiento en campo. Después de que toda la información fuera recopilada, se generó el mapa de inventario de reconocimiento, en donde cada uno de los deslizamientos fue clasificado de acuerdo su tipo de movimiento. Se hizo con el fin de tener una versiona más simple de Varnes (1978).

Para realizar un modelamiento de amenaza por caída de rocas, se puede utilizar una extensión del SIG llamado Rock Fall Analyst, el cual en sus análisis utiliza dos partes principales como los son; una simulación de trayectoria de caída de rocas en 3D, y un ráster Modelado de distribución espacial de desprendimientos de rocas. se utiliza un método geoestadístico para simular el desprendimiento de rocas La frecuencia, la energía, la velocidad y trayectorias. El procedimiento para el modelado de amenaza por caída de rocas es el siguiente, se cuenta con datos de caídas de rocas tomados por medio de LiDAR, estos valores son calibrados y llevados al Rockfall Analyst, en donde se simula La trayectoria y velocidad de caída de rocas en 3D, esto permite generar diferentes ráster, un ráster espacial de frecuencia, un ráster de la altura y rebote de las rocas y un ráster de energía cinemática. Estos tres son sobrepuestos y reclasificados, en donde se generar un modelo espacial, el cual es una vez más reclasificado y generando así, un ráster de amenaza por caída de rocas (Hengxing, Dereck, Chenghu, & Chang ho, 2010).

En el 2017 se realizó un estudio para identificar la susceptibilidad por remoción en masa para el corredor vial Cuestaboba, se realizan con diferentes variables geológicas y geomorfológicas obtenidos con estudios realizado de ingeniería en dicho lugar (Lopez, 2017).

Las variables fueron jerarquizadas dependiendo de la importancia ante los fenómenos recurrentes de remoción en masa para el sitio de interés, el proceso se realiza mediante un método de combinación lineal ponderada (WLC), con la cual se generó el mapa de susceptibilidad (Jaboyedoff, y otros, 2013).

El movimiento masivo se produce cuando hay perturbaciones en la estabilidad del terreno, estas pueden suceder por factores como pendientes empinadas, alta intensidad de lluvias, condición del suelo, explotación de la naturaleza por los humanos y el estado de su estructura geológica. El objetivo del proyecto es reducir el impacto de este fenómeno e identificar las áreas más propensas. El método utilizado es el Storie Index que califica la tierra en función de suelo y al final los divide en tres niveles de vulnerabilidad al movimiento de masas: Bajo moderado y alto (Djakun, Maryati, & Kasim, 2020).

Se realizó una zonificación de la inestabilidad para reducir las situaciones de desastres en los municipios Labranzagrande, Nunchia, Paya y Pisba de Yopal. Es importante identificar el índice de susceptibilidad mediante análisis jerárquicos planteados por SGC. Para lo cual se utiliza el software Arcgis y sus diferentes herramientas del arctoolbox para la relación de diferentes temáticas como la geología, geomorfología, coberturas y suelos (Jiménes, 2017).

Para realizar levantamientos en lugares tan inaccesibles además donde el terreno es tan inestable se utiliza una herramienta llamada LIDAR, que es una técnica de teledetección

óptica que permite obtener una muestra de la superficie de la tierra con mediciones exactas en coordenadas x,y,z. Este instrumento es instalado en una aeronave remotamente tripulada para lograr una mayor eficiencia en tiempo y en abordar lugares complicados en su topografía. El producto es un datasets de nube de puntos en gran cantidad que visualizar, procesar y analizar (Lopez, 2017).

De la nube de puntos se generan las curvas de nivel que muestran la forma de la superficie, estas nos permiten observar al mismo tiempo las partes planas y empinadas, así como las crestas y valles (Lopez, 2017).

En el tema de drones en Colombia, en el año 1994 se unió como miembro a la organización de civil internacional OACI quienes son los encargados de desarrollar un plan de gestión para la operación de los UAS/Drones a nivel mundial. Esto quiere que cada país sea responsable del uso de su espacio aéreo (Unidad administrativa especial de aeronautica civi, 2018).

En Colombia, la autoridad de su espacio aéreo es la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil UAEAC. En el 5 de febrero del 2019 entro en vigencia una nueva regulación de drones integrado en el RAC No. 91, más concretamente en el apéndice número 13 (Unidad administrativa especial de aeronautica civi, 2018).

Las edificaciones que existen actualmente en el sector serán definidas de acuerdo con los trabajos de Heinimann (1999) y Jam (2007).

La vulnerabilidad física de las personas se calcula en conjunto con la vulnerabilidad de las edificaciones, de ahí surge que se haya creado una función exponencial propuesta por (Ragozin & Tikhvinsky, 2000) y modificada por (Uzielli, 2007) que dice que:

$$Spers=(Se)^{3,2}$$

5. Referente normativo y legal

En la Ley 1523 de 2012 la gestión de riesgo de desastres es descrita como un conjunto de procesos y actividades tanto sociales y políticas apoyadas por diferentes programas, medidas y acciones, que ayudan al conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres, con el fin de alcanzar un buen nivel de seguridad, bienestar, calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible, este se encuentra asociado con la planeación del desarrollo seguro, esto teniendo presente cuatro pilares fundamentales: Conocimiento del riesgo que se refiere a la identificación de la amenaza, análisis del riesgo, monitoreo y comunicación del mismo; reducción del riesgo en esta etapa se proponen y realizan las medidas de intervención correctiva y prospectiva, en donde se cuenta con medidas estructurales y no estructurales, las medidas estructurales son aquellas apoyadas de obras civiles, refuerzos a estructuras y demás, las medidas no estructurales se enfocan en la capacitación y comunicación del riesgo para las comunidades cercanas al riesgo. 3. Manejo de desastres es la preparación que tiene un municipio frente al desastre, se refiere al inventario con que cuenta para tratar la situación, como lo son albergues, camiones de bomberos y personal. 4. Protección financiera (Colombiano, 2016).

De acuerdo al Decreto 1807 de 2014; en donde se reglamenta el artículo 189 del Decreto-Ley 019 de 2012 el cual contiene la regulación de las condiciones y escala de detalle que deben tener los estudios a la hora de delimitar y zonificar las áreas de amenaza, y las áreas en condición de riesgo, también determina las medidas para su mitigación. Se cuentan con dos tipos de estudios: estudios básicos que cuentan con tres clases de suelo; suelo urbano el cual tiene una exigencia en escala de 1:5.000, suelo de expansión urbana escala 1:5.000 y suelo rural escala de 1:25.000; para los estudios detallados se tienen dos clases suelos

urbanos que cuentan con una escala de trabajo 1:2.000 o mayor, y suelos de expansión urbana con escala de 1:2.000, como se encuentra en la figura 1.

Figura 1

Escalas de trabajo

TIPO DE ESTUDIO	CLASE DE SUELO	ESCALA
Estudio Básico	Urbano	1:5.000
	Expansión Urbana	1:5.000
	Rural	1:25.000
Estudio Detallado	Urbano	1:2.000
	Expansión Urbana	1:2.000

Fuente: Decreto 1807 de 2014.

El factor de seguridad (FS) es la división entre las fuerzas resistentes (FR) y las fuerzas actuantes (FA), el cual evalúa el estado límite de falla. Los factores de seguridad permiten categorizar la amenaza en estabilidad de taludes frente a amenaza por movimientos en masa, el valor de amenaza se encuentra en los siguientes rangos: Bajo <1 , Medio 1.1-1.5, Alto >1.5 en condiciones estáticas, establecidos por la norma sismo resistente (NSR-10) Título H, estudios geotécnicos.

6. Referente teórico

Este documento se centra en la identificación de las amenazas y riesgos causados por los movimientos en masa por medio de herramientas SIG; un movimiento en masa se puede clasificar de diferentes formas de acuerdo con el material y la forma en que se presente, si el material es suelo, se puede encontrar con una falla traslacional, la cual se genera por una superficie deslizante, o por otro lado se puede tener una falla rotacional, la cual se genera a partir de una superficie circular. Si el material es roca, se puede generar falla por volcamiento o derrumbe.

El riesgo de desastres es definido, como la relación entre la amenaza y vulnerabilidad, si alguno de estos tiende a cero, de igual modo el riesgo será igual a cero. Ahora bien, en las definiciones propuestas por la Ley 1523 de 2012 se define el riesgo como los daños o pérdidas que podrían presentarse por la ocurrencia de un evento físico peligroso de origen natural, socio-natural tecnológico, entre otros, este se encuentra determinado por la vulnerabilidad (Colombiano, 2016).

Los procesos de movimiento en masa sobre laderas están dados por varios factores: formaciones geológicas superficiales, geomorfológicos, estructurales, aspectos climáticos, biológicos y algunas veces factores antrópicos, estos procesos de remoción se dan en el sentido de la pendiente a causa de la fuerza de gravedad.

Los movimientos en masa se encuentran clasificados dependiendo de los materiales por los que estén compuestos y la forma en que se da el movimiento en masa:

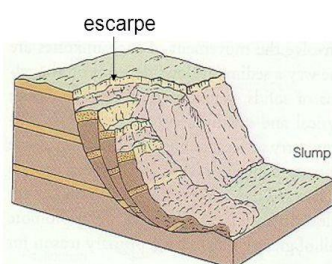
Deslizamientos: Se originan cuando una masa de tierra se cae sin perder el contacto sobre otra masa estable a favor de la pendiente. Los deslizamientos se dividen en traslacionales y rotaciones cóncava, como se puede observar en la figura 2 (Castiblanco Ruiz, 2011).

Figura 2

Deslizamiento rotacional y traslacional

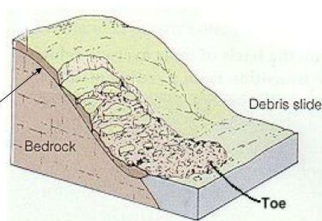
Movimientos en masa

Deslizamiento rotacional (Slump / Rotational landslide)



Deslizamiento traslacional (Translational Landslide)

movimiento sobre una superficie
previa: una falla, un estrato de arcilla,
etc.



Fuente: (<https://slideplayer.es/slide/3188210/11/images/5/Deslizamiento+rotacional.jpg>).

Caídas: se refiere a la caída de varios bloques o fragmentos de roca que se desprenden de una ladera, el bloque cae rodando realizando golpes y rebotes (Castiblanco Ruiz, 2011).

Volcamiento: se da por la rotación hacia delante de un bloque de roca que se da por un giro desde su parte inferior. Dicho movimiento se encuentra controlado principalmente por la gravedad, por empujes de tierras o del mismo cuerpo, o por presión de fluidos que se entran por las grietas (Castiblanco Ruiz, 2011).

Movimientos de flujo: Son movimientos de ladera que se caracterizan porque tienen una deformación interna y continua del material y la ausencia de una superficie marcada de desplazamiento (Castiblanco Ruiz, 2011). Dentro de estos se pueden incluir la reptación: que no es más que un movimiento muy lento que se da en capas muy superficiales de las tierra.

Soliflucción: Es el movimiento o desplazamiento masivo y lento de la tierra dado, que ha adquirido características plásticas y fluidas, tomando propiedades similares a las de un líquido viscoso.

La metodología utilizada para realizar un inventario de movimientos en masa preciso consta de 14 pasos a llevar a cabo, los pasos son los siguiente: generación de inventario de deslizamientos; un análisis de los eventos que generaron los movimientos en masa; generación de un modelo digital de elevación en base a la información disponible; se realiza un modelado de pesos de evidencia WOE; los siguientes tres pasos constan de una evaluación espacial de criterios múltiples; validación del mapa de susceptibilidad; se realiza una clasificación deslizamientos en el mapa de susceptibilidad; el enmascaramiento de los deslizamientos existentes; un manual de edición para el mapa de susceptibilidad por deslizamientos; se realiza una simplificación de unidades en el manual de edición; realizar un cálculo de densidad en cuanto al número de deslizamiento en la zona; finalmente se realiza la producción de los mapas cartográficos (Van Westen, 2016).

En un mapa de inventario de deslizamientos, se pueden presentar errores a la hora del mapeo, algunos de estos errores se generan por: la diferencia entre las proyecciones en cuanto a la perspectiva y el mapa topográfico, por tener una baja calidad de información del mapa topográfico junto con la complejidad del terreno, por eso proponen cuatro subpasos para

minimizar los errores, los pasos a seguir son los siguientes: la información obtenida en campo en mapas, es reescrita en una segunda hoja de plástico indeformable y puesta sobre el mapa topográfico para así corregir todas las distorsiones; la hoja plástica con la corrección de las distorsiones es escaneada para ser importada a un archivo SIG; toda la información sobre deslizamientos de tierra es transformada de formato ráster a vector; para cada uno de los elementos vectoriales generados se realiza un ensamblaje de características para luego ser etiquetadas con la información correspondiente a cada deslizamiento (Santangelo, y otros, 2015).

Lo primero es definir el área de estudio la cual cuenta con escarpes localizando sus secciones reactivadas, para lograr esto se utilizaron DTM multitemporales de la zona de interés en dos diferentes periodos. En la comparación de dos DTM en dos épocas diferentes, con el fin de identificar la variación de los movimientos en masa en la zona de interés. (Dewitte, Chung, Cornet, Daoudi, & Demoulin, 2010).

Al realizar la jerarquización geomorfológica se deben tener en cuenta diferentes aspectos de las mismas para así, poder clasificar de manera adecuada el área a evaluar, teniendo presente que se debe ir de lo de mayor escala a menor escala, es por esto que (Carvajal, 2011) lo divide de la siguiente manera;

Geomorfoestructura: se refiere a espacios continentales o intra continentales definidos por estructuras regionales.

Provincia Geomorfológica: Es un conjunto de regiones con geoformas similares entre sí, las cuales se encuentran definidas por un relieve de gran extensión, contando con una escala de trabajo entre 1:1.000.000 – 1.500.000.

Región geomorfológica: corresponde a asociación de geoformas relacionadas genética y geográficamente, tiene una escala de trabajo de 1: 250.000 y 1:500.000.

Los ambientes morfogenéticos se dividen en 9 clases: morfoestructural (S), volcánico (V), denudacional (D), fluvial y lagunar (F), marino y costero (M), glacial y periglacial (G), eólico (E), kárstico (K), antropogénico (A).

Unidad geomorfológica: corresponde a la forma básica en la cartografía geomorfológica, es una geoforma individual que ha tenido origen por procesos erosivos, ya sea por acumulación o erosión. Su escala de trabajo esta definida en 1: 50.000 a 1:100.000.

Subunidad geomorfológica: es la subdivisión de la unidad geomorfológica y está determinada por los rasgos morfológicos y morfométricos de la superficie. La escala de trabajo está entre 1: 10.000 y 1: 25.000.

Elementos o componentes geomorfológicos: Representan el nivel máximo de detalle de la propuesta de estandarización geomorfológica, con escala 1:10.000 o mayor. Esta categoría está determinada por los rasgos del relieve y por la morfometría detallada del terreno.

De acuerdo con (SGC, 2017), algunos aspectos a tener en cuenta cuando se alcanza el nivel de elementos o componentes son los siguientes:

Contraste de relieve o relieve relativo: es la diferencia de elevación de la geoforma entre la zona más baja y la zona más alta, no toma en cuenta la altura absoluta del nivel del mar. Los rangos de relieve relativo se encuentran en la tabla 4.

Inclinación de la ladera: Es el ángulo formado por un plano horizontal imaginario y la pendiente del terreno, en la tabla 5 se presentan los rangos de inclinación.

Longitud de la ladera: es la longitud que tiene la geoforma predominante en el área de interés, en la tabla 6 se presentan los rangos de longitud de ladera.

Forma de la ladera: Hace referencia a la tendencia general de la superficie, esta, puede ser cóncava o convexa condicionando los tipos de movimientos en masa que pueden generarse en una ladera. Los movimientos rotacionales están relacionados a formas cóncavas y convexas, y los movimientos planares a formas rectas.

(Schicker & Moon, 2012) han mencionado que recientemente, la climatología de lluvia se ha considerado en los modelos de susceptibilidad a deslizamientos de tierra como un factor predisponente en lugar de un factor desencadenante.

(Capecchi, Perna, & Crisci, 2014) en su estudio dividen la curvatura en dos; curvatura plana y curvatura de perfil, la curvatura plana es básicamente la segunda derivada de DEM y corresponde a la concavidad/convexidad de la superficie terrestre medida perpendicularmente

al aspecto, es decir, paralelo al contorno. La curvatura de perfil es la derivada de la modelo de elevación digital. La cual describe la forma del relieve en la dirección de la pendiente más empinada. Corresponde a la concavidad/convexidad de la superficie terrestre medida paralela al aspecto, es decir, perpendicular al contorno.

Mediante el uso de herramientas SIG (Arcgis, Global mapper), slide, autocad entre otros se realizará la identificación de la amenaza por deslizamiento en el área de estudio; el más importante de estos softwares es el SIG (sistema de información geográfica) que nos permite relacionar datos con una localización geográfica. Esto quiere decir que en un solo mapa podemos relacionar infinidad de datos como por ejemplo particular pendientes, geomorfología, usos de suelo, corrientes de agua, entre otros.

De acuerdo a (Guzzetti, Carrara, Cardinali, & Reinchbach, 1999), para realizar un correcto análisis de amenaza por movimiento en masa se debe tener en cuenta una preselección la cual se encuentra dividida en 5 grupos: mallas o grillas, se les asigna un valor ya sea de geología geomorfología, suelos o un valor de factor de estabilidad; unidades de terreno, van en función de la geomorfología y geología, se basa en la forma de la superficie, en los procesos que la formaron; unidades de condición única, son la clasificación de todos o al menos la mayoría de factores de inestabilidad del talud en pocas clases que se guardan en un mapa simple; las Unidades de ladera, automáticamente derivadas de modelos digitales del terreno (DTM); unidades de ladera se pueden dividir en unidades topográficas definidas por la intersección de las curvas de nivel con los límites o fronteras de drenajes ortogonales a las curvas.

Por otra parte, se tiene la amenaza, que es el peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con severidad suficiente para causar pérdida de vidas, infraestructura, recursos ambientales (Colombiano, 2016).

Teniendo claro que la amenaza no es sinónimo de riesgo si no existen objetos o personas vulnerables, la amenaza es entonces la posibilidad de la ocurrencia de un fenómeno que afecta objetos materiales y habitantes de un lugar, para nuestro caso por movimiento en masa que puede ser de carácter natural o antrópico, que puede ser detonado por diferentes agentes, lo que nos lleva a analizar el problema desde un punto de vista más global en donde se tiene en cuenta las variables: comportamiento pluvial, geología, geomorfología y usos del suelo dentro de la zona de estudio para comprender las causas que generan dicho fenómeno.

La vulnerabilidad es la fragilidad física, económica, social, ambiental que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir daños en caso de que un evento físico ocurra (Colombiano, 2016).

De acuerdo con el grado de exposición de los elementos y a la probabilidad de que ocurra una amenaza, el riesgo será clasificado en una de las siguientes tres categorías: bajo, medio, y alto. Riesgo bajo hace referencia a una exposición muy baja casi nula de personas e infraestructura en cuanto a daños posibles, riesgo medio hay un aumento en la exposición lo que puede llegar alcanzar pérdidas de vidas e infraestructura, y riesgo alto se habla de una exposición severa en donde se pueden perder muchas vidas, infraestructura y usos del suelo.

7. Metodología

7.1 Enfoque metodológico

Se enfoca de manera cuantitativa porque se toma una muestra de población, en este caso un sector del barrio Chipre, en el municipio de Manizales, de la misma se van a tomar ensayos de laboratorio de muestras de suelo, para conocer sus propiedades y realizar modelados de la amenaza con ayuda de SIG que sirven para calcular factores de seguridad en laderas. El tipo de investigación corresponde una investigación correlacionable, ya que se basa en el análisis de diferentes variables y la correlación existente entre ellas, se estudian antecedentes en la zona en donde se puede identificar cómo funciona el fenómeno en cuestión, y con la información propia y recolectada al obtener nuestros resultados, estos podrán ser comparados.

7.2 Tipo de estudio

La investigación es aplicada ya que se busca la solución para un grupo de personas en específico en donde llegando al conocimiento, se le dará una utilidad o se pretende mejorar la calidad y seguridad de la vida de las personas.

Cuenta con un enfoque fundamental ya que busca alcanzar el conocimiento para dar métodos o herramientas que ayuden a dar solución a problemas sociales, en donde se busca mejor calidad de vida para las personas.

7.3 Procedimiento

Fase 1: Búsqueda de información bibliográfica y recolección de muestras del terreno para hacer ensayos de laboratorio.

Actividad 1: Búsqueda del estado del arte, publicaciones, estudios relacionados con movimientos en masa para así, conocer qué tipos de deslizamientos existen, con base en esto poder identificar cuál de estos tipos es el que predomina en la zona de interés.

Actividad 2: En campo se realizarán 4 perforaciones semi mecánicas, a distintas profundidades con el fin de conocer la distribución espacial de los estratos, y de cada uno de estos estratos se toma una muestra inalterada por medio de un shelby, que es un tubo de pared delgada, cada una de las muestras a obtener se llevan a laboratorio en donde pasan por tres ensayos, que son; Clasificación granulometría y límites de atterberg, compresión inconfiada y cortes directos u.u, Por medio de estos ensayos se conocerán las propiedades geomecánicas de los suelos tales como, cohesión, fricción, peso unitario seco, peso unitario húmedo, humedad, limite líquido, entre otros. Además de esto se realizará el control de campo debido para identificar la información necesaria.

Actividad 3: Levantamiento fotogramétrico del área de interés por medio de aeronaves remotamente tripuladas, mediante un software de planeación de vuelo donde especificaremos la información necesaria para realizar un trabajo de calidad.

Lo primero es realizar un correcto plan de vuelo el cual abarque un poco más del área a intervenir porque no solo se evalúa en área en específico si no todo aquello que lo rodea y afecta.

Segundo cada fotografía debe ser tomada a un ángulo de 90° contando que cada imagen debe tener elementos que aparezcan en la imagen posterior, anterior y sus laterales del 60 al 90 % dependiente de la topografía del terreno (overlap)

Tercero la calidad del sensor de la aeronave es de una pulgada y una calidad de 20 megapíxeles, preferiblemente debe tener un obturador global para así minimizar las distorsiones que se generan por la velocidad en la que se está trabajando o fuertes vientos que actúen sobre el dron.

Cuarto realizar los sobrevuelos en el horario comprendido entre las 10 de la mañana hasta las 2 de la tarde, en este lapso de tiempo es donde las sombras son menos pronunciadas ya que el sol se encuentra en sus puntos más altos dando un trabajo con menos ruido y de una gran calidad.

Quinto y último se debe tener clara la autonomía de la aeronave, dependiendo del tiempo que dure cada batería se realizara el planteamiento de los vuelos en el sector a trabajar y siempre guardando responsablemente un porcentaje en promedio del 25% para cualquier tipo de emergencia ya sean terrenos muy irregulares o vientos que dificulten el regreso de la aeronave al lugar de aterrizaje, además se debe tener claro en q sitios está prohibido realizar sobrevuelos para no tener ningún problema de carácter legal.

Fase 2: Generar modelo digital de elevación y ortofotomosaico por medio de aeronave remotamente pilotada.

Actividad 1: Después de obtener las fotos del terreno por medio de la aeronave no tripulada se procede al procesamiento de las mismas, estas serán cargadas en Agisoft Metashape, es un software que permite generar el modelo digital del terreno, este se genera siguiendo determinados pasos, el primer consiste en la orientación de las fotos, en donde el programa busca puntos homólogos entre ellas y así, generar una nube de puntos dispersa donde se asigna el sistema de coordenadas a utilizar dependiendo del lugar donde se esté realizando el proyecto, en el segundo paso se crea una malla a partir de la nube de puntos de paso, a partir de la malla se crea la nube de puntos densa que su función es incrementar la información espacial del terreno es decir aumenta en gran cantidad los puntos que representan el relieve del terreno, desde esta nube de punto se realiza una clasificación donde especificaremos cuales son de la superficie del suelo, cuales son de edificaciones o vehículos y los puntos que son de vegetaciones bajas altas o medias; habiendo realizado esta respectiva clasificación se crea una nueva malla a partir de la nube de puntos densa en donde se excluyen todos los elementos que no sean terreno, y finalmente a partir de esta malla que corresponde a un modelo 3D se genera el modelo digital del terreno (DTM) que es una imagen que representa las diferentes alturas que hay en el área donde se realizó el levantamiento fotogramétrico.

Actividad 2: A partir del DTM obtenido se procede a generar un mosaico de fotografías aéreas ortogonales correctas para las distorsiones ópticas, georreferenciado (Ortofotomosaico), el cual se delimita de acuerdo al área específica a trabajar, estos límites se hacen por medio de un shapefile tipo polígono que se crea en un folder de Arcmap, en donde

se le indica al software mediante una herramienta del Arctoolbox (Clip) que exporte solo la información que se encuentre dentro del polígono realizado punto a punto.

Fase3: Generar diferentes escenarios de amenaza por movimiento en masa para categorizar las zonas de amenaza y vulnerabilidad.

Actividad 1: Teniendo el modelo digital del terreno, es llevado al software Global Mapper en donde se crearan los perfiles que representan el relieve del terreno que se obtiene cortando transversalmente las líneas de un mapa de curvas de nivel, o mapa topográfico; de acuerdo a una malla que va en función de la escala de trabajo, los perfiles del terreno generados son exportados a Slide un software que permite conocer la superficie de falla del talud y el factor de seguridad, este se debe correr en cuatro diferentes condiciones, la primer condición es una condición estática y seca, la segunda corresponde a estáticas con lluvias, la tercera es pseudoestática sin lluvias y la cuarta es una condición síntesis que consiste en la integración de pseudoestática con lluvias, para cada una de estas condiciones obtenemos valores de factor de seguridad.

Actividad 2: Obtenidos los valores de factor de seguridad para cada escenario, son llevados a ArcGIS en donde son creados como una capa de puntos con valores en su tabla de atributos, a partir de estos se realizará una interpolación a través de diferentes herramientas, buscando la efectividad y confiabilidad de las mismas, se generará un mapa de manchas de acuerdo a la clasificación de los valores de los factores de seguridad, la cual depende en que condición se encuentra si es en condiciones estáticas o pseudoestáticas.

Fase 4: Estructurar una geodatabase que cumpla con los lineamientos establecidos por la entidad competente en cuanto a la estructura y campos requerido y a su vez que almacene toda la información digitalizada obtenida en campo y procesada en un SIG.

Actividad 1: En el momento que se comiencen a crear vectores o capas de información se deberá crear una geodatabase, la cual almacenara cada una de estos shapefiles, la geodatabase permitirá manejar de manera adecuada y organizada la información que recolectemos y procesemos con las diferentes herramientas que nos facilita el software ArcMap de la familia esri, ya que, en ella se crearan diferentes feature dataset, estos se crean de acuerdo al campo requerido y dentro de estos se crearan los shapefiles que se vayan generando, cabe resaltar que todos se manejan mediante un solo sistema de coordenadas que se elegirá dependiendo el sector de Colombia donde se va a realizar el proyecto.

Actividad 2: Se verificará el orden y campos que debe llevar la geodatabase, queriendo de esta manera cumplir con los lineamientos mínimos exigidos por las diferentes organizaciones a la hora de presentar este tipo de información y se aceptada para la solución al problema a tratar.

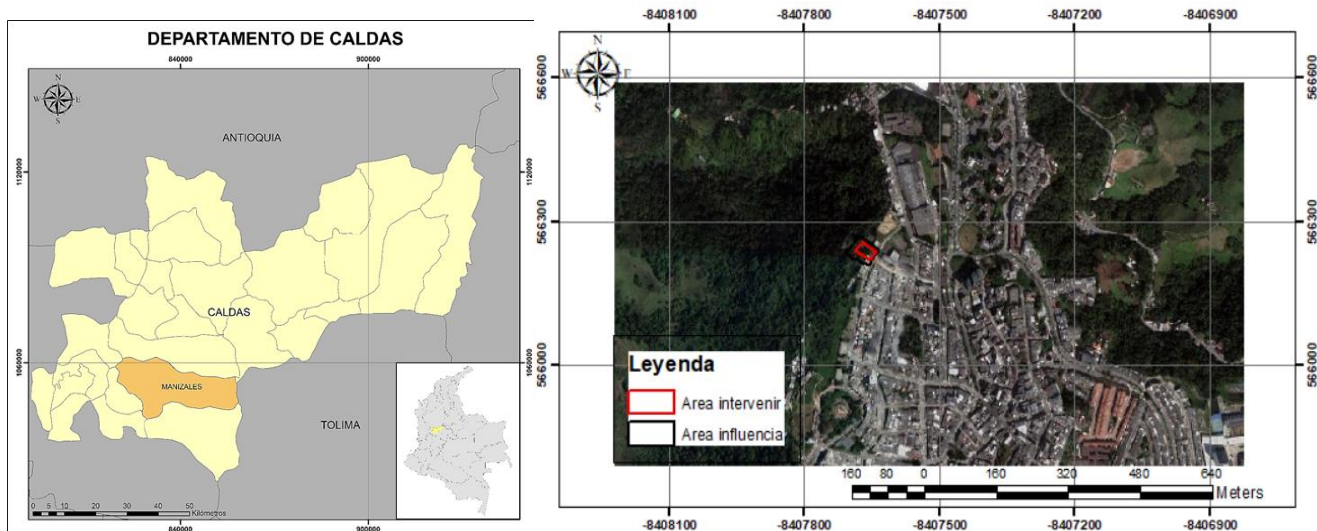
8. Resultados

8.1 Localización

Manizales es un municipio colombiano, capital del departamento de Caldas, evidenciado en la figura 3. Está ubicado en el centro occidente de Colombia, en la región paisa, sobre la Cordillera Central de los Andes, cerca del Nevado del Ruiz. Tiene una población de 434.403 habitantes, de acuerdo al censo poblacional oficial para el año 2018. Manizales es denominada la "Ciudad de las Puertas Abiertas". También se le conoce como "Manizales del Alma" debido a un pasodoble taurino que lleva su nombre, igualmente como "La Perla del Ruiz", "La Capital del Afecto", "La Capital Mundial del Café" y como "La Colina Iluminada".

Figura 3

Localización del área de interés.



Fuente: Propia

8.2 Área a intervenir

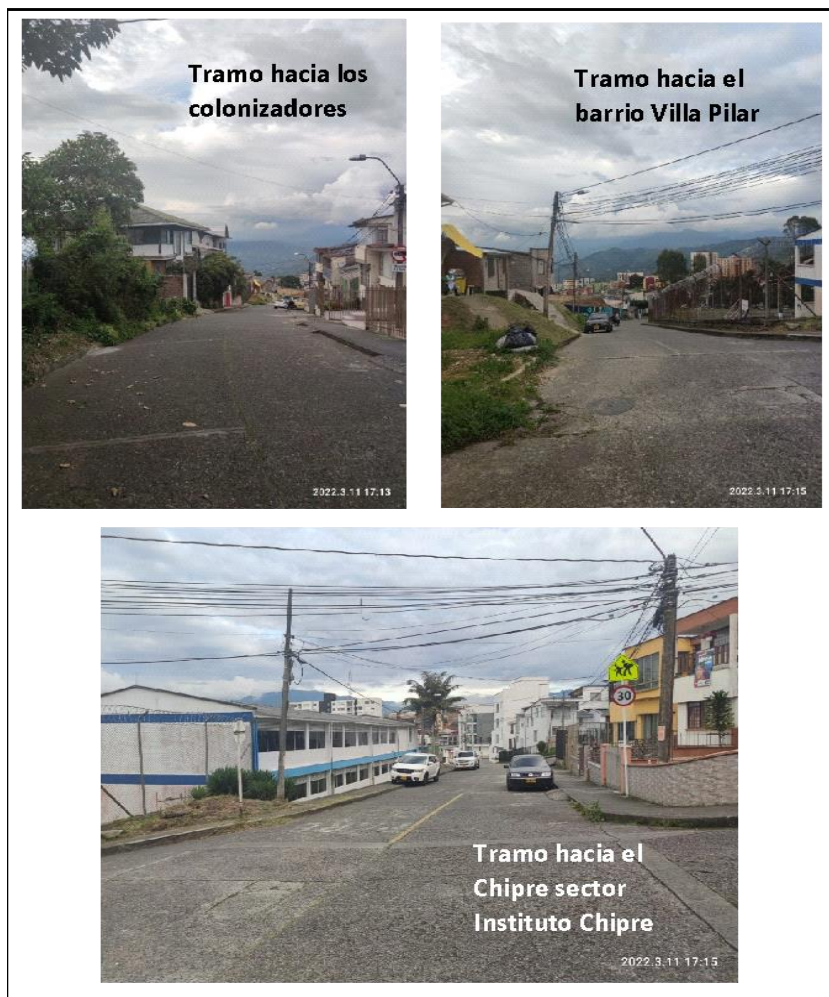
El área a intervenir corresponde a aquellas zonas que son objeto de desarrollo y que fueron indicadas previamente por los interesados de este estudio. En este estudio el área de interés se encuentra en el barrio Chipre enfrente al instituto Chipre.

Para este caso específicamente, se tiene que este sitio ha sido intervenido intensamente por la acción antrópica, pues es una parte del territorio que se ha configurado para el desarrollo urbanístico debido a la evolución que este barrio ha tenido dentro de la historia del municipio; los cortes y los llenos se han convertido entonces en la expresión geomorfológica más relevante del sitio y por lo tanto se convierte en los determinantes de la delimitación del área a intervenir.

Particularmente la zona de estudio es una geoforma resultado de la intervención del hombre, es decir, su morfometría y morfología corresponde a la modificación del terreno mediante la configuración de cortes y la implementación de llenos. Esto sucede tanto el predio de interés como en los sitios localizados alrededor del mismo. Asimismo, dentro del predio de interés ocurrió un fenómeno de remoción en masa.

Sector del barrio Chipre.

Se incluyen a las calles que delimitan a la zona de interés para el desarrollo urbanístico y a las edificaciones vecinas.

Figura 4*Vías aledañas*

Fuente: Propia.

La zona de interés se encuentra en el barrio Chipre y coincide con la vía que conduce hacia el barrio Villa Pilar de un lado, y hacia los monumentos a los Colonizadores del otro lado, como se muestra en la figura 4. Asimismo, se tiene las edificaciones vecinas al lote, evidenciadas en la figura 5.

La influencia que ejerce el proyecto sobre este tramo es principalmente social, tiene a ser baja toda vez que sólo impacta con posible ruido y la posible afectación temporal de la movilidad pero que no representa un inconveniente a futuro.

Figura 5

Edificaciones cercanas al área de interés

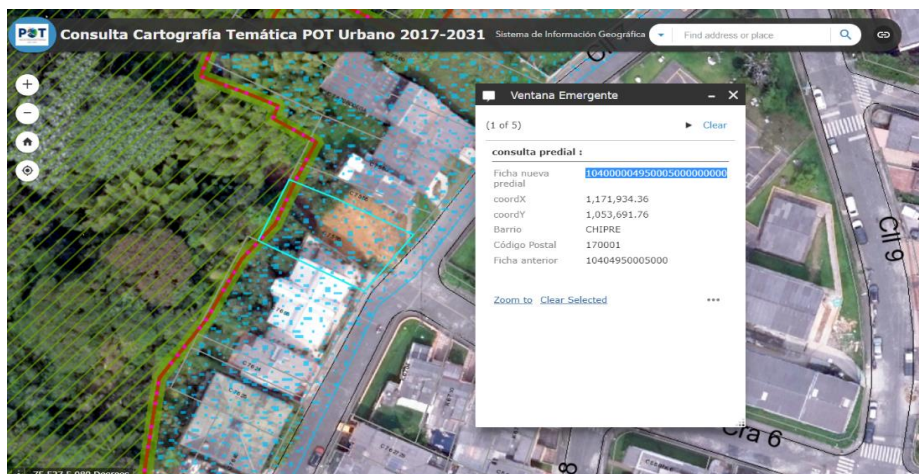


Fuente: Propia.

En este caso, el área de influencia directa se identifica de acuerdo con el análisis del límite del predio donde se encuentra la zona de estudio, a partir del Geoportal de la alcaldía de Manizales como se puede observar en las figuras 6 y 7. Con la información anterior se delimita el AID correspondiente, la cual se puede evidenciar en el siguiente mapa.

Figura 6

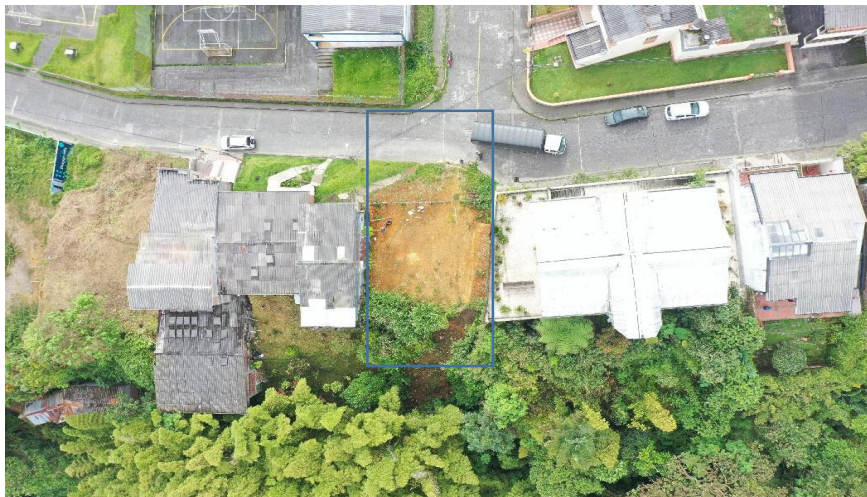
Delimitación del predio en área de interés, se resalta en color azul claro



Fuente: Tomado de Geoportal Alcaldía de Manizales, Cartografía Temática POT Urbano

Figura 7

Área de influencia directa, sector del barrio Chipre



Fuente: Propia.

A continuación, se presentan los resultados producto del trabajo realizado, que tiene como fin identificar y zonificar el riesgo por movimiento en masa para el área de estudio, todos los mapas generados están regidos bajo el sistema de coordenadas Magna sirgas origen Bogotá.

8.3 Procesos morfodinámicos e inventarios

8.3.1 Procesos morfodinámicos

Se ha podido apreciar que las bases de datos no reportan movimientos en masa dentro del área de interés. Empero, con el ánimo de complementar dicha información se ha recurrido a la fotointerpretación de la fotografía aérea obtenida con el sobrevuelo de drone, así como de las fotografías satelitales que se pueden obtener de la plataforma Google Earth.

Las imágenes satelitales no fueron de gran ayuda, para la escala de trabajo resultan verse bastante borrosas lo que dificulta la fotointerpretación, esto se puede evidenciar en la figura 8. Por su parte, la fotografía aérea si permite hacer un reconocimiento de los rasgos geomorfológicos que den cuenta de la existencia de fenómenos de remoción en masa.

Figura 8

Imagen satelital de la zona



Fuente: Tomado y adaptado de Google Earth

Mapa 1

Deslizamientos dentro del área de interés.



Fotografía del área del área de influencia

Fuente: Propia.

Gracias a la fotografía aérea se pudo observar que:

Recientemente se presentó un deslizamiento superficial de tipo traslacional, expuesto en el mapa 1, este fue reportado el 16/03/2022 por el equipo, no obstante, se desconoce su fecha de ocurrencia. Se localiza en las coordenadas 839213.704, 1053681.092.

El movimiento en masa se clasifica de tipo deslizamiento y su subtipo es deslizamiento traslacional evidenciado la ausencia de escarpes y la baja profundidad que alcanzó la superficie de falla comparado con la longitud corona a punta del movimiento.

De su morfometría aproximada destaca su diferencia de altura corona a punta que no es menor a 15 m, la longitud horizontal corona a punta de por lo menos 16,2 m y el ancho es de 5,4 m. Su pendiente es de alrededor de 40 grados.

Las causas inherentes del deslizamiento son: material plástico débil y meteorizado físicamente, así como contraste de permeabilidad y rigidez de los materiales roca-suelo.

Como factores contribuyentes se incluyen a las cargas en la corona del talud, mantenimiento deficiente del sistema de drenaje y ausencia de vegetación. El factor detonante es la lluvia.

Además de esto:

No existen cicatrices de deslizamientos antiguos.

No se observan escarpes de movimientos en masa, ni menores ni mayores.

No hay erosión ni en surcos ni en cárcavas.

No hay socavación pues ni siquiera hay cuerpos de aguas presentes.

No hay hondonadas o hundimientos.

Lo anterior también se verificó con el trabajo de campo donde se confirmó que no hay rasgos geomorfológicos indicativos de inestabilidad salvo porque se presenta un deslizamiento de tipo traslacional.

Se tiene entonces que se evidencia un proceso morfodinámico activos sobre el área de influencia directa como se observa en el mapa 2.

8.4 Aspectos topográficos

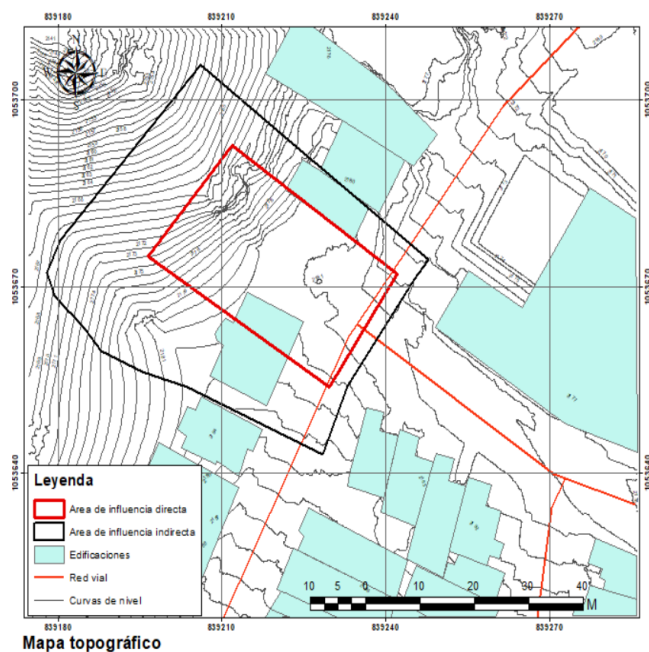
8.4.1 Topografía

Se realizó un sobrevuelo con Drone Mavic 2 Pro, en el cual se delimita la zona a levantar por medio de un polígono y líneas de vuelo programadas en el terreno, posteriormente con las fotos obtenidas se hace un procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales, generando así datos espaciales, de los cuales se puede obtener el ortomosaico, DEM y curvas de nivel.

En el Mapa 2 Se pueden observar las curvas de nivel que representan líneas imaginarias de la misma altura con respecto al nivel del mar, también se observan las vías tanto principales y edificaciones.

Mapa 2

Topografía



Fuente: Propia.

Del mapa topográfico se puede observar que las alturas de la zona de estudio oscilan entre 2141 y 2190 msnm. También se alcanza a identificar ciertas zonas de menor pendiente en donde las curvas están más espaciadas, por su parte, hay zonas de mayores pendientes donde las curvas están menos espaciadas. Esto se detallada en el apartado de pendientes que se presenta a continuación.

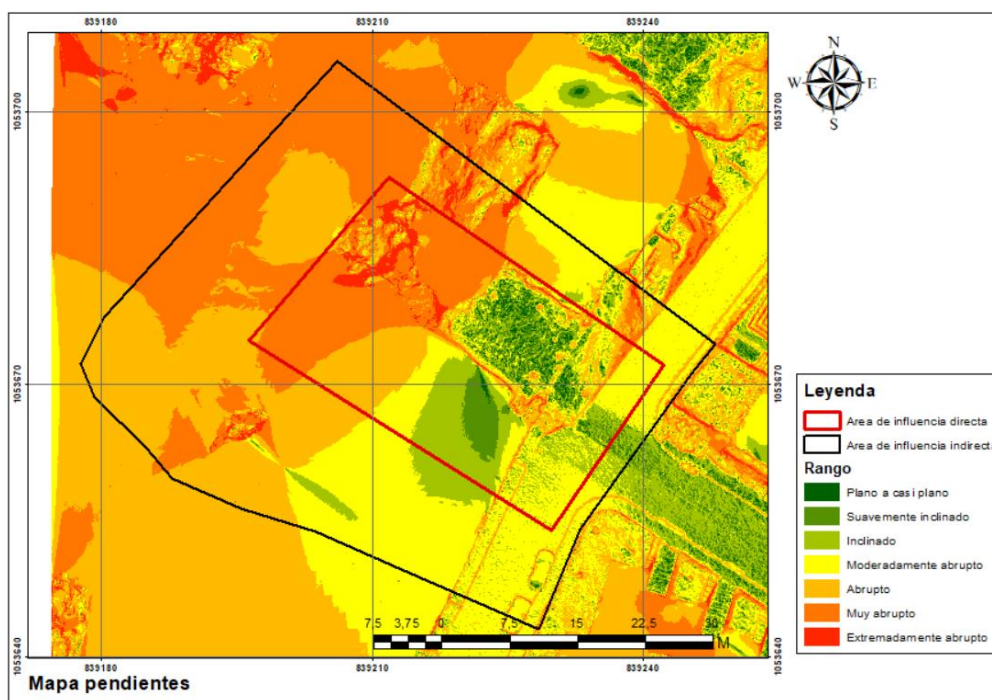
8.4.2 Pendientes

El mapa 3 de pendientes fue generado a través del modelo de elevación digital (DEM) obtenido con el sobrevuelo del dron, dicho DEM presenta una resolución de 5 centímetros lo que permitió la generación de insumos morfométricos conforme a la escala de trabajo exigida para estudios detallados en zona urbana, siguiendo los lineamientos técnicos en el

Decreto 1807 de 2014. A continuación, se presenta el mapa de pendientes de la zona de estudio.

Mapa 3

Pendientes



Fuente: Propia.

A partir de los rangos de pendientes proporcionados por el Servicio Geológico Colombiano, se muestra en la tabla 1 los valores obtenidos para la zona de estudio.

Tabla 1

Valores del área en porcentaje según intervalo de inclinación de la ladera

Inclinación (°)	Porcentaje del área con este valor
0 – 2	2,61925174%
2 – 4	4,87622835%
4 – 8	10,9645674%
8 – 16	28,2789749%

16 – 35	32,4571061%
35 – 55	18,8152708%
>55	1,9886007%

Fuente: Propia.

De acuerdo a la Tabla 2, tomada de la guía metodológica para zonificación de amenaza por movimiento en masa, los procesos característicos y condiciones del terreno de acuerdo a la inclinación, son los siguientes: 1) Moderadamente abrupto, cuando la inclinación está entre 16° y 35°, con esto, y al realizar un análisis detenido del mapa de pendientes, se concluye que la zona de estudio se encuentra en condiciones de inclinación abruptas a moderadamente abruptas, con alta propensión al desarrollo de surcos y susceptibles a erosión y deslizamientos.

Tabla 2

Rangos de pendientes

INCLINACIÓN (°)	PROCESOS CARACTERÍSTICOS Y CONDICIONES DEL TERRENO
0-2	Plano a casi plano. No hay denudación apreciable.
2-4	Suavemente inclinado. Movimientos en masa de baja velocidad y procesos erosivos de diferentes tipos, especialmente bajo condiciones periglaciares (solifluxión) y fluviales (erosión laminar y en surcos). Susceptible a desarrollar procesos erosivos.
4-8	Inclinado. Condiciones similares a las anteriores. Alta susceptibilidad a desarrollar procesos erosivos.
8-16	Moderadamente abrupto. Movimientos en masa de todos los tipos, especialmente solifluxión periglacial, reptación y ocasionalmente deslizamientos, también erosión de tipo laminar y en surcos. Susceptible a erosión y deslizamientos.
16-35	Abrupto. Procesos denudacionales intensos de diferentes tipos (erosión bajo cubierta forestal, reptación, deslizamientos). Alta propensión al desarrollo de procesos erosivos.
35-55	Muy abrupto. Afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, depósitos granulares caóticos de poco espesor.
> 55	Extremadamente abrupto. Afloramientos rocosos. Procesos denudacionales muy fuertes, especialmente "denudación de escarpe"; susceptible a rodamiento de rocas.

Fuente: Guía metodológica para zonificación de amenaza por movimiento en masa.

Sí bien hay pendientes que se clasifican como abrupta a extremadamente abruptas, éstas son así debido a los cortes que el ser humano ha podido ejecutar.

8.5 Aspectos geológicos

8.5.1 Geología local

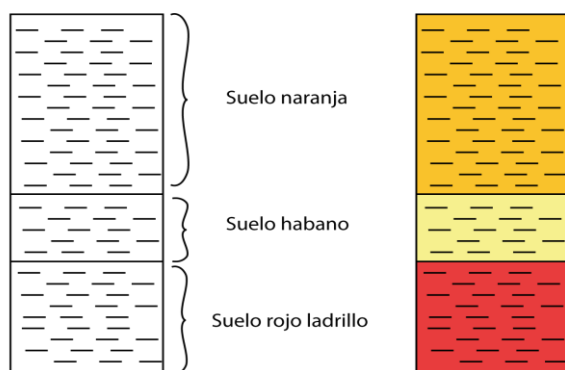
El área de interés se localiza sobre la litología conocida como Complejo Quebradagrande, específicamente en el suelo residual del miembro sedimentario (ksc), también se encuentra sobre depósitos de flujo piroclásticos (Qfl), los cuales fueron encontrados y posteriormente descritos durante la etapa de campo.

8.5.2 Perfil del suelo

En el área a intervenir se encuentran principalmente 3 capas de suelo, el primero corresponde a un estrato de suelo color naranja con textura arcillosa, su espesor varía desde 3,5m hasta 4m, seguido a este se encuentra un estrato que corresponde a suelo de color habano con textura arcillosa, su espesor varía desde ausente en algunas zonas hasta 1,5m, por último, se localiza un estrato caracterizado por suelo color rojo ladrillo con textura arcillosa, su espesor varía desde 3,5m hasta 4m. El perfil del suelo tiene 8m y se resume en la figura 9.

Figura 9

Esquema representativo del perfil de suelo



Fuente: Propia.

8.6 Unidades de geología para ingeniería

Para llegar al nivel de Unidades de Geología para Ingeniería (UGI) se discriminan las capas de suelo según su espesor y competencia geomecánica. A continuación, se presentan las propiedades ingenieriles para cada uno de los estratos obtenidos a partir de los ensayos realizados en laboratorio, y para cada uno se muestra el valor promedio de la humedad natural, resistencia a la compresión inconfiada, corte directo, clasificación granulométrica del suelo, entre otros. Se observan dichas propiedades en la tabla 3.

Tabla 3

Propiedades geomecánicas de las capas de suelo.

ESTRATO	PUH	PUS	W	LL	LP	IP	200	C	Phi	SUC S
	ton/m ³	ton/m ³	%	%	%	%	%	Ton/m ²	Grados	%
Naranja	1,636	1,042	56	53	47	6	52	2,52	36	MH
Habano	1,72	1,18	45	50	32	18	64	2,05	26	MH
Rojo ladrillo	1,671	1,146	45	47	33	14	67	1,47	35	ML

Fuente: Propia.

El mapa de UGI se construyó a partir del software ArcMap interpolando los espesores identificados con las perforaciones y agrupando las unidades según su origen.

En el Mapa 4, se observan 2 unidades geológicas para ingeniería: 1) Srlmprsn: Suelo residual limoso muy profundo de roca sedimentaria naranja 2) Srlmprsr: Suelo residual limoso muy profundo de roca sedimentaria rosado.

- Suelo residual limoso muy profundo de roca sedimentaria naranja (Srlmprsn)

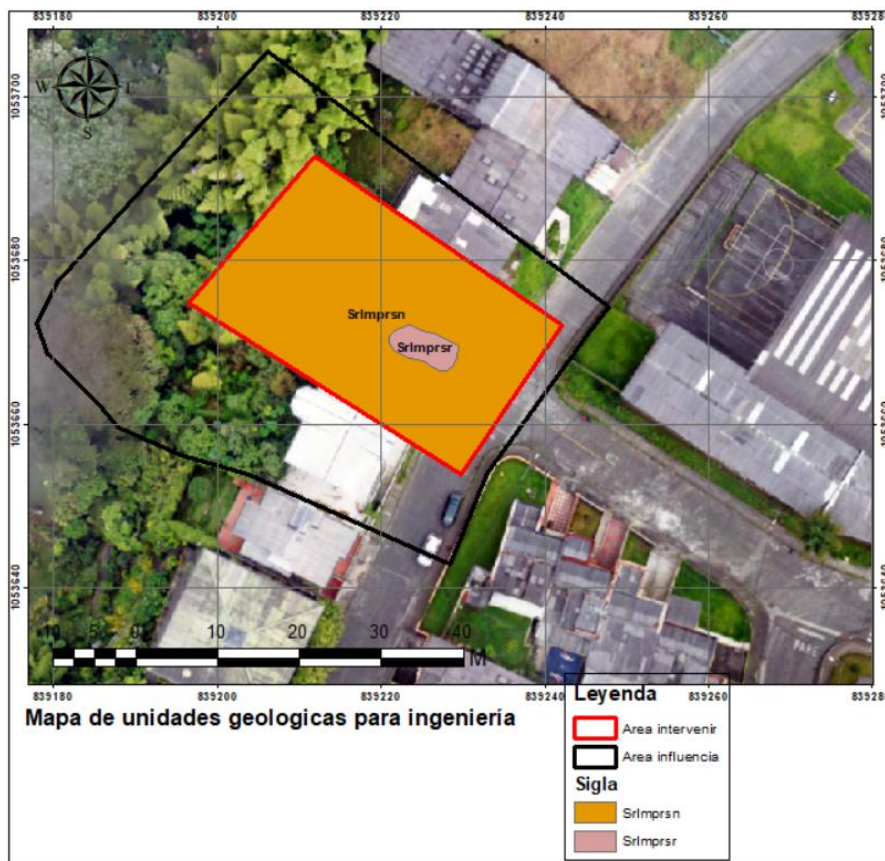
Esta unidad corresponde a los suelos que se han formado producto de la meteorización de las rocas sedimentarias que conforman el miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande y que han alcanzado espesores mayores a 1,5 m.

- Suelo residual limoso muy profundo de roca sedimentaria rosado (Srlmprsr)

Esta unidad corresponde a los suelos que se han formado producto de la meteorización de las rocas sedimentarias que conforman el miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande y que han alcanzado espesores mayores a 1,5 m.

Mapa 4

Unidades geológicas para ingeniería



Fuente: Propia.

8.7 Aspectos geomorfológicos y morfometría

La geomorfología relaciona la forma de la superficie con los procesos que la originaron y a las condiciones físicas y químicas a las que está sujeto. La geomorfología tiene como fin la definición de las formas del terreno, la explicación de su origen, cambios en el tiempo, naturaleza de los materiales, y procesos geomorfológicos modeladores.

Se realizó un análisis y evaluación visual con el fin de conocer de manera detallada la morfometría y morfogénesis del área en estudio, entendiendo por morfometría al atributo de la geomorfología que estudia las características cuantitativas de las formas del relieve (alturas, superficies, pendientes, volúmenes, etc.) y como morfogénesis la determinación del origen de las formas del terreno, es decir, las causas y procesos que dieron la forma al paisaje.

Un mapa geomorfológico funciona como un documento que integra aspectos, morfológicos, morfométricos y morfodinámicos.

La morfología indica las formas de la superficie de la tierra, tales como, la inclinación, longitud, altura, forma de la ladera, de las crestas y de los valles. Está sujeta a los procesos endógenos y exógenos que la afecten.

La morfometría hace referencia al análisis cuantitativo de la superficie del terreno en términos de medidas de longitud, área, forma y pendiente. Está enfocada en la caracterización y el análisis de los rasgos topográficos del paisaje. Los parámetros más frecuentemente medidos incluyen: altitud (altura sobre el nivel del mar), pendiente, dirección, curvatura, entre otros.

Los procesos morfodinámicos se encuentran asociados a los procesos exógenos, los cuales se encargan de modelar la superficie y geoformas existentes. Hay diferentes agentes exógenos como lo son: viento, agua, hielo y acción de la gravedad.

Contraste de relieve o relieve relativo: A partir de los datos de relieve anteriormente mencionados y expuestos en la tabla 4, teniendo en cuenta las alturas topográficas en las que se encuentra el área de estudio, se determina que el relieve de la ladera es muy bajo obteniendo un valor de 49 m dentro del intervalo <50 m, por lo que se considera material muy blando erosionable

Tabla 4

Rangos de relieve relativo

	DESCRIPCION DEL RELIEVE	RESISTENCIA RELATIVA DEL MATERIAL
< 50m	Muy bajo.	Materiales muy blandos y erosionables.
50 – 250 m	Bajo.	Blando erosionable.
250 – 500 m	Moderado.	Moderadamente blando y erosión alta.
500 – 1000 m	Alto.	Resistente y erosión moderada.
1000 – 2500 m	Muy alto.	Muy resistente y erosión baja.
> 2500 m	Extremadamente alto.	Extremadamente resistente y erosión muy baja.

Fuente: (SGC, 2012).

Inclinación de la ladera: Los valores predominantes de inclinación para la ladera en estudio son entre 16 y 35°, por lo que se considera entre muy inclinada, abrupta a muy abrupta, con resistencia y susceptibilidad moderada a movimientos en masa, según la guía metodológica del SGC, 2012.

Tabla 5*Rangos de inclinación de la ladera*

INCLINACION (Grados)	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS DEL MATERIAL Y COMPORTAMIENTO
< 5	Plana a suavemente inclinada.	Muy blanda y muy baja susceptibilidad a movimientos en masa (MM).
6 – 10	Inclinada.	Blanda y baja MM.
11 – 15	Muy Inclinada.	Moderadamente Blanda y Moderada susceptibilidad a MM.
16 – 20	Abrupta.	Moderadamente Resistente y Moderada susceptibilidad a MM.
21 – 30	Muy abrupta.	Resistente y Alta susceptibilidad a MM.
31 - 45	Escarpada.	Muy Resistente y Alta susceptibilidad a MM.
> 45	Muy Escarpada.	Extremadamente Resistente, baja susceptibilidad a MM.

Fuente: (SGC, 2012)

Longitud de la ladera: La longitud de la ladera en estudio se encuentra en una longitud 50-250m, con un valor de 243m, catalogándose como corta.

Tabla 6*Rangos de longitud de la ladera*

LONGITUD (metros)	DESCRIPCION
< 50m	Muy corta.
50 – 250 m	Corta.
250 – 500 m	Moderadamente larga.
500 – 1000 m	Larga.
1000 – 2500 m	Muy larga.
> 2500 m	Extremadamente larga.

Fuente: (SGC, 2012)

Forma de la ladera: En el área de estudio se encuentra un predominio de formas convexas.

Tabla 7

Movimientos en masa asociados de acuerdo con la forma de la ladera

CLASE	CARACTERÍSTICAS MATERIAL	MOVIMIENTOS EN MASA ASOCIADOS
RECTA	Alta resistencia y disposición estructural a favor de la pendiente.	Movimiento Traslacional.
CONCAVA	Material blando y disposición estructural no diferenciado.	Deslizamiento Rotacional.
CONVEXA	Materiales blandos y disposición estructural casi horizontal.	Predomina Meteorización y Erosión. Pequeños Deslizamientos Rotacionales.
IRREGULAR O ESCALONADA	Materiales con resistencia variada. Disposición estructural en contra de la pendiente.	Caida de Bloques. Erosión Diferencial.
COMPLEJA	Mezcla de materiales. Disposición estructural no definida.	Deslizamientos Complejos

Fuente: (SGC, 2012)

Mapa 5

Elementos geomorfológicos



Fuente: Propia

Según las características de la ladera observadas en campo se pueden identificar los siguientes elementos geomorfológicos expuestos en el mapa 5.:

- Planicies antrópicas planas
- Escarpes de erosión menor convexa de ladera corta y relieve relativo muy bajo

Adicionalmente se incluye el deslizamiento traslacional, cuyas características fueron descritas en el apartado de procesos erosivos.

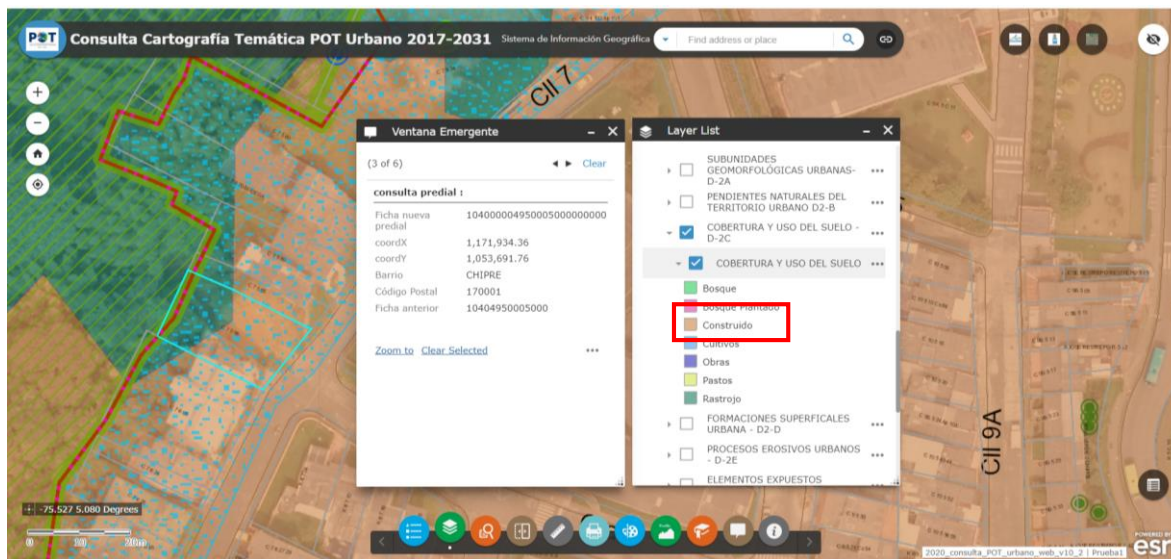
8.8 Cobertura del suelo, usos del suelo

8.8.1 Cobertura del suelo

El mapa de cobertura del POT de Manizales, tiene que para el área de interés predominan la cobertura de construcción. Como se puede observar en mapa realizado mediante el geoportal de la alcaldía de Manizales en la cartografía temática del (Alcaldía de Manizales, 2017) POT urbano, en la figura 10 se delimita el área de interés en color azul claro.

Figura 10

Cobertura y uso del suelo para el área de interés en el POT de Manizales



Fuente: Tomado de Geoportal Alcaldía de Manizales, Cartografía Temática POT Urbano

Las unidades identificadas por medio de fotografías aéreas y validación en campo fueron clasificadas de acuerdo a la tabla 8, leyenda de tercer nivel de Corine Land Cover.

Tabla 8

Leyenda tercer nivel de Corine Land Cover

NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
1. Territorios artificializados	1.1. Zonas urbanizadas	1.1.1. Tejido urbano continuo
		1.1.2. Tejido urbano discontinuo
		1.1.3. Construcciones rurales
	1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	1.2.1. Zonas industriales o comerciales
		1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados
		1.2.3. Zonas portuarias
		1.2.4. Aeropuertos
		1.2.5. Obras hidráulicas
	1.3. Zonas de extracción minera y escombreras	1.3.1. Zonas de extracción minera
		1.3.2. Zonas de disposición de residuos
1.4. Zonas verdes artificializadas no agrícolas		
2. Territorios agrícolas	2.1. Cultivos transitorios	2.1.1. Otros cultivos transitorios
		2.1.2. Cereales
		2.1.3. Oleaginosas y leguminosas
		2.1.4. Hortalizas
		2.1.5. Tubérculos
	2.2. Cultivos permanentes	2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos
		2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos
		2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos
		2.2.4. Cultivos agroforestales
		2.2.5. Cultivos confinados

NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
		2.3.1. Pastos limpios
	2.3. Pastos	2.3.2. Pastos arbolados
		2.3.3. Pastos enmalezados
		2.3.4. Pastos degradados
		2.4.1. Mosaico de cultivos
		2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
		2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales
		2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales
		3.1.1. Bosque denso
		3.1.2. Bosque abierto
	3.1. Bosques	3.1.3. Bosque fragmentado
		3.1.4. Bosque de galería o ripario
		3.1.5. Plantación forestal
		3.2.1. Herbazal
3. Bosques y áreas seminaturales	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	3.2.2. Arbustal
		3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
		3.3.1. Zonas arenosas naturales
		3.3.2. Afloramientos rocosos
	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
		3.3.4. Zonas quemadas
		3.3.5. Zonas glaciales y nivales
		4.1.1. Humedales y zonas pantanosas
4. Áreas húmedas	4.1. Áreas húmedas continentales	4.1.2. Turberas
		4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpo de agua
		5.1.1. Ríos
		5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales
	5.1. Aguas continentales	5.1.3. Canales - (vallados y acequias)
5. Superficies de agua		5.1.4. Cuerpos de agua artificiales
		5.2.1. Lagunas costeras
	5.2. Aguas marítimas	5.2.2. Mares y océanos
		5.2.3. Estanques para acuicultura marina

Fuente: Guía metodológica para zonificación de amenaza por movimiento en masa.

En el estudio se tomó la imagen actualizada de la zona que corresponde al ortomosaico generado por medio de las fotografías captadas por el dron, de donde se realizó la identificación de las coberturas de tierras en el tiempo actual (CCT-t1).

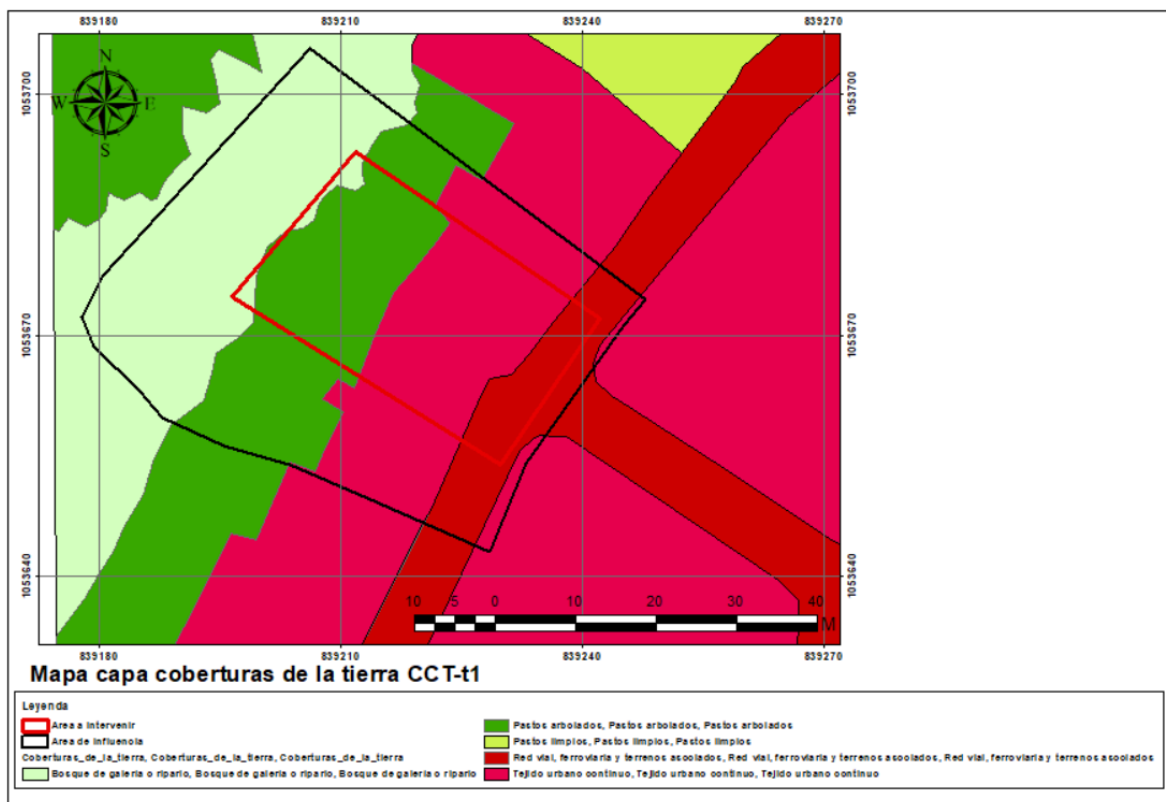
Capa de cobertura de tierras en el tiempo actual (CCT-t1): las unidades identificadas corresponden a pastos limpios, bosques riparios, pastos arbolados, red vial y tejido urbano, como se identifica en el Mapa 6.

La clasificación final para el mapa de coberturas de tierra y su división conforme a Corine Land Cover, es la siguiente:

- Unidad 1: Nivel 1: territorios agrícolas, Nivel 2: pastos, Nivel 3: pastos arbolados.
- Unidad 2: Nivel 1: territorios agrícolas, Nivel 2: pastos, Nivel 3: pastos limpios.
- Unidad 3: Nivel 1: territorios artificializados, Nivel 2: zonas industriales o comerciales y redes de comunicación, Nivel 3: red vial, ferroviaria y terrenos asociados.
- Unidad 4: Nivel 1: territorio artificializado, Nivel 2: zonas urbanas, Nivel 3: tejido urbano continuo.
- Unidad 5: Nivel 1: Bosques y áreas seminaturales, Nivel 2: Bosques, Nivel 3: Bosques de galería o ripario.

Mapa 6

Capa de coberturas de la tierra CCT-t1



Fuente: Propia.

8.8.2 Usos del suelo

El uso del suelo es la utilidad que presta la cobertura de la tierra al ser humano, las funciones económicas de una porción específica de la tierra (como el uso urbano o industrial, de reserva natural, entre otros) (IDEAM, 2012). La clasificación de usos del suelo se realizó por medio de la tabla 9, y se presenta en el Mapa 7.

Los usos del suelo dados a la cobertura de tierras en la zona de estudios son los siguientes:

- Unidad 1: Nivel 1: territorios agrícolas, Grupo de uso: otros usos, Uso actual: tierras en descanso.
- Unidad 2: Nivel 1: territorio artificializado, Grupo de uso: asentamientos, Uso actual: Residencial.
- Unidad 3: Nivel 1: territorios agrícolas, Grupo de uso: infraestructura, Uso actual: transporte.

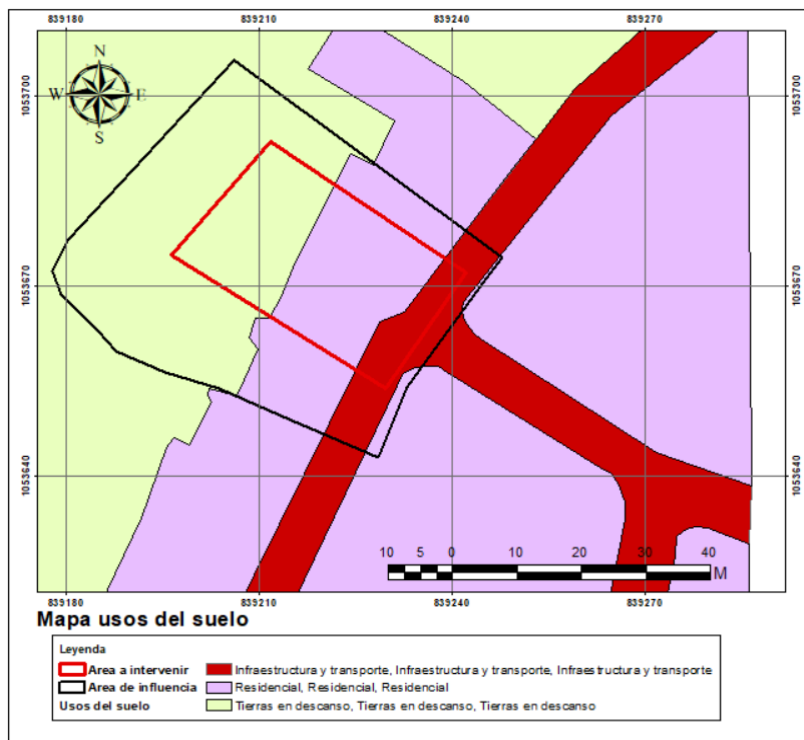
Tabla 9*Leyenda de usos del suelo*

NIVEL I	GRUPO DE USO	USO ACTUAL
1. Territorios artificializados	* Asentamiento	* Residencial
		* Comercial
		* Industrial
	* Infraestructura	*Infraestructura y transporte
		*Recreacional, deportivo o turístico
		* Transporte
	* Minería	*Materiales de construcción
		*Metales radiactivos
		* Minerales no metálicos
		* Minerales energéticos
*Piedras preciosas		
* Otros usos	* Disposición de materiales líquidos	
	*Disposición de materiales sólidos	
2. Territorios agrícolas	* Agricultura	* Cultivos transitorios intensivos
		* Cultivos transitorios semintensivos
		* Cultivo permanente intensivo
		* Cultivo permanente semi intensivo
	* Ganadería	* Pastoreo semi intensivo
		* Pastoreo intensivo
	* Otros usos	* Tierras en descanso
	* Agricultura	* Producción
	* Agroforestal	* Sistemas combinados de agricultura y forestería
	* Agrosilvopastoril	*Sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería
	* Agropecuario	*Cultivos permanentes semi-intensivos con pastoreo extensivo
	* Agrosilvopastoril	*Sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería
	* Silvopastoril	*Sistemas combinados de ganadería y forestería
	* Conservación	*Protección
	3. Áreas naturales y seminaturales	* Conservación
* Producción - Protección		
* Forestal		* Sistema forestal productor (FFPD)
		* Sistema forestal protector (FPR)
* Conservación		* Protección
* Otros usos		* Pastoreo
* Conservación		* Producción
		* Protección
* Agroforestal		* Producción - Protección
* Conservación		* Protección
* Otros usos	* Tierras en descanso	
Otros usos	* Protección	
* Sin uso	* Sin uso	
* Otros usos	* Restauración	
	* Recuperación	

Fuente: Guía metodológica para zonificación de amenaza por movimiento en masa.

Mapa 7

Capas de usos del suelo CUS-t1



Fuente: Propia.

8.9 Aspectos geotécnicos

8.9.1 Prospección geotécnica

Para estudios detallados de amenaza, se deben seleccionar secciones representativas de análisis; en ellas se recomienda ubicar por lo menos tres sondeos que permitan identificar el perfil geotécnico, el espesor de los materiales y la zona de falla potencial.

Estos sondeos tendrán que llegar, mínimo, hasta 3 m por debajo de la superficie estimada de deslizamiento, ya que la profundidad del deslizamiento no superó los 2 m; con lo anterior, se busca tener un conocimiento íntegro de los materiales en profundidad. Según lo

anterior, y con el fin de dar cumplimiento a los mínimos exigidos normativamente, se realizaron cuatro (4) sondeos mecánicos en el área de estudio para establecer espesores de las capas de suelos y profundidades del nivel freático, así como su continuidad espacial, los cuales se muestran en el mapa 8.

Mapa 8

Localización de los sondeos exploratorios



Fuente: Propia

8.9.2 Caracterización de la columna estratigráfica

Para construir un modelo geológico – geotécnico adecuado, se deben tener en cuenta las condiciones intrínsecas que determinan la estabilidad del terreno, como tipo de material, espesor, pendiente, condiciones de agua, cobertura, etc., presentan variabilidad espacial; por

lo tanto, resulta conveniente identificar unidades geotécnicamente homogéneas, con el fin de plantear en cada caso un modelo conceptual que involucre en forma consistente las características geológicas y geomorfológicas y los parámetros geotécnicos, de modo que se puedan hacer cálculos de estabilidad para obtener en cada zona la amenaza por remoción en masa de manera determinística, basada en el cálculo de los factores de seguridad. (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Para la determinación del modelo geológico geotécnico se tuvo en cuenta el mapa de unidades geológicas de ingeniería, el mapa de elementos geomorfológicos, la exploración geotécnica y los resultados de los ensayos de laboratorio. Los elementos definidos en el modelo son:

- La pendiente del terreno, la cual se obtuvo a partir del modelo de elevación digital obtenido a partir de las curvas de nivel levantadas en campo con ayuda de un vuelo de dron.
- El espesor del suelo y su variación, que se pudo establecer gracias a la descripción detallada de las perforaciones.
- La litoestratigrafía que incluye los parámetros geotécnicos, adquiridos de los resultados de los ensayos de laboratorio.
- La posición del nivel freático, que sí bien en las perforaciones no se detectó, se asumió como si existiera en la tercera parte del estrato más superficial. Esto se hace debido a que el nivel de aguas freáticas es un parámetro muy variable que depende intensamente de la temporada del año y del régimen de pluviosidad de ese momento. Sí bien, no se detecta en las perforaciones, Manizales es una zona bastante lluviosa en donde no se debe despreciar el efecto del agua.

8.9.3 Estabilidad de taludes

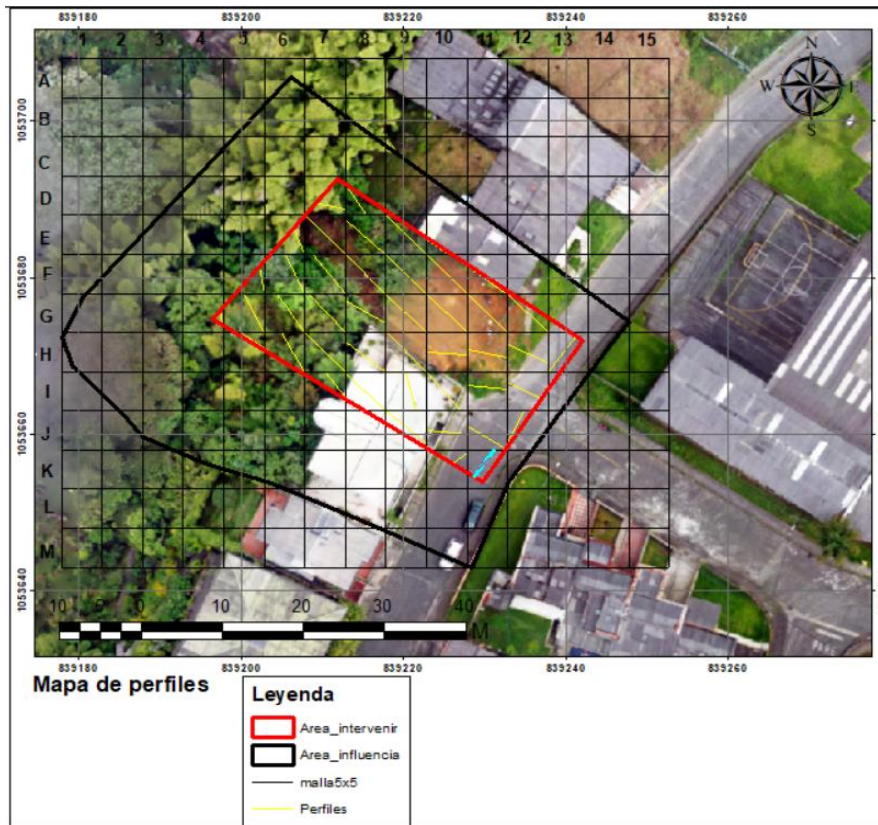
8.9.3.1 Perfiles de análisis

Para conseguir un mapa de zonificación por movimiento en masa se hace indispensable el cálculo de factores de seguridad, los cuales deben obedecer a una unidad de análisis adecuada. Se determinó que el ancho de la malla que se ajusta al perfil de suelo, es de 5 metros debido a que cobijaba alturas acordes a la profundidad de exploración. Así las cosas, la unidad de análisis para este estudio es una malla de 5 x 5 metros.

Con ayuda del software ArcMap y mediante el uso de la herramienta Fishnet, se creó la malla de análisis, de tal manera que se abarcara toda el área de influencia que se determinó anteriormente. La malla tuvo un total de 15 columnas y 15 filas tal y como puede observarse en el Mapa 9. Las columnas fueron nombradas con números del 1 al 15 y las filas fueron nombradas con letras de la A la O.

Mapa 9

Localización de los perfiles que serán analizados como líneas de estabilidad con su respectiva malla



Fuente: Propia.

Posteriormente, se examinó cuáles celdas de la malla coincidían con el área a intervenir para que con base en ello se tomara la decisión de cuáles perfiles de análisis utilizar. Después de dicho análisis se llegó a la construcción de 44 perfiles de análisis cuya nomenclatura depende de su localización en la malla, por ejemplo, si el perfil se dibujó dentro de la celda cuya fila corresponde a C y cuya columna corresponde a 13, entonces el perfil se llamará C13. Los perfiles analizados se presentan en la Tabla 10 expuesta a continuación:

Tabla 10

Discriminación de los perfiles de análisis utilizados para la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimiento en masa

Perfil			
D7	F9	G12	I8
D8	F10	H5	I9
E6	F11	H6	I10
E7	G4	H7	I11
E8	G5	H8	I12
E9	G6	H9	J9
E10	G7	H10	J10
F5	G8	H11	J11
F6	G9	H12	J12
F7	G10	H13	K11
F8	G11	I7	K12

Fuente: Propia

Cada uno de los 44 perfiles de análisis se elaboró con la ayuda del software Global Mapper y fueron exportados a formatos CAD para su procesamiento. Todos los perfiles pueden observarse en formato DXF en el Anexo D. Perfiles de análisis; cada uno de ellos cuenta con información de coordenada de origen y coordenada de fin para la línea de corte, altura y longitud del perfil y se puede verificar su pendiente.

8.9.3.2 Análisis de susceptibilidad

Tomando en cuenta las condiciones actuales del terreno y con base en las propiedades geomecánicas calculadas en el laboratorio y con la profundidad del nivel de aguas freáticas asumido, ya que no se encontró en los sondeos exploratorios, se modelaron los 44 perfiles de análisis en el software Slide 5.0, obteniendo los resultados que se presentan en la tabla 11.

Tabla 11*Factores de seguridad resultantes de los análisis de susceptibilidad*

Perfi	Bishop	Janbu	GLE	Final	Perfi	Bishop	Janbu	GLE	Final
D7	2,01	1,92	1,99	1,92	F9	2,66	2,58	2,66	2,58
D8	3,17	3,37	3,62	3,17	F10	7,99	7,84	7,99	7,84
E6	3,62	33,99	34,72	3,62	F11	40,37	37,39	40,37	37,39
E7	3,05	4,83	5,24	3,05	G4	8,39	10,27	47,21	8,39
E8	1,41	1,57	2,77	1,41	G5	2,83	2,87	44,16	2,83
E9	1,76	1,95	27,40	1,76	G6	2,80	2,72	2,84	2,72
E10	4,38	4,48	4,48	4,38	G7	3,83	3,80	3,83	3,80
F5	3,24	3,21	3,40	3,21	G8	4,87	4,67	4,86	4,67
F6	1,39	1,52	2,17	1,39	G9	40,82	38,68	40,81	38,68
F7	1,14	1,22	1,80	1,14	G10	169,18	164,40	169,10	164,40
F8	1,41	1,28	1,41	1,28	G11	119,87	108,44	119,87	108,44

Perfi	Bishop	Janbu	GLE	Final	Perfi	Bishop	Janbu	GLE	Final
G12	8,38	7,76	8,38	7,76	I8	25,34	24,40	25,34	24,40
H5	6,85	7,76	13,76	6,85	I9	116,97	111,78	116,96	111,78
H6	5,67	5,43	5,66	5,43	I10	36,99	35,45	36,98	35,45
H7	15,53	14,25	15,52	14,25	I11	14,45	13,57	14,44	13,57
H8	12,07	11,67	12,06	11,67	I12	78,49	72,10	78,49	72,10
H9	84,28	82,27	84,28	82,27	J9	167,67	164,46	167,67	164,46
H10	13,58	12,88	13,57	12,88	J10	25,04	23,33	25,04	23,33
H11	50,95	47,77	50,94	47,77	J11	14,45	13,47	14,45	13,47
H12	14,93	14,04	14,92	14,04	J12	37,50	33,73	37,50	33,73
H13	14,70	13,93	14,69	13,93	K10	70,27	65,36	70,27	65,36
I7	16,27	15,52	16,27	15,52	K11	25,07	23,05	25,06	23,05

Fuente: Propia.

Dado que se tienen 44 imágenes, una por cada perfil, que ilustra cada uno de los resultados expuestos en la tabla anterior, no se presentan en este documento dado que ocuparían bastante espacio; sin embargo, pueden consultarse en el Anexo F. Resultados de los análisis de estabilidad. De igual manera, los archivos en formato. sli del programa Slide 5.0 pueden verificarse en el Anexo E. Archivos de Slide.

Teniendo en cuenta la tabla 11, los sitios son en su mayoría estables y seguros para condiciones normales, pues para condiciones estáticas el mínimo de factor de seguridad admitido es de 1,5, salvo por aquellos casos donde está por debajo de 1,5 donde aún hay estabilidad, pero se pierde la seguridad. En el mapa 10 se presenta gráficamente el resultado de la zonificación de la susceptibilidad.

Mapa 10

Zonificación de la susceptibilidad



Fuente: Propia.

De los datos obtenidos del modelo, se puede interpretar que la mayoría del área se encuentra en susceptibilidad baja, esto porque a la hora de interpolar la información obtenida de los perfiles de estabilidad casi todos los datos cuentan con un factor de seguridad alto, cerca del deslizamiento se observan unas pequeñas zonas de color amarillo, que indican susceptibilidad media, y la zona en color rojo corresponde al deslizamiento.

8.9.4 Escenarios de amenaza

Se refiere a todas las combinaciones de las características geoambientales, incluyendo los factores condicionantes y los factores detonantes, que pueden incidir en la probabilidad espacial, probabilidad de magnitud y probabilidad temporal, en la generación de un movimiento en masa.

Los escenarios de amenaza definidos para el análisis de la amenaza por remoción en masa corresponden a escenario de lluvias y escenario de sismo.

8.9.4.1 Escenario de lluvia

Una vez definidas las unidades de suelo para los análisis, es necesario contar con información de campo para evaluar la inestabilidad resultante de la precipitación relacionada con los cambios del nivel freático. Existen evidencias muy claras de la relación directa entre las lluvias y la ocurrencia de movimientos en masa. Los deslizamientos pueden ocurrir durante o inmediatamente después de presentarse una lluvia. Cuando las lluvias son muy intensas puede llegarse incluso a la saturación completa del talud durante la lluvia.

La activación de un deslizamiento puede depender no solamente de la cantidad total de lluvia sino también de la duración y de la intensidad de la lluvia y del régimen de los periodos lluviosos, entre más lenta sea la lluvia habrá más infiltración y menos escorrentía. La proporción escorrentía- infiltración depende de la intensidad de la lluvia, la pendiente, la cobertura vegetal y la permeabilidad del suelo subsuperficial.

Los movimientos en masa detonados por lluvias causan grandes pérdidas económicas. Es así que los sistemas tropicales húmedos de montaña, se caracterizan por su complejidad y fragilidad, de allí surge la necesidad de generar conocimiento propio de ese ambiente con el fin de conceptualizar y buscar la interrelación de sus componentes para un adecuado ordenamiento del territorio y el direccionamiento hacia el desarrollo sostenible.

Para un periodo de retorno dado, en este caso 20 años, el nivel freático tenderá a subir cuando se presente eventos lluviosos máximos extremos.

Se supone que la serie de acumulados anuales de lluvia infiltrable sigue una distribución normal por ser suma de eventos de precipitación individuales. El valor de 1,65 corresponde, entonces, al valor Z de la distribución normal estándar asociado a una probabilidad de excedencia anual de 0,05, correspondiente a un periodo de retorno de 20 años.

A continuación, en la Tabla 12, se presenta el valor de las profundidades a las que se asumió el nivel freático aguas (NAF), esto porque en ninguno de los sondeos se encontró NAF, entonces con ánimo de ser conservadores y cumplir los lineamientos de la gestión del riesgo, el NAF se toma a 0.33% de la capa de suelo más superficial, además de esto para generar el modelo de escenario de lluvia se tomaran perfiles saturados.

Tabla 12*Profundidad de los niveles de agua freática según los perfiles de análisis*

Perfil de análisis	Profundidad del NAF (m)	Perfil de análisis	Profundidad del NAF (m)	Perfil de análisis	Profundidad del NAF (m)	Perfil de análisis	Profundidad del NAF (m)
D7	2,48	G12	2,58	F9	2,64	I8	2,47
D8	2,48	H5	2,48	F10	2,66	I9	2,36
E6	2,48	H6	2,48	F11	2,64	I10	2,33
E7	2,48	H7	2,48	G4	2,48	I11	2,45
E8	2,49	H8	2,47	G5	2,48	I12	2,48
E9	2,51	H9	2,23	G6	2,48	J9	2,48
E10	2,57	H10	2,09	G7	2,49	J10	2,48
F5	2,48	H11	2,43	G8	2,58	J11	2,48
F6	2,48	H12	2,51	G9	2,51	J12	2,48
F7	2,49	H13	2,49	G10	2,44	K10	2,48
F8	2,57	I7	2,48	G11	2,61	K11	2,48

Fuente: Propia

Tabla 13*Profundidad de los niveles de agua freática para un período de retorno de 20 años según el perfil de análisis.*

Perfil	Pf (m)	Pf (mm)	Pf 20 (mm)	Pf 20 (m)	Altura NAF (m)	Perfil	Pf (m)	Pf (mm)	Pf 20 (mm)	Pf 20 (m)	Altura NAF (m)
D7	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68	G12	2,58	2580	-1800	-1,8	0,78
D8	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68	H5	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68
E6	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68	H6	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68
E7	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68	H7	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68
E8	2,49	2490	-1800	-1,8	0,69	H8	2,47	2470	-1800	-1,8	0,67
E9	2,51	2510	-1800	-1,8	0,71	H9	2,23	2230	-1800	-1,8	0,43
E10	2,57	2570	-1800	-1,8	0,77	H10	2,09	2090	-1800	-1,8	0,29
F5	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68	H11	2,43	2430	-1800	-1,8	0,63
F6	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68	H12	2,51	2510	-1800	-1,8	0,71
F7	2,49	2490	-1800	-1,8	0,69	H13	2,49	2490	-1800	-1,8	0,69
F8	2,57	2570	-1800	-1,8	0,77	I7	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68
F9	2,64	2640	-1800	-1,8	0,84	I8	2,47	2470	-1800	-1,8	0,67
F10	2,66	2660	-1800	-1,8	0,86	I9	2,36	2360	-1800	-1,8	0,56
F11	2,64	2640	-1800	-1,8	0,84	I10	2,33	2330	-1800	-1,8	0,53
G4	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68	I11	2,45	2450	-1800	-1,8	0,65
G5	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68	I12	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68

G6	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68	J9	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68
G7	2,49	2490	-1800	-1,8	0,69	J10	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68
G8	2,58	2580	-1800	-1,8	0,78	J11	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68
G9	2,51	2510	-1800	-1,8	0,71	J12	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68
G10	2,44	2440	-1800	-1,8	0,64	K10	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68
G11	2,61	2610	-1800	-1,8	0,81	K11	2,48	2480	-1800	-1,8	0,68

Fuente: Propia

Los resultados anteriores muestran los valores de profundidad a los que se esperaría que se presente el nivel freático para un periodo de retorno de 20 años. Algunos puntos, que indican valores negativos, dan a interpretar que el nivel freático alcanzará el nivel de superficie, generando posiblemente sitios de encharcamiento o rebose la capa freática. De manera general, de acuerdo con el empleo de la metodología expuesta, el nivel freático en la zona de estudio ascendería aproximadamente 1,8 m para un periodo de retorno de 20 años.

8.9.4.2 Análisis de amenaza en escenario de lluvia

En este escenario, se modificó la profundidad del nivel de aguas freáticas mostrado en los análisis de susceptibilidad y se ajustó a las profundidades mostradas en la Tabla 14, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 14

Factores de seguridad resultantes de los análisis de amenaza en escenario de lluvia

Perfil	Bishop	Janbu	GLE	Final	Perfil	Bishop	Janbu	GLE	Final
D7	2,01	1,92	1,99	1,92	G12	7,97	7,39	7,97	7,39
D8	3,00	3,18	3,41	3,00	H5	4,54	4,95	6,67	4,54
E6	3,42	33,81	34,51	3,42	H6	4,21	4,04	4,21	4,04
E7	2,96	4,81	5,20	2,96	H7	4,89	4,59	4,88	4,59
E8	1,29	1,38	2,06	1,29	H8	11,62	11,24	11,62	11,24
E9	1,64	1,78	27,30	1,64	H9	83,09	80,90	83,08	80,90
E10	4,15	4,28	4,35	4,15	H10	13,30	12,63	13,30	12,63

F5	3,03	2,91	3,03	2,91	H11	51,17	47,97	51,16	47,97
F6	1,30	1,37	1,74	1,30	H12	14,60	13,74	14,60	13,74
F7	1,05	1,08	1,36	1,05	H13	14,21	13,48	14,20	13,48
F8	1,34	1,00	1,34	1,00	I7	15,83	15,10	15,83	15,10
F9	2,45	2,37	2,44	2,37	I8	24,55	23,65	24,55	23,65
F10	7,71	7,51	7,71	7,51	I9	115,46	110,32	115,46	110,32
F11	40,58	37,82	40,57	37,82	I10	36,95	35,40	36,94	35,40
G4	8,15	10,05	47,03	8,15	I11	14,09	13,26	14,09	13,26
G5	2,63	2,63	2,64	2,63	I12	77,88	71,59	77,87	71,59
G6	2,37	2,28	2,37	2,28	J9	165,70	162,54	165,70	162,54
G7	2,58	2,56	2,58	2,56	J10	24,56	22,94	24,56	22,94
G8	4,04	3,87	4,04	3,87	J11	14,12	13,17	14,11	13,17
G9	40,49	38,34	40,49	38,34	J12	36,69	33,05	36,69	33,05
G10	167,62	162,90	167,62	162,90	K10	69,55	65,39	69,55	65,39
G11	143,90	133,35	143,90	133,35	K11	24,47	22,98	24,46	22,98

Fuente: Propia.

De la misma manera que se mencionó para el análisis de susceptibilidad, los perfiles generados en este apartado se encuentran en la carpeta de anexos correspondiente

Mapa 11

Zonificación de la amenaza en escenario de lluvia



Fuente: Propia.

Después de utilizar el método de (IDW), se generó el modelo de escenario de precipitación o lluvia, en el cual se observa la mayor parte del área de color verde indicando una amenaza baja, las manchas de color amarillo indican amenaza media y dentro de estas manchas se encuentra unas pequeñas manchas rojas indicando amenaza alta, en este también se adjunta el deslizamiento que corresponde a amenaza alta, en comparación a el modelo de susceptibilidad se puede observar un crecimiento en el tamaño de la manchas y como comienzan a aparecer las pequeñas manchas rojas, como se observa en el mapa 11.

8.9.4.3 Escenario de sismo

Los sismos han sido actores principales en la generación u ocurrencia de movimientos en masa a lo largo de la historia, por esto es de gran importancia hacer un modelamiento en condición de sismo. Caídas de roca, deslizamientos de suelos y deslizamientos en roca en laderas escarpadas, involucrando capas superficiales de suelo y roca descompuesta, han sido los tipos de movimientos en masa más comunes detonados por sismos históricos (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Para aplicar el escenario sísmico, se debe conocer el coeficiente de aceleración horizontal para poder analizar el equilibrio límite en condición pseudoestática para que, a partir del mismo, se determinen los componentes verticales y horizontales de la carga sísmica de la zona.

Los valores sísmicos son tomados de la NSR-10, con base en el coeficiente de aceleración pico horizontal del municipio en donde se lleva a cabo el análisis para el área a intervenir.

Tabla 15

Valores de los coeficientes de movimiento sísmico para los municipios del departamento de Caldas

Departamento de Caldas						
Municipio	Código Municipio	A _a	A _v	Zona de Amenaza Sísmica	A _e	A _d
Manizales	17001	0.25	0.25	Alta	0.20	0.10
Aguadas	17013	0.25	0.25	Alta	0.20	0.10
Anserma	17042	0.25	0.30	Alta	0.20	0.10
Aranzazu	17050	0.25	0.25	Alta	0.19	0.09
Belalcázar	17088	0.25	0.30	Alta	0.20	0.10
Chinchiná	17174	0.25	0.25	Alta	0.20	0.10
Filadelfia	17272	0.25	0.25	Alta	0.20	0.10
La Dorada	17380	0.15	0.20	Intermedia	0.11	0.06
La Merced	17388	0.25	0.25	Alta	0.21	0.10
Manzanares	17433	0.20	0.20	Intermedia	0.20	0.10
Marmato	17442	0.25	0.25	Alta	0.20	0.10
Marquetalia	17444	0.20	0.20	Intermedia	0.17	0.08
Marulanda	17446	0.20	0.25	Alta	0.18	0.09
Neira	17486	0.25	0.25	Alta	0.19	0.10
Norcasia	17495	0.15	0.20	Intermedia	0.15	0.07
Pácora	17513	0.25	0.25	Alta	0.20	0.10
Palestina	17524	0.25	0.25	Alta	0.20	0.10
Pensilvania	17541	0.20	0.20	Intermedia	0.18	0.09
Riosucio	17614	0.25	0.30	Alta	0.20	0.10
Risaralda	17616	0.25	0.30	Alta	0.20	0.10
Salamina	17653	0.25	0.25	Alta	0.18	0.09
Samaná	17662	0.20	0.20	Intermedia	0.19	0.09
San José	17665	0.25	0.30	Alta	0.20	0.10
Supía	17777	0.15	0.30	Alta	0.20	0.10
Victoria	17867	0.25	0.20	Alta	0.13	0.06
Villamaría	17873	0.25	0.25	Alta	0.18	0.09
Viterbo	17877	0.25	0.30	Alta	0.23	0.10

Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

A partir de la Tabla 15, se tiene entonces que, específicamente para Manizales, el coeficiente de aceleración pico horizontal (A_a) es 0.25.

El procedimiento para determinar el valor de carga sísmica horizontal y vertical que será utilizada en el modelamiento implica determinar el tipo de perfil de suelo que se tiene en el sector según las consideraciones explicada en la NSR-10.

Tabla 16

Tipos de perfiles de suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $\bar{v}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s > $\bar{v}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s > $\bar{v}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) > $\bar{s}_u \geq 50$ kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²)
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	180 m/s > \bar{v}_s
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	IP > 20 w $\geq 40\%$ 50 kPa (≈ 0.50 kgf/cm ²) > \bar{s}_u
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F₁ — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F₂ — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F₃ — Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con Índice de Plasticidad IP > 75) F₄ — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)	

Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

No se tiene un dato específico ni de velocidad de la onda S ni de número de golpes de SPT, pero sí se cuenta con información geomecánica suficiente. Como se observa en la tabla 16 los suelos deben estar agrupados en tipos C, D o E; los suelos tipo C no suelen aparecer en regiones de actividad sísmica alta y suelen tener resistencias a la compresión altas.

Para saber en qué perfil de suelo se clasifican los estratos identificados, la NSR-10 presenta la Tabla 17. Destacan tres propiedades: índice de plasticidad (IP), humedad (w) y resistencia a la compresión última (Su). Un suelo tipo E será aquel que, simultáneamente,

tenga un IP mayor a 20, un porcentaje de humedad mayor o igual a 40 y una resistencia a la compresión última menor a 50 KPa, en caso contrario será tipo D o C. En las capas de suelos encontrados se tiene que:

Tabla 17

Consideraciones para establecer si un estrato de suelo se clasifica como perfil tipo E según sus propiedades geomecánicas

Estrato	IP (%)	w (%)	Su (KPa)	Es tipo E?
1	6	56	100,5	NO
2	18	45	43,0	NO
3	14	45	70,7	NO

Fuente: Propia.

Según la tabla anterior, ninguno de los estratos ninguno de los estratos es estrictamente tipo E pues no se cumple simultáneamente que el IP sea mayor 20, el porcentaje de humedad sea mayor a 40; y la Su sea menor a 50, se cumplen unos u otros, lo cierto es que las humedades superan el límite en todos los casos, y por ello se consideran los estratos como de perfil E.

Una vez conocidos el tipo de perfil de suelo y el coeficiente de aceleración pico horizontal, se pueden determinar los coeficientes Fa y Fv correspondientes a los valores de los períodos cortos e intermedios del espectro sísmico, siguiendo las tablas 18 y 19.

Tabla 18*Valores de Fa para la zona de períodos cortos en el espectro*

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_a \leq 0.1$	$A_a = 0.2$	$A_a = 0.3$	$A_a = 0.4$	$A_a \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

Tabla 19*Valores de Fv para la zona de períodos intermedios en el espectro*

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_v \leq 0.1$	$A_v = 0.2$	$A_v = 0.3$	$A_v = 0.4$	$A_v \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

Los coeficientes Fa y Fv serán 1.45 y 3.0, respectivamente.

Paso por seguir es la determinación del coeficiente de importancia, este responde a qué tipo de edificación se construirá. Dado que se prospectan construir edificaciones de ocupación normal (Grupo I), el coeficiente de importancia será 1.00.

Para conocer la aceleración máxima horizontal se plantea que:

$$a_{max} = Fa * I * A_a$$

Donde a_{max} es la aceleración máxima, F_a es el coeficiente para zona de períodos cortos en el espectro, I es el coeficiente de importancia y A_a es el coeficiente de aceleración pico horizontal.

$$a_{max}=1.45*1*0.25$$

$$a_{max}=0.362$$

Ahora bien, el título H de la NSR-10 explica que “el coeficiente sísmico de diseño para análisis pseudoestáticos de taludes KST tiene valor inferior o igual al de a_{max} y se admiten los siguientes valores mínimos de KST/a_{max} dependiendo del tipo de material térreo (reforzado o no) como se observa en la tabla 20 y del tipo de análisis:

Tabla 20

Valores de KST/a_{max} mínimos para análisis pseudoestáticos de taludes

Material	K_{ST}/a_{max} Mínimo	Análisis de Amplificación Mínimo
Suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados (RQD < 50%)	0.80	Ninguno
Macizos rocosos (RQD > 50%)	1.00	Ninguno
Todos los materiales térreos	0.67	Amplificación de onda unidimensional en dos columnas y promediar
Todos los materiales térreos	0.50	Amplificación de onda bidimensional

Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

Según lo anterior:

$$\frac{KST}{a_{max}} = 0,8$$

$$\frac{KST}{0,362} = 0,8$$

$$KST = 0,29$$

Finalmente, se obtuvo que la carga sísmica a utilizar en el modelo de escenario de sísmico corresponde a 0,29 en la componente horizontal y de 0,15 en la vertical esto porque la componente vertical se considera el 50% de la horizontal.

8.9.4.4 Análisis de amenaza en escenario de sismo

Para modelar esta condición se ha aplicado la carga sísmica horizontal y vertical que se encontraron con los análisis inmediatamente anteriores, obteniendo los resultados expuestos en la tabla 21:

Tabla 21

Factores de seguridad resultantes de los análisis de amenaza en escenario de sismo

Perfil	Bishop	Janbu	GLE	Final	Perfil	Bishop	Janbu	GLE	Final
D7	1,51	1,25	1,48	1,25	G12	3,67	3,38	3,67	3,38
D8	2,11	2,12	2,11	2,11	H5	4,33	4,62	5,55	4,33
E6	2,66	19,48	19,81	2,66	H6	3,26	3,02	3,27	3,02
E7	1,93	2,91	2,83	1,93	H7	7,36	6,64	7,35	6,64
E8	0,99	0,99	0,99	0,99	H8	4,92	4,65	4,92	4,65
E9	1,18	1,19	1,19	1,18	H9	13,36	12,94	13,45	12,94
E10	2,85	2,77	2,85	2,77	H10	7,00	6,46	6,99	6,46
F5	2,27	2,01	2,26	2,01	H11	22,73	21,25	22,73	21,25
F6	1,00	0,97	1,02	0,97	H12	6,48	6,10	6,47	6,10
F7	0,82	0,77	0,84	0,77	H13	5,93	5,58	5,93	5,58
F8	0,98	0,82	0,99	0,82	I7	6,85	6,47	6,85	6,47
F9	0,69	1,55	1,69	0,69	I8	7,22	6,93	7,22	6,93
F10	4,77	4,35	4,77	4,35	I9	20,35	19,53	20,35	19,53
F11	15,27	14,33	15,26	14,33	I10	11,83	11,36	11,83	11,36
G4	5,30	6,21	28,01	5,30	I11	6,20	5,87	6,20	5,87
G5	1,89	1,79	1,90	1,79	I12	23,05	22,06	23,05	22,06
G6	1,87	1,67	1,88	1,67	J9	19,56	19,39	20,08	19,39
G7	2,37	2,23	2,37	2,23	J10	9,88	8,34	8,91	8,34
G8	2,76	2,54	2,76	2,54	J11	6,16	5,81	5,16	5,16

G9	11,49	10,99	11,49	10,99	J12	11,82	11,25	11,82	11,25
G10	22,66	22,13	22,66	22,13	K10	21,17	20,17	21,17	20,17
G11	22,66	21,72	22,66	21,72	K11	9,17	8,57	9,17	8,57

Fuente: Propia.

Los perfiles usados para obtener los valores de factor de seguridad, se encuentra en la carpeta de anexos correspondiente a Anexo E. Archivos de Slide.

Se debe indicar que en el escenario de sismo o condiciones pseudoestáticas, el factor de seguridad es tomado de la siguiente manera: mayor a 1,05, es estable, pero siendo conservadores y apegándonos a la gestión del riesgo y queriendo alcanzar modelamientos más confiables, no se discrimina que la amenaza es baja cuando es mayor a 1,5 y media cuando se está entre 1,1 y 1,5. El resultado obtenido se presenta en el mapa 13.

Mapa 12

Zonificación de la amenaza en escenario de sismo



Fuente: Propia.

Del modelamiento se tiene que en un escenario de sismo se acerca mucho a la realidad, dado que las manchas de amenaza media y alta se sitúan en el punto en donde se presentó el deslizamiento, mientras que las manchas de color verde que representan la amenaza baja continúan igual que los modelos analizados previamente.

8.9.4.5 Análisis bajo escenario simultaneo: lluvia y sismo.

Considerar un escenario síntesis, se han combinado dos escenarios: lluvia y sismo en un solo, obteniendo los siguientes resultados:

Para modelar esta condición se ha aplicado la carga sísmica horizontal y vertical que se encontraron con los análisis de sismo y se localizó el nivel freático según los análisis de lluvia, obteniendo los resultados de la tabla 22.

Tabla 22

Factores de seguridad resultantes de los análisis de amenaza en escenario de lluvia y sismo

Perfil	Bishop	Janbu	GLE	Final	Perfil	Bishop	Janbu	GLE	Final
D7	1,42	1,13	1,37	1,13	G12	3,50	3,22	3,50	3,22
D8	2,00	1,99	2,01	1,99	H5	2,89	2,91	3,10	2,89
E6	2,51	19,35	19,69	2,51	H6	2,49	2,30	2,49	2,30
E7	1,88	2,90	2,81	1,88	H7	2,62	2,40	2,62	2,40
E8	0,91	0,88	0,91	0,88	H8	0,93	0,85	0,94	0,85
E9	1,10	1,09	1,11	1,09	H9	4,09	4,09	4,09	4,09
E10	2,70	2,63	2,71	2,63	H10	6,84	6,32	6,84	6,32
F5	2,12	1,48	2,12	1,48	H11	22,71	21,24	22,71	21,24
F6	0,94	0,87	0,94	0,87	H12	6,30	5,94	6,30	5,94
F7	0,75	0,68	0,78	0,68	H13	5,73	5,39	5,74	5,39
F8	0,93	0,67	0,94	0,67	I7	6,67	6,29	6,67	6,29
F9	1,56	1,42	1,56	1,42	I8	2,41	2,41	2,41	2,41

F10	4,57	4,16	4,56	4,16	I9	5,74	5,57	5,74	5,57
F11	15,15	14,24	15,15	14,24	I10	0,75	0,75	0,75	0,75
G4	5,13	6,06	27,89	5,13	I11	6,05	5,72	6,05	5,72
G5	1,76	1,64	1,77	1,64	I12	22,87	21,89	22,87	21,89
G6	1,60	1,41	1,60	1,41	J9	7,12	7,12	7,12	7,12
G7	1,65	1,55	1,65	1,55	J10	0,44	0,44	0,44	0,44
G8	2,35	2,14	2,35	2,14	J11	6,00	5,67	5,99	5,67
G9	11,47	10,97	11,47	10,97	J12	11,60	11,04	11,60	11,04
G10	22,41	21,89	22,41	21,89	K10	20,95	19,97	20,95	19,97
G11	22,64	22,06	22,64	22,06	K11	8,96	8,38	8,95	8,38

Fuente: Propia.

Los archivos tipo slide en donde se corrió cada uno de los estratos se encuentra en el anexo E. Archivos de slide.

Mapa 13

Zonificación de la amenaza combinada



Fuente: Propia

Del escenario combinado para estos análisis de estabilidad, se observa que la mancha de amenaza media y alta crece aún más, lo que implica que, ante un sismo de magnitudes similares a las máximas históricas y tomando en cuenta la lluvia en período de retorno de 20 años, se presentaría amenaza alta y media en la zona en donde se presentó el deslizamiento, mientras que para el resto de la zona se tiene amenaza baja, como se muestra en el mapa 13.

8.9.5 Caracterización y zonificación de la vulnerabilidad

8.9.5.1 Tipología

8.9.5.1.1 Edificaciones

Con las visitas realizadas en campo y la inspección de las edificaciones observadas en la figura 11, se pudo observar que de éstas una está construida en un sistema estructural aporticado de vigas y columnas en concreto reforzado y cuyos espacios entre luces se rellenan con mampostería. Con base en lo anterior, y tomando en cuenta su importancia, se incluye dentro del tipo B. La otra está construida en mampostería, se desconoce si es reforzada o no, pero se incluye en el tipo C.

Figura 11

Tipo de estructuras que se encuentran cerca del área a intervenir.



Fuente: Propia.

Del mismo modo, existen algunos espacios del lote que permanecerán sin ocupar por lo que se agrupa dentro del grupo G.

Dado que las características particulares de cada edificación varían de manera importante, la descripción detallada de cada vivienda que se encuentra en zona de amenaza alta o media.

8.9.5.1.2 Red vial

Se acoge a lo descrito por Argyroudís et al. (2005) y que se resume en la siguiente tabla 23.

Tabla 23

Caracterización del tipo de vía presente.

CLASIFICACIÓN	TIPO	ANCHO (m)
Autopista	V-0	100
Arterial principal	V-1	60
Arterial secundaria	V-2	40
	V-3	25
Vial intermedia	V-4	22
	V-5	18
	V-6	16
Vial local	V-7	13
	V-8	10
	V-9	8

Fuente: Argyroudís et al. (2005) en Servicio Geológico Colombiano (2017)

8.9.5.1.3 Sistema de acueducto

Se sigue la clasificación de la tabla 24.

Tabla 24*Caracterización del tipo de sistema de acueducto.*

CLASIFICACIÓN	DIÁMETRO (PULGADAS)
Red matriz*	>12
Red primaria*	6-12
Red secundaria	2-6
Red local	½-2

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

El barrio Chipre cuenta con el sistema de acueducto local del municipio de Manizales, Caldas, y es manejado por la empresa Aguas de Manizales.

8.9.5.1.4 Sistema de alcantarillado

Se sigue la clasificación de la tabla 25.

Tabla 25*Caracterización del tipo de sistema de alcantarillado.*

CLASIFICACIÓN	DIÁMETRO (PULGADAS)
Red troncal	≥18
Red secundaria	
Red local	<18
Canales	--

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

8.9.5.1.5 Sistema de redes eléctricas

Se sigue la clasificación de la tabla 26.

Tabla 26

Caracterización del tipo de sistema de red eléctrica.

CLASIFICACIÓN	TENSIÓN ELÉCTRICA	USO
Alta tensión	57,5-230 kV	Transporte y distribución
Media tensión	1-57,5 kV	Producción y distribución
Baja tensión	<1 kV	Distribución y consumo

Fuente: Retie (2012) en Servicio Geológico Colombiano (2017)

8.9.5.2 Exposición

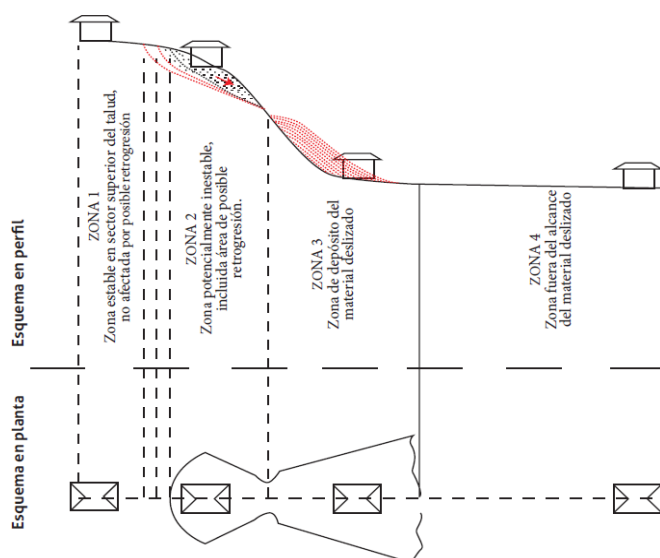
El grado de exposición depende de la ubicación de las edificaciones con respecto a la interacción de la propagación de los movimientos en masa como se muestra en la figura 12.

Se definen 4 zonas:

- Elementos ubicados en la zona estable en la parte superior del talud.
- Elementos ubicados directamente sobre la ladera potencialmente inestable.
- Elementos ubicados en la trayectoria del movimiento en masa.
- Elementos ubicados fuera del alcance del movimiento en masa.

Figura 12

Zonas de exposición de los elementos expuestos.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

Las edificaciones y otros tipos de infraestructura no se encuentran dentro de las zonas de amenaza alta o media en el escenario combinado, teniendo en cuenta que no está dentro de la amenaza tampoco se encuentran en la línea de trayectoria de algún movimiento en masa.

8.9.5.3 Fragilidad

La fragilidad es la respuesta de los elementos expuestos frente a un movimiento en masa, en cuanto a estructuras dependen de las características de estas y en personas a la capacidad de respuesta a la emergencia.

8.9.5.3.1 Fragilidad de edificaciones

La fragilidad de las edificaciones depende del tipo de estructura, la altura, su conservación y su edad. Con base en esos parámetros se aplica la siguiente ecuación:

$$Se = 1 - (1 - Stip) (1 - Salt) (1 - Scon) (1 - Sed)$$

Con base en las tablas propuestas por el del Servicio Geológico Colombiano se han asignado los coeficientes correspondientes a cada edificación siguiendo las observaciones realizadas en campo. La información referente a los coeficientes de fragilidad asignados a cada edificación se puede apreciar en el Anexo G. Fragilidad.

8.9.5.3.2 Fragilidad de líneas vitales

Con base en las tablas propuestas por la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano se han asignado los coeficientes correspondientes a cada línea vital siguiendo las

observaciones realizadas en campo. La información referente a los coeficientes de fragilidad asignados a cada edificación se puede apreciar en el Anexo G. Fragilidad.

Vías

El parámetro de fragilidad de las vías se calcula según su ancho así:

$$Sancho=3,0/Wvia$$

$$S= 0,375$$

Acueducto

La fragilidad de los acueductos depende del diámetro de las tuberías de la red, la cual se discriminan en la tabla 27.

Tabla 27

Coefficiente de fragilidad en acueductos tomando en cuenta el diámetro de las tuberías.

DIÁMETRO (PULGADAS)	S_{diam}
½	1,00
¾	0,44
1	0,25
1 ¼	0,16
1 ½	0,11
2	0,06

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

Alcantarillado

La fragilidad del alcantarillado depende del tipo de material con el cual se haya construido, por lo tanto, se categorizan los coeficientes de la tabla 28.

Tabla 28

Coeficiente de fragilidad en alcantarillado tomando en cuenta el tipo de material en el cual se construyó.

MATERIAL	S_{mat}
Asbesto cemento	0,90
Gres	0,60
Concreto simple	0,60
Polietileno	0,50
Concreto reforzado	0,10

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

Se considera que el material en que está construido el alcantarillado es concreto simple y por ende su coeficiente de fragilidad es 0,60.

Redes eléctricas y de telecomunicaciones

Para este caso se tiene un parámetro definido por Retie e Icontec conocido como carga nominal de rotura de los postes de concreto; este parámetro define el coeficiente de fragilidad como se expone en la tabla 29.

Tabla 29

Coeficiente de fragilidad en redes eléctricas y de telecomunicaciones tomando en cuenta la carga mínima de rotura.

CARGA MÍNIMA DE ROTURA (kN)	S_{carga}
Madera	1,00
5001	0,90
7355	0,82
10300	0,70
13220	0,62
17640	0,53
19600	0,51

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

En caso de no conocer la carga mínima de rotura, se debe asignar el mínimo de valor correspondiente a 5001 KN y por tanto su fragilidad es de 1,00.

8.9.5.3 Fragilidad de personas

Spers es la fragilidad de las personas y Se es la fragilidad de las edificaciones. Dado que se tiene un coeficiente de fragilidad para cada edificación, también se tiene un coeficiente de fragilidad de personas para cada una de esas edificaciones; dichos valores se pueden consultar en el Anexo G. Fragilidad en el archivo “personas”.

8.9.5.4 Escenarios de vulnerabilidad

Se tiene dos escenarios de vulnerabilidad: deslizamientos de baja deformación (movimientos lentos), deslizamientos en etapa de falla (movimientos rápidos). De cada uno de ellos se debe calcular la intensidad con la que puede impactar a los elementos expuestos.

Se realizaron los análisis de vulnerabilidad para las edificaciones del área a intervenir, esto. Se presentan análisis para todas las edificaciones.

8.9.5.4.1 Movimientos de baja deformación (movimientos lentos)

Para este caso se consideran las edificaciones en la zona 2 de exposición, es decir, aquellas que se encuentran directamente sobre la ladera potencialmente inestable. Para calcular la intensidad se tiene que:

$$I_{len} = 1 - (1 - I_{l-def}) (1 - I_{l-vel}) (1 - I_{l-prof})$$

Donde l-def se refiere a la intensidad por deformación, l-vel a la intensidad por velocidad y l-prof a la intensidad por profundidad.

Los detalles de los cálculos se presentan en el Anexo G. Fragilidad, sin embargo, se dan algunos aspectos generales, por ejemplo, las luces observadas en campo oscilan entre los 3 y 4m, por lo tanto, se tendría que el asentamiento diferencial máximo estaría entre 1 y 1,3 cm. Con ayuda de la tabla 30 se puede obtener un coeficiente para l-def:

Tabla 30

Relación deformación/umbral tolerable.

RELACIÓN DEFORMACIÓN/ UMBRAL TOLERABLE	I_{l-def}
<0,2	0,1
0,2-0,4	0,2
0,4-0,6	0,4
0,6-0,8	0,6
0,8-1,0	0,8
1,0-1,2	0,9
$\geq 1,2$	1,0

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

El parámetro l-vel depende de la velocidad del movimiento. Como se trata de movimientos que van de lentos a extremadamente lentos la velocidad asumida será de 1.6 m/año a 16 mm/año, respectivamente. En mm/s se tendrían velocidades $5,07 \times 10^{-5}$ y $5,07 \times 10^{-7}$, respectivamente. Para esas velocidades el parámetro de l-vel se calcula según la ecuación:

$$I_{l-vel} = 1/36 \times (\log v + 6,30)^2$$

El parámetro l-prof depende la profundidad de la masa desplazada con respecto a la profundidad de la cimentación. Como no se cuenta con un instrumento específico para medir la profundidad de los movimientos de reptación se asumirá esta misma profundidad.

Con respecto a la profundidad de la cimentación, no existe en los lotes vacíos, pues no hay edificaciones presentes en la actualidad; en el caso de las otras edificaciones ubicadas en amenaza alta o media, construcción con 2 pisos, la experiencia sugiere que la profundidad de dichas cimentaciones debería oscilar entre 1 y 2 metros.

Con respecto a d (profundidad de la masa desplazada) se tiene que:

- En los lotes vacíos se usará el promedio de profundidades, la cual es de 1,2 metros.
- En la vivienda, se tiene que el perfil I8, I9 e I10 cubre dicha área, y en ese perfil la profundidad calculada es de 0,4 metros.

Con los valores de d establecidos y asumiendo h de 1,5m para las viviendas, se procedió a calcular I_{prof} , esto puede observarse en los cálculos de fragilidad donde también están los demás cálculos de fragilidad lenta.

$$I_{prof} = 1,44(d/h) - 2$$

La intensidad en líneas vitales depende también del umbral tolerable de deformación y de la deformación exhibida. No se contaba con los instrumentos necesarios para medir deformaciones en acueductos, ni en redes eléctricas, etc. Por tanto, la intensidad en líneas vitales obtendrá el máximo coeficiente de 1,00.

8.9.5.4.2 Movimientos de alta velocidad de deformación (movimientos rápidos)

Este tipo de escenario toma en cuenta el mecanismo de impacto que se divide en dos categorías: enterramiento e impacto.

Para el caso de las edificaciones, la intensidad depende de la profundidad y de la presión de impacto, para proceder a calcularla según:

$$I_{rap} = 1 - (1 - I_{f-pre}) (1 - I_{f-prof})$$

Donde f-pre se refiere a la intensidad por presión de impacto y f-prof a la intensidad por profundidad de la edificación.

El parámetro f-pre depende de la relación presión de impacto de deslizamiento/presión horizontal límite de la estructura, como en la tabla 31.

Tabla 31

Relación presión de impacto de deslizamiento / presión horizontal límite de estructura.

RELACIÓN PRESIÓN DE IMPACTO DE DESLIZAMIENTO/ PRESIÓN HORIZONTAL LÍMITE DE ESTRUCTURA	I_{f-pre}
<0,1	0,05
0,1-0,2	0,20
0,2-0,4	0,40
0,4-0,7	0,70
0,7-1,0	0,90
≥1,0	1,00

Fuente: Du et al., (2014) en Servicio Geológico Colombiano (2017)

La presión de falla según el tipo de estructura depende de la tipología de la misma. Por su parte la carga lateral depende la velocidad del movimiento, se asumirá el caso más crítico de un movimiento extremadamente rápido cuya velocidad es mayor a 5 m/s, y depende además de la densidad de la masa de suelo que para este caso se usará el peso unitario promedio de la ladera que es 1,67 ton/m³. Según lo anterior la presión de impacto se calcula según:

$$P = 1/2 \rho v^2$$

Donde P es la presión de impacto, ρ es la densidad de la masa desplazada en kg/m³ y v es la velocidad del movimiento en m/s.

$$P=1/2(1670 \text{ kg/m}^3) (5 \text{ m/s})^2$$

$$P=20875 \text{ KPa}$$

I f-prof es el parámetro de intensidad por la profundidad del deslizamiento. Este parámetro se presenta en función de la relación entre la profundidad del deslizamiento y la altura de la edificación.

Los detalles de cálculo se observan en el Anexo G. Fragilidad. En cuanto a la intensidad de las líneas vitales, dado que se torna complejo medir la deformación que sufre la red de acueducto y la de alcantarillado, estos dos componentes recibirán la máxima intensidad asumida de 1.0.

Por último, las redes eléctricas reciben su coeficiente de intensidad con base en la relación altura deslizamiento / altura nominal del poste. Los postes localizados en amenaza alta y media alcanzan una altura de 12 metros, ahora bien, lo más probable es que los postes no sean totalmente cubiertos por la masa desplazada, cuando mucho serán cubiertos 1 metro de su altura, por tanto, la relación se calcula según:

$$Rln= 1/12 = 0,08$$

Para asignar el coeficiente de intensidad se usa la tabla que se expone en la tabla 32

Tabla 32

Relación altura de deslizamiento / altura nominal del poste.

RELACIÓN ALTURA DESLIZAMIENTO/ALTURA NOMINAL POSTE	I_{alt}
≤0,1	0,1
0,2	0,4
0,25	0,7
≥0,3	1,0

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

Dado que el resultado de la relación es 0,08, menor que 0,1, el coeficiente es 0,1.

8.9.5.5 Cálculo y zonificación de la vulnerabilidad

El cálculo de la vulnerabilidad depende de los resultados de fragilidad e intensidad y se discrimina según las siguientes consideraciones:

$$V = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{I}{1-S} \right)^2 & I \leq 1 - S \\ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{1-I}{S} \right)^2 & I > 1 - S \end{cases}$$

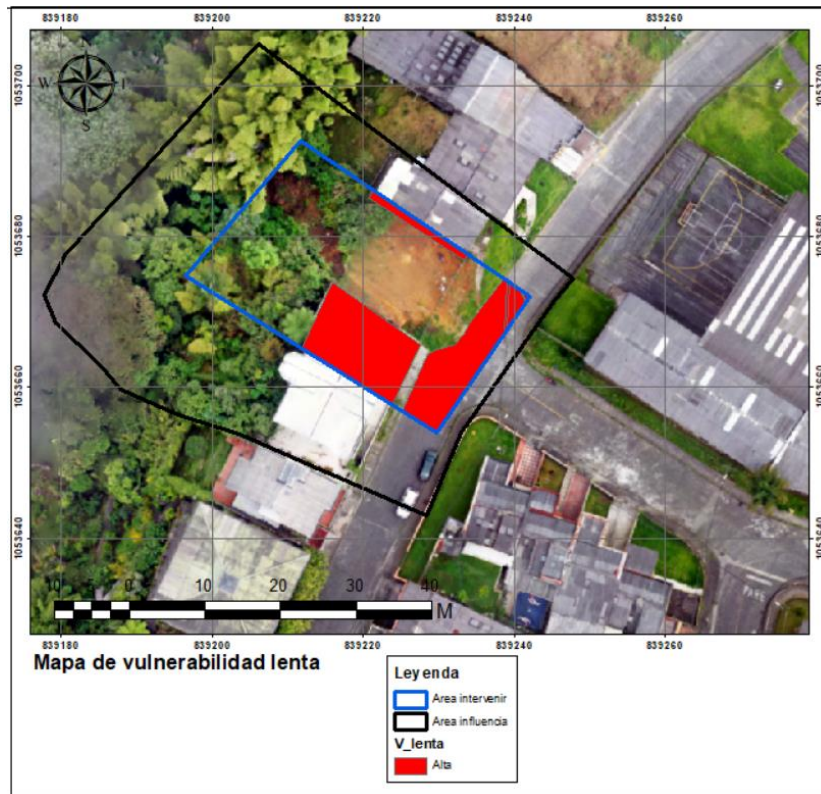
Donde V es la vulnerabilidad, I es la intensidad y S es la fragilidad. Los cálculos de vulnerabilidad se pueden verificar en el Anexo H. Vulnerabilidad; dichos valores se han incorporado en la tabla de atributos de los shapefiles del mapa titulado zonificación de la vulnerabilidad.

Inicialmente se presenta el mapa 14 de vulnerabilidad de todas las edificaciones, donde se aprecia que, por sus características constructivas, edad, número de pisos, entre otros aspectos, todas resultan tener vulnerabilidad alta en un caso de ser impactadas por

movimientos en masa. Seguidamente, se presentan el mapa 15 de vulnerabilidad específicamente para las zonas de amenaza alta y media.

Mapa 14

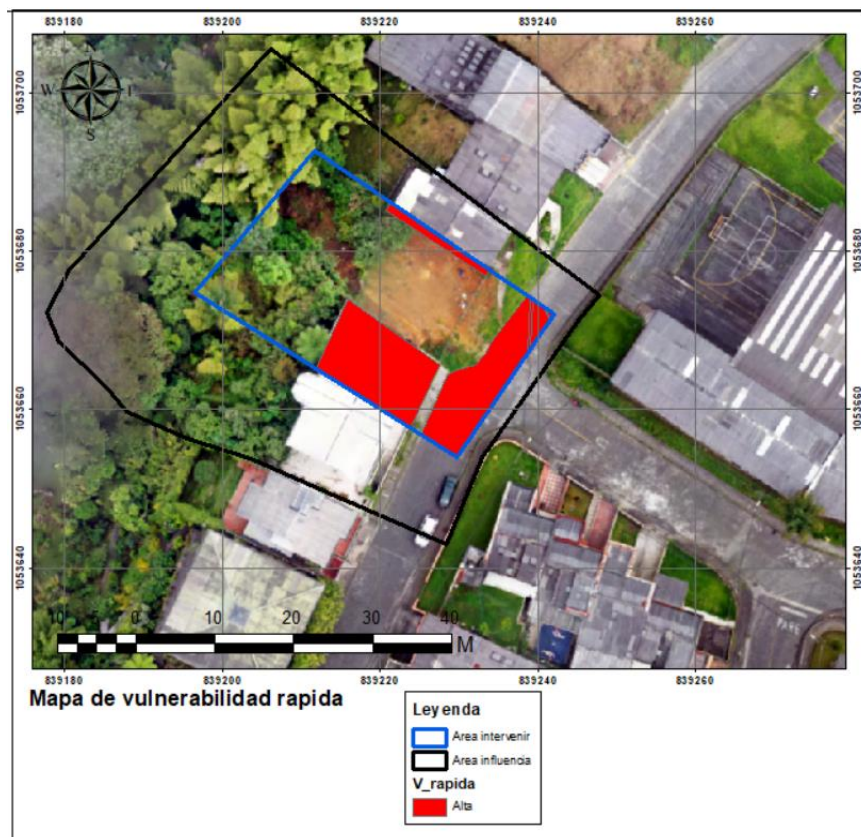
Zonificación de la vulnerabilidad para movimientos lentos.



Fuente: Propia

Mapa 15

Zonificación de la vulnerabilidad para movimientos rápidos.



Fuente: Propia

8.9.6 Caracterización y zonificación del riesgo

Para la cuantificación del riesgo se deben integrar los resultados de amenaza y de vulnerabilidad tomando en cuenta todos los procesos posibles o probables que den lugar a un fenómeno de inestabilidad. Analíticamente, el riesgo se puede describir así:

$$Rs = P(HI) * V * E$$

Donde Rs es el riesgo específico o grado de pérdida para una amenaza de magnitud o intensidad (HI), que ha ocurrido en un área específica y en un tiempo dado. P(HI) es la

amenaza o probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa, V es la vulnerabilidad y E es el costo del elemento expuesto.

Tabla 33

Regla de decisión para el riesgo individual

NIVEL DE AMENAZA	VULN. ALTA	VULN. MEDIA	VULN. BAJA
ALTA	ALTO	ALTO	MEDIO
MEDIA	ALTO	MEDIO	BAJO
BAJA	BAJO	BAJO	BAJO

Fuente: Phoon (2008)

La regla de decisión utiliza los valores de los rangos de amenaza y vulnerabilidad definida en los componentes anteriores. De igual manera, en función de determinar la probabilidad de que se generen daños y su magnitud a partir de la vulnerabilidad y el fenómeno amenazante, se realizará la estimación de la probabilidad anual para la amenaza. Para el caso de los movimientos en masa esta probabilidad anual está en función de los periodos de retorno de los eventos de lluvia que tienen una incidencia sobre los movimientos en masa y de los sismos. Para el riesgo por personas se va a aplicar esta misma tabla de decisión.

Se establece que el juicio que determine el costo estimado del riesgo debe ser seleccionado por quien realice la evaluación. Por ende, se ha decidido asignar valores de riesgo así:

- Para los predios con edificaciones construidas, se consulta el precio del metro cuadrado de unidad construida y multiplicarla por el área total construida.

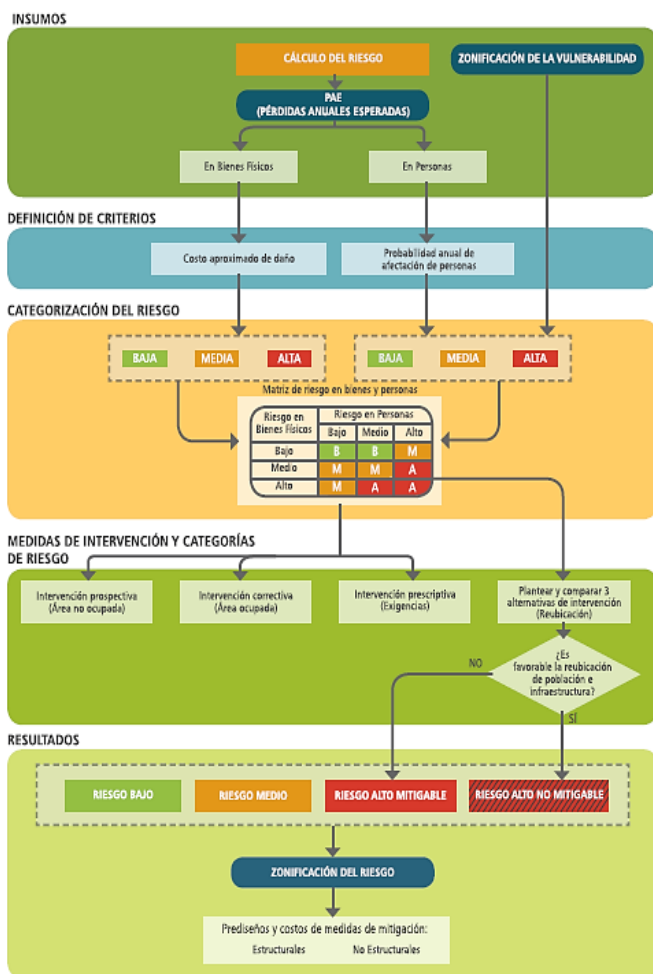
- Para los predios que se prospectan a ser ocupados por edificaciones se consulta el precio del metro cuadrado de terreno y se multiplica por el área total del predio.

8.9.6.1 Evaluación del riesgo

Una vez calculado el costo estimado de los daños directos se procede a fijar la aceptabilidad del riesgo en bienes físicos y personas los cuales se basan en comparaciones con estimaciones de pérdidas anuales o en probabilidad de personas afectadas anualmente. Para evaluar el riesgo se sigue el diagrama de flujo observado en la figura 13.

Figura 13

Esquema metodológico para la evaluación del riesgo.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

El costo aproximado es un estimado de los costos que resultan de enmendar los daños que se generen por efecto de la materialización de una amenaza en comparación con el costo estimado del bien, como se muestra en la tabla 34.

Tabla 34

Estimación del costo aproximado de daño

COSTO APROXIMADO DE DAÑO (%)	DESCRIPCIÓN
VALOR INDICATIVO	
200	Estructura completamente destruida o con daños a gran escala que requieren trabajos de ingeniería para recuperación. Pueden causarse daños importantes en propiedades adyacentes.
60	Daños extensivos en la mayoría de la estructura o se extiende más allá de los límites del sitio que requieren obras significativas de recuperación. Se pueden causar por lo menos consecuencias considerables a estructuras adyacentes.
60	Daños moderados en alguna parte de la estructura o parte significativa que requiere grandes trabajos de recuperación. Se puede causar por lo menos consecuencias menores a propiedades adyacentes.
20	
20	Daños limitados en parte de la estructura que requieren algún trabajo para restablecer su funcionalidad.
0	Daños menores (para eventos de alta probabilidad, esta categoría se puede subdividir a un límite entre valores de 0 y 1 %).

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

Tomando en cuenta los costos estimados, con las proyecciones realizadas para la amenaza en el escenario combinado, y con las características propias de los bienes y líneas vitales del área a intervenir, se podría considerar que ante un movimiento en masa crítico, las edificaciones que existen actualmente en el área de interés, tendrían a lo sumo, daños moderados que requieren de algún tipo de obra para su recuperación, que sí siguen las recomendaciones constructivas y de diseño establecidas por la NSR-10 de seguro no sufrirán daños excesivos y no serán tan vulnerables ante los movimientos en masa.

Aunado a lo anterior, sí se compara el costo total del área construida y sin construir con el costo de medidas correctivas para un caso crítico, el valor económico de las áreas construidas y sin construir es mayor que el de una obra de mitigación. Así las cosas, se considera un riesgo medio, para aquellas edificaciones que estén dentro de amenaza alta o media por movimiento en masa, las demás edificaciones no presentan riesgo por encontrarse por fuera de las zonas clasificadas como de amenaza alta o media.

En cuanto a personas se debe evaluar la probabilidad anual de afectación de personas, la cual es en extremo probable cuando un movimiento en masa es efectivo, pero ya se ha observado que las laderas del área de interés son poco susceptibles a fenómenos de remoción en masa, además, las áreas de amenaza alta y media ocurren, en su mayoría, en zonas no habitadas, por lo cual no hay mucha probabilidad de que anualmente haya afectaciones para la comunidad.

Tabla 35

Categorías de riesgo.

RIESGO EN BIENES FÍSICOS	RIESGO EN PERSONAS		
	ALTO	MEDIO	BAJO
ALTO	A	A	A
MEDIO	A	M	M
BAJO	A	B	B

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

El riesgo de bienes se caracterizó como medio dado que el mantenimiento que requieren las laderas y taludes no implica la construcción de obras de mitigación que sea económicamente inviables, pues al comparar su precio con el valor económico de las edificaciones, resultan ser un porcentaje menor al 8% del costo de las edificaciones para un

caso crítico, sí bien se podría incluso considerar como riesgo bajo, se mantendrá medio con el ánimo de ser conservadores. Las zonas sin construir si se consideran de riesgo bajo.

Con base en la premisa anterior, y siguiendo la clasificación de la Tabla 35.

Categorías de riesgo, el riesgo se categoriza como medio para las edificaciones y personas del área de influencia y bajo para las zonas vacías y que serán objeto de las nuevas edificaciones.

El riesgo puede aumentar de categoría sí la infraestructura que se construya no atiende las necesidades constructivas sismorresistentes.

Mapa 16

Zonificación del riesgo.



Fuente: Propia.

Después de realizar una superposición de mapas entre el escenario combinado y la vulnerabilidad, se extrajo el modelo de riesgo expuesto en el mapa 16, el cual cruza los elementos expuesto con las zonas de amenaza, como se mostró en la tabla 35, el riesgo es categorizado de acuerdo al grado de amenaza y vulnerabilidad, y el cruce entre ellas.

8.10 Estructuración geodatabase

Después de generar las capas de información necesaria, ya sea tipo vector o raster, se procede a estructurar la geodatabase, la cual tiene como finalidad organizar y estructurar todas estas capas siguiendo los lineamientos que se ajusten a el tipo de estudio. Dentro de la geodatabase se crearon los diferentes feature dataset que agrupan las diferentes capas, esto observado en la figura 14. Los feature dataset cuentan con sus propias propiedades, tales como sistema de coordenadas, tolerancia y demás.

Figura 14

Geodatabase y featuare dataset creados para las diferentes capas.

The figure consists of two screenshots of a GIS software interface. The top screenshot shows a table with two columns: 'Name' and 'Type'. The 'Name' column contains 'Chipre.gdb' and the 'Type' column contains 'File Geodatabase'. The bottom screenshot shows a similar table with 19 rows, each representing a feature dataset. The 'Name' column lists datasets from T1 to T9, and the 'Type' column for all entries is 'File Geodatabase Feature Dataset'.

Name	Type
Chipre.gdb	File Geodatabase

Name	Type
T1_Accesibilidad_vial	File Geodatabase Feature Dataset
T10_Coberturas_de_la_tierra_CC...	File Geodatabase Feature Dataset
T11_Zonificacion	File Geodatabase Feature Dataset
T12_Zonificacion_geotecnica	File Geodatabase Feature Dataset
T13_Factores_de_seguridad	File Geodatabase Feature Dataset
T14_Pendientes	File Geodatabase Feature Dataset
T15_Procesos_morfodinamicos	File Geodatabase Feature Dataset
T16_Amenaza	File Geodatabase Feature Dataset
T17_Vulnerabilidad	File Geodatabase Feature Dataset
T18_Riesgo	File Geodatabase Feature Dataset
T2_Base	File Geodatabase Feature Dataset
T3_Perfiles	File Geodatabase Feature Dataset
T4_Infraestructura	File Geodatabase Feature Dataset
T5_Sondeos	File Geodatabase Feature Dataset
T6_Unidades_geologicas_ingeni...	File Geodatabase Feature Dataset
T7_Unidades_geologicas_superf...	File Geodatabase Feature Dataset
T8_Geomorfologia	File Geodatabase Feature Dataset
T9_Capa_usos_del_suelo_CUS_t1	File Geodatabase Feature Dataset

Fuente: Propia.

Dentro de cada feature dataset se encuentra las capas tipo vector ya sean, punto, línea o polígono, de acuerdo al dato recolectado, cada una de ellas tiene su nombre de acuerdo a su temática. Los datos tipos raster se encuentran dentro una carpeta llamada RASTER. Todos los datos generados para cartografía se encuentran en el Anexo J. cartográfico.

9. DISCUSIÓN

Se confirma la importancia y necesidad de la gestión del riesgo de desastres aplicada para todos los municipios en Colombia, especialmente en zonas con condición de amenaza media y alta, la anterior definida en la ley 1523 con el fin de contribuir a la seguridad, bienestar, calidad de vida de la población y al desarrollo sostenible.

Es importante identificar y analizar los 3 subprocesos principales en la gestión del riesgo: el conocimiento del riesgo, la reducción del riesgo y el manejo de desastres, también, es de gran importancia resaltar el decreto 1807 de 2014, para la realización de estudios técnicos teniendo en cuenta el principio de gradualidad para identificar, revisar y estudiar de manera correcta y detallada los lugares propensos a fenómenos de inundación, avenidas torrenciales y movimientos en masa.

El empleo de herramientas SIG, resulto indispensable para el procesamiento, distribución e identificación de datos espaciales para establecer y diseñar una metodología de análisis aplicada al desarrollo y conocimiento de los diferentes factores necesarios para llevar a cabo el estudio, es de destacar que el uso de un SIG más allá de obtener, ordenar, procesar y generar datos, este interpreta, analiza y da soluciones con los datos adquiridos.

Dentro de los aspectos a tener en cuenta se puede hablar claramente del Modelo Digital de Elevación, el cual es un insumo muy útil ya que a partir de este se puede generar más información, pero se debe tener especial cuidado con la resolución y calidad de este, puesto que muchas veces la resolución no es acorde a la escala de trabajo necesario y por esto se hace necesario buscar u obtener uno de mayor resolución, para este tipo de estudio es recomendable hacer el uso de aeronaves no tripuladas (drones), con ellas se pueden generar

Modelos Digitales de Elevación de resolución menor a 1m, lo que nos da una escala de trabajo de mayor detalle.

Conocer los materiales que conforman el área de estudio es de vital importancia debido a que por medio de estos se pueden generar perfiles geológico-geotécnicos que nos permiten obtener los diferentes valores de factores de seguridad para la susceptibilidad y cada uno de los escenarios de riesgo, en este punto es indispensable nombrar el uso de la interpolación por medio del inverso de la distancia ponderada (IDW), ya que también se hicieron pruebas con la herramienta Kriging para ver cuál de los dos se adaptaba mejor a la realidad, finalmente el método (IDW) fue el que más similitud. En este apartado es importante tener claro los valores de factores de seguridad y depurar algunos datos, ya que en ocasiones los valores tendrán una variación muy alta, teniendo así que los valores que se salgan de la media o mediana, es decir, los valores extremos no sean tomados en cuenta, así, se evita que estos tiendan a modificar el resultado de las interpolaciones. Este tipo de método también fue utilizado para encontrar el espesor de los estratos, el cual se encuentra discriminado en el shapefile de perforaciones, en donde cada una de ellas cuenta con el espesor encontrado de los estratos y también con el del nivel freático de aguas.

La zonificación del riesgo se logra con una apropiada identificación de la amenaza y de la vulnerabilidad de las estructuras expuestas, esto se obtiene con una buena investigación en campo y análisis de los datos obtenidos. Después de tener estos datos generados se procede a realizar una superposición de mapas, donde se toman los polígonos que se encuentren categorizados como amenaza media y alta y se cruzan con los polígonos que se encuentren en vulnerabilidad media y alta, de tal cruce se obtiene el polígono de riesgo, el cual es clasificado de acuerdo a la tabla de clasificación del riesgo y valor en daños y obras.

10. CONCLUSIONES

A partir de la información bibliográfica recolectada de las diferentes entidades se pudo obtener información del plan de ordenamiento territorial (POT) de Manizales, del POMCA del Río Chinchiná, que resultó ser muy útil al compararla con la información recolectada en campo, las perforaciones dieron la posibilidad de conocer el perfil de suelos en el área a intervenir, ensayos de laboratorio para conocer las propiedades geomecánicas de cada uno de ellos.

Se encontraron tres capas de suelo en el área de influencia: todos son suelo residual del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande con la particularidad de que varían en el grado de meteorización. Por debajo del mismo se localiza la roca parental. La distribución de las capas varía según el lugar donde se analice. Los suelos encontrados se categorizan como MH (limos de alta plasticidad), excepto por el estrato 3 que ha sido clasificado como ML (limos de baja plasticidad).

El nivel de aguas freáticas no se encontró en ninguno de los lugares dentro del área de influencia, sin embargo, y tomando en cuenta que Manizales es una ciudad caracterizada por su alta pluviosidad, se asumió un nivel freático en la tercera parte del primer estrato.

El vuelo de drone es un buen insumo, ya que, a partir de la captura de las fotos, el procesamiento de las mismas en el software Agisoft, nos permitió obtener el ortomosaico, el modelo digital de elevación (DEM) y curvas de nivel, también permitió corroborar la información observada en campo. El uso del DEM en ArcMap es de mucha ayuda ya que a

partir de el podemos genera la mayoría de capas temáticas necesarias, entre ellas se encuentra el mapa de pendientes y otros.

Por medio del programa ArcMap se generaron la mayoría de capas e información necesaria para el desarrollo del estudio, por ejemplo, de las unidades geológicas para ingeniería, las cuales dan las propiedades geomecánicas de los suelos; la cobertura y uso del suelo que permiten tener una idea de la infiltración y escorrentía sobre la precipitación; mapas de pendientes, útiles en cuanto al reconocimiento de zonas de mayor pendientes, las cuales tienden a ser más susceptibles a movimientos en masa. Para el área a intervenir se interpretó que la zona cuenta con un predominio de pendientes entre 16 y 35°, las cuales son denominadas pendientes abruptas.

Por medio de los factores de seguridad obtenidos de los perfiles evaluados en los diferentes modelos de escenarios de amenaza evaluados, se pudo realizar una interpolación para cada uno de ellos por medio del inverso de la distancia (IDW), del cual se obtuvieron los siguientes datos:

El análisis de susceptibilidad coincide con la realidad, lo cual se demuestra en el mapa en donde en la zona donde ocurrió el deslizamiento muestra manchas de amenaza media, mientras que en el resto del área se cuenta con una mancha de color verde indicando una amenaza baja.

Con la ayuda de los factores de seguridad en el modelo de escenario de amenaza por lluvia, se observa que en la zona donde se presentó el deslizamiento las manchas de color amarillo amenaza media, crecieron un poco y aparecen manchas de color rojo de amenaza

alta dentro de las de color amarillo, indicando que la amenaza se encuentra específicamente en la ladera.

En el modelo del escenario de amenaza en sismo se observa como las manchas de color amarillo y rojo amenaza media y alta crecen aún más en comparación el escenario de lluvia, se tiene claro que el método utilizado es el correcto ya que da un resultado muy similar a la realidad, la amenaza en escenario de sismo varía según las afectación que las cargas horizontales y verticales ejerzan en el terreno para desestabilizarlo, siendo así, entre más daños cause subirá el nivel de amenaza, y entre menos cause menor será el nivel.

Finalmente, la amenaza por movimientos en masa en un escenario combinado (lluvia y sismo) muestra que la amenaza se concentra en la zona en donde ocurrió el deslizamiento y sus alrededores en la ladera, a diferencia de las zonas planas se presenta amenaza baja.

El deslizamiento presente en la zona se categorizo como amenaza alta en todos los modelos.

Teniendo presente el escenario combinado, se podría considerar que, ante un movimiento en masa crítico, las edificaciones que existen actualmente en el área de interés, tendrían como mucho, daños moderados que requieren de algún tipo de obra para su recuperación.

El riesgo identificado de la superposición es bajo en los sitios donde se requiere mantenimiento normal de taludes y laderas y donde la probabilidad de víctimas fatales es prácticamente nula. Es un riesgo aceptable y requiere tan solo medidas de prevención.

El riesgo es medio en los sitios que requieren investigación y planeación un poco más detallada para evitar su riesgo aumente. Las medidas para reducir el riesgo son viables económicamente y en muchas ocasiones se resume a un mantenimiento normal de taludes y laderas o arreglos menores en las estructuras. Se requiere evitar que el nivel de riesgo aumente, pero las medidas de intervención son en todo caso viables técnica y económicamente.

Contando con todos los datos generados se creó una geodatabase, la cual se encarga de almacenar cada uno de los shapefiles en un feature dataset, el cual agrupa las capas dependiendo de la temática a la que pertenezca, es una manera muy ordenada de guardar las capas, ya que su uso y entendimiento es sencillo. La finalidad de generar una geodatabase es con el fin de poder compartirla con otro usuario y que el uso de la misma sea práctico.

11. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados de este estudio donde se zonificó la amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa tomando en cuenta aspectos geológicos, geomorfológicos, topográficos, y geotécnicos se procede a recomendar las siguientes aptitudes de uso del suelo:

Se recomienda como zonas urbanizables a aquellas áreas que, en este estudio, aún para el escenario más crítico de amenaza por movimientos en masa, se comprobó que sus factores de seguridad son los suficientemente altos como para considerar una amenaza baja ($F.S > 1,5$). Así, como son sitios que no representan peligro alguno, se consideran urbanizables.

Se recomienda como zonas urbanizables con obras de mejoramiento a aquellas áreas que, en este estudio, en el escenario más crítico de amenaza por movimientos en masa, presentan amenaza alta y/o media y pueden presentar sitios con vulnerabilidad alta y riesgo medio. Son zonas que, para poder llevar a cabo un desarrollo urbanístico, deben ser intervenidas con alguna obra de tratamiento geotécnico.

Al revisar la información del POT en cuanto a amenaza y riesgo por movimiento en masa en el área a intervenir de este estudio, se consideran las siguientes recomendaciones:

Recomendar como zonas que mantienen su condición de desafectación a aquellas áreas que el POT de Manizales se categorizaron como de “amenaza baja” y que coinciden con las zonas que en este estudio se muestran como de amenaza y riesgo bajo.

Recomendar como zonas que pierden su condición de afectación a aquellas áreas que POT de Manizales categorizó como de amenaza alta o media, y que en este estudio se muestran como de amenaza y riesgo bajo. Dado que se comprobó que las zonas no tienen amenaza y riesgo ni medio ni alto, se propone desafectarlas. También se incluyen aquellas áreas categorizadas como de amenaza media o alta en el POT y que en este estudio se proponen como de mejoramiento a través de la implementación de obras de tratamiento geotécnico y/o hidráulico. Dado que se comprobó que con algunas intervenciones la amenaza y riesgo se disminuyen, se propone desafectarlas.

Con base en lo anterior, no se considera que haya zonas que no se puedan desafectar y se considera viable la urbanización del área de interés siempre y cuando se lleven a cabo las obras recomendadas en este estudio.

12. REFERENCIAS

- Alcaldía de Manizales. (2017). *Plan de ordenamiento territorial del municipio de manizales*. Manizales.
- Cano, S. (2021). *Influencia de la posición del frente húmedo en la generación de movimientos en masa en formaciones superficiales de la microcuenca de la quebrada El Perro del municipio de Manizales, Colombia*. Manizales.
- Capecchi, V., Perna, M., & Crisci, A. (2014). Stastiscal modeling of rainfall-induced shallow lansliding using static predictors and numerical weather predictions: preliminary results. *Copernicues publications on behalf of the European Geosciences Union.*, 4987-5036.
- Carvajal, J. H. (2011). Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. *INGEOMINAS*.
- Castiblanco Ruiz, D. A. (2011). *Evaluación de amenaza por deslizamiento con base en mapas de geología y geomorfología*. pontifica universidad javeriana.
- Colombiano, S. G. (2016). *Guá metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa*. Bogotá.
- Corpocaldas. (2016). *POMCA Rio Chinchiná*.
- Dewitte, O., Chung, C.-J., Cornet, Y., Daoudi, M., & Demoulin, A. (2010). Combinig spatial dara in landslide reactivation susceptibilty mapping: A likelihood ratiobased approach in W Belgium. *Elsevier*, 153-166.

- Djakun, J., Maryati, S., & Kasim, M. (2020). *Identification of vulnerability area of mass movement using storie method in bone bolango regency gorontalo province*. Indonesia: State University of Gorontalo.
- Erener, A., & Duzgun, S. (2012). *A regional scale quantitative risk assessment for landslides: case of Kumluca watershed in Batin, Turkey*. Springer.
- Fepuleai, A., & Németh, K. (2019). Volcanic Geoheritage of landslide and rockfalls on a Tropical Ocean island Western Samoa, SW Pacific. *Geoheritage*, 577-596.
- Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2007). Comparing landslide inventory maps. *Elsevier*, 22.
- Guzzetti , F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy, *Geomorphology. Elsevier*, 181-216.
- Hengxing, L., Dereck, M., Chenghu, Z., & Chang ho, L. (2010). Rockfall hazard analysis using LiDAR and spatial modeling. *Elsevier*, 213-223.
- Jaboyedoff, M., Choffet, M., Derron, P., Horton, A., Loye , C., Longchamp, B., . . . Pedrazzini, A. (2013). *Preliminary slope mass movement susceptibility mapping using DEM and LiDAR DEM*. Biswajeet Pradhan manfred buchroithner.
- Jiménes, J. (2017). *Zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa, por medio de geoprocesamiento con herramientas SIG, plancha 193 Yopal*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Lopez, B. (2017). *Analisi de susceptibilidad por movimiento en masa, para el corredor vial Cuestaboba-Mutiscua en del departamento de norte de Santander, implementado el software Arcgis*. Bogota: Universidad militar nueva granada.

- Ragozin, A., & Tikhvinsky, I. (2000). *Landslide hazard, vulnerability and risk assessment*.
- Robin, F., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Z, W. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Elsevier*, 99-111.
- Santangelo, M., Marchesini, I., Bucci, F., Cardinali, F., Fiorucci, F., & Guzzetti, F. (2015). An approach to reduce mapping errors in the production of landslide inventory maps. *Natural hazards and earth sistem sciences*, 2111-2126.
- Schicker, R., & Moon, V. (2012). Comparison of bivariate and multivariayte statistical approaches in landslide susceptibility mapping at a regional scale, *Geomorphology*. 40-57.
- SGC. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa*. SGC.
- Unidad administrativa especial de aeronautica civil. (2018). *Reglamentos aeronauticos de Colombia*. Bogotá.
- Uyeturk, C., Huvaj, N., Bayraktaroglu, H., & Huseyinpasaoglu, M. (2020). Geotechnical characteristics of residual soils in rainfall-triggered landslide in Rize, Turkey. *Engineering Geoogy*.
- Uzielli, M. (2007). *Probabilistic estimation of vulnerability to landslides*.
- Van Westen, C. J. (2016). *National scale landslide susceptibility assessment for Saint Vicent*. World Bank, GFDRR, ACP-EU Disaster Risk Reduction Program.
- Vasu, N., Lee, S., Pradhan, A., Kim, Y., Kang, S., & Lee, D. (2016). A new approach to temporal modelling for landslide hazard assessment using an extreme rainfall induced-landslide. *Engineering Geology*, 36-49.

- Vaz, T., Zezere, J., Pereira, S., Oliveira, S., Garcia, R., & Quaresma, I. (2018). Regional rainfall thresholds for landslide occurrence using a centenary database. *Natural Hazards & Earth system Sciences*, 1037-1054.
- Wu, L., Zhang, L., Zhou, Y., Xu, Q., Yu, B., Liu, G., & Bai, L. (2018). Theoretical analysis and model test for rainfall-induced shallow landslide in the red-bed area of Sichuan. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 1343-1353.
- Wu, L.; Zhou, Y.; Sun, P.; Shi, J.; Liu, G.; Bai, L.; (2017). Laboratory characterization of rainfall-induced loess slope failure. *Elsevier*, 1-8.
- Xu, G., Zhang, T., Li, Z., Li, P., Cheng, Y., & Cheng, S. (2017). Temporal and spatial characteristics of soil water content in diverse soil layers on land terraces of the Loess Plateau, China. *Catena*, 20-29.
- Zêzere, J., Oliveira, C., Pereira, S., Garcia, R., Melo, R., Vaz, T., . . . Quaresma, I. (2018). Construction of a national landslide susceptibility Map for Portugal. *Geophysical Research Abstracts*, 20-29.
- Zhang, X., Li, P., Bin Lin, Z., Qiang Yu, G., & Li, C. (2018). Effects of precipitation and different distributions of grass strips on runoff and sediment in the loess convex hillslope. *Elsevier*, 130-140.

A. Anexo: Descripción de las perforaciones

B. Anexo: Registro fotográfico

C. Anexo: Resultado de los ensayos de laboratorio

D. Anexo: Perfiles de análisis

E. Anexo: Slide

F. Anexo: Resultados de análisis de estabilidad

G. Anexo: Fragilidad

H. Vulnerabilidad

I. Anexo: Riesgo

J.Anexo: Cartográfico