

AMENAZA PARA PARCELACIÓN EN LA VEREDA LA CABAÑA, CORREGIMIENTO EL REMANSO, MUNICIPIO MANIZALES, CALDAS

Laura Melissa Gutiérrez Hernández

Universidad de Caldas
Ciencias Exactas y Naturales, Caldas (Universidad de Caldas)
Manizales, Colombia
2021

AMENAZA PARA PARCELACIÓN EN LA VEREDA LA CABAÑA, CORREGIMIENTO EL REMANSO, MUNICIPIO MANIZALES, CALDAS

Laura Melissa Gutierrez Hernández

Tesis como requisito parcial para optar al título de:
Geologa

Director (a):
Msc. Santiago Cano Bedoya

Universidad de Caldas
Ciencias Exactas y Naturales , Caldas (Universidad de Caldas)
Manizales, Colombia
2021

A mis padres y mi angel que esta en el cielo por su apoyo, por su bondad y paciencia en creer en mi, por su lealtad e infinitp amor .

Agradecimientos

A Santiago Cano Bedoya Msc en Ciencias de la tierra: Enfoque en Geología ambiental por su enseñanza , colaboración y apoyo incondicional en todo el proceso de formación como Geólogo.

Resumen

En la vereda La cabaña, corregimiento El Remanso de Manizales se realiza un estudio detallado de amenaza para el proyecto de parcelación que se llevará a cabo, el cual se encuentra registrado por el ente correspondiente con un nivel de amenaza media frente a movimientos en masa. Es por esto que el Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha implementado la Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo (SCG, 2017) permitiendo obtener un mayor detalle en zonas de interés y así, evaluar el nivel de amenaza. Siguiendo las siguiente pautas metodológicas las cuales se componen de 6 etapas así: (1) trabajo de campo, se define la información primaria para las condiciones geológicas, geomorfológicas y estratigráficas del terreno; (2) recolección de información bibliográfica comparada con la fase de campo; (3) definición de los rasgos geomorfológicos que conforman el área de estudio escala 1:2000; luego, (4) se estudian los resultados del laboratorio identificando las propiedades geotécnicas que; (5) permiten identificar el análisis de la amenaza por el método de talud infinito, obteniendo el factor de seguridad, y siendo evaluado con las variables de lluvia y sismo (además, de un escenario crítico que combina estas dos variables), teniendo la condición de amenaza en estos escenarios. Finalmente, (6) generando mapas temáticos, que sustentan la condición de amenaza en la zona. Esta metodología permite ver el resultado para el área de estudio definiendo una susceptibilidad baja, y en un escenario crítico se evidencias las 3 condiciones de amenaza para identificar y mitigar futuros riesgos.

Palabras claves: amenaza, La Cabaña, susceptibilidad, deslizamiento, geotécnicas

Abstract

In the village of La Cabaña, El Remanso de Manizales, a detailed threat study is carried out for the subdivision project that will be carried out, which is registered by the corresponding entity with a medium threat level against mass movements. This is why the Colombian Geological Service (SGC) has implemented the Methodological Guide for Threat, Vulnerability and Risk Studies (SCG, 2017) allowing to obtain greater detail in areas of interest and thus, evaluate the level of threat. Following the following methodological guidelines which are composed of 6 stages as follows: (1) field work, the primary information for the geological, geomorphological and stratigraphic conditions of the terrain is defined; (2) collection of bibliographic information compared to the field phase; (3) definition of the geomorphological features that make up the study area scale 1: 2000; then, (4) the results of the laboratory are studied identifying the geotechnical properties that; (5) allow identifying the threat analysis by the infinite slope method, obtaining the safety factor, and being evaluated with the variables of rain and earthquake (in addition, of a critical scenario that combines these two variables), having the condition threat in these scenarios. Finally, (6) generating thematic maps, which support the threat condition in the area. This methodology allows to see the result for the study area defining a low susceptibility, and in a critical scenario the 3 threat conditions are evidenced to identify and mitigate future risks.

Keywords: threat, La Cabaña, susceptibility, landslide, geotechnical

Tabla de Contenido

1.	Introducción.....	12
2.	Objetivos	14
	Objetivo general	14
	Objetivos específicos.....	14
3.	Localización	15
3.1.	Área a intervenir y área de influencia.....	18
	3.1.1. Área a intervenir	18
	3.1.2. Área de influencia.....	19
	3.1.2.1. Área de influencia directa (AID).....	19
4.	Fundamento teórico.....	22
5.	Marco geológico.....	42
6.	Metodología.....	45
	Etapa I: Trabajo de campo.....	45
	Etapa II Recopilación: Bibliográfica.....	45
	Etapa III: Rasgos Geomorfológicos	46
	Etapa IV: Análisis de los resultados de laboratorio.....	46
	Etapa V: Determinación de la Amenaza	47
	Etapa VI: Mapas Temáticos	47
7.	Resultados	49
	7.1. Procesos erosivos	49

7.1.1.	Catálogo e inventario	49
7.1.2.	Inventario de procesos morfodinámicos	50
7.2.	Aspectos geológicos, geomorfológicos y morfométricos	58
7.2.1.	Mapa topográfico	58
7.2.2.	Pendientes.....	59
7.3.	Estudio geológico	61
7.3.1.	Geología regional.....	61
7.3.2.	Geología estructural.....	70
7.3.2.1.	Sistema de Fallas Romeral.....	72
7.3.3.	Geología local.....	74
7.3.3.1.	Esquistos de Lisboa – Palestina.....	74
7.3.3.2.	Esquistos cuarzo-sericítico con grafito (Kies).....	74
7.3.3.3.	Esquistos anfibólicos	75
7.3.3.4.	Esquistos cloríticos	75
7.3.3.5.	Anfibolitas	75
7.3.4.	Geología estructural local	76
7.3.4.1.	Falla de Piedecuesta	76
7.3.4.2.	Falla La Manuela.....	76
7.3.4.3.	Capa 1: Capa de suelo orgánico	77
7.3.4.4.	Capa 2: Ceniza volcánica.....	78
7.3.4.4.1.	Capa No. 2.1.....	79
7.3.4.4.2.	Capa No. 2.2.....	80

7.3.4.5.	Capa 3: Saprolito sin estructura	80
7.3.4.6.	Capa 4: Saprolito.....	81
7.3.5.	Unidades geológicas superficiales	83
7.3.5.1.	Capa número 1: materia orgánica:.....	87
7.3.5.2.	Capa número 2: flujos piroclásticos y lahares con contenido de ceniza y lapilli: 87	
7.3.5.3.	Capa número 3: flujos piroclásticos y lahares:.....	88
7.3.5.4.	Capa número 4: suelo residual horizonte (Saprolito fino):	88
7.4.	Geomorfología y morfometría.....	89
7.4.1.	Mapa de subunidades geomorfológicas	90
7.4.2.	Curvatura.....	90
7.4.3.	Componentes geomorfológicos indicativos de procesos de flujo de caída	92
8.	Cobertura del suelo, usos del suelo y conflictos de uso del suelo.....	107
8.1.	Cobertura del suelo	107
8.1.1.	Mosaico de cultivos.....	111
8.1.2.	Guadual	112
8.1.3.	Rastrojo de corte bajo	112
8.2.	Uso del suelo.....	114
8.3.	Conflictos de usos del suelo.....	118
9.	Aspectos geotécnicos.....	120
9.1.	Prospección geotécnica.....	120
9.2.	Caracterización de la columna estratigráfica	121
10.2.1.	Estrato No. 1	123

10.2.2. Estrato No. 2	124
10.2.3. Estrato No. 3	125
10.2.4. Estrato No. 4	127
10.3 Resultados de los ensayos de laboratorio	128
10.3.1 Propiedades geomecánicas de los estratos.....	129
10.4 Estabilidad de taludes y de la ladera.....	130
10.4.1 Perfiles de análisis	130
10.4.2 Análisis de la susceptibilidad.....	133
10.4.2.1 Resultados de los análisis de susceptibilidad.....	133
10.5 Caracterización y zonificación de la amenaza para el escenario de movimientos en masa	138
10.5.1 Escenarios de amenaza por movimiento en masa.....	139
10.5.1.1 Escenario de Lluvia	140
10.5.1.1.2 Resultados de los análisis de amenaza en escenario de lluvia.....	141
10.5.1.2 Escenario de Sismo	145
10.5.1.2.1 Resultados de los análisis de amenaza en escenario de sismo.....	152
10.5.1.3 Análisis bajo escenario crítico de lluvia y sismo simultáneos	156
11. Discusión	161
12. Conclusiones	163
13. Recomendaciones.....	166
14. Anexos	167
15. Bibliografía	169

Listado de figuras

Figura 1. Zonificación detallada de amenaza por movimientos en masa a escala 1:2000.	25
Figura 2. Ubicación del movimiento por caída de rocas en la vía hacia tres puertas. El cuadro rojo representa el área de trabajo.	50
Figura 3. Mapa de la geología de la zona.	61
Figura 4. Mapa Geología estructural.	72
Figura 5. Esquema de jerarquización geomorfológica.	93
Figura 6. Esquema de un deslizamiento rotacional.	104
Figura 7. Mapas de zonificación por amenaza sísmica: Categorización en alta, media y baja (izquierda) y categorización según el valor de Aa (derecha).	146
Figura 8. Perfil de análisis 1 en el sitio crítico 1.	167
Figura 9. Perfil de análisis 2 en el sitio crítico 1.	167
Figura 10. Perfil de análisis 3 en el sitio crítico 1.	168

Listado de fotografías

Fotografía 1. Movimiento en masa de tipo deslizamiento subtipo rotacional.	51
Fotografía 2. Recorte de fotografía aérea en donde se puede observar el agrietamiento del suelo.	53
Fotografía 3. Mapa en donde se muestra agrietamiento superficial.	53
Fotografía 4. Movimientos en masa JS-002 y JS-003.	55
Fotografía 6. Reptación.	56

Fotografía 8. Ceniza asociada al depósito de La Cabaña.....	69
Fotografía 9. Capa de suelo orgánico.....	78
Fotografía 10. Ceniza volcánica.....	79
Fotografía 11. Suelo de color amarillo-naranja y suelo rojizo.....	81
Fotografía 12. Izq. Saprolito con líticos de cuarzo. Der. Lítico de roca metamórfica.....	82
Fotografía 13. Ejemplo de los estratos encontrados en el área de estudio.....	83
Fotografía 14. Loma denudada.....	101
Fotografía 15. Escarpe de erosión menor.....	103
Fotografía 16. Deslizamiento rotacional dentro del área de influencia.....	104
Fotografía 17. Ejemplos de los cultivos que se encuentran dentro del área de estudio.....	112
Fotografía 18. Cadillo, cañabrava y maleza.....	113

Listado de mapas

Mapa 1. Localización general del proyecto.....	16
Mapa 2. Localización específica del proyecto donde se observan el área a intervenir y el área de influencia.....	18
Mapa 3. Mapa donde se muestra movimiento en masa JS-001.....	52
Mapa 4. Mapa en donde se muestran los movimientos en masa JS-002 y JS-003.....	55
Mapa 5. Reptación en la zona de estudio denominada como Js-004.....	57
Mapa 6. Mapa topográfico.....	58
Mapa 7. Pendientes.....	59
Mapa 8. Mapa de unidades geológicas superficiales.....	89

Mapa 9. Mapa de curvatura.....	91
Mapa 10. Mapa geomorfológico.....	105
Mapa 11. Capa de cobertura de tierras CCT-t0.....	109
Mapa 12. Capa de coberturas de la tierra CCT-t1.....	110
Mapa 13. Capas de usos del suelo CUS-t1.....	118
Mapa 14. Localización de los sondeos exploratorios.....	121
Mapa 15. Distribución del espesor del estrato 1 en el área de estudio.....	123
Mapa 16. Distribución del espesor del estrato 2 en el área de estudio.....	125
Mapa 17. Distribución del espesor del estrato 3 en el área de estudio.....	126
Mapa 18. Distribución del espesor del estrato 4 en el área de estudio.....	128
Mapa 19. Localización de los perfiles que serán analizados como líneas de estabilidad con su respectiva malla.....	131
Mapa 20. Zonificación de la susceptibilidad.....	137
Mapa 21. Mapa de amenaza por precipitación.....	144
Mapa 22. Zonificación de la amenaza en escenario de sismo.....	155
Mapa 23. Zonificación de la amenaza en escenario de lluvia y sismo.....	159

Listado de tablas

Tabla 1. Parámetros para definir magnitud de los movimientos en masa.....	26
Tabla 2. Lista de factores causales de movimientos en masa.	27
Tabla 3. Métodos para la evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa.	28

Tabla 4. Categorías de zonificación de susceptibilidad y amenaza según los factores de seguridad.31

Tabla 5. Clasificación de las unidades de construcción por categorías.33

Tabla 6. Número mínimo de sondeos y profundidad por cada unidad de construcción Categoría de la unidad de construcción.34

Tabla 7. Rango de pendientes.60

Tabla 8. Clasificación de rocas de acuerdo con su resistencia.84

Tabla 9. Unidades geológicas superficiales (UGS) según su origen.86

Tabla 10. Características de unidades geomorfológicas.92

Tabla 11. Rangos de relieve relativo.97

Tabla 12. Rangos de inclinación de la ladera.98

Tabla 13. Rangos de longitud de la ladera.99

Tabla 14. Movimientos en masa asociados de acuerdo a la forma de la ladera.102

Tabla 15. Leyenda tercer nivel de Corine Land Cover.108

Tabla 16. Clase de cambio por deforestación y priorización de las zonas para análisis multitemporal en la zonificación de amenazas por movimiento en masa.114

Tabla 17. Leyenda de usos del suelo.116

Tabla 18. Propiedades geomecánicas de los materiales involucrados en el área de estudio.130

Tabla 19. Discriminación de los perfiles de análisis utilizados para la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimiento en masa132

Tabla 20. Categorías de zonificación de susceptibilidad y amenaza según los factores de seguridad.133

Tabla 21. Factores de seguridad resultantes de los análisis de susceptibilidad.134

Tabla 22. Factores de seguridad resultantes de los análisis de amenaza en escenarios de lluvia.141

Tabla 23. Valores de los coeficientes de movimiento sísmico para los municipios del departamento de Caldas.	147
Tabla 24. Tipos de perfiles de suelo.....	148
Tabla 25. Consideraciones para establecer si un estrato de suelo se clasifica como perfil tipo E según sus propiedades geomecánicas.....	149
Tabla 26. Valores de Fa para la zona de períodos cortos en el espectro.....	150
Tabla 27. Valores de Fv para la zona de períodos intermedios en el espectro.....	150
Tabla 28. Valores de KST/amax mínimos para análisis pseudoestáticos de taludes.	151
Tabla 29. Factores de seguridad resultantes de los análisis de amenaza en escenarios de sismo.	152
Tabla 30. Factores de seguridad resultantes de los análisis de amenaza en escenarios de lluvia y sismo.....	156

Listado de ecuaciones

Ecuación 1. Estimación del Factor de Seguridad.....	30
-----------------------------------------------------	----

1. Introducción

De acuerdo al artículo 1 de la ley 1523 de 2012, la gestión de riesgo es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para: el conocimiento del riesgo; la reducción del riesgo y; el manejo de desastres, con el propósito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible. En este sentido, el riesgo implica en sí, una construcción social, que trasciende la dinámica de la estructura biofísica y establece vínculos con las diferentes estructuras que configuran el territorio. De tal modo, para el análisis de riesgo, es necesario hacer una mirada de manera conjunta a los factores que interviene en su configuración. En este sentido, los factores de riesgo subyacen a las formas en las que se planifica, se habita, se vive y se ordena un territorio.

En relación a lo anterior, se torna de vital importancia evaluar el riesgo al que se encuentran sometidas las comunidades y la infraestructura de un lugar para determinar si una acción es viable o no desde el punto de vista de seguridad y prevención. Es así que, dentro de los requerimientos solicitados por el Primer Curador Urbano del municipio de Manizales para emitir un Concepto Norma Urbanística del Proyecto de parcelación en la vereda La Cabaña del corregimiento El Remanso, municipio de Manizales; y de acuerdo a la revisión del Plan de Ordenamiento Territorial de Manizales se hace necesario adelantar estudios detallados de amenaza, para los fenómenos de movimientos en masa, debido a que el predio se encuentra ubicado en un sector que se clasifica parcialmente con amenaza (Media y Alta) y riesgo (Alto) por deslizamiento. El propósito de este informe es mostrar la metodología utilizada para determinar la amenaza por movimientos en masa

siguiendo la interpretación de los factores de seguridad (FS) y teniendo en cuenta factores como sismicidad y pluviosidad, además de las condiciones topográficas del terreno.

2. Objetivos

Objetivo general

- Apoyar al equipo de geotecnia en la generación de los mapas de zonificación de amenaza por remoción en masa.

Objetivos específicos

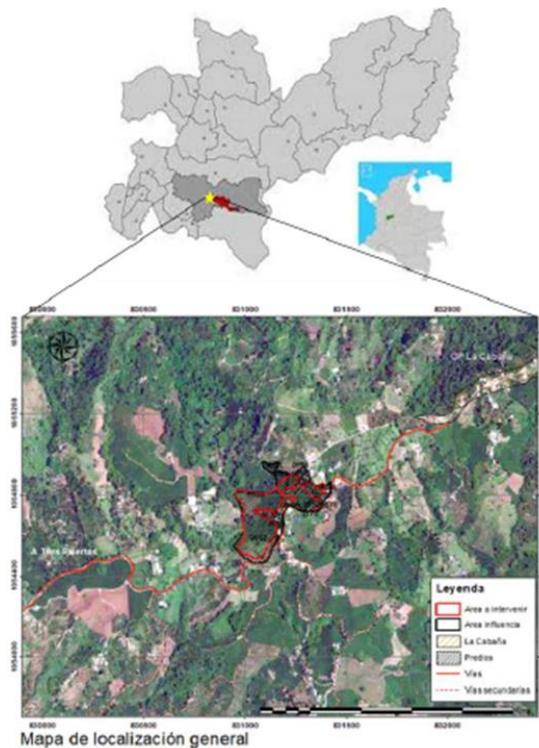
- Realizar levantamiento de información primaria para la generación de cartografía geológica y geomorfológica.
- Supervisar las labores de perforación y extracción de muestras de laboratorio.
- Describir detalladamente las unidades de suelo encontradas en las perforaciones.
- Contribuir en la generación del modelo geológico-geotécnico de la zona.
- Apoyar al equipo de geotecnia en los análisis de estabilidad de laderas

3. Localización

El área de estudio que corresponde al “Proyecto de Parcelación” se encuentra situada dentro del corregimiento El Remanso, más precisamente en la vereda La Cabaña, la cual se encuentra ubicada al sector noroeste del casco urbano del municipio de Manizales y en el sector central de la subcuenca del río Chinchiná; dicho sector era un paso obligado de la antigua vía que conduce de Manizales al corregimiento de Arauca (Palestina). Se encuentra a 17,7 kilómetros de la vía que conduce a Manizales - Quebra de Vélez – La Cabaña - Tres Puertas y a treinta minutos de la zona urbana de Manizales. En la Figura 3.1 se muestra la localización general del proyecto.

El Corregimiento Remanso está localizado en la zona central de la subregión; limita al norte con los corregimientos Colombia y Cristalina, al occidente con el municipio de Palestina, al sur con el corregimiento Panorama y el municipio de Palestina y al Oriente con el corregimiento Manantial y parte de la zona urbana de Manizales (Alcaldía de Manizales, 2013)

Mapa 1. Localización general del proyecto.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

El corregimiento presenta un área superficial de 5.854 Ha, y a este pertenecen las veredas: La cuchilla del salado, La Linda (parte), La Palma, La Quebra de Vélez, Cueva Santa, Patio Bonito, Malpaso, El Chuzo, Santa Clara, Manzanares y La Cabaña; y los vecindarios de El Bosque, Cuchilla de los Santa, Farallones, Morrogordo, La Pava, Morrocaliente y Altamar.

Geográficamente el corregimiento presenta una topografía entre escarpada y ondulada. Se caracteriza por presentar laderas alargadas con dirección norte-sur, fuertes pendientes algunas colinas sub redondeadas, las cuales son interceptadas por pequeños drenajes.

Predominan los suelos franco Arcilloso altamente fracturable; son fértiles, en un nivel mediano alto y necesita de abonos, muy ricos en materia orgánica y con componente volcánico.

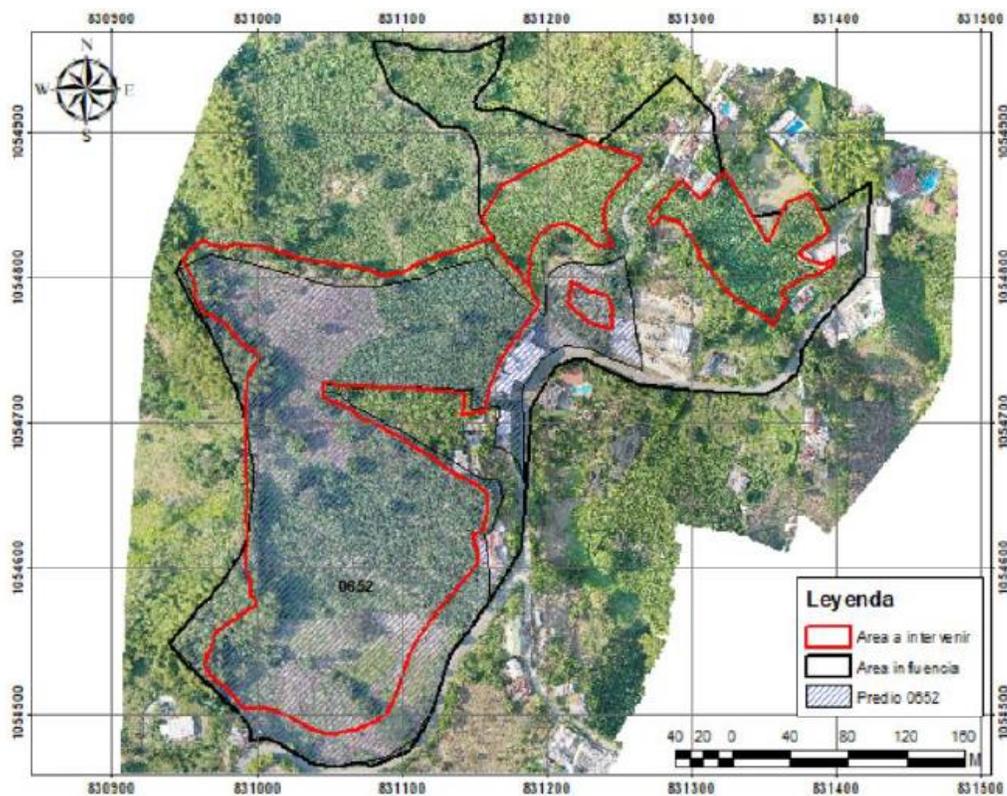
Se encuentra entre los 1.000 – 1.800 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura promedio de 23°C y una precipitación media anual de 2.000 milímetros.

3.1. Área a intervenir y área de influencia.

3.1.1. Área a intervenir

El área a intervenir corresponde a la zonificación de los sectores que, debido a sus características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas, son potencialmente aptas para el desarrollo del proyecto o áreas construibles, estas áreas se identifican en el Mapa 2, estas fueron indicadas previamente como áreas potencialmente parcelables por los interesados de este estudio.

Mapa 2. Localización específica del proyecto donde se observan el área a intervenir y el área de influencia.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

3.1.2. Área de influencia

Con el fin de adelantar la caracterización socio ambiental que comprende el Proyecto de Parcelación, es necesario definir los límites de las áreas de influencia directa e indirecta, las cuales corresponden a los sectores que de alguna forma podrán presentar una afectación, bien sea de manera positiva o negativa sobre los entornos físicos, bióticos y socioeconómicos; esto como resultado de la ejecución de las diferentes actividades que conllevan la implementación del proyecto.

Por lo tanto, las áreas de influencia se definen como la zona en donde se podrían presentar alteraciones en los componentes ambientales y sociales durante las etapas del proyecto.

De acuerdo a lo anterior el área de influencia se encuentra determinada por las condiciones ambientales que limitan o restringen la propagación de los posibles impactos ambientales derivados de la acción de un movimiento en masa, así como lo son límites de coberturas de forestal y/o cuencas hidrográficas.

Cabe mencionar que el estudio detallado de amenaza se realizara únicamente para el área de influencia directa, por consiguiente, la zonificación se desarrollara solamente para esta área.

3.1.2.1. Área de influencia directa (AID)

El Área de Influencia Directa – AID, contempla el sector donde se podrán manifestar los impactos directos producto de la ejecución del proyecto. Si bien el área de estudio

corresponde a un predio específico, para este caso el predio 0652, no se debe desconocer que este tipo de estudios deben abarcar no solo el área que está delimitada por la línea imaginaria definida por catastro, sino que se deben analizar el contexto geológico y geomorfológico que se representa por una serie de laderas.

Al utilizar como elemento de análisis la ladera y no el límite catastral, se está incluyendo todos los factores condicionantes que puedan propiciar la inestabilidad, además se tendría en cuenta la recomendación emitida en el concepto de norma urbanística y reglamentado por el artículo 2.2.2.1.3.1.4 del Decreto 1077 de 2015 que dicta “la unidad de análisis para el caso de amenaza por deslizamientos o movimientos en masa será un área que incluya la geoforma en la cual este ubicado el predio, de tal forma que se involucre las laderas de influencia que puedan comprometer la estabilidad del predio o predios objeto de análisis”.

Igualmente se identifican los siguientes sectores que hacen parte del área de influencia directa del proyecto y corresponden a:

Tramo vía La Cabaña – Monterredondo:

Esta vía veredal será utilizada como una vía de acceso al proyecto, se proyecta un área en donde los impactos directos provenientes de la ejecución de las actividades de movilización y transporte trascenderán hasta aproximadamente 30m a lado y lado de la vía existente, esto teniendo en cuenta la dispersión del material particulado y ruido proveniente del tránsito de vehículos, dicha margen corresponde a las fajas de retiro obligatorio para variantes que

forman parte de la red vial y que fueron decretadas en el artículo 8 del Decreto 2976 de 2010.

Tramo de faja forestal y zona de protección hidráulica:

Este tramo comprende la delimitación de las coberturas forestales asociadas a la faja forestal y zona de protección hidráulica que se encuentra en la quebrada hacia el sector sur del proyecto, para lo cual se proyecta un área de protección de 30m para los impactos directos provenientes de la ejecución de las actividades del proyecto.

Esta delimitación se proyectó sobre límites físicos y/o bióticos que pudiesen ser fácilmente identificables bien sea en campo y/o cartográficamente, como son el caso de la faja forestal y la zona de protección hidráulica.

4. Fundamento teórico

Se definirán algunos conceptos técnicos y teóricos, con el fin de dar a conocer de una mejor manera los estudios realizados y el desarrollo de los mismos, para el correcto entendimiento de este proyecto.

Como se ha presentado en la Ley 1523 de 2012, la gestión del riesgo es un proceso social que enmarca tres componentes principales: el conocimiento del riesgo, la reducción del riesgo y el manejo de desastres, cuyo fin es contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible.

Para analizar amenazas por movimientos en masa es necesario incluir conocimientos sobre geología, geofísica, climatología, hidrología y geotecnia al igual sobre la zona de estudio. La “Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo” sugiere realizar el análisis de amenaza mediante tres fases principales: definir un modelo geológico-geotécnico, plantear escenarios de amenaza y zonificar la amenaza. Como resultado de estas fases y de la etapa de análisis en sí misma, se obtienen los mapas de amenaza.

La definición del modelo geológico-geotécnico incluye la consideración de los factores condicionantes de inestabilidad prevalentes en el área de estudio. Estos configuran la predisposición del terreno a la inestabilidad y están directamente relacionados con las características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de las laderas, considerándose inherentes al área de estudio, dado que prácticamente no varían en el espacio o tiempo; debido a su compleja evaluación, los factores directamente relacionados con la intervención antrópica se incluyen como condicionantes, a pesar de que su variación espacio temporal puede ser frecuente. Como resultado de esta etapa se obtiene un mapa de zonas homogéneas desde el punto de vista de características y comportamiento esperado.

Factores como la lluvia y los sismos, que pueden modificar las condiciones de estabilidad de una ladera, se consideran detonantes y se deben evaluar en términos probabilísticos para la definición de escenarios de amenaza actuales y potenciales que determinarán las posteriores etapas de análisis de riesgo. La definición de escenarios permite caracterizar la amenaza en términos de ubicación, clasificación, material, tamaño, distancia de viaje, velocidad y frecuencia de ocurrencia, para integrarla con los escenarios de vulnerabilidad en la fase de análisis de vulnerabilidad.

Se propone la definición de las áreas de amenaza mediante la aplicación de métodos de equilibrio límite en términos de probabilidad de falla. Al final del proceso se tendrá un mapa de zonificación de amenaza que permitirá la toma de decisiones en un primer nivel de conocimiento, para la aplicación de las posteriores fases y etapas para la elaboración de estudios de riesgo. (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

Los estudios básicos de amenaza por movimientos en masa a escala 1:5000 se deben realizar en zona urbana, suburbana, periurbana, de expansión y centros poblados, según lo definido por el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), la secretaria u Oficina de Planeación municipal y la de gestión del riesgo de la alcaldía municipal, de tal modo que respondan a la necesidad de gestión del municipio en aquellas zonas identificadas como de presión urbanística.

Las áreas con condición de riesgo se identificarán a partir del análisis de las áreas zonificadas como de amenaza alta en los estudios básicos, con la información cartográfica disponible (predial o catastral, entre otras) que permita identificar la existencia de elementos expuestos, de áreas urbanizadas, ocupadas o edificadas, así como de aquellas en las que se encuentren edificaciones indispensables y líneas vitales. Con esta información se elabora el mapa con la delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo y se establecen los criterios para la caracterización

y delimitación de las unidades de análisis que dependen del fenómeno a estudiar y la priorización para la realización de los estudios detallados a escala 1:2000 que permitirán categorizar el riesgo.

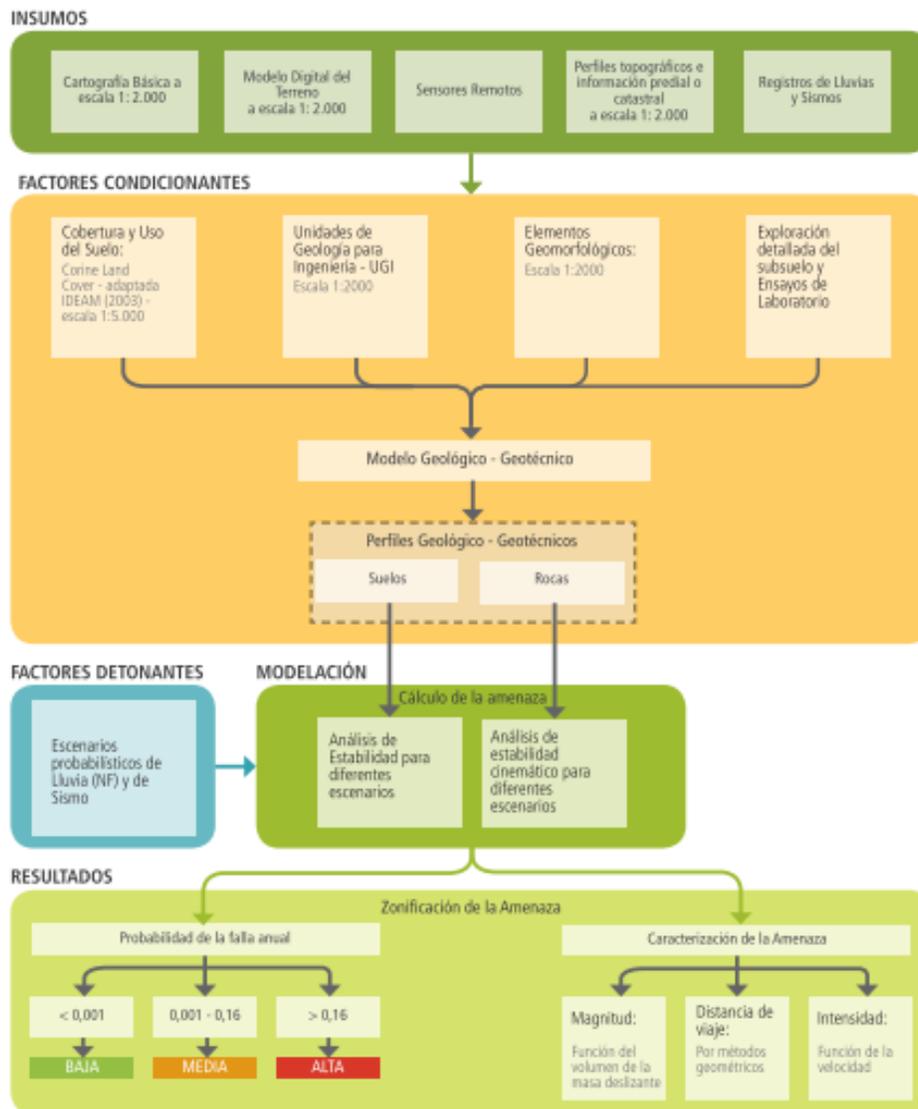
La zonificación de amenaza en los estudios básicos se realiza a escala 1:5000 con base en análisis determinísticos, mientras que para los estudios de detalle se realiza a escala 1:2000, aplicando análisis probabilísticos.

Para efectuar los estudios de amenaza se requiere la cartografía básica del área de análisis a escala 1:5000 y a partir de ella se genera la cartografía temática, correspondiente a cartografía geológica en unidades de geología para ingeniería, la cartografía geomorfológica en cuanto a elementos geomorfológicos y la cartografía de cobertura y uso del suelo. Además, se debe hacer un inventario de movimientos en masa y un registro histórico de estos (catálogo).

Estudios de detalle de amenaza por movimiento en masa

En la Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa se propone un modelo probabilístico para el análisis detallado de la amenaza, escala 1:2000, de acuerdo con las actividades que se presentan en el siguiente esquema metodológico.

Figura 1. Zonificación detallada de amenaza por movimientos en masa a escala 1:2000.



Fuente: “Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa”. (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

Los análisis detallados de amenaza por movimientos en masa se deben desarrollar para aquellas zonas que hayan quedado clasificadas como de amenazas alta y media en el estudio básico de amenaza, además de los insumos requeridos para los estudios básicos de amenaza (cartografía básica digital, geología para ingeniería, elementos geomorfológicos, inventario de movimiento en

masa, cobertura y uso del terreno, exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio), en el análisis detallado de la amenaza hay que incluir el análisis de secciones y factores detonantes.

Caracterización de la amenaza:

En la evaluación del riesgo por movimientos en masa, es fundamental predecir el modo de falla de las laderas y cuantificar el desplazamiento de la masa, incluyendo la distancia de viaje y la velocidad (Hungry et al., 2005). Entre los parámetros que definen la magnitud de los movimientos en masa se deben incluir todos aquellos que describan su capacidad destructiva (AGS, 2007b).

Tabla 1. Parámetros para definir magnitud de los movimientos en masa.

TIPO DE PROCESO	PARÁMETROS QUE DEFINEN MAGNITUD
Velocidad y volumen movilizado	Deslizamientos
Energía cinética	Caídas
Desplazamientos totales	Deslizamientos, movimientos lentos
Desplazamientos diferenciales	Movimientos lentos
Caudal pico por ancho (m ³ /m/s)	Flujos

Fuente: “Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa”. (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

Caracterización Geoambiental

Se debe recopilar información de geología, geomorfología, cobertura de tierra y clima para el área de estudio, así como interpretar de manera visual imágenes satelitales, ortofotos y trabajo de campo para identificar sus particularidades y poder generar hipótesis en relación con los factores que condicionan su ocurrencia.

Cruden & Varnes (1996) consideran una lista de factores causales de movimientos en masa como: condiciones geológicas y geomorfológicas, procesos físicos y antrópicos.

Tabla 2. Lista de factores causales de movimientos en masa.

CONDICIONES GEOLÓGICAS	CONDICIONES GEOMORFOLÓGICAS
Discontinuidades en macizos o masas de suelo orientadas en la misma dirección de la ladera	Depósitos de material transportado en la base o cresta de la ladera
Discontinuidades estructurales	Erosión costera de laderas
Contraste en permeabilidades y de rigidez	Erosión de márgenes laterales
Materiales cizallados	Erosión fluvial de la base del talud
Materiales colapsables	Erosión glacial de laderas
Materiales fisurados o diaclasados	Erosión subterránea
Materiales meteorizados	Levantamiento tectónico
Materiales plásticos débiles	Levantamiento volcánico
Materiales sensitivos	Rebote glacial
	Remoción de vegetación
PROCESOS FÍSICOS	PROCESOS ANTRÓPICOS
Contracción y expansión de suelos expansivos	Deforestación Minería
Derretimiento súbito de hielo	Desocupar reservorios
Descenso de niveles de inundación o mareas altas	Excavación de laderas
Erupciones volcánicas	Imposición de cargas en el borde de laderas
Periodos de lluvia intensos	Irrigación de laderas
Precipitación prolongada	Rellenos no técnicos
Rompimiento de reservorios	Sistemas de drenaje defectuosos
Sismos	Vibración artificial

Fuente: Adaptado y modificado de CRUDEN, D., VARNES D. Investigation and mitigation. Chapter 3: Landslide types and processes. Special Report - National Research Council 247, National Academy of Sciences. 1996.

Métodos para evaluar la susceptibilidad y la amenaza por deslizamiento

Los estudios de susceptibilidad y amenaza a movimientos en masa se basan principalmente en la deducción del como los movimientos en masa tienden a ocurrir donde ellos se han generado en el pasado, “el pasado y el presente son la base para el futuro” (Varnes, 1984) así en términos espaciales tienden a ocurrir agrupados o en clúster, un grupo puede tener varios movimientos en masa de diferentes tamaños tipos y edades (Malamud et al., 2004).

Un área puede ser declarada susceptible a deslizamientos cuando las condiciones del terreno en el sitio son comparables a aquellas zonas donde se han producido movimientos en masa (Van Westen et al., 1997).

La ocurrencia de movimientos en masa tanto en el tiempo como en el espacio puede ser estudiada a través de investigaciones heurísticas, análisis estadísticos de factores geoambientales, o modelos físicos (Van Westen et al., 1997). Los movimientos en masa son controlados principalmente por leyes físicas que pueden ser estudiadas de forma empírica, estadística o determinística Cascini (2008) (Tabla 4). Estos diferentes tipos de estudio contribuyen de alguna manera a la aplicación por parte de organismos gubernamentales de medidas de prevención y mitigación en materia de riesgos de deslizamientos al nivel mundial (van Westen et al., 1997). En base a la experiencia, algunos autores como Amorim et al. (2009), concluyen sobre la importancia de trabajar en una mejora en la calidad de los datos de entrada referentes al inventario de movimientos en masa y las variables condicionantes, antes de la búsqueda de metodologías más sofisticadas de evaluación de la susceptibilidad.

Tabla 3. Métodos para la evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa.

Método	Entrada	Topografía, inventario de deslizamientos, geomorfología	Adicionalmente Clasificación y profundidad del suelo, unidades de terreno	Adicionalmente hidrogeología y geotecnia.
	Proceso			
Básico	Modelos heurísticos o empíricos	*		
Intermedio	Modelos estadísticos	*	*	
Sofisticado	Modelo determinísticos (bases físicas o geotécnicas)	*	*	*

Fuente: (Cascini, 2008).

Modelos determinísticos

Constituyen un marco teórico que une la hidrología, la geomorfología, la ciencia del suelo y la geotecnia con diferente grado de simplificación con el fin de entender físicamente la ubicación y el momento de ocurrencia de un deslizamiento. El análisis de estabilidad por medio del método del talud infinito suele ir acompañado de condiciones de infiltración en el estado cuasi-estacionario y transitorio constantes, con el fin de calcular el factor de seguridad (FS). En términos prácticos los métodos determinísticos evalúan el factor de seguridad mediante el análisis de estabilidad de las laderas al tener en cuenta los parámetros de resistencia del terreno (van Westen y Terlien, 1996).

Gestión del riesgo

Antes de conocer el método de estimar riesgos es preciso entender el concepto de gestión de riesgo. Éste se puede definir como el proceso estratégico para que los actores sociales implicados en la dinámica de un territorio, puedan concertar el contexto, las capacidades y los recursos que se dispondrán de forma preventiva y correctiva para llegar a niveles aceptables de seguridad humana (Leonelli, 2000).

Cómo tal, la gestión del riesgo es el arte de unir fuerzas en función del desarrollo humano sostenible, actuando sobre las causas y factores detonantes del riesgo, con la finalidad ante todo de preservar la vida (PRODESAMH, 2000).

Factor de seguridad

“El factor de seguridad también llamado el coeficiente de seguridad es un factor que se utiliza en ingeniería para sobredimensionar los cálculos teóricos”. Tomado de Manual: “Modelos de referencia para el cálculo de cimentaciones y elementos de contención”, Universidad Nacional de Educación a Distancia.

La evaluación del grado de estabilidad de cada rebanada de tierra se realiza aplicando el concepto del Factor de Seguridad, definido como el cociente entre fuerzas a favor y en contra del deslizamiento. Tomado del Artículo: “Estabilidad de Taludes “de Luis Bañón Biasquéz.

Según el ingeniero Carlos Rodríguez un experto en el área, una ecuación que permite relacionar parámetros se puede expresar como se describe en la ecuación No. 2:

Ecuación 1. Estimación del Factor de Seguridad.

$$\Phi = \frac{c' * b * \sec(\beta) + (\gamma * b * h * \cos(\beta))(u * b * \sin(\beta)) * \tan(\phi')}{b * h * \gamma * \sin(\beta)} \quad [1]$$

$$\Phi = \frac{c'}{\gamma * h} * \frac{1}{\sin(\beta) * \cos(\beta)} + \left[\frac{1}{\tan(\beta)} - \frac{u}{\gamma * h} * \frac{1}{\sin(\beta) * \cos(\beta)} \right] * \tan(\phi') \quad [2]$$

$$\Phi = \frac{c'}{\gamma * h} * \frac{1}{\sin(\beta) * \cos(\beta)} + \left[1 - \frac{r * u}{\cos^2(\beta)} \right] * \frac{\tan(\phi')}{\tan(\beta)} \quad [3]$$

$$\Phi = \frac{c'}{\gamma * h} * A + B * \frac{\tan(\phi')}{\tan(\beta)} \quad [4]$$

En donde cada parámetro de la ecuación No. 1 representa:

- c' = Cohesión efectiva (Pa= N/m²).
- γ = Peso unitario del suelo (N/m³).
- m = z_w/z (Adimensional).
- w = Peso unitario del agua (N/m³).
- z = Profundidad de la falla bajo la superficie (m).

- z_w = Altura del nivel freático sobre la falla (m).
- β = Inclinación de la pendiente ($^\circ$).
- ϕ' = Angulo efectivo de la resistencia a la fricción ($^\circ$)

Esta ecuación permite clasificar el nivel de amenaza por movimientos en masa a partir del resultado que se obtiene en el factor de seguridad.

Tabla 4. Categorías de zonificación de susceptibilidad y amenaza según los factores de seguridad.

Factor de seguridad	Categoría de susceptibilidad y amenaza
< 1.1	Alta
1.1 – 1.5	Media
> 1.5	Baja

Estudio Geotécnico

Según la norma NSR-10 en el título H.2.1 el estudio geotécnico se define como un conjunto de actividades que comprenden el reconocimiento de campo, la investigación del subsuelo, los análisis y recomendaciones de ingeniería necesarios para el diseño y construcción de las obras en contacto con el suelo, de tal forma que se garantice un comportamiento adecuado de la edificación, protegiendo ante todo la integridad de las personas ante cualquier fenómeno externo, además de proteger vías, instalaciones de servicios públicos, predios y construcciones vecinas.

En cuanto a la Investigación del Subsuelo comprende el estudio y el conocimiento del origen geológico, la exploración del subsuelo (apiques, trincheras, perforación, sondeo y otros). los ensayos, pruebas de campo y laboratorio son necesarios para identificar y clasificar los diferentes suelos, rocas y cuantificar las características físico-mecánicas e hidráulicas del subsuelo.

Para el Análisis y Recomendaciones consiste principalmente en la interpretación técnica conducente a la caracterización del subsuelo y la evaluación de posibles mecanismos de falla, de deformación para suministrar los parámetros y las recomendaciones necesarias para el diseño, construcción de los sistemas de cimentación, contención y de otras obras en el terreno influenciadas por factores geotécnicos.

La caracterización geotécnica del subsuelo se definen el número mínimo y la profundidad mínima de los sondeos exploratorios del subsuelo, los cuales dependen del tamaño de la edificación propuesta (unidad de construcción). El ingeniero geotecnista, podrá aumentar el número o la profundidad de los sondeos, dependiendo de las condiciones locales y los resultados iniciales de la exploración.

De esta manera se define las unidades de construcción como:

- Una edificación en altura.
- Grupo de construcciones adosadas, cuya longitud máxima en planta no exceda los 40 m
- Cada zona separada por juntas de construcción.
- Construcciones adosadas de categoría baja, hasta una longitud máxima en planta de 80 m
- Cada fracción del proyecto con alturas, cargas o niveles de excavación diferentes. Para los casos donde el proyecto exceda las longitudes anotadas, se deberá fragmentar en varias unidades de construcción, por longitudes o fracción de las longitudes.

Clasificación de las unidades de construcción por categorías

Es importante tener en cuenta estas clasificaciones las cuales determinan el nivel de complejidad de los estudios; ya que según la norma NSR-10 título H las unidades de construcción se clasifican

en Baja, Media, Alta y Especial, según el número total de niveles y las cargas máximas de servicio. Para las cargas máximas se aplicará la combinación de carga muerta más carga viva debida al uso y ocupación de la edificación

Tabla 5. Clasificación de las unidades de construcción por categorías.

Categoría de la unidad de construcción	Según los niveles de construcción	Según las cargas máximas de servicio en columnas (kN)
Baja	Hasta 3 niveles	Menores de 800 kN
Media	Entre 4 y 10 niveles	Entre 801 y 4,000 kN
Alta	Entre 11 y 20 niveles	Entre 4,001 y 8,000 kN
Especial	Mayor de 20 niveles	Mayores de 8,000 kN

Fuente: Norma NSR-10 título H

Para tales estudios debe de realizarse una **exploración de campo** la cual consiste en la ejecución de apiques, trincheras, perforación o sondeo con muestreo, sondeos estáticos o dinámicos, u otros procedimientos exploratorios reconocidos en la práctica, con el fin de conocer y caracterizar el perfil del subsuelo afectado por el proyecto, ejecutar pruebas directas o indirectas sobre los materiales encontrados y obtener muestras para la ejecución de ensayos de laboratorio.

La exploración debe ser amplia y suficiente para buscar un adecuado conocimiento del subsuelo hasta la profundidad afectada por la construcción, teniendo en cuenta la categoría del proyecto, el criterio del ingeniero geotecnista y lo dispuesto en las tablas 5 y 6. En el caso de macizos rocosos se debe hacer la clasificación de éstos por uno de los métodos usuales (RMR, Q, GSI) y realizar levantamiento de discontinuidades en los afloramientos, apiques o muestras.

El cumplimiento de estas normas mínimas no exime al ingeniero geotecnista de realizar los sondeos exploratorios necesarios adicionales, para obtener un conocimiento adecuado del subsuelo, de acuerdo con su criterio profesional. En caso de no realizar estos sondeos, deberá consignar esta recomendación en su informe geotécnico.

El número mínimo de sondeos de exploración que deberán efectuarse en el terreno donde se desarrollará el proyecto se definen en la tabla 6.

Tabla 6. Número mínimo de sondeos y profundidad por cada unidad de construcción Categoría de la unidad de construcción.

Categoría Baja	Categoría Media	Categoría Alta	Categoría Especial
Profundidad Mínima de sondeos: 6 m. Número mínimo de sondeos: 3	Profundidad Mínima de sondeos: 15 m. Número mínimo de sondeos: 4	Profundidad Mínima de sondeos: 25 m. Número mínimo de sondeos: 4	Profundidad Mínima de sondeos: 30 m. Número mínimo de sondeos: 5

Fuente: Norma NSR-10 título H

De acuerdo a las anteriores tablas se definen las Características y distribución de los sondeos las cuales deben cumplir las siguientes disposiciones:

- Los sondeos con recuperación de muestras deben constituir como mínimo el 50% de los sondeos practicados en el estudio definitivo.
- En los sondeos con muestreo se deben tomar muestras cada metro en los primeros 5 m de profundidad y a partir de esta profundidad, en cada cambio de material o cada 1.5 m de longitud del sondeo.
- Al menos el 50% de los sondeos deben quedar ubicados dentro de la proyección sobre el terreno de las construcciones.
- Los sondeos practicados dentro del desarrollo del Estudio Preliminar pueden incluirse como parte del estudio definitivo - de acuerdo con esta normativa - siempre y cuando hayan sido ejecutados con la misma calidad y siguiendo las especificaciones dadas en el presente título del Reglamento.
- El número de sondeos finalmente ejecutados para cada proyecto, debe cubrir completamente el área que ocuparán la unidad o unidades de construcción contempladas en cada caso, así como las áreas que no quedando ocupadas directamente por las estructuras o

edificaciones, serán afectadas por taludes de cortes u otros tipos de intervención que deban ser considerados para evaluar el comportamiento geotécnico de la estructura y su entorno.

Por lo tanto, se deben tener en cuenta de igual manera la profundidad de los sondeos ya que por lo menos el 50% de todos los sondeos debe alcanzar la profundidad dada en la Tabla 6; afectada a su vez por los siguientes criterios, los cuales deben ser justificados por el ingeniero geotecnista.

La profundidad indicativa se considerará a partir del nivel inferior de excavación para sótanos o cortes de explanación. Cuando se construyan rellenos, dicha profundidad se considerará a partir del nivel original del terreno

- Profundidad en la que el incremento de esfuerzo vertical causado por la edificación, o conjunto de edificaciones, sobre el terreno sea el 10% del esfuerzo vertical en la interfaz suelo-cimentación.
- En los casos donde se encuentre roca firme, o aglomerados rocosos o capas de suelos firmes asimilables a rocas, a profundidades inferiores a las establecidas, el 50% de los sondeos deberán alcanzar las siguientes penetraciones en material firme de acuerdo con la categoría de la unidad de construcción:
 - Categoría Baja: los sondeos pueden suspenderse al llegar a estos materiales
 - Categoría Media: penetrar un mínimo de 2 metros en dichos materiales, o dos veces el diámetro de los pilotes en éstos apoyados
 - Categoría Alta y Especial: penetrar un mínimo de 4 metros o 2.5 veces el diámetro de pilotes respectivos, siempre y cuando se verifique la continuidad de la capa o la consistencia adecuada de los materiales y su consistencia con el marco geológico local.
- En todo caso primará el concepto del ingeniero geotecnista, quien definirá la exploración necesaria siguiendo los lineamientos ya señalados, y en todos los casos, el 50% de las

perforaciones, deberán alcanzar una profundidad por debajo del nivel de apoyo de la cimentación. En algunos casos, a juicio del Ingeniero geotecnista responsable del estudio, se podrán reemplazar algunos sondeos por apiques ó trincheras

Para definir el número de sondeos en un proyecto, se definirán inicialmente las unidades de construcción. En todos los casos el número mínimo de sondeos para un estudio será de tres (3) y para definir el número se debe aplicar el mayor número de sondeos resultante y el número de unidades de construcción.

Los sondeos realizados en la frontera entre unidades adyacentes de construcción de un mismo proyecto, se pueden considerar válidos para las dos unidades siempre y cuando domine la mayor profundidad aplicable.

En cuanto a los ensayos de laboratorio se definen la selección de muestras obtenidas de la exploración de campo que deberán ser objeto de los manejos y cuidados que garanticen su representatividad y conservación. Las muestras para la ejecución de ensayos de laboratorio deberán ser seleccionadas por el ingeniero geotecnista y deberán corresponder a los diferentes materiales afectados por el proyecto.

Tipo y número de ensayos depende de las características propias de los suelos o materiales rocosos por investigar, del alcance del proyecto y del criterio del ingeniero geotecnista. El ingeniero geotecnista ordenará los ensayos de laboratorio que permitan conocer con claridad la clasificación, peso unitario y permeabilidad de las muestras escogidas. Igualmente, los ensayos de laboratorio que ordene el ingeniero geotecnista deben permitir establecer con claridad las propiedades geomecánicas de compresibilidad y expansión de las muestras escogidas, así como las de esfuerzo-deformación y resistencia al corte ante cargas monotónicas. Los análisis de respuesta de sitio deben

realizarse con resultados de ensayos de laboratorio que establezcan con claridad las propiedades esfuerzo deformación ante cargas cíclicas de los materiales de las muestras escogidas

Las propiedades básicas para la caracterización de suelos y rocas son como mínimo las siguientes:

Propiedades básicas de los suelos a determinar con los ensayos de laboratorio son: peso unitario, humedad y clasificación completa para cada uno de los estratos o unidades estratigráficas y sus distintos niveles de meteorización. Igualmente debe determinarse como mínimo las propiedades de resistencia en cada uno de los materiales típicos encontrados en el sitio mediante compresión simple o corte directo en suelos cohesivos, y corte directo o SPT en suelos granulares.

Propiedades básicas de las rocas a determinar con los ensayos de laboratorio son: peso unitario, compresión simple (o carga puntual) y eventualmente la alterabilidad de este material mediante ensayos tipo desleimiento-durabilidad o similares.

Las propiedades mecánicas e hidráulicas del subsuelo tales como: resistencia al cortante, propiedades esfuerzo-deformación, compresibilidad, expansión, permeabilidad y otras que resulten pertinentes de acuerdo con la naturaleza geológica del área, se determinarán en cada caso mediante procedimientos aceptados de campo o laboratorio, debiendo el informe respectivo justificar su número y representatividad de manera precisa y coherente con el modelo geológico y geotécnico del sitio

El ingeniero responsable del estudio podrá llevar a cabo pruebas de campo para la determinación de propiedades geomecánicas, en cuyo caso deberá realizarlos con equipos y metodologías de reconocida aceptación técnica, patronados y calibrados siempre y cuando, sus resultados e interpretaciones se respalden mediante correlaciones confiables y aceptadas con los ensayos

convencionales, sustentadas en experiencias publicadas y se establezcan sus intervalos más probables de confiabilidad.

Sistemas de información geográfica

Los sistemas de información geográfica se componen de cuatro grandes grupos de subsistemas. Según Rodríguez et al.

Subsistema de entrada

El sub sistema de entrada comprende todos los procesos relacionados con la gestión de información capturada necesaria para abordar un problema en particular o describir una situación o evento. Este subsistema debe considerar tanto los datos espaciales como los no espaciales. Los datos espaciales son aquellos que se derivan de mapas, planos, fotografías aéreas, imágenes de satélite o levantamientos topográficos o geodésicos y describen las características cuantitativas de un objeto geográfico.

Este subsistema se encarga de resolver los aspectos técnicos relativos a la conversión de datos en formato analógico (papel) a formato digital, considerando una estructura adecuada para realizar procesos posteriores de análisis y modelación. Tomado de Área disciplinar, “Geografía Introducción al concepto de geolocalización” María Evangelina Chávez.

Georreferenciación

Es el posicionamiento en el que se define la localización de un objeto espacial (representado mediante punto, vector, área, volumen) en un sistema de coordenadas determinado. Este proceso es utilizado frecuentemente en los Sistemas de Información Geográfica.

La georreferenciación posee una definición aplicada a la existencia de los objetos en un espacio físico, mediante el establecimiento de relaciones entre las imágenes raster o vector aplicados sobre una proyección geográfica o sobre un sistema de coordenadas Tomado de Área disciplinar, “Geografía Introducción al concepto de geolocalización” María Evangelina Chávez.

Subsistema de Almacenamiento

Es el subsistema que permite el almacenamiento, ordenamiento y recuperación de datos. Este proceso se realiza en forma paralela con el de captura. La organización de la información (para su almacenamiento) se realiza con ayuda de manejadores de bases de datos (SMBD, por sus siglas en español) que permiten manipular datos digitales. Tomado de “Introducción a los Sistemas de Información Geográfica” Ing., Álvaro Puentes Molina.

La información espacial se almacena en diferentes estructuras que procesan los datos espaciales a manera de puntos, redes, líneas, polígonos y áreas a las cuales se les otorgan valores que pueden ser georreferenciados. Tomado del Artículo: “Sistemas de Información Geográfica” María Cecilia Rubí.

GeoDataBase

La esencia de un SIG está constituida por una base de datos geográfica. Esta es, una colección de datos acerca de objetos localizados en una determinada área de interés. Una base de datos geográfica posee un conjunto de procedimientos que permiten hacer un mantenimiento tanto de la documentación como de la administración. Los objetos geográficos dentro de una GeoDataBase son organizados por temas de información o capas de información también llamadas niveles. (Universidad de Piura, Perú)

Subsistema de análisis y diseño

Existen muchos tipos de análisis en SIG cómo los son: el análisis espacial, el análisis de proximidad, el análisis de redes y el análisis en tercera dimensión, entre otros. El éxito de cada uno de estos análisis recae en la calidad y preparación de la información a ser analizada. Se requiere de una correcta conceptualización de las tareas de análisis previas a su ejecución. Tomado de, Slides: “Introducción a los SIG” Juan Carlos Valdés Quintero.

Los Sistemas de Información Geográfica permiten procesar simultáneamente diferentes variables, simular procesos, monitorear áreas bajo riesgos naturales y amenazas ecológicas, determinando áreas para la construcción de viviendas, vías de transporte, acueducto, entre otros. Un SIG puede analizar variados tipos de información, por ejemplo: datos estadísticos, fotografías aéreas, imágenes de satélite y datos espaciales. Tomado del Artículo: “Sistemas de Información Geográfica.” Biblioteca Luis Ángel Arango del Banco de la República.

La integración de mapas en el pasado se limitaba esencialmente a la superposición de capas. Los análisis se realizaban por medio de una operación aritmética de suma y resta. Hoy, a partir de la organización de la información en proyectos de SIG, dos o más mapas pueden ser relacionados a través de distintas funciones lógicas y matemáticas. Los cálculos de: longitud, área, perímetro e intersecciones entre distintas unidades geográficas pueden ser realizados con precisión. Tomado de Universidad de San Carlos de Guatemala, Isaías Pixtún.

Subsistema de salida

Es el subsistema que comprende la presentación de los datos y el despliegue de resultados derivados del subsistema de análisis y diseño. La salida de datos corresponde a un despliegue gráfico.

Gracias a los SIG es posible visualizar datos en forma espacial manejando información georreferenciada para su análisis y posterior diseño. Una vez ingresados los datos y establecidas las respectivas bases de las capas, el beneficio primario que provee un SIG es visualizar la información procesada, capa por capa, a manera de mapas de presentación. Tomado de, “El uso de los sistemas de información geográfica (SIG) en el análisis demográfico de situaciones de desastre

Angélica Reyna.

5. Marco geológico

La evolución geológica del oeste de Colombia fue el resultado de la acumulación de terrenos alóctonos en el margen continental desde el Cretácico (Restrepo y Toussaint, 1988; Grösser, 1989; Moreno Sánchez y Pardo, 2003; Cediél et al., 2003; Pindell y Kennan, 2009; Cardona et al., 2011; Spikings et al., 2015; Cardona et al., 2018; Hincapié-Gómez et al., 2018). El basamento y núcleo de la Cordillera central está compuesto por rocas de terrenos aloctonos, estos fueron acrecionados al continente durante la actividad tectónica del Cretácico tardío – Paleógeno, asociada con la convergencia de una placa oceánica localizada al occidente y la corteza continental de la Cordillera Central (González, 1993 a; Toussaint, 1996). En el proceso de subducción del periodo Cretácico se forma un arco de islas, dando lugar a una cuenca marginal que durante el proceso de subducción se fue estrechando; favoreció la acumulación de sedimentos.

Durante el periodo Cretácico Superior, ocurre la acreción de un terreno exótico al margen continental de la Cordillera Central (Villagómez et al., 2011; Moreno-Sánchez y Pardo-Trujillo, 2003) dicho terreno es conocido como Complejo Arquía (Maya y González, 1995), esta unidad geológica se constituye como una franja alargada, estrecha y discontinua de esquistos anfibólicos, sericíticos, cuarcitas y neises, junto a anfibolitas y metagabros asociados a cuerpos ultramáficos; localizada al oriente de la Falla Cauca-Almaguer (Cauca-Patía) que lo separa de las rocas de arco de la Formación Barroso. (Rodríguez, G., & Arango, M. I., 2013); donde la edad mínima del metamorfismo del Complejo Arquía es Cretácico temprano según edades K/Ar (Restrepo y Toussaint, 1975; Toussaint, 1996; Brook, 1984; Restrepo, 1991; Restrepo, 2008; McCourt et al., 1984) y Ar/Ar (Vinasco et al., 2001).

La actividad volcánica generada durante el proceso del arco de islas dio origen a una unidad volcánica sedimentaria que aparece en los mapas regionales como una franja alargada N-S (Álvarez

y González, 1978), la cual Álvarez y González (1978) llamaron Formación Barroso. Esta unidad está constituida por derrames de lavas basálticas y andesíticas, tobas, aglomerados, tufas e intercalaciones sedimentarias de chert, lodolitas, limolitas y grauwas. (Rodríguez y Arango, 2012); cuyas características texturales de rocas son pórfidicas, amigdalares, vacuolares o piroclásticas, sin texturas “diabásicas”. La Formación Barroso aflora entre la Falla Cauca – Almaguer y la Falla Dabeiba – Pueblo Rico, hacia el este de la Cordillera Occidental (RODRÍGUEZ, G., & ZAPATA, G., 2013).

El Sistema de Fallas Romeral produce entre las cordilleras Central y Occidental cuencas de tracción, en una de las cuales se depositan durante el Neógeno sedimentos continentales, cubriendo gran parte de las unidades litoestratigráficas preexistentes. Siendo el caso de la Formación Irra – Tres Puertas donde la actividad fluvial asociada permitió la formación de terrazas y aluviones los cuales se caracterizan por su topografía plana; cuyos depósitos son asociados con el río Cauca, en la desembocadura del río Chinchiná y quebrada Llano Grande, los cuales son de grande extensión y están constituidos principalmente por gravas, arenas y limos. (INGEOMINAS, 2001).

A partir del Mioceno Medio se inicia una actividad volcánica lávica que aporta los clastos volcánicos a los depósitos que se formaban en la parte baja de la cordillera.

En el Mioceno tardío la actividad volcánica se torna explosiva y se caracteriza por la producción de grandes volúmenes de rocas piroclásticas, parte de los cuales son aportados a los depósitos de la Formación Manizales (Naranjo y Ríos, 1989) que afloran en la zona de la ciudad de Manizales y otros que en forma de flujo se depositan, como en el caso del “Depósito Volcánico de La Cabaña”, el cual se originó a partir de una corriente de densidad piroclástica (pyroclastic density current, según Fisher, 1990, en Wohletz, 1998) de ceniza y pómez que cubrió gran parte de la topografía preexistente a manera de manto, como lo muestran las modelaciones de corrientes de densidad

piroclástica (Gladstone et al.,2004), en las cuales las partes más finas de estas corrientes que pueden ser débilmente estratificadas u homogéneas, siendo menos afectadas por la topografía, y sólo las partes más densas de las mismas son valle-confinadas (Borrero, Parra, & Ospina, 2006).

6. Metodología

Etapas I: Trabajo de campo

Se llevó a cabo la cartografía geológica, para la identificación y descripción de las características físicas del suelo como el color, la textura, la plasticidad, el índice de humedad; además se identificó la unidad geológica a partir de las muestras de suelo y roca observadas y descritas en campo; se realizaron un total de 12 perforaciones en las unidades geológicas superficiales, las cuales fueron georreferenciadas mediante un dispositivo GPS, en este proceso, se recolectaron muestras de suelo inalteradas en tubos shelby, indicando la profundidad a la cual fue tomada cada una, con el fin de realizar un análisis de las propiedades geomecánicas e interpretar el comportamiento del suelo en los diferentes escenarios que se evalúan, para este proyecto fue lluvia y sismo; se identificaron las características de los componentes geomorfológicos encontradas como ladera irregular, laderas estructurales, escarpes de erosión menor y se logró identificar un deslizamiento rotacional en la parte trasera de la estación de policía que se encuentra en construcción, fuera de la zona de estudio; los componentes geomorfológicos fueron afectadas por procesos morfogenéticos exógenos. Se tiene en cuenta el uso del suelo actual y se definen para así mismo ser evaluado en la fase de resultados.

Etapas II: Recopilación Bibliográfica

Se realizó con el fin de asociar las características geológicas y estructurales de la región encontradas en campo con la información relacionada en documentos y estudios previos que contienen información gráfica como mapas y tablas; además de las características climáticas, geomorfológicas, topográficas y usos del suelo; de la literatura consultada destacan los siguientes

documentos: “Memoria Explicativa de la plancha 205 ” del Servicio Geológico Colombiano (antiguo Ingeominas) del año 2001 (Estrada et al., 2001) , “ Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa (SGC,2015),

Etapas III: Rasgos Geomorfológicos

Del trabajo levantado en campo se construyeron los rasgos geomorfológicos, estos se contrastan utilizando la plataforma Google Earth, lo que permitió realizar el análisis de fotointerpretación para los elementos geomorfológicos y procesos denudativos usando los documentos: “Propuesta de la Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia” (Carvajal, 2011) y la “Propuesta Metodológica Sistemática para la Generación de Mapas Geomorfológicos Analíticos aplicados a La Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:100.000” del Servicio Geológico Colombiano, 2012 (SGC, 2012). Con ayuda de estos documentos se logró hacer la jerarquización geomorfológica para la zona de estudio, permitiendo llegar a la categoría de componente o elemento geomorfológico ya que la escala de trabajo usada fue 1:2000.

Etapas IV: Análisis de los resultados de laboratorio

Luego de recibir los resultados de laboratorio de las muestras, se construyeron tablas con la información geomecánica definiendo los estratos de suelo encontrados, se incluye el espesor promedio para cada uno de los estratos encontrados; para este caso se definieron 4 estratos, cada uno con propiedades como cohesión, ángulo de fricción y peso unitarios; se enfatiza en estas ya que permiten construir y evaluar el comportamiento del suelo tanto en condiciones actuales como en condición de amenaza.

Etapa V: Determinación de la Amenaza

Se aplicó el método determinístico utilizando el software SLIDE, se evalúan las posibilidades de ocurrencia para movimientos en masa con los diferentes factores detonantes como sismo y lluvia, teniendo en cuenta las propiedades geomecánicas de los estratos. Con este análisis se logró evaluar el factor de seguridad mediante el análisis de estabilidad de las laderas contemplando los parámetros de resistencia del terreno (Van Westen y Terlien, 1996); se consideran los rangos para los factores de seguridad donde, valores inferiores a 1,1 es amenaza alta; entre 1,1 - 1,5 es amenaza media y, valores superiores a 1,5 es amenaza alta.

Etapa VI: Mapas Temáticos

A partir de la información obtenida con los puntos georreferenciados en la fase de campo, se generaron los mapas temáticos correspondientes a: las Unidades Geológicas para Ingeniería, teniendo en cuenta la unidad geológica correspondiente al Complejo Arquía como lo son los Esquistos de Lisboa - Palestina, de acuerdo a la información cartográfica obtenida del SGC; además, el mapa topográfico sacado del DEM el cual se tiene por el sobre vuelo aéreo realizado con drone; de igual manera, el DEM permite tener como resultado el mapa de pendientes a una escala cartográfica más detallada; para poder obtener el mapa geomorfológico se apoya de las características de curvatura del área de estudio, sacadas del mapa de curvatura; así como el mapa de cobertura, usos y conflictos del suelo. Con el resultado de estos mapas temáticos, además de las interpretaciones realizadas con las características geotécnicas y topografía del terreno, permiten generar como fase final el mapa de susceptibilidad y amenaza teniendo en cuenta los factores de seguridad que se generan en el software SLIDE de acuerdo a la sismicidad y pluviosidad para cada

una de las celdas analizadas. Cabe resaltar que todos estos mapas se generaron en el software ArcMap.

7. Resultados

7.1. Procesos erosivos

7.1.1. Catálogo e inventario

No se registran movimientos en masa en la zona de interés ni en los sectores de La Cabaña en la base de datos SIMMA y tampoco en la base de datos de desinventar.org. Los deslizamientos más próximos a la zona se encuentran en el Barrio La Linda o en vía que conecta hacia La Cabaña.

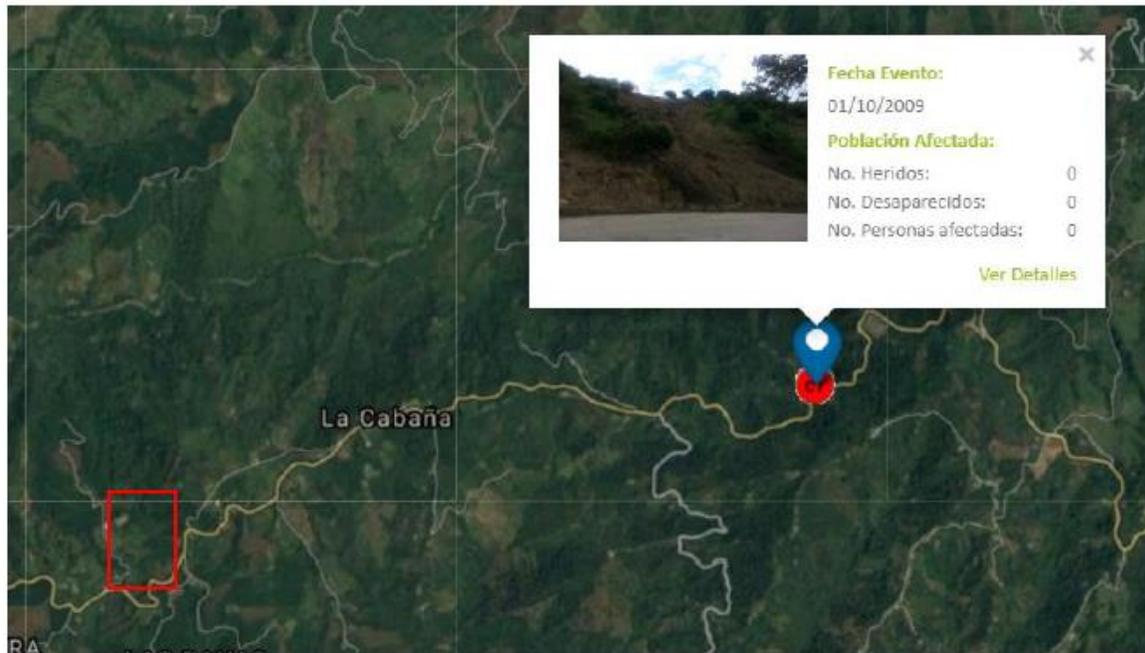
Se registra una caída de roca en la vía desde la Linda hacia tres puertas, fecha del evento 01/10/2009, fecha del reporte 06/07/2013, fecha de diligenciamiento 27/11/2014, tomado de la base de datos SIMMA/SGC el cual fue reportado por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC, nombre del encuestador Luis David Mesa Ríos.

A su vez se registra un flujo de detritos seguido de la caída de rocas, el cual se genera por origen residual, fecha del evento 01/10/2009, fecha del reporte 06/07/2013, fecha de diligenciamiento 27/11/2014, tomado de la base de datos SIMMA/SGC el cual fue reportado por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC, nombre del encuestador Luis David Mesa Ríos, el cual se evidencia en la Figura 1.

Su estado actual es activo, es compuesto, su distribución es en ensanchamiento, su edad varía entre 1 a 5 años. Son varios los factores detonantes registrados; material meteorizado, ausencia de vegetación y lluvias.

El material del cual está compuesto la caída de rocas es principalmente detritos de la unidad conocida como Anfibolitas de Chinchiná, y a suelo residual de las mismas.

Figura 2. Ubicación del movimiento por caída de rocas en la vía hacia tres puertas. El cuadro rojo representa el área de trabajo.



Fuente: Base de datos SIMMA/SGC.

7.1.2. Inventario de procesos morfodinámicos

Dentro de la zona de estudio se identificó un movimiento en masa sobre la estación de policía, en donde bajo el mismo han realizado obras de mitigación de riesgo como anclajes activos (dados), y manejo de aguas superficiales. Hacia el sur del área de trabajo se puede observar un agrietamiento del suelo, que aparentemente se ha generado por erosión pluvial pudiendo generar un carcavamiento a futuro.

Sobre el comando de policía se observó un movimiento en masa aparentemente estable inactivo, de estilo único, distribución retrogresivo, la edad del movimiento es desconocido, el movimiento es de tipo deslizamiento subtipo rotacional como lo muestra la Fotografía 1, en donde se puede

apreciar la zona de escarpe y la zona de depósito, tipo de material tierra, la humedad en las partes altas es baja, y en la zona de depósito la humedad es alta, origen del suelo residual, velocidad del movimiento muy rápido, Las dimensiones de este movimiento corresponden a 15m de ancho por 10m de alto aproximadamente. Causas del movimiento acumulación de lluvias, meteorización física del material.

En las fotografías aéreas tomadas de Google Earth (2006) que fueron analizadas, este movimiento en masa no se había generado.

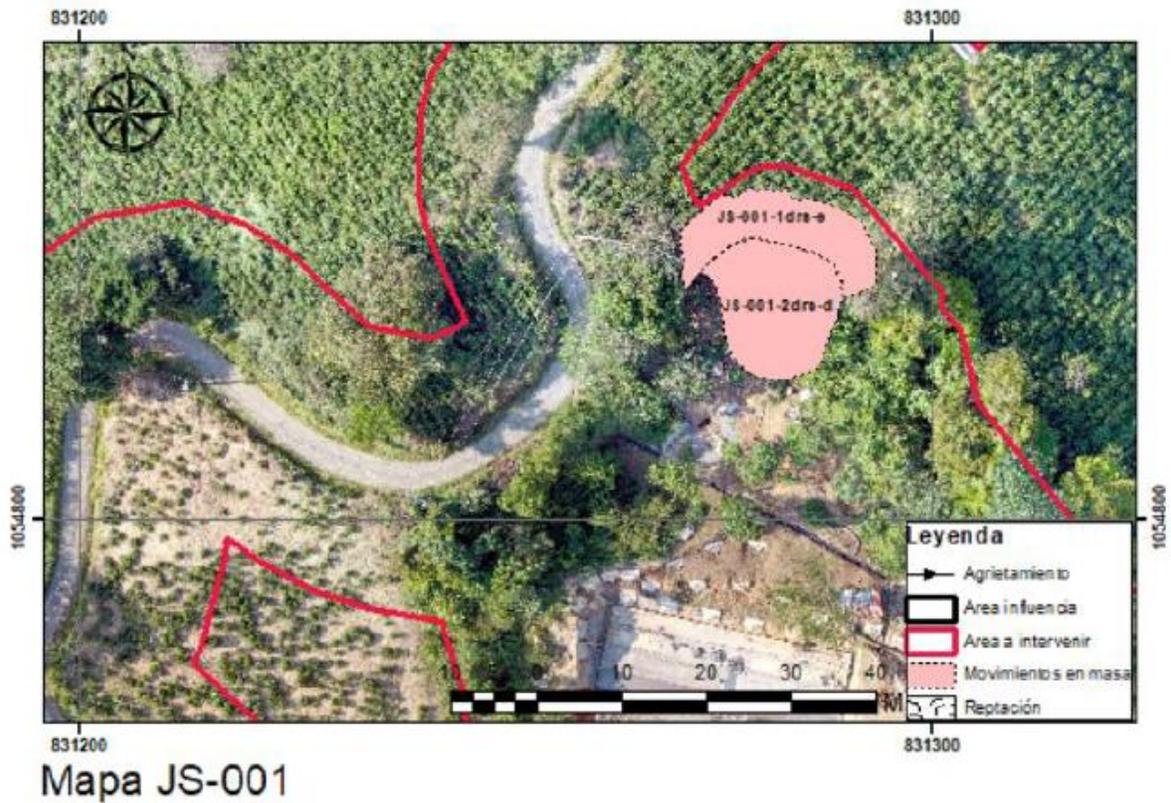
Fotografía 1. Movimiento en masa de tipo deslizamiento subtipo rotacional.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

La erosión que se observó es de carácter superficial, generando pequeños surcos de edad reciente. La cobertura del suelo es principalmente de uso agrícola, en este caso cultivos de café.

Mapa 3. Mapa donde se muestra movimiento en masa JS-001.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

El movimiento en masa identificado fue denominado como JS-001, en el cual se pueden observar la zona de escarpe (e) y la zona de depósito (d), su acrónimo de acuerdo a su tipo y subtipo es drs-e y drs-d como se observa en el Mapa 3.

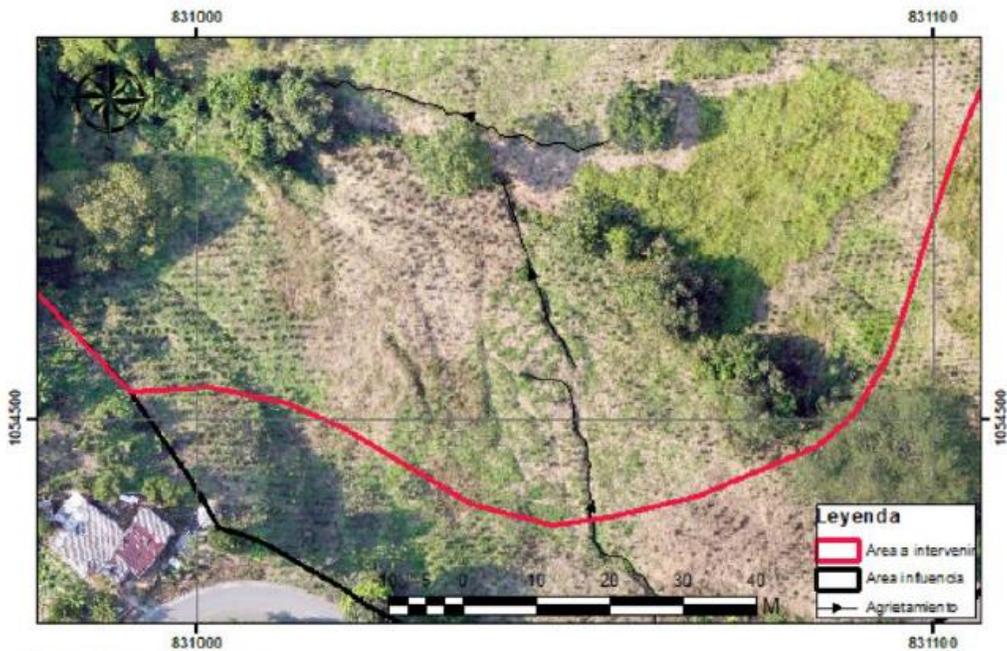
En la Fotografía 2 y en el Mapa 3 se puede ver que hacia el sur de la zona se encuentra un canal que está sufriendo erosión pluvial, al parecer el cual se llena cuando llueve, lo cual a futuro podría generar un movimiento en masa o carcavamiento.

Fotografía 2. Recorte de fotografía aérea en donde se puede observar el agrietamiento del suelo.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Fotografía 3. Mapa en donde se muestra agrietamiento superficial.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Hacia el suroeste del área de interés se observaron dos movimientos en masa de baja magnitud, los cuales se describirían a continuación:

Movimiento en masa en estado inactivo, de estilo único, distribución retrogresivo, la edad del movimiento es desconocido, el movimiento es de tipo deslizamiento subtipo rotacional, en donde se puede apreciar la zona de escarpe (e), pero no la zona de depósito, tipo de material tierra, la humedad media, origen del suelo residual, velocidad del movimiento muy rápido, las dimensiones del movimiento son 5m de ancho x 2m de alto aproximadamente. Causas del movimiento acumulación de lluvias, meteorización física del material, reptación del terreno. El movimiento es llamado JS-002, y su acrónimo drs-e.

Movimiento en masa en estado inactivo, de estilo único, distribución retrogresivo, la edad del movimiento es desconocido, el movimiento es de tipo deslizamiento subtipo rotacional, en donde podemos apreciar la zona de escarpe (e), y la zona de depósito (d), tipo de material tierra, la humedad media, origen del suelo residual, velocidad del movimiento muy rápido, las dimensiones del movimiento en masa son 3.5m de ancho x 2.5m de alto aproximadamente. Causas del movimiento acumulación de lluvias, meteorización física del material. El movimiento es denominado como JS-003, y su acrónimo drs-e y drs-d. Los anteriores movimientos en masa se observan en la Fotografía 3 y en el Mapa 5.

Fotografía 4. Movimientos en masa JS-002 y JS-003.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Mapa 4. Mapa en donde se muestran los movimientos en masa JS-002 y JS-003.



Mapa JS-002 y JS-003

Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

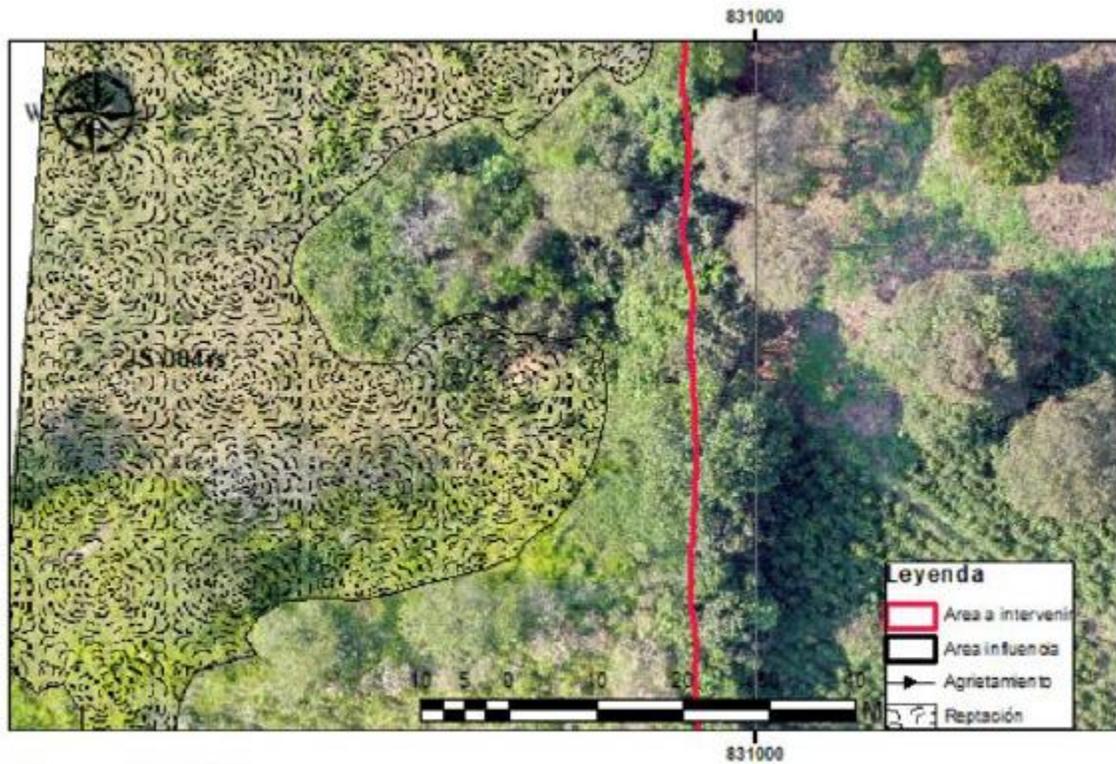
Se observó reptación en el mismo lugar en donde se encuentran los movimientos en masa JS-002 y JS-003, con un área aproximada de 4.300m². Es un movimiento lento en función de la gravedad, en ocasiones acelerado por las huellas del ganado que se forman de manera paralela a las curvas de nivel observado en el mapa 4.

Fotografía 5. Reptación



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Mapa 5. Reptación en la zona de estudio denominada como Js-004.



Mapa JS-004

Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

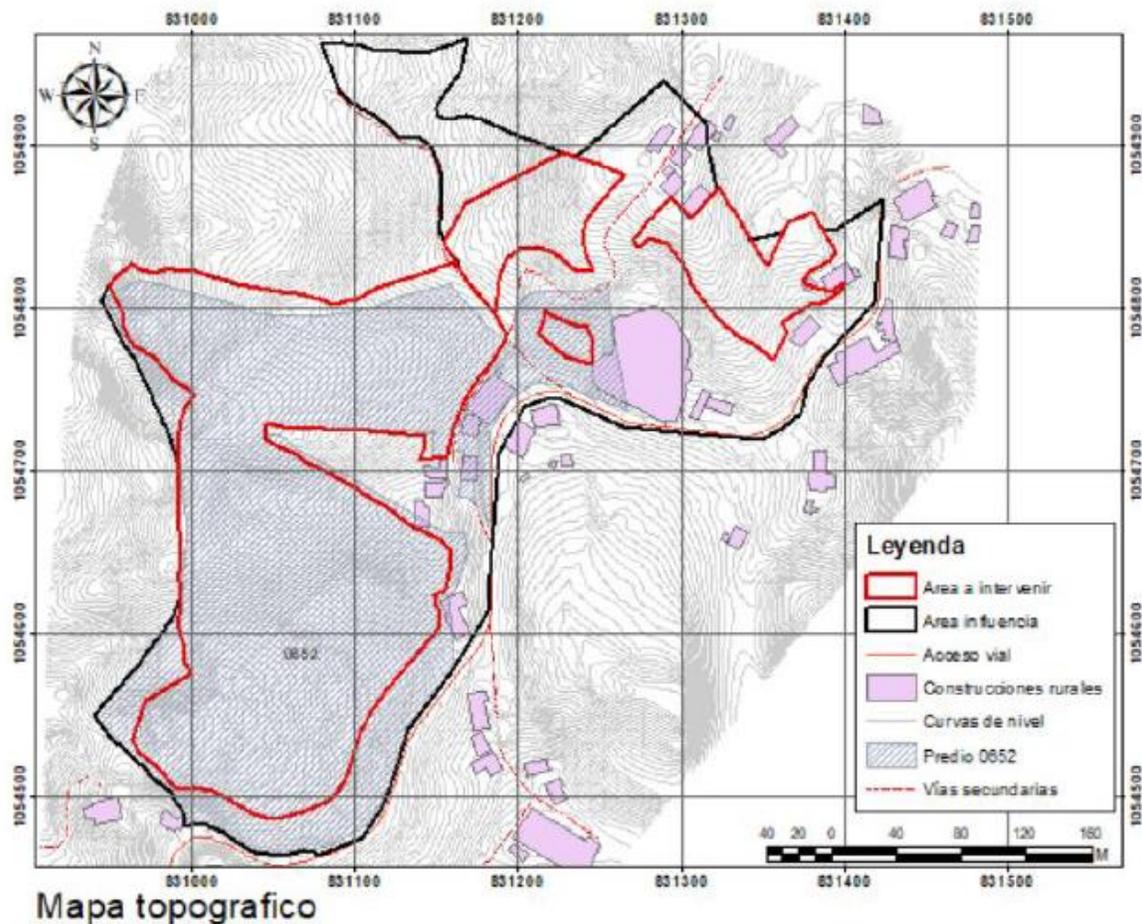
Su edad es desconocida, su estado es activo, es de carácter superficial; fue denominado como JS-004, y su acrónimo es rs como se presenta en el mapa 5.

7.2. Aspectos geológicos, geomorfológicos y morfométricos

7.2.1. Mapa topográfico

En el Mapa 6, mapa topográfico obtenido a través de un sobrevuelo con Drone, se pueden observar las curvas de nivel las cuales son líneas imaginarias que dan altura con respecto al nivel del mar, también se observan las estructuras presentes en la zona y las vías tanto principales como secundarias.

Mapa 6. Mapa topográfico



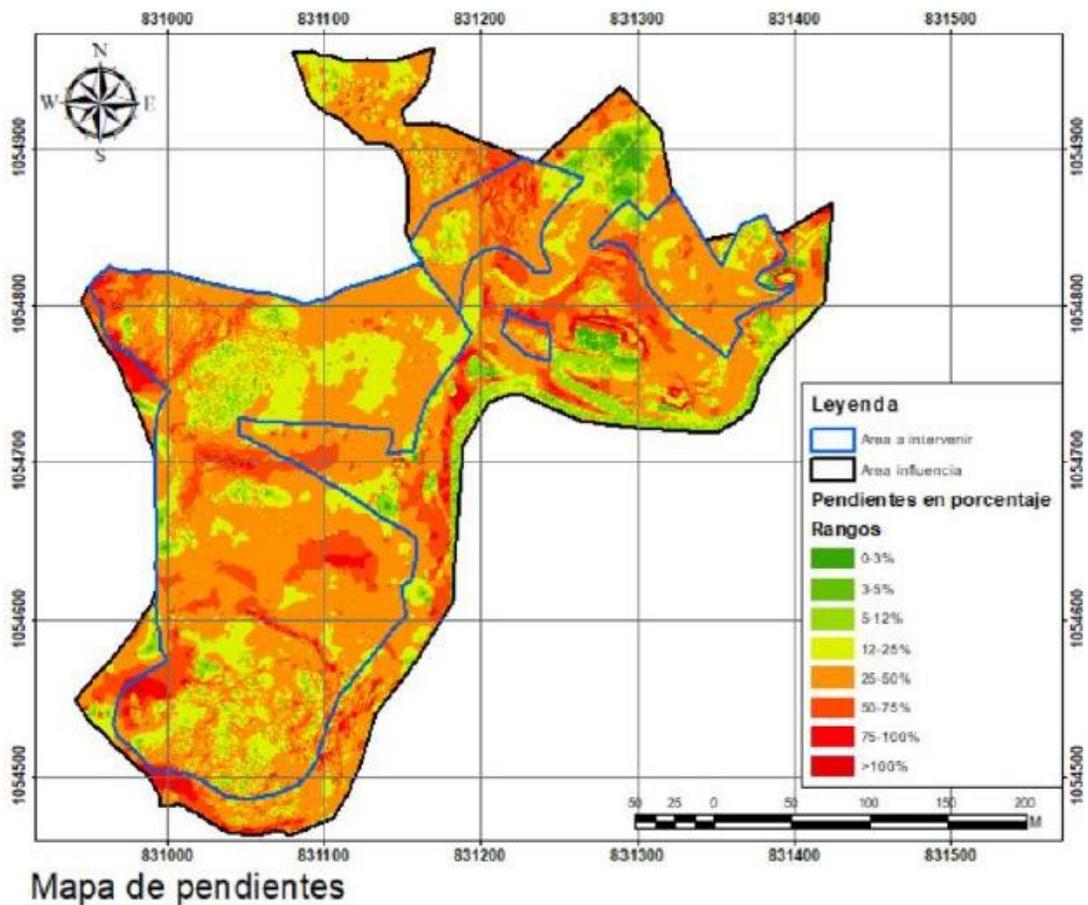
Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

7.2.2. Pendientes

El mapa de pendientes fue obtenido a través de un modelo de elevación, en este caso un DEM. A continuación, se presenta el mapa de pendientes de la zona de estudio.

En el Mapa 7, se puede evidenciar principalmente los siguientes tipos de pendientes: 1) Las resaltadas con color verde amarillento, aquellas con un ángulo de inclinación entre 7° y 14° , 2) Con color naranja, las que tienen un ángulo entre 15° y 27° , y 3) Con color rojo, ángulos entre 28° y 37° . Se encuentran pendientes superiores a 45° , pero en una medida muy baja.

Mapa 7. Pendientes.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

En el polígono de color negro que delimita el área objeto de estudio, se observó que los ángulos predominantes se encuentran entre 15° y 27° de inclinación.

De acuerdo a la Tabla 7, 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 8° y 16°, y 2) abrupto, cuando la inclinación está entre 16° y 35°. Con esto, al realizar un análisis detenido del mapa de pendientes, se concluye que la zona de estudio se encuentra en condiciones de inclinación bajas, con la posible ocurrencia de deslizamientos ocasionales y desarrollo de procesos erosivos.

Tabla 7. Rango 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.

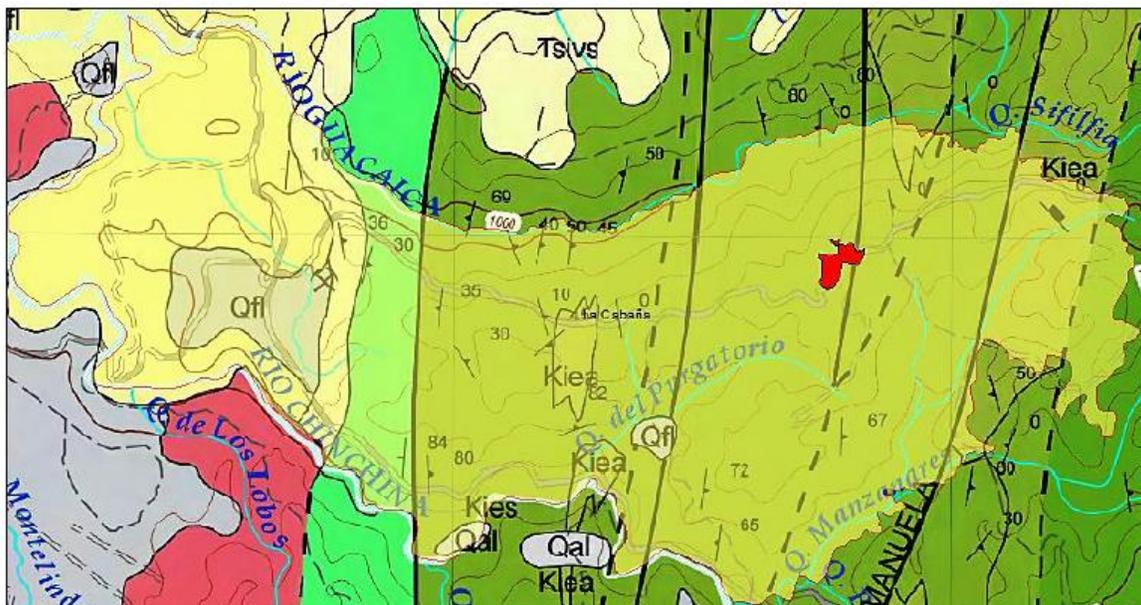
Fuente: Guía metodológica para zonificación de amenaza por movimiento en masa.

7.3. Estudio geológico

7.3.1. Geología regional

Existen afloramientos caracterizados por la presencia de depósitos piroclásticos originados a partir de una corriente de densidad piroclástica, cuya probable área fuente es el volcán Nevado del Ruiz, generado a partir del colapso de una columna eruptiva. Asociado con la actividad tectónica de las fallas que afectan las diferentes unidades litológicas se desarrolló un metamorfismo dinámico de intensidad variable, que afectó las distintas unidades de acuerdo con su composición mineralógica y características texturales. De esta manera se mencionan en orden cronoestratigráfico de la más antigua a la más reciente las siguientes unidades geológicas. (SGC, 2001), la Figura 3 se muestra el mapa de la geología de la zona.

Figura 3. Mapa de la geología de la zona.



Fuente: plancha 205 del SGC, 2001.

- **Anfibolita Saussurítica de Chinchiná (Kach)**

La Anfibolita Saussurítica de Chinchiná aflora en el extremo suroriental de la vereda La Cabaña, al este de Chinchiná, se prolonga hacia el norte hasta un poco al sur de Filadelfia (González, 1996). Los mejores afloramientos se encuentran en las carreteras Manizales – Chinchiná, Manizales – Tres Puertas – Alto de Lisboa y en la quebrada Sifilfia. Las rocas predominantes en esta unidad son de color verde a gris verdoso, masivas, de grano medio a fino, con bandeamiento a veces plegado, producido por segregación metamórfica de minerales claros y oscuros. Aunque no se tienen edades radiométricas en los esquistos y anfibolitas de esta unidad, las edades isotópicas en metamorfitas del Complejo Arquía recopiladas por Maya (1992) indican un evento cretácico el cual se puede relacionar con la edad de estas rocas.

- **Complejo Arquía**

Se define esta unidad en el sentido establecido por Maya & González (1995), para referirse al conjunto de rocas metamórficas de media a alta presión, localmente asociadas con peridotitas serpentinizadas localizadas al occidente del Complejo Quebradagrande y limitadas tectónicamente al este por la Falla Silvia – Pijao y al oeste por la Falla Cauca – Almaguer. Las rocas de este complejo fueron descritas por Mosquera (1978) como Esquistos de Lisboa – Palestina, nomenclatura que se utiliza en este informe tratando la unidad – roca como parte del Complejo Arquía por su posición tectónica y características del metamorfismo.

- **Esquistos de Lisboa – Palestina (Kies, Kiea)**

Esta unidad definida por Mosquera (1978), aflora al este del río Cauca y al oeste de Manizales (SGC, 2001) y sus mejores afloramientos se encuentran en las carreteras La Manuela – Chinchiná, Manizales – Tres Puertas, Quebra de Vélez – Alto de Lisboa y Neira – Irra y en las quebradas Llanogrande y Fonditas. Incluye esquistos cuarzo – sericíticos con grafito (Kies) y esquistos anfibólicos, esquistos cloríticos, anfibolitas y anfibolitas granatíferas; este último conjunto, por su coloración verde característica e íntima asociación, fue cartografiado como una sola asociación (Kiev) y se describe como “esquistos verdes” (SGC, 2001).

- **Esquistos cuarzo-sericíticos con grafito (Kies)**

Corresponden a rocas metamórficas de estructura esquistosa, de color gris oscuro a negro, untuosas al tacto por la presencia de grafito, con abundantes lentes y venas discontinuas de cuarzo lechoso concordantes con la foliación y por lo general intensamente plegado (SGC, 2001).

- **Esquistos verdes (Kiea)**

Esta unidad por su estructura y composición mineralógica, se pueden distinguir los siguientes tipos litológicos: esquistos anfibólicos, esquistos cloríticos y anfibolitas granatíferas; son frecuentes en especial en las rocas esquistosas, pliegues de diferentes tamaños y clases: chevron, cilíndricos, asimétricos y simétricos (SGC, 2001).

- **Formación Nogales (Kn)**

Las rocas sedimentarias que afloran en el flanco occidental de la Cordillera Central al occidente de la Falla Silvia – Pijao, se han correlacionado con la Formación Nogales definida por Nelson (1957) en el Valle del Cauca. Estas rocas en trabajos anteriores (Mosquera, 1978, Calle & González, 1981; Estrada & Viana, informes internos) habían sido consideradas como parte del Complejo Quebradagrande; sin embargo, por su posición tectónica y asociación con rocas basálticas de la Formación Barroso, se prefiere considerarlas como parte de la Formación Nogales. Los mejores afloramientos se encuentran en la carretera Palestina – La Paloma. La unidad está constituida por una serie de cherts, areniscas y conglomerados asociados, y por lo general se encuentran en contacto fallado con rocas basálticas de la Formación Barroso en el área de esta plancha. Entre el Turoniano y Maastrichtiano, edad que estaría de acuerdo con las edades radiométricas obtenidas en las rocas asociadas (Nivia, 1997; en (SGC, 2001)).

- **Grupo Cañasgordas, Formación Barroso (Kvb)**

Las rocas volcánicas básicas que afloran sobre el flanco occidental de la parte septentrional de la Cordillera Occidental han sido agrupadas en la Formación Barroso (Álvarez & González, 1978; Calle & González, 1980) como parte del Grupo Cañasgordas (Álvarez & González, 1978; González, 1997), localizado al occidente de la Falla Cauca – Almaguer. Corresponden a basaltos, diabasas, tobas y aglomerados con algunas intercalaciones de sedimentos silíceos (Klb). En el área cercana al municipio de Chinchiná, la Formación Barroso constituye dos franjas con características litológicas diferentes: una occidental, donde predominan tobas y aglomerados sobre los basaltos y diabasas, con intercalaciones de sedimentos silíceos, y una franja oriental con basaltos y diabasas

donde no se encuentran rocas piroclásticas ni sedimentitas. Las características litológicas de la Formación Barroso, en el área de estudio, indican que la franja oriental es más afín con un vulcanismo generado en una dorsal meso – oceánica mientras que la occidental lo es más con un ambiente de arco de isla (SGC, 2001).

La recopilación de las edades isotópicas en las vulcanitas de esta formación (Maya, 1992) indica que ésta sería del Cretácico Superior, aunque teniendo en cuenta que son edades K/Ar, que el potasio en estas rocas es bajo y la alteración es por metamorfismo, es necesario tener precaución en la interpretación de la edad obtenida, pues ésta podría indicar más bien la edad del metamorfismo, que la de cristalización. Los basaltos de la franja occidental han dado edades $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ de 77 ± 2 y 77 ± 3 Ma (Estrada, 1995) que sugieren una edad del Cretácico tardío para estas rocas; sin embargo, sedimentitas asociadas con rocas volcánicas básicas de la Formación Barroso en la región de Buriticá – Peque, contienen fauna del Aptiano – Albiano hasta el Campaniano (Etayo et al., 1980; Etayo, 1989), lo cual sugiere que la edad del conjunto sea del Cretácico temprano tardío, que se extiende hasta el Cretácico tardío (SGC, 2001).

- **Formación Irra-Tres Puertas (Tsic-Tsivs)**

Se denomina Formación Irra – Tres Puertas al conjunto de conglomerados ricos en rocas verdes, arenas, limos, arcillas y delgadas capas de carbón, a los conglomerados ricos en cuarzo lechoso y chert negro y al conjunto de estratos compuestos por arenas cuarzosas ricas en pómez y conglomerados ricos en pórfidos andesíticos que afloran desde 1,5 km al sur de Irra sobre el río

Cauca y se prolongan continuamente hasta el río Guacaica. También afloran al sur de Tres Puertas sobre la quebrada La Habana donde en gran parte están cubiertos por flujos de escombros (SGC, 2001).

De base a techo, la secuencia se ha subdividido en las siguientes unidades:

- Conglomerados ricos en rocas verdes, areniscas, limolitas y arcillolitas con láminas de carbón.
- Conglomerados ricos en cuarzo lechoso y chert negro.
- Volcano – sedimentitas de composición andesítica.
- **Miembro de conglomerados ricos en rocas verdes, areniscas, limolitas y arcillolitas con láminas finas de carbón (Tsic)**

Conjunto de estratos de origen aluvial que individualmente tienen hasta 2 m de espesor y cuyos mejores afloramientos se encuentran en la carretera Panamericana entre 1 km al sur de la intersección de los ríos Tapias - Tareas y Tres Puertas; además, afloran en las quebradas Honda, Buenavista y Minarrica (SGC, 2001).

Hacia la base está compuesto por conglomerados ricos en cantos de rocas verdes, intercalados con delgados niveles de areniscas gruesas de color pardo. En la parte media y superior, además de los estratos de conglomerados ricos en rocas verdes, aparecen capas de areniscas, a veces con estratificación cruzada, areniscas conglomeráticas, limolitas, arcillolitas azulosas y arcillolitas de color crema con fracturas rellenas por óxidos de hierro. En el tope de la unidad se encuentran láminas finas de color negro, ricas en materia orgánica y que llegan a formar carbones (SGC, 2001).

- **Miembro Volcano- Sedimentario (Tsivs)**

Corresponde a una serie de sedimentos de origen volcánico, de color crema a blanco laminares, ricos en cuarzo, feldespato y fragmentos de pómez, que se intercalan con niveles conglomeráticos ricos en fragmentos de pórfidos andesíticos y, en menor proporción, de rocas verdes; además, incluye tobas de cristales con o sin fragmentos pumíticos y láminas delgadas de sedimentos ricos en materia orgánica (turba). Los mejores afloramientos se encuentran en la Carretera Panamericana entre Irra y el río Tapias, en la quebrada Honda y en la finca El Delirio (SGC, 2001).

Este material se depositó en una cuenca de tracción que se desarrolló al occidente de la Cordillera Central durante el Eoceno – Oligoceno como consecuencia del movimiento lateral derecho a lo largo del Sistema de Fallas Romeral (Estrada, 1995; Sierra et al., 1995). Estas cuencas están limitadas al oeste por las fallas del sistema del Cauca y al este por las del Sistema Romeral.

No existen evidencias paleontológicas, radiométricas o estratigráficas claras que permitan establecer con precisión la edad de la secuencia de la Formación Irra-Tres Puertas, pero al menos la unidad volcano – sedimentaria debe ser posterior a los pórfidos andesíticos, ya que contiene fragmentos de estas rocas y por lo tanto sería post Mioceno tardío – Plioceno temprano.(Dueñas & Castro, 1981) Los niveles de pómez podrían correlacionarse con los encontrados en la Formación Mesa, en el flanco oriental de la Cordillera Central, datados en 3,5 Ma (Van Houten, 1976; en (SGC, 2001)).

- **Depósitos Piroclásticos de La Cabaña**

El depósito piroclástico de La Cabaña aflora al Oeste de Manizales (Departamento de Caldas, Colombia), entre los Ríos Chinchiná y Guacaica en la zona de La Cabaña, Tres Puertas y La Manuela, en un área de aproximadamente 6 Km. La distancia aproximada recorrida por la corriente de densidad piroclástica que lo generó desde la probable fuente, el Volcán Nevado del Ruiz, hasta el Río Cauca (probable límite de la zona de influencia del flujo) es de 50 Km.; esta corriente presentó un alto grado de fluidización y un comportamiento dinámico turbulento de una fase menos densa de la corriente piroclástica, lo cual evitó su confinamiento a lo largo de los valles de los drenajes principales. (Borrero, Parra, & Ospina, 2006).

De acuerdo a las características granulométricas y morfológicas observadas en el Depósito Volcánico de La Cabaña, este se originó a partir de una corriente de densidad piroclástica (pyroclastic density current, según Fisher, 1990, en Wohletz, 1998) de ceniza y pómez que cubrió gran parte de la topografía preexistente a manera de manto, como lo muestran las modelaciones de corrientes de densidad piroclástica (Gladstone et al., 2004), en las cuales las partes más finas de estas corrientes que pueden ser débilmente estratificadas (como los niveles definidos en este trabajo) u homogéneas, siendo menos afectadas por la topografía, y sólo las partes más densas de las mismas son valle-confinadas. En (Borrero, Parra, & Ospina, 2006).

Se encontró que la tendencia de la moda con respecto al factor gamma, promedio ponderado de la dispersión entre la Toba Napolitana Amarilla (Campi Flegrei, Italia) y el depósito piroclástico de La Cabaña son muy similares, lo que induce a pensar en un origen común asociado con una caldera, propuesta que se puede relacionar con los resultados de Londoño & Sudo (2002) donde una

estructura caldérica es predefinida en el volcán Nevado del Ruiz. La creciente acumulación de grandes cantidades de gas en algunas áreas (especialmente alrededor del Cráter Arenas-Volcán Nevado del Ruiz) a profundidades someras puede producir la inestabilidad del sistema volcánico–magmático–hidrotermal y podría disparar erupciones freáticas o freatomagmáticas, similares a las que originaron el depósito piroclástico de La Cabaña. (Borrero, Parra, & Ospina, 2006).

Fotografía 6. Ceniza asociada al depósito de La Cabaña.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

- **Cenizas y flujos de escombros (Qfl)**

La Formación Irra – Tres Puertas se encuentra cubierta localmente por arenas tobáceas, flujos aluviales con niveles arenosos y conglomeráticos y por flujos de escombros, probablemente lahares depositados discordantemente. Las arenas y flujos se caracterizan por el color pardo – amarillo y por su poca consolidación presenta una meteorización que origina canales verticales, por tener niveles conglomeráticos ricos en fragmentos de rocas volcánicas de composición andesítica. Cuando se depositan sobre el miembro volcánico – sedimentario, lo hacen rellenando los ejes de los sinclinales y en este caso la estratificación está inclinada hacia el contacto. Por sus relaciones estratigráficas con la Formación Irra – Tres Puertas y su bajo grado de consolidación, estas unidades han sido asignadas al Cuaternario (SGC, 2001).

- **Depósitos aluviales recientes (Qal)**

Bajo esta denominación se agrupan los sedimentos de relleno de los ríos Cauca, Risaralda, Chinchiná, Mapa, Guacaica y de algunos de los tributarios; además, incluyen algunos depósitos coluviales. Las terrazas y aluviones se caracterizan por su topografía plana; los depósitos asociados con el río Cauca, en la desembocadura del río Chinchiná y quebrada Llano Grande, son de grande extensión y están constituidos por gravas, arenas y limo. (SGC, 2001).

7.3.2. Geología estructural

La Cordillera Central se caracteriza por ser una cadena que ha sufrido intensos plegamientos, fallamientos, levantamientos e intrusiones batolíticas de gran magnitud, haciéndose difícil

dilucidar las relaciones estructurales y estratigráficas entre las distintas unidades de roca. La cordillera está enmarcada dentro de dos sistemas de fallas aproximadamente perpendiculares entre sí; el primer sistema está representado por las fallas de Cauca y Romeral al oeste y la de Palestina al este con direcciones variables entre NNE-SSW y NE-SW que coinciden con las direcciones generales de los sistemas tectónicos de la cadena Andina (Page, 1986). El segundo sistema tiene dirección aproximada NW-SE a E-W y está constituido por la Falla Salento y algunos lineamientos en la zona volcánica Ruiz - Tolima. (SGC, 2001).

Entre el límite oriental de los cabalgamientos (Falla San Jerónimo) y la Falla Silvia-Pijao hay superposición de materiales de ambas cordilleras pudiendo aparecer rocas metamórficas, como ventanas, debajo de las unidades oceánicas donde, además, las distintas unidades de roca se presentan tectonizadas en mayor o menor grado, conformando unidades estructurales separadas, en su mayor parte, por fallas de alto ángulo de dirección y buzamiento variable y por bloques tectónicos. (SGC, 2001).

7.3.2.1.2. Falla de Piedecuesta

La Falla de Piedecuesta, definida al norte de la plancha por Grosse (1926), pone en contacto en esta área las rocas ultramáficas de Filadelfia con los Esquistos de Lisboa – Palestina del Complejo Arquía y con los sedimentos cenozoicos de la Formación Irra – Tres Puertas. Cerca del municipio de Riosucio (Calle & González, 1982), a lo largo de la traza de esta falla se encuentran serpentinitas que cabalgan sobre las rocas de la Formación Combia; igualmente, en el Alto de Lisboa se observan rocas metamórficas del Complejo Arquía que cabalgan sobre rocas del Terciario. La traza de esta estructura es continua desde el sur de Chinchiná hasta el río Arma, donde se une a la Falla Cauca – Almaguer. (SGC, 2001).

7.3.2.1.3. Falla La Merced

Corresponde a una estructura de dirección N-S que se desprende de la Falla Silvia – Pijao en el borde occidental de la Plancha 187 - Salamina (González, 1980) y en esta plancha pone en contacto rocas metamórficas del Complejo Arquía con cuerpos de rocas máficas y ultramáficas. Al norte corta el cuerpo de Rocas Ultramáficas de Filadelfia y pone en contacto este cuerpo con los Esquistos de Lisboa – Palestina y hacia el sur hace parte de un sistema anastomosado como el de la Falla de Romeral y presenta a lo largo de su traza silletas alineadas y una alta inestabilidad. Al norte es una falla vertical, mientras que al sur buza entre 55 y 70° al W y tiene un posible desplazamiento sinistral, si se considera que las serpentinitas al oeste de La Merced pertenecen al cuerpo de Filadelfia (Mejía et al., 1988).

7.3.3. Geología local

7.3.3.1. Esquistos de Lisboa – Palestina

Esta unidad definida por Mosquera (1978), aflora en la parte occidental de la plancha, al este del río Cauca y al oeste de Manizales (Plancha 206) y sus mejores afloramientos se encuentran en las carreteras La Manuela – Chinchiná, Manizales – Tres Puertas, Quebra de Vélez – Alto de Lisboa y Neira – Irra y en las quebradas Llanogrande y Fonditas. Incluye esquistos cuarzo – sericíticos con grafito (Kies) y esquistos anfibólicos, esquistos cloríticos, anfibolitas y anfibolitas granatíferas; este último conjunto, por su coloración verde característica e íntima asociación, fue cartografiado como una sola asociación (Kiev) y se describe como “esquistos verdes”. (SGC, 2001).

7.3.3.2. Esquistos cuarzo-sericítico con grafito (Kies)

La textura predominante es heteroblástica a lepidoblástica, a veces bandeada por segregación metamórfica, con capas ricas en cuarzo granoblástico separadas por láminas finas de mica blanca y grafito. El cuarzo (50 – 70%) es granoblástico con bordes suturados; la mica blanca (10 – 40%) corresponde a sericita en los esquistos de más bajo grado y moscovita en los de mayor grado; grafito en láminas finas se asocia, por lo general, a las micas. Como minerales metamórficos diagnóstico se encuentran localmente cloritoide (0-14%), granate (0-21%) y cordierita (0-8%). El cloritoide aparece en cristales alargados paralelos a la población, definida por la orientación paralela a subparalela de láminas de mica. La cordierita en microporfidoblastos defleca la foliación y el granate aparece en porfidoblastos fracturados con bordes corroídos (SGC, 2001).

7.3.3.3. Esquistos anfibólicos

Son las rocas predominantes dentro del conjunto de esquistos verdes; macroscópicamente son rocas de esquistosidad fina persistente, que muestran por lo general un intenso plegamiento. La textura es cristaloblástica de grano grueso, nematoblástica con foliación definida por la orientación de cristales de anfíbol, con un débil bandeamiento composicional definido por la variación en la proporción relativa entre anfíbol y plagioclasa.

7.3.3.4. Esquistos cloríticos

Estas rocas son relativamente menos abundantes que los otros tipos de metamorfitas que constituyen la unidad de esquistos verdes. Se caracterizan por presentar una esquistosidad fina y una coloración verde manzana, debido a la abundancia de clorita a lo largo de los planos de foliación y no contiene anfíboles.

7.3.3.5. Anfibolitas

Son rocas de color verde grisáceo a verde oscuro, de grano fino a grueso, con foliación bien definida en las de grano fino y es masiva o presenta bandeamiento composicional en las de grano grueso. La textura predominante es granoblástica a nematoblástica y está constituida por hornblenda actinolítica (40-60%), plagioclasa (20-30%) de composición albita y por epidota – clinozoisita (25-30%) en granos entre cristales de anfíbol.

La litología en la zona de estudio fue levantada por medio de la campaña de campo realizada, teniendo en cuenta la descripción hecha por cada estrato de suelo encontrado, el cual se define de

manera más detallada en la estratigrafía de esta zona, mediante la descripción específica de sus propiedades físicas, y realizando una comparación con la bibliografía consultada.

7.3.4. Geología estructural local

7.3.4.1. Falla de Piedecuesta

La Falla de Piedecuesta, definida al norte de la plancha por Grosse (1926), pone en contacto en esta área las rocas ultramáficas de Filadelfia con los Esquistos de Lisboa – Palestina del Complejo Arquía y con los sedimentos cenozoicos de la Formación Irra – Tres Puertas.

En los límites de la plancha con la Plancha 186 - Riosucio (Calle & González, 1982), a lo largo de la traza de esta falla se encuentran serpentinitas que cabalgan sobre las rocas de la Formación Combia; igualmente, en el Alto de Lisboa se observan rocas metamórficas del Complejo Arquía que cabalgan sobre rocas del Terciario. La traza de esta estructura es continua desde el sur de Chinchiná hasta el río Arma, donde se une a la Falla Cauca – Almaguer. (SGC, 2001).

7.3.4.2. Falla La Manuela

La Falla de La Manuela, probable prolongación hacia el sur de esta falla, es subvertical y presenta una zona de cizalladura de 100 – 150 m de amplitud. El cuerpo de Rocas Ultramáficas de Filadelfia presenta un fracturamiento caótico a lo largo de la Falla de La Merced, sin una dirección preferencial y localmente desarrolla una foliación intensa con desarrollo de poliedros de cizalladura; esta foliación tiene dirección predominante N15°E/30°E. (SGC, 2001).

Estratigrafía

En la zona de estudio se logra diferenciar y caracterizar un perfil de suelo asociado a los Esquistos de Lisboa – Palestina pertenecientes al Complejo Arquía; a partir de las observaciones realizadas en campo mediante la toma de puntos con GPS a través del aplicativo “Oruxmaps”; además, se realiza la toma de diferentes muestras y fotografías de los afloramientos analizados, los cuales son representativos para cada unidad del perfil de suelo encontrado; cuyas características se describen de base a techo de la siguiente manera:

7.3.4.3. Capa 1: Capa de suelo orgánico

Compuesto principalmente por suelo orgánico de coloración café oscuro a negro, como se observa en la Fotografía 9, de textura limo-arenosa el cual se encuentra en algunas zonas alternada con material de ceniza volcánica. Suelo variaba de seco a húmedo de acuerdo a la cercanía con los cultivos encontrados.

Fotografía 7. Capa de suelo orgánico.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

7.3.4.4. Capa 2: Ceniza volcánica

Estrato limo-arenoso de ceniza volcánica de color gris claro, el cual presenta un tamaño de grano fino, esto no permite reconocer fácilmente los minerales que presenta, observado en la Fotografía 10. Es un estrato seco sin plasticidad ni compacidad. Se logra diferenciar principalmente dos estratos en el área de estudio que poseen diferentes características de acuerdo a su composición mineralógica y su textura, los cuales se explicaran a continuación:

Fotografía 8. Ceniza volcánica



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

7.3.4.4.1. Capa No. 2.1

A medida que se avanza en profundidad, es común en todos los sondeos que se encuentre un estrato que corresponde a un limo color pardo amarilloso, de humedad baja, plasticidad alta y resistencia media a alta que es correlacionable con los depósitos de caída piroclástica.

En 1997, Aguirre y Dunoyer realizaron una publicación donde se discriminan los depósitos de caída piroclástica según sus características texturales y demás, se establecieron tres sets: I, II y III. Con base en las descripciones realizadas se considera que el set que más se asemeja a lo encontrado en el sector es el Set II, del cual se define una subdivisión en Set IIA y IIB.

El Set IIA consiste en una serie de niveles de ceniza media a fina de colores pardos con presencia ocasional de pómez y se correlaciona con el segundo estrato encontrado en el sitio de interés.

7.3.4.4.2. Capa No. 2.2

El segundo estrato también corresponde a un limo, pero con mayor tamaño de partículas arenosas, de color grisáceo humedad media a baja y resistencia media a alta. Se puede correlacionar con el Set III definido por Aguirre y Dunoyer (1997): ya que corresponde a los depósitos más antiguos (entre los 31170 +/- 980 años y 39000 años), se caracteriza por presentar potentes capas de ceniza fina, de color abano a grisáceo con alto contenido de humedad, lo cual es correspondiente con que se tengan partículas más arenosas inmersas en un estrato de características muy similares al inmediatamente suprayacente y de color gris.

7.3.4.5. Capa 3: Saprolito sin estructura

En la Fotografía 11 se puede observar una capa limo – arcillosa de color amarillo – naranja que corresponde a saprolito sin estructura; se caracteriza por presentar líticos volcánicos y minerales de moscovita de tamaño fino a muy fino; en algunas zonas presenta clastos de cuarzo cuyo tamaño varía de fino a guijo con formas desde subangulares a subredondeadas. La humedad en esta capa es variable, ya que en las zonas más altas topográficamente presenta un bajo o nulo grado de humedad, no posee plasticidad ni compacidad mientras que en las zonas más bajas la humedad natural era un poco más alta, más plástica y más compacta.

Fotografía 9. Suelo de color amarillo-naranja y suelo rojizo.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

7.3.4.6. Capa 4: Saprolito

De coloración pardo - rojiza y en algunas zonas se encontraba “mezclado” con la capa limo – arcillosa de color amarillo – naranja. Su tamaño de grano es muy fino, en algunas zonas se encuentran clastos de rocas metamórficas (esquistos) moderadamente meteorizadas, las cuales aún permiten ver su foliación como se observa en la Fotografía 12; además de esto, se puede apreciar clastos de minerales como cuarzo y moscovita. La humedad varía en las zonas más altas topográficamente presenta un bajo grado de humedad, por lo tanto, una baja plasticidad y compacidad, mientras que en las zonas más bajas la humedad natural era media, mediamente

plástico y compacto. Al ser la base del perfil de suelo encontrado se logra aproximar su espesor a 20 cm ya que en algunas zonas se encontraba cubierto.

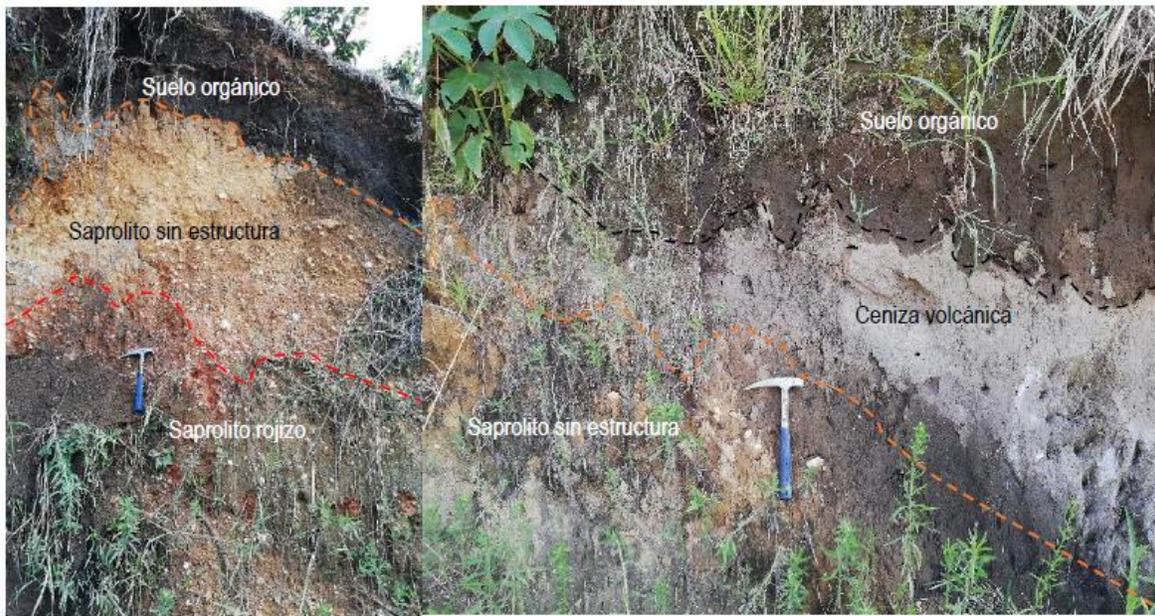
Fotografía 10. Izq. Saprolito con líticos de cuarzo. Der. Lítico de roca metamórfica.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

En la Fotografía 13 se pueden observar algunas columnas estratigráficas observadas en el área de estudio.

Fotografía 11. Ejemplo de los estratos encontrados en el área de estudio.



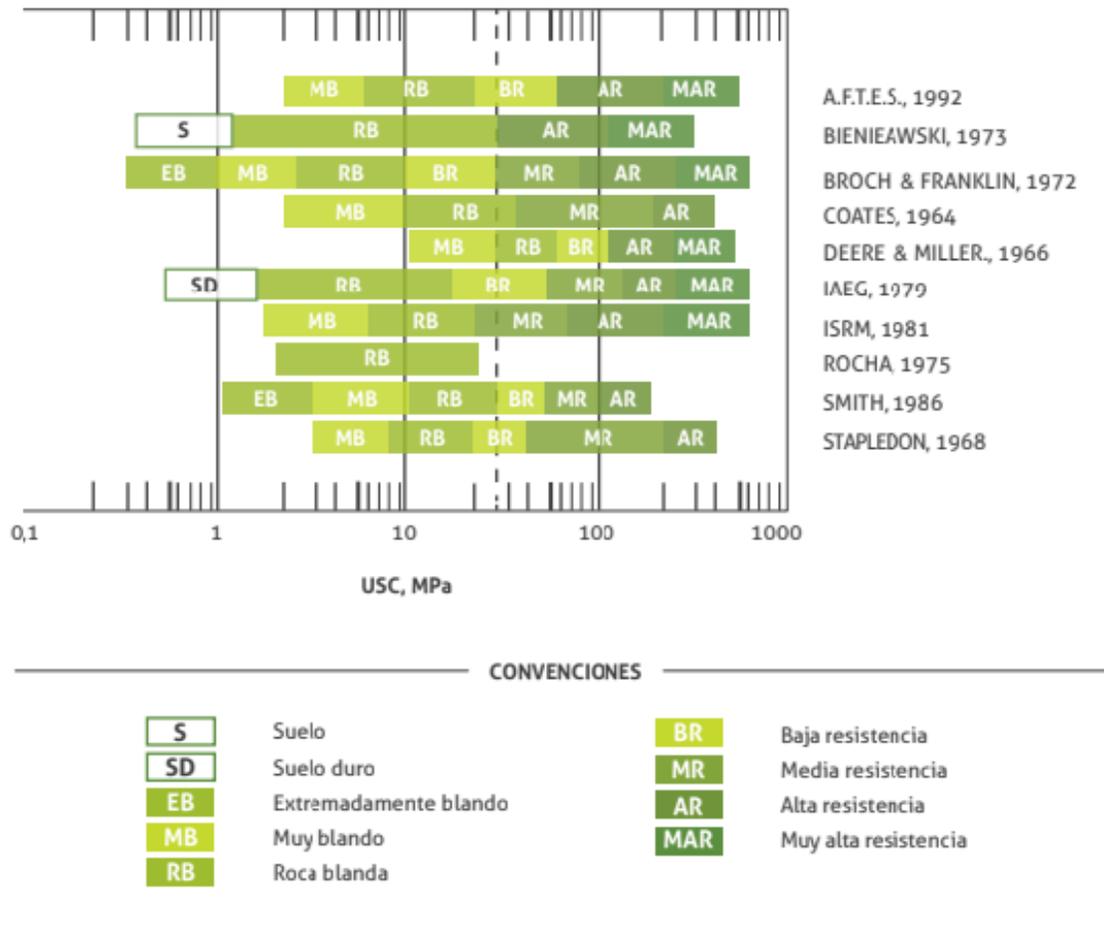
Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

7.3.5. Unidades geológicas superficiales

El material que se encuentra en la zona de estudio corresponde a suelos muy blandos de acuerdo a la clasificación dada por la guía metodológica para zonificación de amenaza por movimiento en masa, en la Tabla 2 clasificación de rocas de acuerdo con su resistencia.

Las unidades geológicas superficiales (UGS) encontradas son tres: La primera capa de suelo corresponde a ceniza de tamaño fino, de color pardo claro; la segunda capa de cenizas con presencia de lapilli en donde sus fragmentos se encuentran bien redondeados y el tamaño de los granos varía de 3 mm, el color predominante es pardo oscuro a grisáceo; la tercera capa corresponde a suelo residual del Complejo Arquía, su granulometría regida por limos de color naranja amarillento.

Tabla 8. Clasificación de rocas de acuerdo con su resistencia.



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

Siguiendo los lineamientos de la Tabla 8, unidades geológicas superficiales (UGS) según su origen, se obtuvo la siguiente clasificación para cada capa:

- Primera capa:
 - Tipo de material: suelo
 - Origen de la UGS: suelo transportado depósitos volcanoclásticos primarios y secundarios

- Tipo de UGS: flujos piroclásticos y lahares con contenido de ceniza y lapilli
- Segunda capa:
 - Tipo de material: suelo
 - Origen de la UGS: suelo transportado depósitos volcanoclásticos primarios y secundarios
 - Tipo de UGS: flujos piroclásticos y lahares
- Tercera capa:
 - Tipo de material: suelo
 - Origen de la UGS: derivado de roca in situ
 - Tipo de UGS: suelo residual horizonte V (Saprolito fino).

Tabla 9. Unidades geológicas superficiales (UGS) según su origen.

TIPO DE MATERIAL	ORIGEN DE LA UGS	TIPO DE UGS
Roca	Roca inalterada	<ul style="list-style-type: none"> Roca dura (Calidad de macizo buena y muy buena) Roca intermedia (Calidad de macizo regular) Roca blanda (Calidad de macizo mala y muy mala)
	Derivadas de roca in situ	<ul style="list-style-type: none"> Suelo residual: Horizontes IV (saprolito grueso), V (saprolito fino) y VI.
Suelo	Depósitos volcanoclásticos primarios	<ul style="list-style-type: none"> Flujos piroclásticos (Ignimbrita), oleada piroclástica, caldas piroclásticas (bombas, bloques y ceniza).
	Depósitos volcanoclásticos secundarios	<ul style="list-style-type: none"> Lahar, avalancha de escombros
	Depósitos aluviales	<ul style="list-style-type: none"> Aluviones recientes y de cauce activo Llanura aluvial Abanicos o conos aluviales Terrazas aluviales Depósitos fluviotorrenciales
	Depósitos lacustres y paludales	<ul style="list-style-type: none"> Suelos fluviolacustre Suelos paludales
	Depósitos costeros	<ul style="list-style-type: none"> Deltas, Barras, Playas, etc.
	Depósitos eólicos	<ul style="list-style-type: none"> Dunas y Médanos Loess
	Depósitos glaciares	<ul style="list-style-type: none"> Morrenas y Tillitas Suelos Fluvioglaciares
	Depósitos de gravedad y ladera	<ul style="list-style-type: none"> Coluvial Talus, derrubios de pendiente Flujos (de lodo, tierra y de escombros)
	Depósitos antrópicos	<ul style="list-style-type: none"> Llenos de basuras Llenos de escombros Llenos mixtos
	Suelo transportado	

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

A continuación, se presentan cuatro cuadros con 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, comprensión inconfiada, cortes directos, clasificación del suelo, entre otros.

7.3.5.1. Capa número 1: materia orgánica:

ENSAYO	VALOR PROMEDIO
Clasificación	OL
Humedad	63,3 %
Limite liquido	49,1%
Limite plástico	41,3 %
Índice de plasticidad	7,8 %
Peso unitario húmedo	1,47 ton/m ³
Peso unitario seco	0,9 ton/m ³
Compresión inconfiada	5 ton/m ²
Cohesión	5 ton/m ²
Angulo de fricción	17 °

7.3.5.2. Capa número 2: flujos piroclásticos y lahares con contenido de ceniza y lapilli:

ENSAYO	VALOR PROMEDIO
Clasificación	MH
Humedad	56,57 %
Limite liquido	54,30 %
Limite plástico	36,58 %
Índice de plasticidad	17,73 %
Peso unitario húmedo	1,59 ton/m ³
Peso unitario seco	1,02 ton/m ³
Compresión inconfiada	5,8 ton/m ²
Cohesión	4,53 ton/m ²
Angulo de fricción	24 °

7.3.5.3. Capa número 3: flujos piroclásticos y lahares:

ENSAYO	VALOR PROMEDIO
Clasificación	ML
Humedad	68,5 %

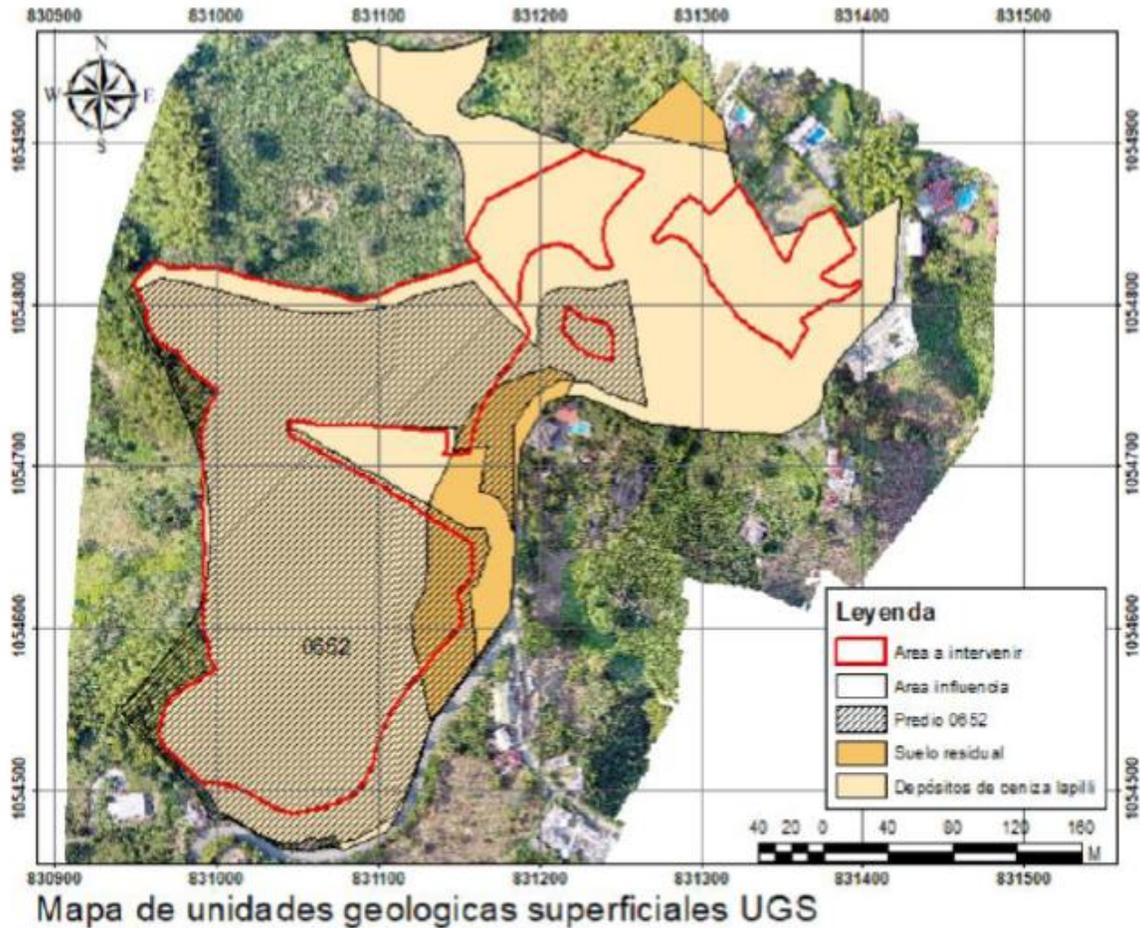
ENSAYO	VALOR PROMEDIO
Limite liquido	49,70 %
Limite plástico	34,8 %
Índice de plasticidad	14,90 %
Peso unitario húmedo	1,54 ton/m ³
Peso unitario seco	0,93 ton/m ³
Compresión inconfiada	4,90 ton/m ²
Cohesión	2,80 ton/m ²
Angulo de fricción	28 °

7.3.5.4. Capa número 4: suelo residual horizonte (Saprolito fino):

ENSAYO	VALOR PROMEDIO
Clasificación	ML (SM)
Humedad	59,33 %
Limite liquido	39,24%
Limite plástico	43,35 %
Índice de plasticidad	10,40 %
Peso unitario húmedo	1,79 ton/m ³
Peso unitario seco	1,30 ton/m ³
Compresión inconfiada	5,62 ton/m ²
Cohesión	3,8 ton/m ²
Angulo de fricción	30 °

En el Mapa 8, se observan tres unidades: 1) unidad de depósitos piroclásticos y lahares con presencia de ceniza y lapilli, 2) unidad de depósitos piroclásticos y lahares con presencia de ceniza y 3) suelo residual del Complejo Arquía.

Mapa 8. Mapa de unidades geológicas superficiales.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

7.4. Geomorfología y morfometría

La morfometría hace referencia al análisis cuantitativo de la superficie del terreno en términos de medidas de longitud, área, forma y pendiente. La morfometría se enfoca 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 y rugosidad del relieve, 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.

7.4.1. Mapa de subunidades geomorfológicas

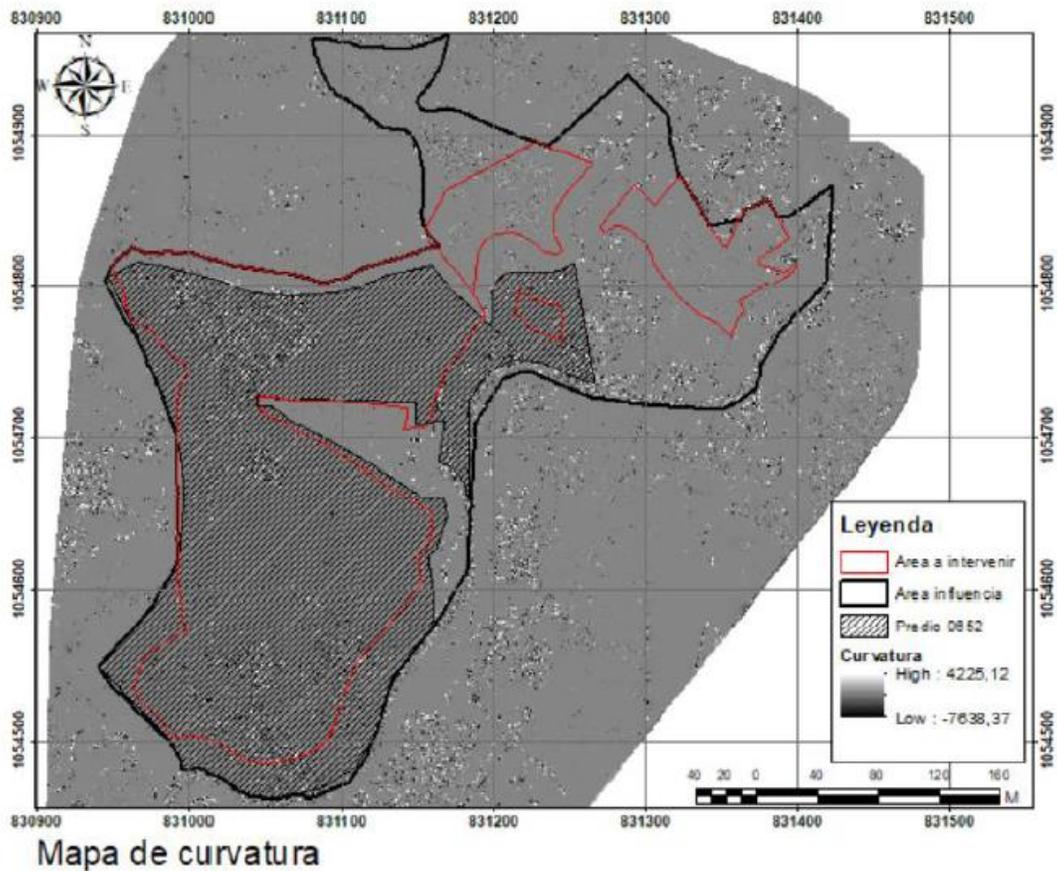
Los mapas de subunidades geomorfológicas se enfocan en cuatro aspectos principales los cuales son: un mapa de pendientes, un mapa de curvatura, las subunidades indicativas de procesos de tipo flujo o caída y rasgos geomorfológicos indicativos de inestabilidad.

7.4.2. Curvatura

La curvatura es un parámetro que indica la concavidad o convexidad de las superficies a estudiar, y a la hora de realizar un análisis de estabilidad o zonificación por movimientos en masa es una herramienta realmente práctica. Mediante ella se puede determinar si una ladera presenta una tendencia a la acumulación de agua o no, lo que podría ser un detonante a la hora de generar movimientos en masa.

En el Mapa 9 se presenta el mapa de curvatura para el área de estudio, los valores arrojados por el mapa de curvatura muestran un rango entre: 4.225 y -7.638, aclarando que los valores positivos representan el grado de convexidad y los valores negativos el grado de concavidad.

Mapa 9. Mapa de curvatura.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Explicando esto, dentro del polígono que demarca la zona de estudio, en dirección sur y oeste se encuentran dos zonas con alta concavidad, lo que podría indicar acumulación de aguas; además, de acuerdo a las fotografías aéreas estas áreas presentan procesos erosivos los cuales se encuentran detonados por agua.

7.4.3. Componentes geomorfológicos indicativos de procesos de flujo de caída

Dentro de los componentes geomorfológicos se deben tener claro ciertos parámetros para su clasificación de acuerdo con la Tabla 10, por tal razón es importante definir en primer lugar el ambiente geomorfológico al que pertenece la geoforma asociada, en segundo lugar, la unidad o subunidad geomorfológica, teniendo en cuenta que las unidades o subunidades geomorfológicas dependerán de dicho ambiente.

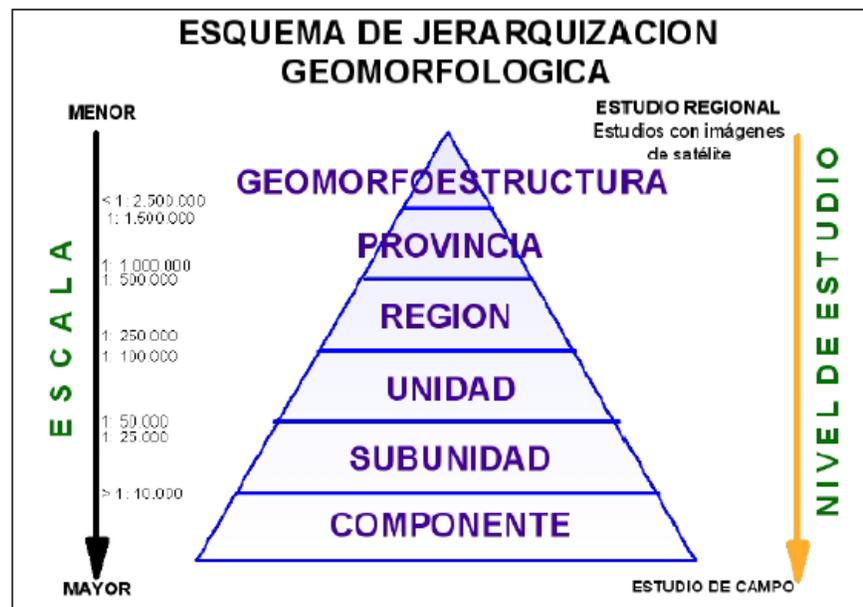
Tabla 10. Características de unidades geomorfológicas.

GEOMORFO ESTRUCTURA	PROVINCIA GEOMORFO LOGICA	REGION GEOMORFO LOGICA	UNIDAD GEOMORFO LOGICA	SUBUNIDAD GEOMORFO LOGICA	COMPONENTE GEOMORFO LOGICO
SISTEMA MONTAÑOSO CRATONICO DE LA GUYANA SISTEMA OROGENICO ANDINO SISTEMA OROGENICO COSTERO Y MARGENES CONTINENTALES	PENPLANICIE DE LA ORINOQUIA PENPLANICIE DE LA AMAZONIA	Ambiente. Estructural Sierras estructurales de Bogotá	Espínazo Cuesta Meseta Volcán de todo S. Hemoclinal	Ladera estructural Flancos Loma d presión Cocaina estructural	Escarpe estructural Escarpe de falla Sag ponds
		Ambiente Volcánico Sierra volcánica	Cráter Cono volcánico Flujo de lava Campo cetriza	Cráter con lago Túnel de lava Tap volcánico Ladera volcán	Borde de cráter Cuello Volcánico Ladera int. Cráter Cono paráuto
	CINTURON MONTAÑOSO DE SAN JACINTO CINTURON MONTAÑOSO DEL SINU	Ambiente Denudacional Sierra denudacional	Glacis Destriamiento Inselberg Cerro residual	Glacis erosión Cono delirizam Talus escombros Ladra denudada	Barranco Escarpe delirizam Terraceta surcos
		Ambiente Fluvial Llanura aluvial Del Magdalena	P. inundación Delta liguinar Terraza fluvial Abanico fluvial	Basines Albardones Delta d desborde Meandro	Orillares Escarpe terrazas Banco fluvial Cauce de río
		Ambiente Marino Llanura costera Caribe	Terraza marina Isla barrera Espign Playon	Plataforma Abr Playa Duna costera P. intermareal	Acanalado Cresta de playa Píniculo
	CORDILLERA OCCIDENTAL VALLE INTERCIBELERANO DEL MAGDALENA PLATAFORMA CONTINENTAL CARIBE	Ambiente Glacial Sierra Glaciada	Morrenas Valle glacial Karus	Morrena Lat. Drumlin Artes glaciaria Ladera glaciada	Circo glacial Esker Bloque errático Entia glaciaria
		Ambiente. Eólico Pínicos desérticas	C. de Dunas D. pedregoso Pl. de deflación Salar	Nebliha Yardangs Hoyo deflación Wadis	Sutco deflación Valle interdunar Tafóni Hoyo deflación
		Ambiente. Karstico Sierras Karsticas	Pojje Torre kárstica Uvalas Valle despizoma	Dolias Posoz Cerro pepino Fondo pl pojje	Lad. caída Kart Puente Nral Entrada Caverna Depresión Kartica
		Ambiente. Antropogénico Pianos Antropicos*	C. basura C. escombros Embalses Terraza agrícola	Flancos Cantera Presa industrial Minas	Canales Espolones Roupeolas Banca caminos

Fuente: Van Zuidam, 1986 y Carrillo, 1995.

Debido a que la escala de trabajo empleada en este estudio es detallada, se requiere hacer la jerarquización geomorfológica con la finalidad de homogenizar las unidades encontradas, en la cual el máximo nivel de detalle es el elemento geomorfológico concepto definido por los rasgos del relieve, la morfometría detallada del terreno y los micro relieves asociados con unas características litológicas del estudio, permitiendo el análisis de la evolución geomorfológica y geológica de la misma (Carvajal, 2011).

Figura 5. Esquema de jerarquización geomorfológica.



Fuente: Tomado de Propuesta de Estandarización para la Cartografía Geomorfológica. (Carvajal, 2011).

A continuación, se describe el proceso de jerarquización geomorfológica presentado en la Figura 5 y que es empleado en este estudio, sus descripciones y los resultados obtenidos en cada uno de ellos:

Geomorfoestructura: Son grandes áreas geográficas o amplios espacios continentales o intra continentales caracterizados y definidos por estructuras geológicas y topográficas regionales que han sufrido deformaciones y posiblemente metamorfismo o intrusión ígnea. (Carvajal, 2011).

Teniendo en cuenta la anterior definición y que la escala empleada para definir una Geomorfoestructura es mayor a 1:2.500.00, se establece que el municipio de Manizales se encuentra en la geomorfoestructura del Sistema Orogénico Andino.

Provincia Geomorfológica: Se toma como base sus características geológicas, morfológicas y geográficas, están establecidas para escalas entre 1:1.000.000 – 1.500.000. (Carvajal, 2011).

El área de estudio se encuentra en la provincia geomorfológica de la cadena montañosa de los Andes, específicamente en la Cordillera Central.

Región Geomorfológica: El nombre propuesto para las regiones geomorfológicas está definido por un término morfológico de meso relieve, asociado con el nombre del ambiente morfogenético correspondiente.

Teniendo en cuenta que la provincia geomorfológica del área de estudio es la Cordillera Central, se toma el nombre morfológico de sierra, ya que es la subdivisión correspondiente a Cordillera.

El ambiente morfogenético hace alusión a las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas bajo las cuales se generaron las geoformas. Se determina con base en la interpretación de los procesos geomorfológicos registrados (origen tanto endógeno como exógeno), que dieron lugar a la formación, evolución y modificación de las mismas. (Carvajal, 2011).

A partir de las observaciones hechas en la fase de campo, las fotografías tomadas y las características topográficas encontradas durante la recopilación bibliográfica, además del uso de la plataforma Google Earth, esta información permite interpretar el ambiente correspondiente en el área de trabajo, así:

Ambiente denudacional (D): Determinado por la actividad de los procesos erosivos hídricos y pluviales, y principalmente producto de procesos de meteorización, erosión y remoción en masa, sobre geoformas pre existentes. (Carvajal, 2011).

Al tener el término morfológico definido como sierra y el ambiente morfogenético como denudacional es posible realizar la clasificación de la región geomorfológica como una sierra denudacional.

Unidad Geomorfológica: Es la unidad básica de la cartografía geomorfológica. Está determinada con criterios genéticos, morfológicos y geométricos en función de la escala de trabajo propuesta de 1: 50.000 a 1:100.000. (Carvajal, 2011).

Al emplear una escala de trabajo más detallada es posible clasificar la unidad geomorfológica, cuyo proceso geomórfico asociado es la erosión, típico de un ambiente denudacional; además, se tiene en cuenta su geoforma la cual se pudo fotointerpretar con ayuda del software Google Earth permitiendo clasificar la unidad geomorfológica como una colina denudacional.

Subunidad Geomorfológica: Es una subdivisión de las unidades geomorfológicas; está determinada fundamentalmente por los contrastes morfológicos y morfométricos, que relacionan

el tipo de material o la disposición estructural de los mismos, con la correspondiente topografía del terreno. La escala de trabajo está definida entre 1: 10.000 y 1: 25.000. (Carvajal, 2011).

Dado el rango de escala empleado, los contrastes morfológicos y morfométricos, además que el tipo de material encontrado en la zona de estudio corresponde a suelo es posible tener la clasificación de dos subunidades geomorfológicas, las cuales son:

- Ladera Denudacional: Ladera modelada en suelo residual y orgánico de tipo denudacional.
- Deslizamiento: Un deslizamiento es un movimiento de una masa de suelos o rocas, que ocurre ladera abajo predominantemente a lo largo de una superficie de ruptura o zonas relativamente delgadas de intensa deformación cortante (Cruden & Varnes, 1996 en (SGC, 2012)).

Componente Geomorfológico: El elemento o componente geomorfológico corresponde al máximo nivel de detalle de jerarquía en la subdivisión propuesta (escala 1:2000 a 1:10.000): asociados con una característica litológica o sedimentaria establecida con base en análisis detallados. (Velásquez, 1999; Ingeominas, 1999; Meijerink, 1988; Damen, 1990; en (Carvajal, 2011)).

El ambiente geomorfológico para el área de estudio de la vereda La Cabaña, corresponde al ambiente denudacional, el cual incluye geoformas cuya expresión morfológica está definida por la

acción combinada de procesos de meteorización y erosión los cuales remodelan y dejan remanentes en las unidades preexistentes.

Para identificar las geoformas del área de estudio se tiene en cuenta las características morfométricas, las cuales tratan aspectos cuantitativos en términos de medidas de longitud, área, forma y pendiente. Estas características se deben definir a partir de las siguientes tablas de información:

- **Contraste de relieve o relieve relativo:** Hace referencia a la diferencia de altitud de la geoforma entre la parte más alta y más baja de ésta, teniendo en cuenta los materiales constitutivos de la geoforma (SGC, 2012), a continuación, se presentan los rangos de relieve relativo:

Tabla 11. 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:** Es el ángulo que forma una ladera o terreno respecto a un plano horizontal, relacionada con el tipo de material que conforma la unidad morfológica y con

la susceptibilidad de dicha unidad a la formación de movimientos en masa, en la Tabla 12 se presentan los rangos de inclinación (SGC, 2012).

Tabla 12. 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:** es un indicador de la homogeneidad del material constitutivo de las geoformas; puede determinar una mayor superficie para el desarrollo de los procesos morfodinámicos, en la Tabla 13 se presentan los rangos de longitud de ladera (SGC, 2012).

Tabla 13. 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).

Al tener dos subunidades geomorfológicas definidas, además de conocer el ambiente geomorfológico y teniendo el conocimiento de que las geformas se encuentran modeladas en suelo de origen residual, se logra identificar cuatro componentes geomorfológicos definiendo en cada uno sus características principales incluyendo la morfometría con sus componentes del terreno para su descripción, además de la rugosidad.

De acuerdo a las características mencionadas anteriormente, se consideran los siguientes rasgos para clasificar el primer componente geomorfológico, así: su relieve relativo es bajo y por tal razón la resistencia del material es blando erosionable (ver Tabla 11); al tener la inclinación plana a suavemente inclinada, conociendo las características del material (muy blando) la susceptibilidad a movimientos en masa es muy baja (ver Tabla 12); la longitud estimada es corta (ver Tabla 13).

Por tal razón la clasificación corresponde a:

Planicie denudacional (Dpd), la cual es definida como un área extensa y plana suavemente inclinada con morfología ondulada. (Definición tomada de (SGC, 2012)).

Las características para clasificar el segundo componente geomorfológico son las siguientes: su relieve relativo es bajo y por tal razón la resistencia del material es blando erosionable (ver Tabla 8); cuyo rango de inclinación corresponde a la categoría “abrupta a muy abrupta”, junto las características del material (muy blando) hacen que la susceptibilidad a movimientos en masa sea moderada y su tenga alta resistencia (ver Tabla 9); la longitud estimada es moderadamente larga (ver Tabla 10). Por tal razón la clasificación corresponde a:

Loma denudada (Dld): Superficie en declive de morfología alomada o colinada como se observa en la Fotografía 14. De pendiente abrupta, y longitud corta a larga, formada principalmente en suelos residuales y depósitos coluviales. (Definición tomada de (SGC, 2012)).

Fotografía 12. Loma desnuda.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Estos dos componentes geomorfológicos son correspondientes con la subunidad Ladera denudacional. Ahora, se caracterizan los componentes geomorfológicos correspondientes a la subunidad deslizamiento denudacional teniendo en cuenta los parámetros para definir el componente y la siguiente descripción:

Forma de la ladera: Refleja la homogeneidad en la resistencia de los materiales, y la presencia o control de estructuras geológicas. También condiciona los tipos de movimientos en masa que pueden desarrollarse en una ladera como lo muestra la Tabla 14. Es común relacionar movimientos rotacionales a pendientes cóncavas y convexas y movimientos planares a pendientes rectas controladas estructuralmente o movimientos complejos a pendientes irregulares (SGC, 2012).

Tabla 14. Movimientos en masa asociados de acuerdo a 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.	Caída de Bloques. Erosión Diferencial.
COMPLEJA	Mezcla de materiales. Disposición estructural no definida.	Deslizamientos Complejos

Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Con lo enunciado, es posible definir tres componentes geomorfológicos los cuales se describen a continuación:

Movimientos lentos (Dml): Puede corresponder a la fase inicial de un movimiento en masa, ya que el movimiento no ocurre simultáneamente a lo largo de lo que, será la superficie de ruptura; el volumen de material desplazado se incrementa a partir de un área de falla local. Muchas veces, los primeros signos de movimiento son grietas en la superficie original del terreno, a lo largo de lo que más tarde será el escarpe principal del deslizamiento (Cruden & Varnes, 1996 en (SGC, 2012)).

Escarpe de erosión menor (Deeme): Escarpe de longitud muy corta a corta de formas rectas a cóncavas, formadas predominantemente por procesos denudacionales, como se observa en la Fotografía 2. (Tomado de (SGC, 2012)).

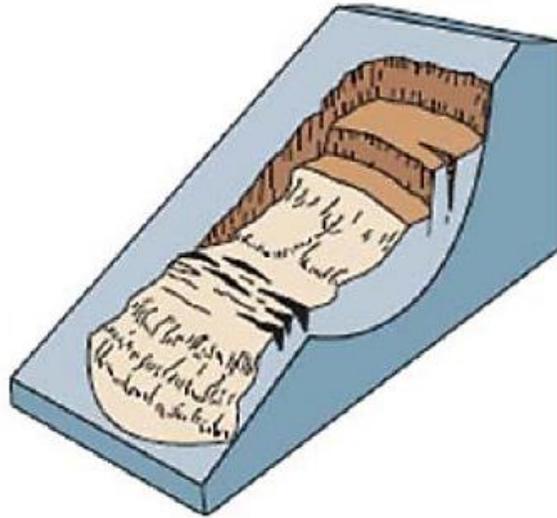
Fotografía 13. Escarpe de erosión menor



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Movimiento rotacional (Ddr): Estos deslizamientos se mueven a lo largo de superficies de ruptura curvas y cóncavas, con poca deformación interna del material (Cruden & Varnes, 1996). La cabeza del material desplazado se mueve verticalmente hacia abajo, mientras que la parte superior del material desplazado se bascula hacia él como se ilustra en la Figura 5. El escarpe principal es prácticamente vertical y carente de soporte, por lo que se pueden esperar movimientos posteriores que causen retrogresión del deslizamiento a la altura de la corona (Cruden & Varnes, 1996 en (SGC, 2012)). En la Fotografía 16 se puede observar un deslizamiento con movimiento rotacional dentro del área de estudio.

Figura 6. Esquema de un deslizamiento rotacional



Fuente. Tomado de SGC,2012.

Fotografía 14. Deslizamiento rotacional dentro del área de influencia

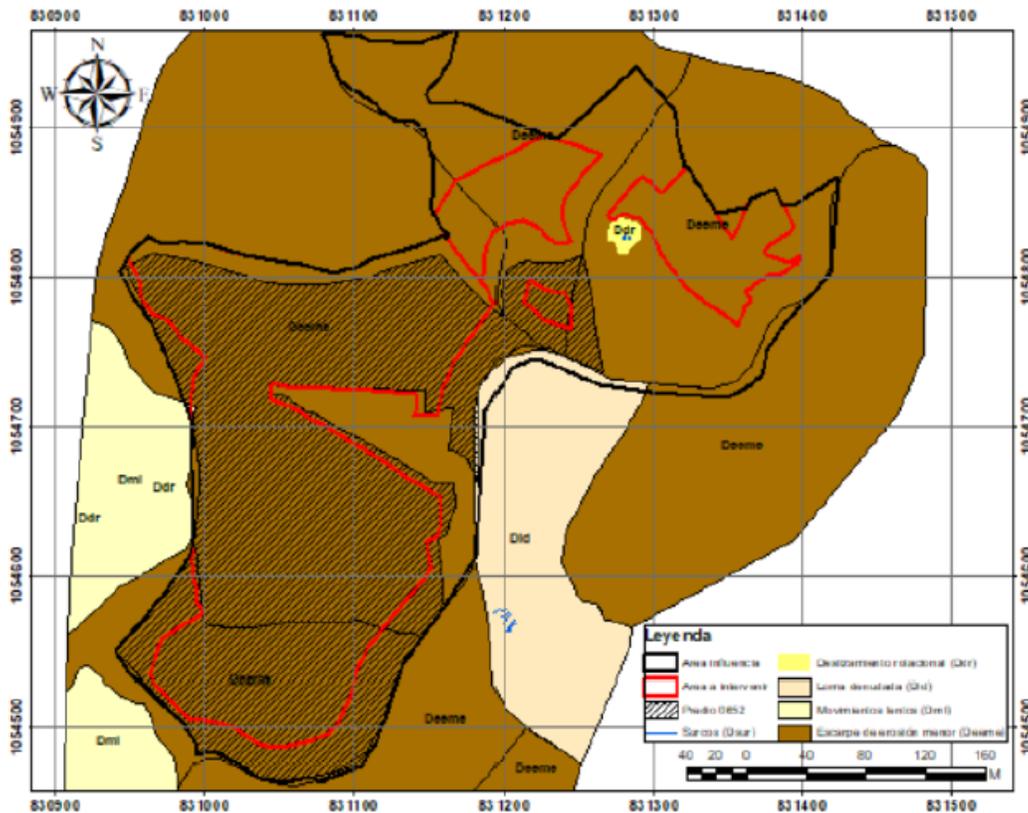


Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

La topografía del corregimiento Remanso se define entre escarpada y ondulada; caracterizada por presentar laderas alargadas con dirección norte-sur, con fuertes pendientes; algunas colinas sub redondeadas, las cuales son interceptadas por pequeños drenajes. (Alcaldía de Manizales, Diana Marcela Villada Marín, 2013).

Como resultado del análisis de campo y la interpretación realizada, se elaboró el Mapa 10 donde se presenta la geomorfología de la zona de estudio.

Mapa 10. Mapa geomorfológico



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

El ambiente geomorfológico corresponde a un ambiente denudacional principalmente, el cual se describe como (D).

El Mapa 10 de geomorfología contiene 5 componentes, descritas de la siguiente manera: Deslizamiento rotacional (Ddr), planicie denudacional (Dpd), loma denudada (Dld), movimientos lentos (Dml), escarpe de erosión menor (Deeme).

8. Cobertura del suelo, usos del suelo y conflictos de uso del suelo

8.1. Cobertura del suelo

De la información recopilada en el POT de Manizales (2017), en el plan de desarrollo y la información obtenida a través de campo, se concluyó que la “cobertura de la tierra” en el área de interés se caracteriza principalmente por la presencia de territorios agrícolas y zonas urbanizadas.

Las unidades identificadas por medio de sensores remotos y validación en campo fueron clasificadas de acuerdo a la Tabla 15, leyenda de tercer nivel de Corine Land Cover tomado de la “Guía metodológica para zonificación de amenaza por movimiento en masa”.

Tabla 15. 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
	2.3. Pastos	2.3.1. Pastos limpios
		2.3.2. Pastos arbolados
		2.3.3. Pastos enmalezados
		2.3.4. Pastos degradados
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	2.4.1. Mosaico de cultivos
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos		
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. Bosques y áreas seminaturales	3.1. Bosques	3.1.1. Bosque denso
		3.1.2. Bosque abierto
		3.1.3. Bosque fragmentado
		3.1.4. Bosque de galería o ripario
		3.1.5. Plantación forestal
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	3.2.1. Herbazal
		3.2.2. Arbustal
		3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	3.3.1. Zonas arenosas naturales
		3.3.2. Afloramientos rocosos
		3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
		3.3.4. Zonas quemadas
		3.3.5. Zonas glaciales y nivales
4. Áreas húmedas	4.1. Áreas húmedas continentales	4.1.1. Humedales y zonas pantanosas
		4.1.2. Turberas
		4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpo de agua
5. Superficies de agua	5.1. Aguas continentales	5.1.1. Ríos
		5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales
		5.1.3. Canales - (vallados y acequias)
	5.1.4. Cuerpos de agua artificiales	
	5.2. Aguas marítimas	5.2.1. Lagunas costeras
		5.2.2. Mares y océanos
5.2.3. Estanques para acuicultura marina		

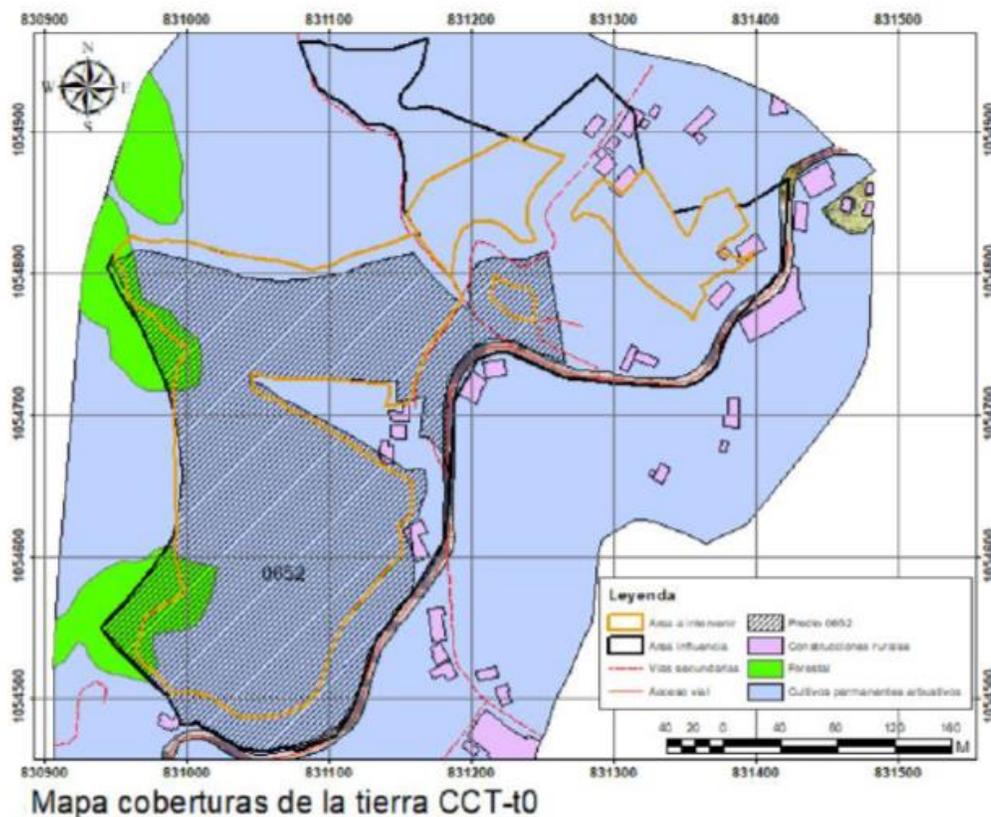
Fuente: Guía metodológica para zonificación de amenaza por movimiento en masa.

En el estudio realizado se tomaron dos imágenes de años distintos, la primera corresponde al año 2006 tomada de Google Earth, y se denomina capa de coberturas de tierras en el tiempo anterior (CCT-t0) y, la otra, corresponde a un ortomosaico del año 2020 obtenido por un dron denominada cobertura de tierras en el tiempo actual (CCT-t1).

A continuación, se hablará más detalladamente de cada una de las imágenes mencionadas

Capa de coberturas de tierras en el tiempo anterior (CCT-t0): las unidades identificadas corresponden a construcciones rurales, cultivos permanentes arbustivos y plantación forestal, como se identifica en el Mapa 11

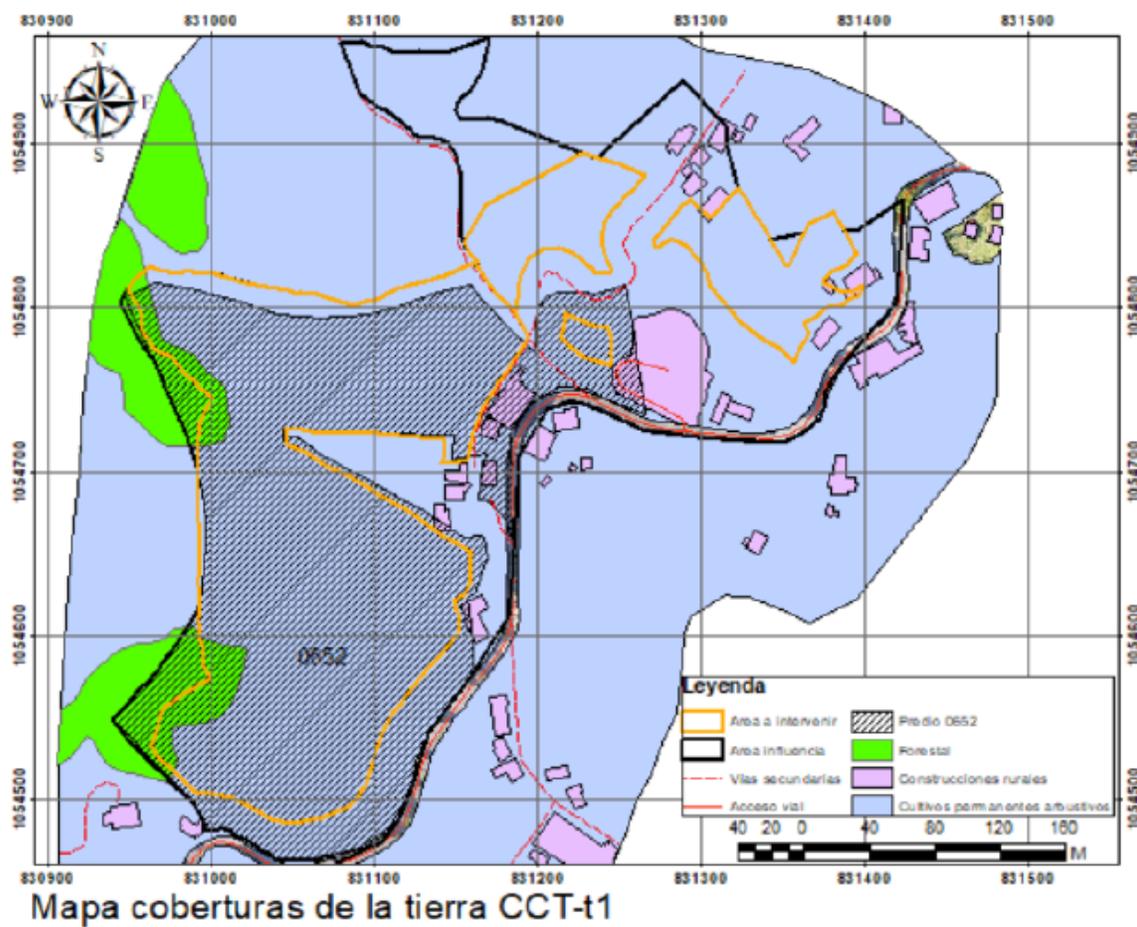
Mapa 11. Capa de cobertura de tierras CCT-t0.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Capa de cobertura de tierras en el tiempo actual (CCT-t1): las unidades identificadas corresponden a construcciones rurales, cultivos permanentes arbustivos y plantación forestal, como se observa en el Mapa 12.

Mapa 12. Capa de coberturas de la tierra CCT-t1.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

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: territorio artificializado
 - Nivel 2: zonas urbanas

- Nivel 3: construcciones rurales

- Unidad 2:

- Nivel 1: territorios agrícolas

- Nivel 2: cultivos permanentes

- Nivel 3: cultivos permanentes arbustivos

- Unidad 3:

- Nivel 1: bosques y áreas seminaturales

- Nivel 2: bosques

- Nivel 3: plantación forestal

8.1.1. Mosaico de cultivos

Es una unidad que comprende cultivos anuales, transitorios o permanentes, en los cuales los tamaños de parcelas son muy pequeños y el patrón de distribución de los lotes es demasiado intrincado para representarlos cartográficamente de manera individual.

Fotografía 15. Ejemplos de los cultivos que se encuentran dentro del área de estudio.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

8.1.2. Guadua

La guadua está relacionada con los sistemas productivos predominantes como la caficultura, cultivos asociados y la ganadería, como un sistema productivo y extractivo complementario.

8.1.3. Rastrojo de corte bajo

Corresponde a maleza como el cadillo y cañabrava

Fotografía 16. Cadillo, cañabrava y maleza.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

De acuerdo a la información recolectada por los mapas de coberturas de tierras tanto en CCT-t0 y CCT-t1, se concluye que no ha habido cambios significativos en el área de interés en cuanto a la pérdida o ganancia de cobertura vegetal, lo que se interpreta como una persistencia de la cobertura a través del tiempo. Tomando en cuenta la información de la Tabla 16 de la guía metodológica para zonificación de amenaza por movimiento en masa, no es necesario realizar el análisis ni la matriz multitemporal, dado que las unidades no han presentado cambios significativos, los cambios presentados son denominados de grado bajo.

Tabla 16. Clase de cambio por deforestación y priorización de las zonas para análisis multitemporal en la zonificación de amenazas por movimiento en masa.

	COBERTURA T1_IDEAM*	COBERTURA T2_IDEAM*	CLASE MAPA DE CAMBIO	GRADO DE CAMBIO_SGC	ACTIVIDAD		
1	Bosque	1	Bosque	1	Bosque Estable	Bajo	Áreas de no implementación del análisis multitemporal
1	Bosque	2	No Bosque	2	Deforestación	Alta	Priorización de áreas para implementar análisis multitemporal de coberturas
1	Bosque	3	Sin Información	3	Sin Información	Sin Información	Criterio Experto
2	No Bosque	1	Bosque	4	Regeneración	Medio	Priorización de áreas para implementar análisis multitemporal de coberturas
2	No Bosque	2	No Bosque	5	No Bosque Estable	Medio	Criterio Experto
2	No Bosque	3	Sin Información	6	Sin Información	Sin Información	Criterio Experto
3	Sin Información	1	Bosque	7	Sin Información	Sin Información	Criterio Experto
3	Sin Información	2	No Bosque	8	Sin Información	Sin Información	Criterio Experto
3	Sin Información	3	Sin Información	9	Sin Información	Sin Información	Criterio Experto

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

8.2. Uso 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), contando con 5 categorías que incluyen los territorios artificializados, territorios agrícolas, bosques y áreas seminaturales, áreas húmedas y superficies de agua. La clasificación de usos del suelo se realizó por medio de la Tabla 17, leyendas de usos

del suelo tomada de la guía metodológica para zonificación de amenaza por movimiento en masa y se presenta en el Mapa 13.

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

- Unidad 1:

- Nivel 1: territorio artificializado

- Grupo de uso: asentamientos

- Uso actual: residencial

- Unidad 2:

- Nivel 1: territorios agrícolas

- Grupo de uso: agricultura

- Uso actual: cultivos permanentes semi intensivos

- Unidad 3:

- Nivel 1: territorio artificializado

- Grupo de uso: infraestructura

- Uso actual: infraestructura y transporte.

- Unidad 4:

- Nivel 1: áreas naturales y seminaturales

- Grupo de uso: forestal

- Uso actual: sistema forestal productor

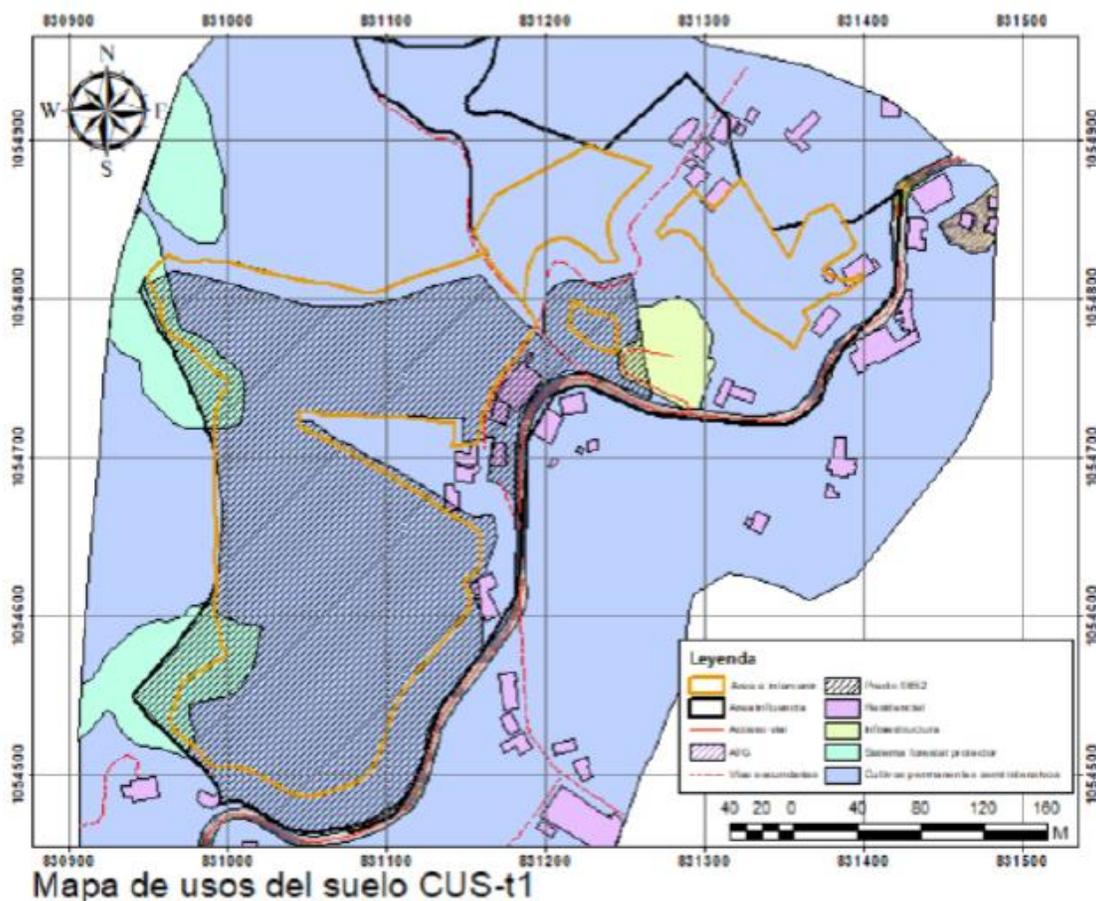
Tabla 17. Leyenda de usos del suelo

NIVEL I	GRUPO DE USO	USO ACTUAL
1. Territorios artificializados	* Asentamiento	* Residencial
		* Comercial
		* Industrial
	* Infraestructura	* Infraestructura y transporte
		* Recreacional, deportivo o turístico
		* Transporte
		* Materiales de construcción
		* Metales radiactivos
	* Minería	* Metales no metálicos
		* Metales energéticos
		* Piedras preciosas
		* Disposición de materiales líquidos
		* Disposición de materiales sólidos
* Otros usos	* Mina en abandono	
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
	* Conservación	* Protección
		* Producción - Protección
	* Forestal	* Sistema forestal productor (FPD)
		* Sistema forestal protector (FPR)
	* Conservación	* Protección
	* Otros usos	* Pastoreo
3. Áreas naturales y seminaturales	* Conservación	* Producción
		* Protección
	* Otros usos	* Tierras en descanso
4. Áreas húmedas	* Conservación	* Protección
	* Sin uso	* Protección
5. Superficies de agua	* Cuerpos de agua naturales	* Cuerpos de agua naturales
	* Cuerpos de agua artificiales	* Cuerpos de agua artificiales
		* Infraestructura

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

Mapa 13. Capas de usos del suelo CUS-t1.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

8.3. Conflictos de usos del suelo

Los conflictos de usos del suelo, se clasifican de acuerdo a la oferta y demanda, de confrontar temáticas referidas a uso potencial del suelo versus uso actual y cobertura de tierras. El uso potencial del suelo hace referencia a la aptitud natural del suelo para producirse constantemente y bajo tratamientos continuos.

De acuerdo a lo antes mencionado y teniendo de referencia información contenida en el POMCA del Río Chinchiná y el POT de Manizales componente rural, se puede determinar que dentro del área de influencia el uso potencial del suelo fue identificado como 4pc-2, el cual corresponde a zonas de uso para la producción agrícola, ganadera y uso sostenible de RRNN, subclase cultivos permanentes semi-intensivos de clima medio y 6pc-2, el cual corresponde a zonas de uso para la producción agrícola, ganadera y uso sostenible de RRNN, subclase agro silvícola con cultivos permanentes, según la clasificación de zonas de uso identificadas en el POMCA.

Con base en el reconocimiento de campo, la interpretación de fotografías aéreas y la revisión de información secundaria, se puede concluir que el conflicto de usos del suelo se clasifica como tierras sin conflicto (TSC), en donde la totalidad del área se encuentra en esta condición, dado que los usos del suelo actuales corresponden a los usos potenciales del suelo, y su vez no se está generando un deterioro ambiental, lo cual permite mantener actividades adecuadas y concordantes con la capacidad productiva natural de las tierra.

9. Aspectos geotécnicos

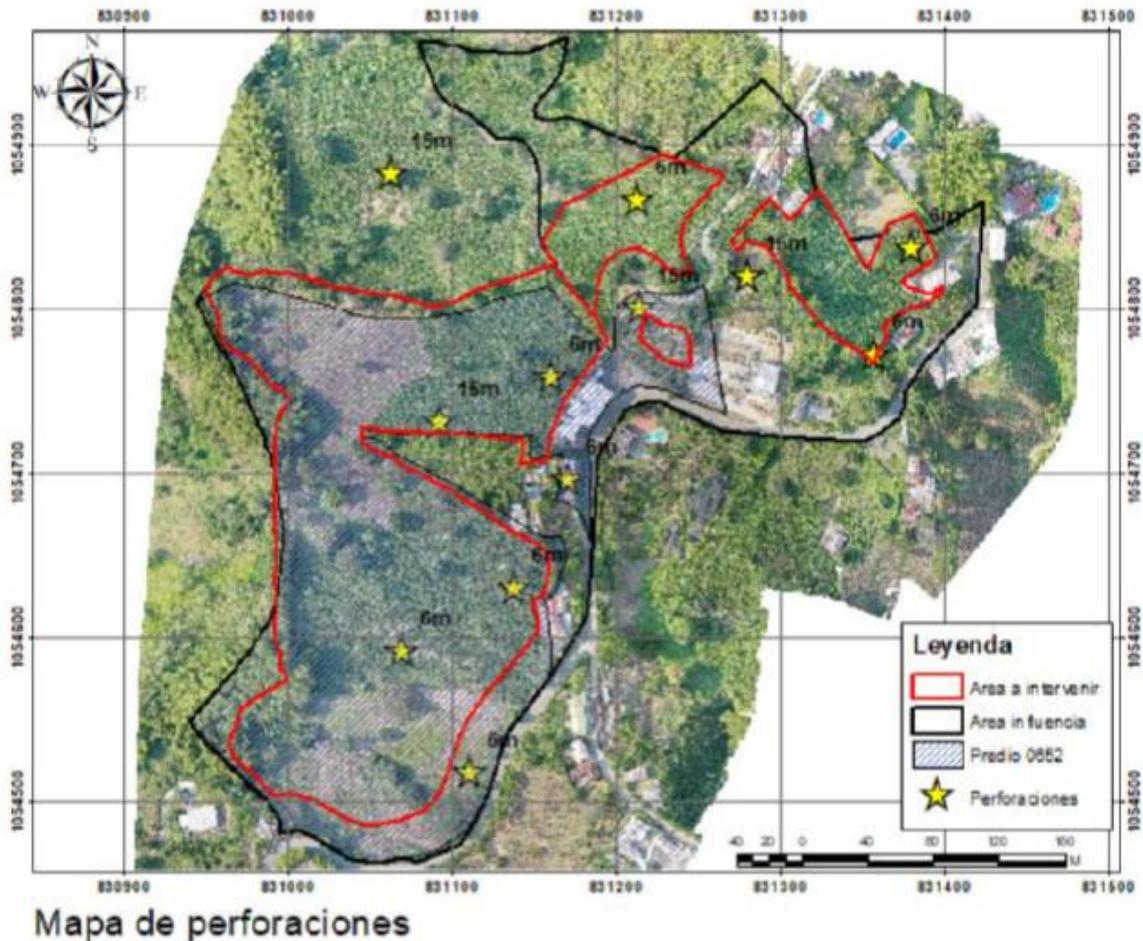
9.1. Prospección geotécnica

Estos sondeos tendrán que llegar, mínimo, hasta 3 m por debajo de la superficie estimada de deslizamiento; si esta superficie se encuentra en el contacto suelo-roca, se deberá profundizar en la roca por lo menos 1 m. En caso de realizar exploración geofísica, se podrá suprimir uno de los sondeos, siempre y cuando sea posible inferir el perfil del subsuelo en forma adecuada.

Según lo anterior, y con el fin de dar cumplimiento a los mínimos exigidos normativamente, se realizaron doce (12) sondeos mecánicos en el área de estudio con el fin de establecer espesores de los estratos y profundidades del nivel freático, así como su continuidad espacial, los cuales se muestran en el Mapa 14. Se hizo énfasis en que para toda la zona que está prospectada como área construible, se tenga información geotécnica relacionada.

De los 12 sondeos realizados, 4 de ellos alcanzaron una profundidad de 15 metros y 8 alcanzaron una profundidad de 6 metros. Lo anterior con el ánimo de abarcar la superficie de falla esperada y tener un conocimiento íntegro de los materiales en profundidad.

Mapa 14. Localización de los sondeos exploratorios.



Fuente:

Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

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 superficiales, el mapa de elementos geomorfológicos, la exploración geotécnica y los resultados de los ensayos de laboratorio. Los elementos definidos en el modelo son:

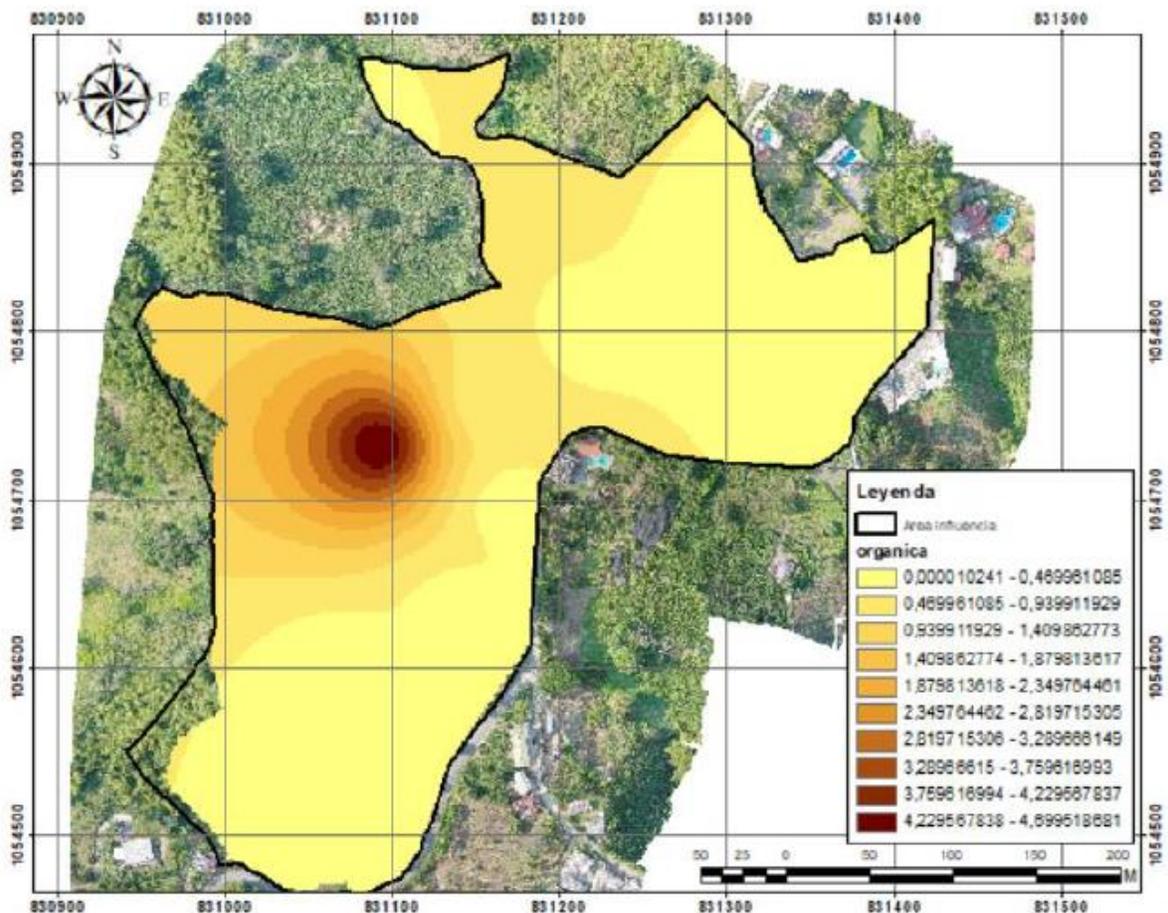
- La pendiente del terreno, la cual se obtuvo a partir del modelo de elevación digital obtenido a partir de las curvas de nivel levantadas en campo con ayuda de un vuelo de drone.
- El espesor del suelo y su variación, que se pudo establecer gracias a la descripción detallada de las perforaciones.
- 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 elaboró a partir de los sitios que se encontraron saturados de agua y que se consideran como de recarga hídrica.

De lo anterior, y con base en lo observado en campo, se establecieron 4 estratos de suelo, que se discriminan así:

10.2.1. Estrato No. 1

El primer estrato encontrado con las perforaciones correspondiente a material orgánico que es importante en la zona por la gran extensión de cobertura de cultivos que se localiza en el área, además que, hacia cierto lugar, alcanza un espesor considerable hacia una parte del área, su distribución se observa en el Mapa 15.

Mapa 15. Distribución del espesor del estrato 1 en el área de estudio



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

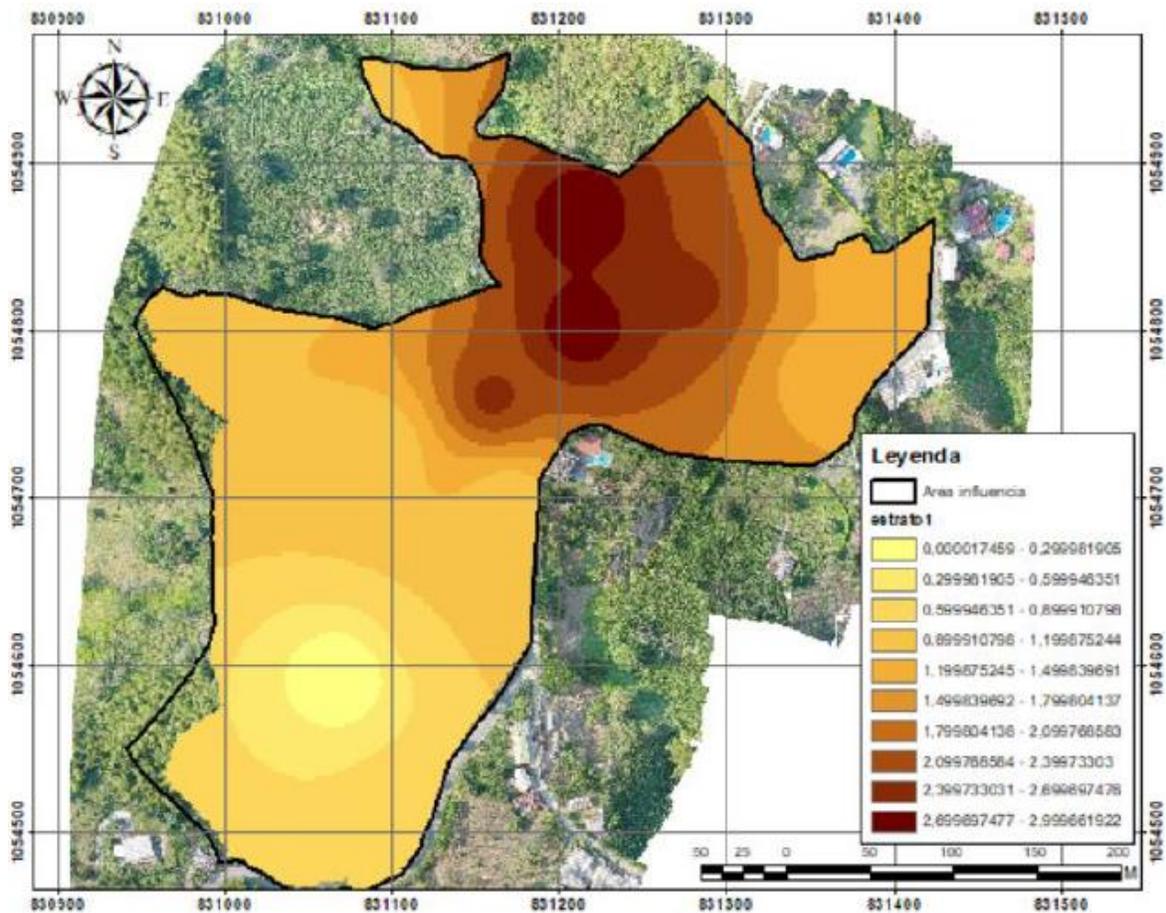
10.2.2. Estrato No. 2

A medida que se avanza en profundidad, es común en todos los sondeos que se encuentre un estrato que corresponde a un limo color pardo amarilloso, de humedad baja, plasticidad alta y resistencia media a alta que es correlacionable con depósitos de caída piroclástica.

En 1997, Aguirre y Dunoyer realizaron una publicación donde se discriminan los depósitos de caída piroclástica según sus características texturales y demás, se establecieron tres sets: I, II y III. Con base en las descripciones realizadas se considera que el set que más se asemeja a lo encontrado en el sector es el Set II, del cual se define una subdivisión en Set IIA y IIB.

El Set IIA “consiste en una serie de niveles de ceniza media a fina de colores pardos con presencia ocasional de pómez...” y se correlaciona con el segundo estrato encontrado en el sitio de interés, en el Mapa 16 se presenta la distribución de este estrato.

Mapa 16. Distribución del espesor del estrato 2 en el área de estudio.



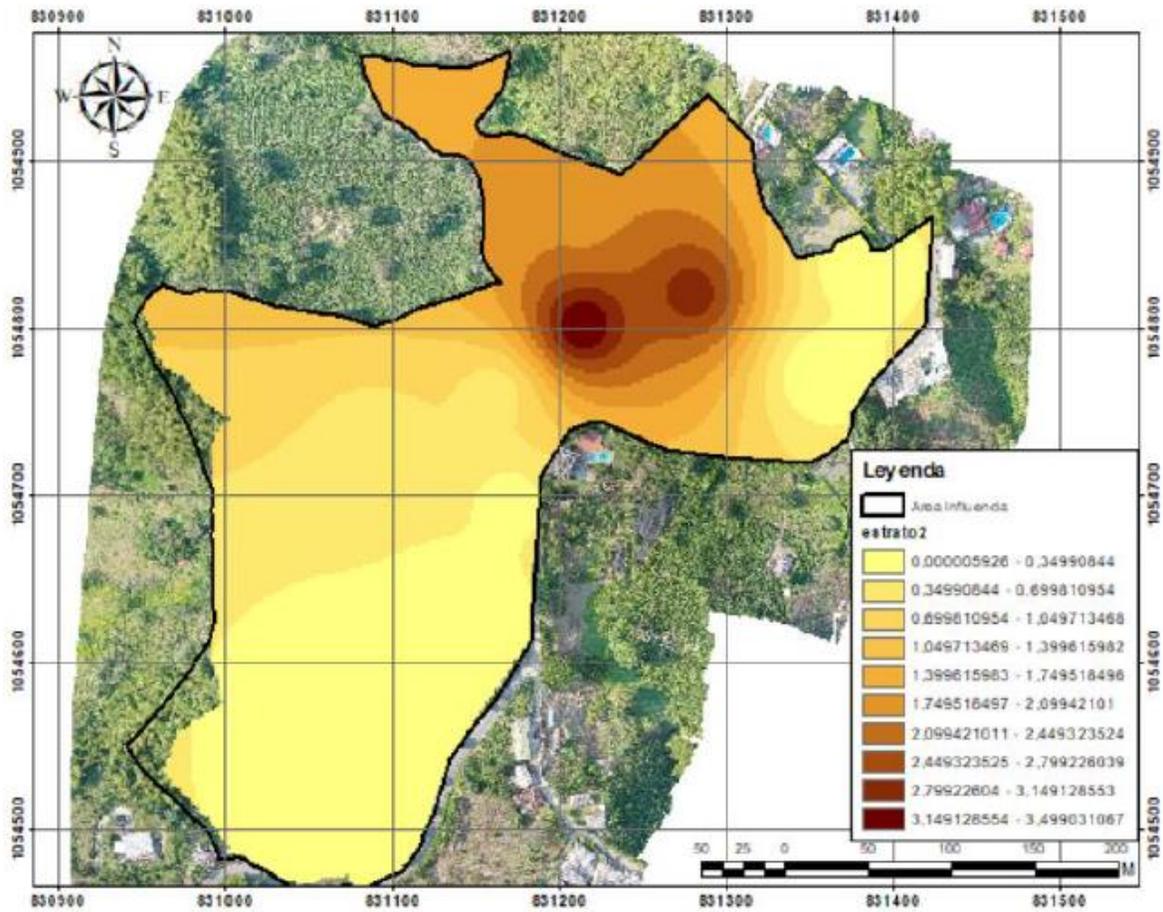
Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

10.2.3. Estrato No. 3

El tercer estrato también corresponde a un limo, pero con mayor tamaño de partículas arenosas, de color grisáceo humedad media a baja y resistencia media a alta. Se puede correlacionar con el Set III definido por Aguirre y Dunoyer (1997): Set III, pues "...corresponde a los depósitos más antiguos (entre los 31170 +/- 980 años y 39000 años), se caracteriza por presentar potentes capas de ceniza fina, de color abano a grisáceo con alto contenido de humedad...", lo cual es

correspondiente con que se tengan partículas más arenosas inmersas en un estrato de características muy similares al inmediatamente suprayacente y de color gris, en el Mapa 17 se presenta la distribución de este estrato.

Mapa 17. Distribución del espesor del estrato 3 en el área de estudio



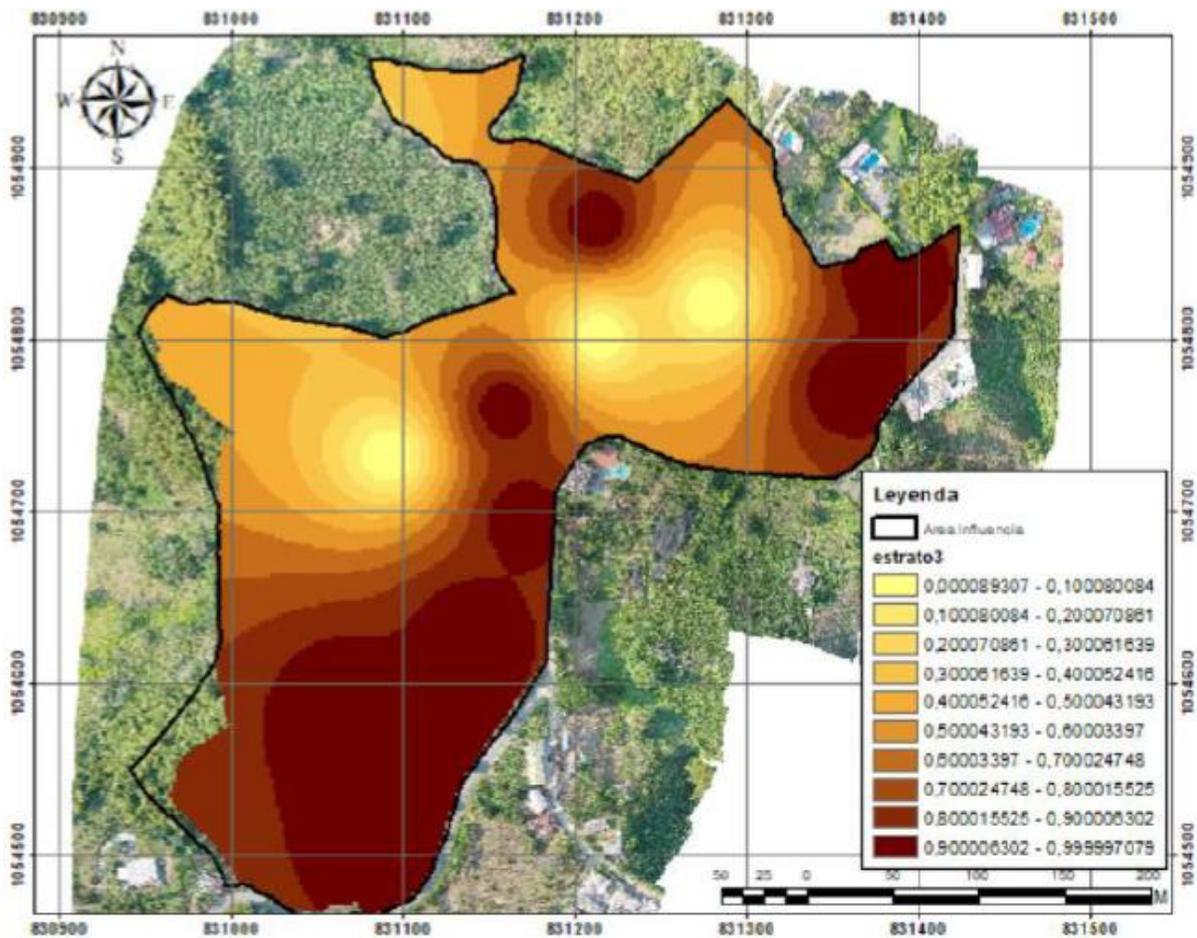
Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

10.2.4. Estrato No. 4

El último estrato que se alcanzó a encontrar con la profundidad alcanzada por las perforaciones de esta consultoría, es un suelo de textura más gruesa que los anteriores pero que sigue presentando una textura limosa importante, se va tornando más húmedo y adquiere un tono notoriamente diferente de color naranja. Sus propiedades geotécnicas tales como peso unitario, cohesión y fricción aumentan con respecto a los suelos que le suprayacen lo cual establece definitivamente que se trata de un estrato diferente.

Es común que dentro de este estrato se encuentren fragmentos de roca correspondientes a líticos metamórficos foliados, por lo que se concluye que esta capa es el suelo residual que hace parte del perfil de meteorización que se forma a partir de la roca parental que conforma el sustrato rocoso de la zona y que se encuentra cartografiado como el Complejo Arquía. En algunas perforaciones se pudo corroborar que debajo de este estrato aparece la roca parental, que, por efecto de los niveles de aguas freáticas someros, se tornaba bastante saturada hasta el punto de comportarse plásticamente, en el Mapa 18 se presenta la distribución de este estrato.

Mapa 18. Distribución del espesor del estrato 4 en el área de estudio.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

10.3 Resultados de los ensayos de laboratorio

Todas las muestras obtenidas de las perforaciones fueron trasladadas a dos laboratorios de suelos según el ensayo que se quisiera realizar: el laboratorio Geotransvial y el laboratorio de Consuas Ingeniería. Los ensayos realizados fueron:

- Humedad natural
- Límites de Atterberg
- Granulometría
- Peso Unitario
- Compresión simple
- Corte Directo

De los ensayos anteriores se pudieron encontrar los parámetros geomecánicos básicos para aplicar el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, que resulta de especial importancia en la modelación de fallas en suelo según la ecuación de resistencia al corte:

$$\tau = C + \sigma \tan \phi$$

Donde τ es la resistencia al corte del material, C es la cohesión del suelo, σ es el esfuerzo vertical en el punto de análisis y ϕ es el ángulo de fricción del suelo.

Los resultados de los ensayos de laboratorio se pueden apreciar de manera detallada en el

10.3.1 Propiedades geomecánicas de los estratos

Para sintetizar se tiene que, el estrato 1 corresponde a material orgánico, el estrato 2 y 3 hacen parte de un mismo depósito de caída piroclástica pero que se subdividen dependiendo de sí tienen más contenido de lapilli o no (Set II y Set III de cenizas volcánicas definido por Aguirre y Dunoyer en 1997) y el estrato 4 correspondiente a suelo residual del Complejo Arquía. Por debajo del mismo

se localiza la roca parental. El resumen de las propiedades geotécnicas de los suelos se presenta en la Tabla 18.

Tabla 18. Propiedades geomecánicas de los materiales involucrados en el área de estudio

	T200 (%)	w (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	PUS (KN/m3)	PUS (ton/m3)	PUH (KN/m3)	PUH (ton/m3)
E1	86,8	63,3	49,1	41,3	7,8	8,829	0,9	14,4207	1,47
E2	77,23	56,57	54,30	36,58	17,73	9,97	1,02	15,57	1,59
E3	76,25	68,50	49,70	34,80	14,90	9,12	0,93	15,06	1,54
E4	59,33	39,24	43,35	32,95	10,40	12,73	1,30	17,58	1,79

	Gs	e0	ef	S (%)	Cc	Co	Su (kg/cm2)	Su (ton/m2)	Su (KPa)
E1	2,613	1,9	1,9	87,3	0,0006	0,38	0,5	5	49,05
E2	2,61	1,59	1,59	93,60	0,00057	0,38	0,58	5,80	56,90
E3	2,61	1,92	1,92	94,35	0,00050	0,38	0,49	4,90	48,07
E4	2,61	1,06	1,06	97,90	0,00056	0,31	0,56	5,62	55,13

	Es (kg/cm2)	Es (ton/m2)	Es (KPa)	C (kg/cm2)	C (ton/m2)	C (KPa)	Fricción	Clasificación
E1	56,17	561,7	5510,277	0,5	5	49,05	17	OL
E2	55,97	559,73	5490,98	0,45	4,53	44,47	24	MH
E3	48,37	483,65	4744,61	0,28	2,80	27,47	28	ML
E4	57,60	575,96	5650,17	0,38	3,80	37,28	30	ML (SM)

Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

10.4 Estabilidad de taludes y de la ladera

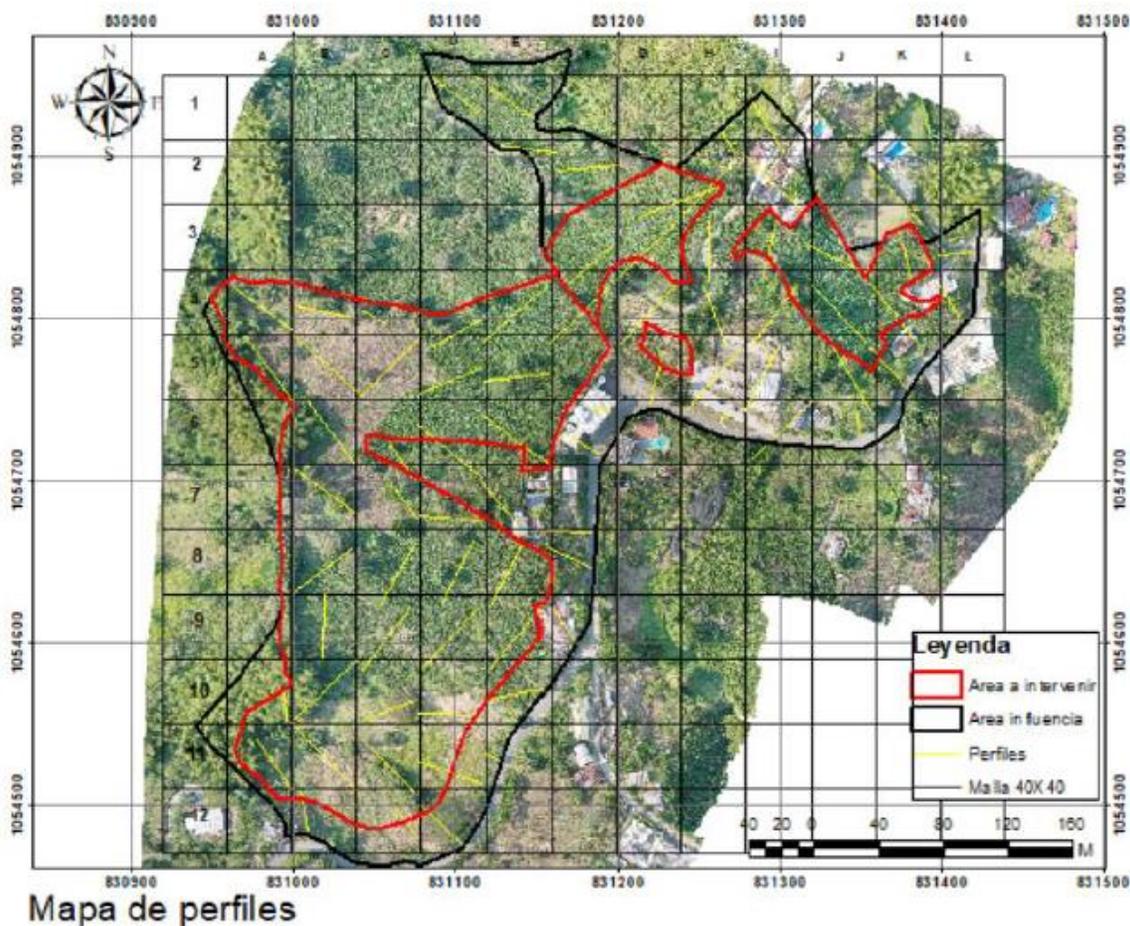
10.4.1 Perfiles de análisis

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.

Con ayuda del software ArcMap, se creó la malla de análisis, de tal manera que se abarcara toda el área de influencia que se determinó. La malla tuvo un total de 12 columnas y 12 filas tal y como

puede observarse en el Mapa 19. Las columnas fueron nombradas con letras desde la A hasta la L y las filas fueron nombradas con números del 1 al 12.

Mapa 19. Localización de los perfiles que serán analizados como líneas de estabilidad con su respectiva malla.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Posteriormente, se examinó cuáles celdas de la malla coincidían con el área de influencia 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 75 perfiles de análisis cuya nomenclatura depende de su localización en la malla, por ejemplo, sí el perfil se dibujó dentro de la celda cuya columna

corresponde a E y cuya fila corresponde a 7, entonces el perfil se llamará E7. Los perfiles analizados se presentan en la Tabla 19 expuesta a continuación:

Tabla 19. Discriminación de los perfiles de análisis utilizados para la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimiento en masa

Perfil	D5	G2
A4	D6	G3
A5	D7	G4
A10	D8	G5
A11	D9	H1
B4	D10	H2
B5	D11	H3
B6	D12	H4
B7	E1	H5
B8	E2	H6
B9	E4	I1
B10	E5	I2
B11	E6	I3
B12	E7	I4
C4	E8	I5
C5	E9	I6
C6	E10	J3
C7	E11	J4
C8	F3	J5
C9	F4	J6
C10	F5	K3
C11	F6	K4
C12	F7	K5
D1	F8	L3
D4	F9	L4

Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Cada uno de los 75 perfiles de análisis se elaboraron con la ayuda del software Global Mapper y fueron exportados a formatos CAD para su procesamiento. 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.

10.4.2 Análisis de la susceptibilidad

Para el caso del método determinístico entonces, se debe contar con una distribución espacial de los espesores de suelo y de sus características mecánicas, además de una posición del nivel freático y de una aceleración sísmica, con lo cual se procede a calcular, por métodos de equilibrio límite, los factores de seguridad en diferentes celdas o “columnas” de suelo, para hallar así su distribución espacial. Con este procedimiento, el factor de seguridad es el dato discriminante para establecer las categorías de amenaza.

Las categorías de susceptibilidad están basadas en el factor de seguridad que se tiene en la ladera, discriminándose como se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20. Categorías de zonificación de susceptibilidad y amenaza según los factores de seguridad.

Factor de seguridad	Categoría de susceptibilidad y amenaza
< 1.1	Alta
1.1 – 1.5	Media
> 1.5	Baja

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

10.4.2.1 Resultados de los 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 hallado en el momento de la exploración, se modelaron los 75 perfiles de análisis en el software Slide 5.0, obteniendo los resultados que se presentan en la T

Tabla 21. Factores de seguridad resultantes de los análisis de susceptibilidad

Perfil	Bishop	Janbu	GLE	Final
A4	3,319	3,374	3,308	3,308
A5	3,282	3,315	3,372	3,282
A10	2,493	2,644	2,513	2,493
A11	6,562	6,698	6,559	6,559
B4	4,463	4,459	4,447	4,447
B5	3,78	3,842	3,766	3,766
B6	71,22	73,272	71,219	71,219
B7	3,847	3,937	3,838	3,838
B8	6,221	6,348	6,215	6,215
B9	4,356	4,498	4,35	4,35
B10	8,204	8,369	8,205	8,204
B11	6,108	6,222	6,108	6,108
B12	2,792	2,889	2,787	2,787
C4	21,962	22,495	21,964	21,962
C5	8,539	8,315	8,523	8,315
C6	5,676	5,897	5,664	5,664
C7	4,332	4,404	4,324	4,324
C8	4,143	4,261	4,135	4,135
C9	5,65	5,796	5,651	5,65
C10	9,848	10,078	9,847	9,847
C11	8,185	8,337	8,182	8,182
C12	5,045	5,079	5,04	5,04
D1	19,897	20,671	19,896	19,896
D4	6,785	6,854	6,776	6,776
D5	91,617	93,738	91,618	91,617
D6	3,203	3,183	3,189	3,183
D7	5,691	5,756	5,682	5,682
D8	2,941	3,008	2,935	2,935
D9	5,412	5,443	5,409	5,409
D10	5,698	5,814	5,694	5,694
D11	3,943	3,991	3,94	3,94
D12	4,987	5,095	4,982	4,982
E1	6,041	6,028	6,03	6,028
E2	5,995	6,063	5,984	5,984
E4	4,003	4,039	3,995	3,995

E5	8,005	7,685	7,992	7,685
E6	5,225	5,206	5,216	5,206
E7	5,944	5,969	5,939	5,939
E8	2,987	3,066	2,978	2,978
E9	3,722	3,808	3,718	3,718
E10	4,785	4,866	4,781	4,781
E11	9,266	9,376	9,261	9,261
F2	5,135	5,216	5,128	5,128
F3	8,417	8,257	8,405	8,257
F4	3,868	3,889	3,863	3,863
F5	3,073	3,571	3,333	3,073
F6	4,435	4,448	4,427	4,427
F7	3,046	3,136	3,041	3,041
F8	3,264	3,365	3,256	3,256
F9	6,969	7,261	6,963	6,963
G2	3,979	4,075	3,966	3,966
G3	2,578	2,622	2,572	2,572
G4	2,41	2,394	2,404	2,394
G5	3,788	3,83	3,784	3,784
H1	32,22	32,645	32,21	32,21
H2	11,619	11,645	11,613	11,613
H3	5,646	5,461	5,639	5,461
H4	2,053	2,082	2,047	2,047
H5	6,188	6,21	6,185	6,185
H6	84,019	84,17	84,016	84,016
I1	10,595	10,62	10,587	10,587
I2	15,058	14,771	15,074	14,771
I3	2,514	2,543	2,506	2,506
I4	2,227	2,232	2,221	2,221
I5	7,118	7,115	7,101	7,101
I6	8,005	8,069	8,002	8,002
J3	3,93	3,977	3,921	3,921
J4	4,741	4,837	4,735	4,735
J5	6,42	6,53	6,411	6,411
J6	6,683	6,908	6,675	6,675
K3	7,377	7,482	7,371	7,371
K4	7,49	7,453	7,484	7,453

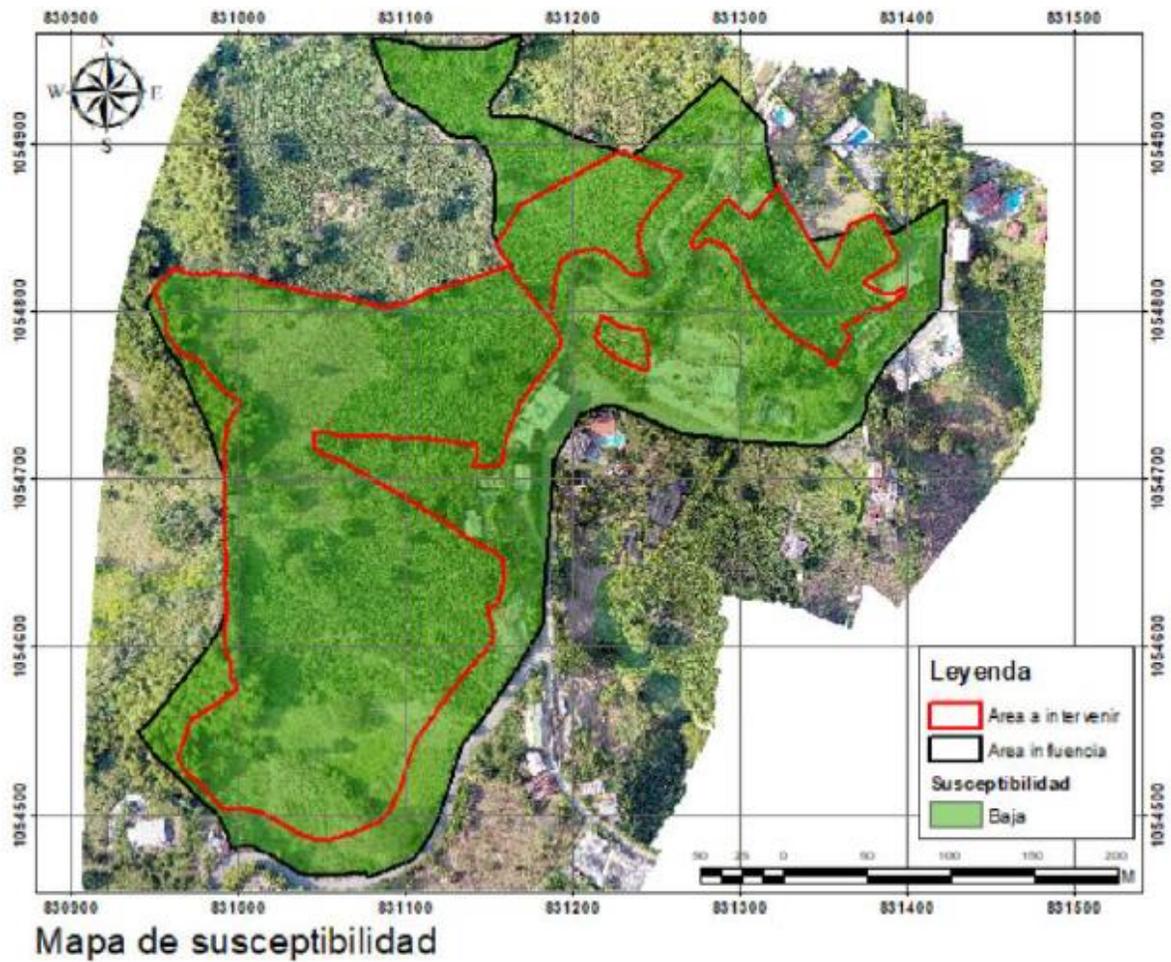
K5	11,918	11,667	11,911	11,667
L3	24,16	24,735	24,153	24,153
L4	5,605	5,791	5,596	5,596
MINIMO	2,047			

Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Dado que se tienen 75 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.

Se puede apreciar que el factor de seguridad mínimo de la ladera es de 2,047, lo cual hace que todos los sitios sean estables a la vez que seguros, pues para condiciones estáticas el mínimo de factor de seguridad admitido es de 1,5. En el Mapa 20 se presenta gráficamente el resultado de la zonificación de la susceptibilidad.

Mapa 20. Zonificación de la susceptibilidad.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Baja: Laderas que por sus factores condicionantes como propiedades geomecánicas competentes, pendientes suaves a poco inclinadas, materiales poco meteorizados y fisurados y niveles de agua freática no tan someros, propician su estabilidad.

10.5 Caracterización y zonificación de la amenaza para el escenario de movimientos en masa

El análisis de la amenaza por movimiento en masa resulta de la interacción de la amenaza y la vulnerabilidad en un sector determinado, a su vez, el análisis de la amenaza difiere del análisis de la susceptibilidad en que en la amenaza sí se toman en cuenta los factores detonantes sumados a los factores contribuyentes a la generación de un movimiento en masa.

Una vez definida la susceptibilidad, esta se debe caracterizar con la frecuencia de ocurrencia de los tipos de movimientos en masa analizados y según cada uno de los escenarios que pueden detonar su ocurrencia: lluvia, sismo y antropismo.

Idealmente se deberían conocer todos los movimientos en masa detonados por un mismo factor (lluvia o sismo) en una región determinada con el fin de definir la probabilidad temporal de ocurrencia de un movimiento en masa. Sin embargo, considerando las limitaciones de información se pueden emplear alternativas con base en métodos estadísticos o el conocimiento del área como en el caso de los métodos heurísticos o geomorfológicos, frecuencias absolutas, relativas, indirectas, distribución de probabilidad empírica o correlación con umbrales de lluvia, etc.

Al final la zonificación de amenaza contiene no solo las categorías de amenaza alta, media y baja, sino también, todas aquellas evidencias de inestabilidad que sean identificadas en el inventario de procesos morfodinámicos.

Para que se haya llegado a la necesidad de caracterizar la amenaza en un estudio detallado se tiene que tener un antecedente elemental, y es que, en los estudios básicos de riesgo que se hayan realizado en el municipio, se haya definido una zona de amenaza alta y que a su vez coincidía con la ubicación de elementos expuestos o con un lugar donde se planificara incorporar elementos expuestos. Estas situaciones se conocen como zonas en condición de riesgo y zonas en condición de amenaza, respectivamente.

10.5.1 Escenarios de amenaza por movimiento en masa

Se refiere a todas las posibles 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.

En este documento se realiza específicamente el análisis de procesos de deslizamiento en taludes naturales, a partir de la evidencia de ocurrencias conocidas (Inventario de procesos morfodinámicos) y mediante la combinación de técnicas cuantitativas.

Los escenarios de amenaza definidos para el análisis de la amenaza por remoción en masa corresponden a escenario de lluvias y escenario de sismo, los cuales son analizados e incluidos en la zonificación de la susceptibilidad, amenaza, vulnerabilidad y riesgo, igualmente se tuvo en cuenta el análisis de la influencia del escenario de cambio climático en la ocurrencia de movimientos en masa.

10.5.1.1 Escenario de Lluvia

Una vez definidas las unidades geotécnicas para los análisis básicos, será necesario contar con cierta información de campo para evaluar la inestabilidad resultante de la acción hídrica relacionada con la fluctuación del nivel freático.

Existen evidencias muy claras de la relación directa entre el régimen de lluvias y la ocurrencia de movimientos en masa. Se pueden diferenciar deslizamientos inmediatos por saturación, los cuales ocurren durante o inmediatamente después de presentarse una lluvia y se relacionan con la eliminación de la succión al producirse la saturación por acción del frente húmedo de infiltración. Cuando las lluvias son muy intensas puede llegarse incluso a la saturación completa del talud durante la lluvia.

Se pueden diferenciar deslizamientos diferidos por aumento de presión de poros, los cuales se relacionan con el régimen de aguas subterráneas el cual a su vez depende del régimen de lluvias del sitio y de la región. Se ha encontrado que existe un lapso entre la ocurrencia de las lluvias, el aumento de la presión de poros y los deslizamientos.

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. En zonas de pluviosidad moderada las lluvias lentas pueden producir el mayor número de deslizamientos. La proporción escorrentía- infiltración depende de la intensidad de la lluvia, la pendiente, la cobertura vegetal y la permeabilidad del suelo subsuperficial. En general se puede inferir que existe una relación directa entre las tasas pluviométricas y la susceptibilidad de los terrenos a la ocurrencia de deslizamientos, incrementándose dicha susceptibilidad en la medida que disminuye la cobertura

vegetal y aumenta la pendiente, asociándose de manera complementaria un incremento de la humedad de los suelos (Borrero & Corpocaldas, 2012).

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.

10.5.1.1.2 Resultados de los 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 22, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 22. Factores de seguridad resultantes de los análisis de amenaza en escenarios de lluvia.

Perfil	Bishop	Janbu	GLE	Final
A4	3,052	3,102	3,046	3,046
A5	2,936	2,962	2,925	2,925
A10	2,105	2,232	2,125	2,105
A11	5,399	5,523	5,392	5,392
B4	3,966	3,995	3,956	3,956
B5	3,484	3,516	3,474	3,474
B6	14,741	15,075	14,737	14,737
B7	3,613	3,699	3,601	3,601
B8	5,577	5,691	5,578	5,577
B9	3,84	3,952	3,838	3,838
B10	7,149	7,304	7,148	7,148

B11	5,322	5,434	5,319	5,319
B12	2,148	2,222	2,145	2,145
C4	9,303	9,666	9,295	9,295
C5	7,043	6,799	7,034	6,799
C6	4,285	4,444	4,274	4,274
C7	3,706	3,809	3,696	3,696
C8	3,662	3,768	3,655	3,655
C9	4,654	4,77	4,653	4,653
C10	3,41	3,374	3,406	3,374
C11	7,337	7,496	7,335	7,335
C12	4,339	4,369	4,336	4,336
D1	9,698	10,131	9,695	9,695
D4	5,726	5,564	5,713	5,564
D5	14,265	13,931	14,256	13,931
D6	2,956	2,949	2,944	2,944
D7	4,98	5,056	4,97	4,97
D8	2,6	2,657	2,594	2,594
D9	4,601	4,721	4,597	4,597
D10	4,85	4,942	4,843	4,843
D11	3,291	3,315	3,287	3,287
D12	4,192	4,275	4,185	4,185
E1	5,495	5,329	5,487	5,329
E2	4,82	4,777	4,811	4,777
E4	3,403	3,465	3,395	3,395
E5	6,997	6,908	6,986	6,908
E6	4,604	4,654	4,6	4,6
E7	4,712	4,802	4,705	4,705
E8	2,607	2,686	2,603	2,603
E9	3,256	3,337	3,252	3,252
E10	4,196	4,269	4,19	4,19
E11	7,521	7,731	7,518	7,518
F2	4,731	4,761	4,717	4,717
F3	7,87	7,785	7,859	7,785
F4	3,368	3,413	3,359	3,359
F6	3,581	3,676	3,577	3,577
F7	2,696	2,752	2,691	2,691
F8	2,648	2,727	2,645	2,645

F9	4,467	4,657	4,472	4,467
G2	3,478	3,555	3,469	3,469
G3	2,352	2,394	2,344	2,344
G4	2,083	2,073	2,081	2,073
G5	3,295	3,311	3,292	3,292
H1	11,331	11,296	11,32	11,296
H2	8,011	8,165	8,008	8,008
H3	4,958	4,962	4,955	4,955
H4	1,772	1,798	1,766	1,766
H5	4,258	4,313	4,25	4,25
H6	14,706	15,62	14,703	14,703
I1	7,563	7,595	7,551	7,551
I2	9,981	10,022	9,976	9,976
I3	2,111	2,13	2,105	2,105
I4	1,922	1,914	1,917	1,914
I5	6,749	6,772	6,733	6,733
I6	7,624	7,697	7,62	7,62
J3	3,699	3,75	3,692	3,692
J4	4,375	4,471	4,369	4,369
J5	6,407	6,53	6,401	6,401
J6	19,822	19,284	19,817	19,284
K3	19,933	19,771	19,923	19,771
K4	6,886	7,029	6,883	6,883
K5	8,739	8,67	8,733	8,67
L3	10,626	10,624	10,616	10,616
L4	4,703	4,728	4,689	4,689
MINIMO	1,766			

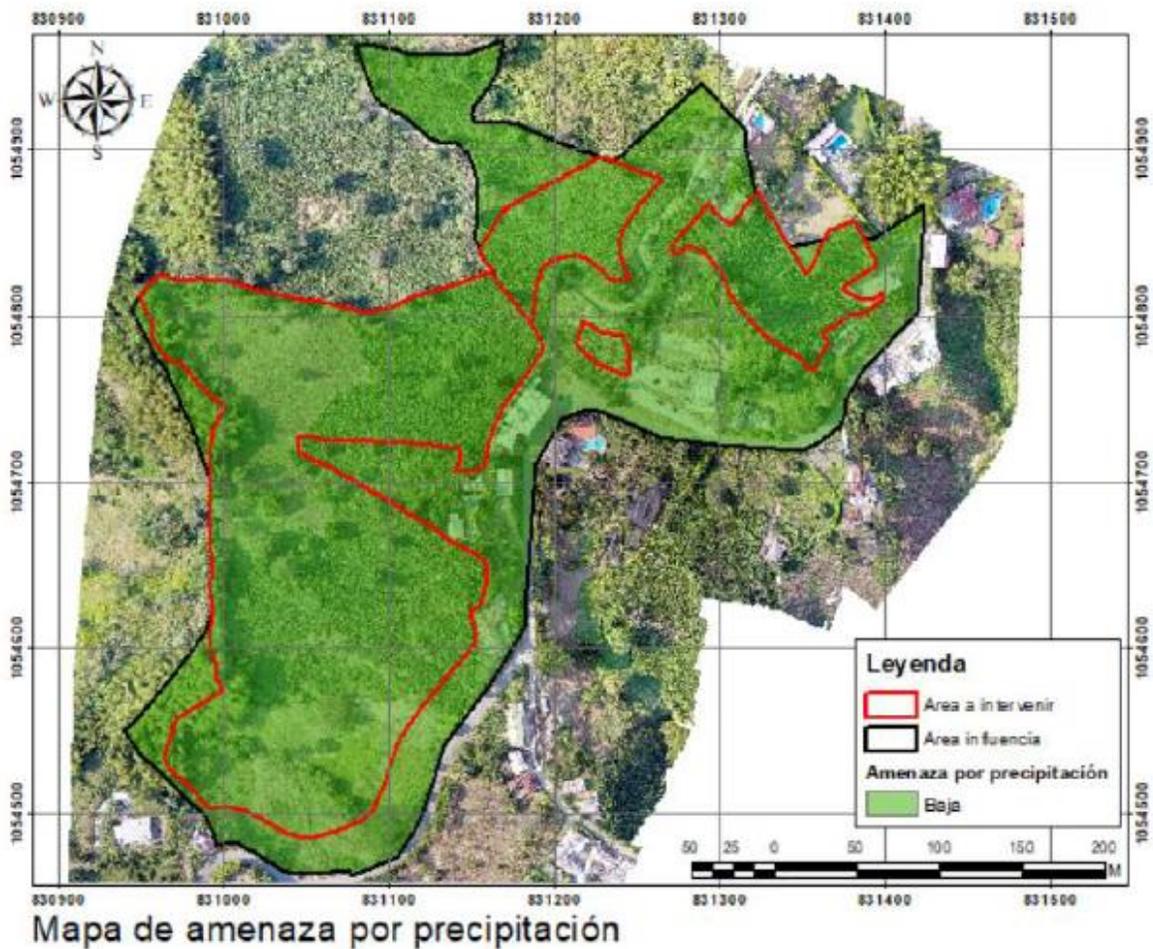
Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Dado que se tienen 75 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.

El factor de seguridad se reduce con respecto al que se encontró para una condición de agua normal como era de esperarse, sin embargo, el mínimo, sigue siendo estable y seguro, pues el factor de seguridad ahora es de 1,766.

De acuerdo a lo descrito anteriormente no se tiene amenaza media ni alta, sino que sólo baja.

Mapa 21. Mapa de amenaza por precipitación.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Baja: Laderas que cuando son sometidas a un escenario de lluvia, ocurre que el ascenso nivel de las aguas freáticas no ocasiona una sobrepresión de poros y no propician la inestabilidad.

10.5.1.2 Escenario de Sismo

La ocurrencia de un sismo ha sido un detonante importante de movimientos en masa en diferentes ambientes geológicos. 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).

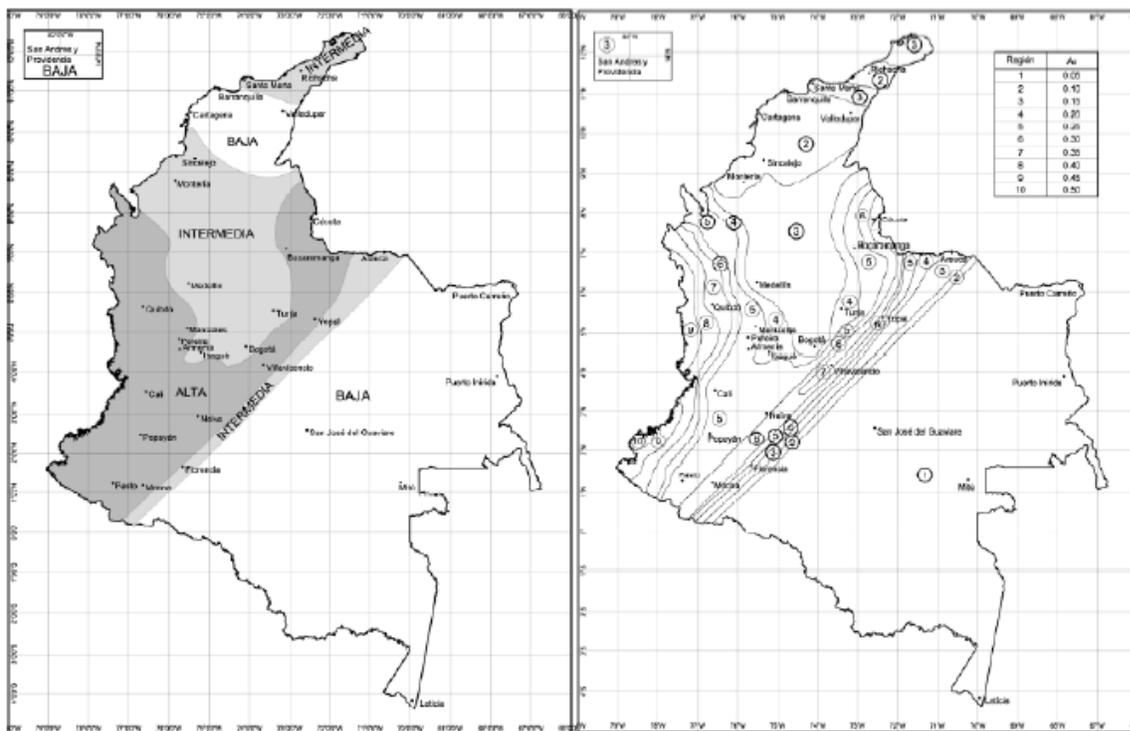
Cuando un sismo ocurre induce un movimiento del terreno que a menudo es suficiente para causar fallas a taludes que están marginalmente a moderadamente estables antes del sismo. Los daños resultantes pueden ser desde insignificantes a catastróficos dependiendo de la geometría y de las características del material que las conforman.

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.

La información sísmica será recopilada del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010) en especial lo contemplado en su título A: Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente.

El primer paso para definir los parámetros sísmicos es determinar los movimientos sísmicos de diseño, para ello se requiere conocer el coeficiente de aceleración pico horizontal del municipio en el cual se está ejecutando el proyecto. Este coeficiente es conocido como A_a y varía según si el municipio se localiza en una zona de amenaza sísmica alta, media o baja:

Figura 7. Mapas de zonificación por amenaza sísmica: Categorización en alta, media y baja (izquierda) y categorización según el valor de A_a (derecha).



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

Tabla 23. 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 23, se tiene entonces que, específicamente para el municipio de Manizales el coeficiente de aceleración pico horizontal (A_a) es 0.25.

El procedimiento para determinar la carga sísmica vertical y horizontal 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 24. Tipos de perfiles de suelo.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500 \text{ m/s}$
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 760 \text{ m/s}$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 360 \text{ m/s}$
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2)$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 180 \text{ m/s}$
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o $100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u \geq 50 \text{ kPa} (\approx 0.5 \text{ kgf/cm}^2)$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$180 \text{ m/s} > \bar{v}_s$
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	IP > 20 w \geq 40% $50 \text{ kPa} (\approx 0.50 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u$
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. 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 21. 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 los estratos encontrados se tiene que:

Tabla 25. 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	7,80	63,30	49,05	NO
2	17,73	56,57	56,90	NO
3	14,90	49,70	48,07	NO
4	10,40	43,35	55,13	NO

Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Ningún estrato es tipo E pues en ningún caso el IP es mayor a 20 y deben cumplirse las tres condiciones. Asimismo, ninguno es tipo C pues en ningún caso Su es mayor a 100. Por lo tanto, se considera que los suelos corresponden a perfiles tipo D.

Una vez conocidos el tipo de perfil de suelo y el coeficiente de aceleración pico horizontal, se pueden determinar los coeficientes F_a y F_v correspondientes a los valores de los períodos cortos e intermedios del espectro sísmico, respectivamente.

Tabla 26. Valores de F_a 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 27. Valores de F_v 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 F_a y F_v serán 1.30 y 1.90, respectivamente.

Paso a 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 D), el coeficiente de importancia será 1.00.

Para conocer la aceleración máxima horizontal se plantea que:

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

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.

$$a_{max}=1.30*1.00*0.25$$

$$a_{max}=0.325$$

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 K_{ST}/a_{max} dependiendo del tipo de material térreo (reforzado o no) y del tipo de análisis”:

Tabla 28. Valores de K_{ST}/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:

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

$$\frac{KST}{0,325} = 0,8$$

$$KST = 0,26$$

Al final se tiene que la carga sísmica usada en el modelamiento de amenaza con sismo será de 0,26 en la componente horizontal y de 0,13 en la vertical toda vez que la componente vertical se considera el 50% de la horizontal.

10.5.1.2.1 Resultados de los 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 siguientes resultados:

Tabla 29. Factores de seguridad resultantes de los análisis de amenaza en escenarios de sismo.

Perfil	Bishop	Janbu	GLE	Final
A4	1,977	1,996	1,964	1,964
A5	2,042	2,023	2,035	2,023
A10	1,676	1,736	1,668	1,668
A11	3,096	3,157	3,095	3,095
B4	2,555	2,5	2,541	2,5
B5	2,204	2,201	2,191	2,191
B6	40,498	41,865	40,498	40,498
B7	2,199	2,229	2,192	2,192
B8	2,971	3,022	2,97	2,97
B9	2,562	2,63	2,557	2,557
B10	3,77	3,829	3,768	3,768
B11	3,087	3,139	3,082	3,082
B12	1,837	1,907	1,864	1,837

C4	10,767	10,695	10,764	10,695
C5	3,777	3,654	3,764	3,654
C6	3,416	3,504	3,404	3,404
C7	2,4	2,396	2,393	2,393
C8	2,413	2,464	2,406	2,406
C9	3,562	3,638	3,559	3,559
C10	4,219	4,303	4,221	4,219
C11	3,533	3,6	3,531	3,531
C12	2,645	2,657	2,645	2,645
D1	9,208	9,427	9,202	9,202
D4	3,39	3,404	3,378	3,378
D5	28,178	28,949	28,177	28,177
D6	1,858	1,829	1,847	1,829
D7	2,643	2,648	2,637	2,637
D8	2,941	3,008	2,935	2,935
D9	3,054	3,122	3,055	3,054
D10	3,13	3,149	3,129	3,129
D11	2,217	2,237	2,216	2,216
D12	2,625	2,669	2,624	2,624
E1	3,174	3,153	3,159	3,153
E2	3,031	3,017	3,02	3,017
E4	2,112	2,11	2,109	2,109
E5	3,548	3,377	3,552	3,377
E6	2,643	2,609	2,645	2,609
E7	2,791	2,77	2,792	2,77
E8	1,918	1,944	1,914	1,914
E9	2,169	2,21	2,166	2,166
E10	2,583	2,609	2,584	2,583
E11	4,489	4,475	4,489	4,475
F2	2,902	2,934	2,893	2,893
F4	3,868	3,889	3,863	3,863
F5	2,169	2,363	2,23	2,169
F6	2,517	2,451	2,516	2,451
F7	1,942	1,965	1,937	1,937
F8	2,154	2,173	2,145	2,145
F9	3,805	3,608	3,804	3,608
G2	2,419	2,42	2,409	2,409

G3	1,534	1,538	1,528	1,528
G4	1,369	1,334	1,373	1,334
G5	2,19	2,162	2,188	2,162
H1	14,707	14,862	14,695	14,695
H2	4,157	4,135	4,155	4,135
H3	2,685	2,604	2,684	2,604
H4	1,271	1,261	1,271	1,261
H5	2,465	2,441	2,465	2,441
H6	37,053	36,152	27,053	27,053
I1	4,136	4	4,135	4
I2	4,251	4,239	4,254	4,239
I3	1,56	1,544	1,555	1,544
I4	1,35	1,339	1,351	1,339
I5	3,322	3,27	3,327	3,27
I6	3,402	3,46	3,4	3,4
J3	2,23	2,244	2,224	2,224
J4	2,449	2,485	2,445	2,445
J5	3,104	3,195	3,097	3,097
J6	3,671	3,705	3,672	3,671
K3	3,483	3,488	3,476	3,476
K4	3,429	3,417	3,429	3,417
K5	5,167	5,039	5,159	5,039
L3	12,904	13,291	12,897	12,897
L4	3,386	3,311	3,365	3,311
MINIMO	1,261			

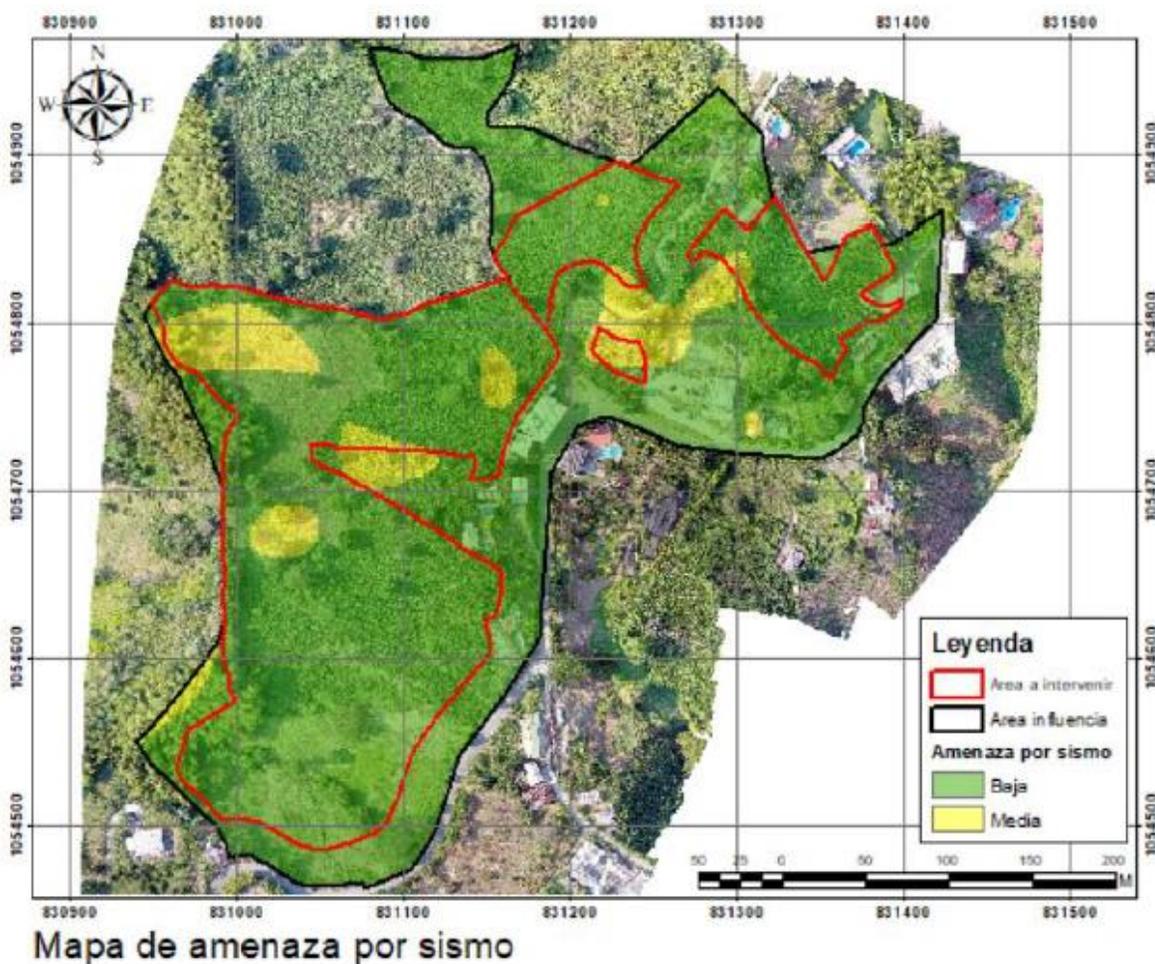
Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Dado que se tienen 75 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.

El escenario de sismo se torna más crítico para estos análisis de estabilidad pues el factor de seguridad mínimo obtenido es de 1,261, lo que implica que, ante un sismo de magnitudes similares a las máximas históricas, habría amenaza media y baja.

Es importante resaltar que en escenario de sismo se considera que una ladera es estable, en condiciones pseudoestáticas, cuando el factor de seguridad es mayor a 1,05, sin embargo, siendo estrictos con los lineamientos de la Guía Metodológica usada para estos modelamientos, no se discrimina sí es lluvia o sismo y simplemente se dice 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 22.

Mapa 22. Zonificación de la amenaza en escenario de sismo



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Baja: Laderas que cuando son sometidas a un escenario de sismo, ocurre que las cargas horizontales y verticales ocasionadas por la propagación de las ondas de un terremoto no son lo suficientemente altas para desestabilizarlas.

Media: Laderas que cuando son sometidas a un escenario de sismo, ocurre que las cargas horizontales y verticales ocasionadas por la propagación de las ondas de un terremoto generar un cierto grado de inestabilidad expresada en una posible descompactación de suelos por reacomodación de las partículas que componen los suelos o generar posibles fracturas, pero no llegan a producir colapso.

10.5.1.3 Análisis bajo escenario crítico de lluvia y sismo simultáneos

Con el ánimo de considerar un escenario crítico, se han combinado ambos 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 siguientes resultados:

Tabla 30. Factores de seguridad resultantes de los análisis de amenaza en escenarios de lluvia y sismo.

Perfil	Bishop	Janbu	GLE	Final
A4	1,833	1,845	1,823	1,823
A5	1,797	1,796	1,794	1,794
A10	1,415	1,466	1,408	1,408

A11	2,719	2,777	2,716	2,716
B4	2,273	2,26	2,266	2,26
B5	2,037	2,032	2,026	2,026
B6	7,751	7,951	7,755	7,751
B7	2,066	2,098	2,056	2,056
B8	2,598	2,648	2,596	2,596
B9	2,262	2,324	2,256	2,256
B10	3,299	3,354	3,297	3,297
B11	2,607	2,655	2,605	2,605
B12	1,442	1,464	1,435	1,435
C4	5,379	5,364	5,358	5,358
C5	3,092	2,97	3,093	2,97
C6	2,523	2,549	2,508	2,508
C7	2,078	2,096	2,067	2,067
C8	2,129	2,176	2,123	2,123
C9	2,935	2,992	2,932	2,932
C10	3,407	3,372	3,403	3,372
C11	3,067	3,134	3,067	3,067
C12	2,287	2,295	2,285	2,285
D1	5,067	5,207	5,501	5,067
D4	2,901	2,767	2,898	2,767
D5	14,265	13,931	14,256	13,931
D6	1,699	1,689	1,689	1,689
D7	2,345	2,361	2,338	2,338
D8	1,651	1,677	1,644	1,644
D9	2,603	2,664	2,598	2,598
D10	2,687	2,701	2,685	2,685
D11	1,903	1,911	1,904	1,903
D12	2,203	2,237	2,199	2,199
E1	2,803	2,721	2,8	2,721
E2	2,533	2,459	2,532	2,459
E4	1,811	1,829	1,809	1,809
E5	3,046	3,009	3,044	3,009
E6	2,322	2,333	2,318	2,318
E7	2,33	2,348	2,325	2,325
E8	1,685	1,71	1,68	1,68
E9	1,901	1,939	1,899	1,899

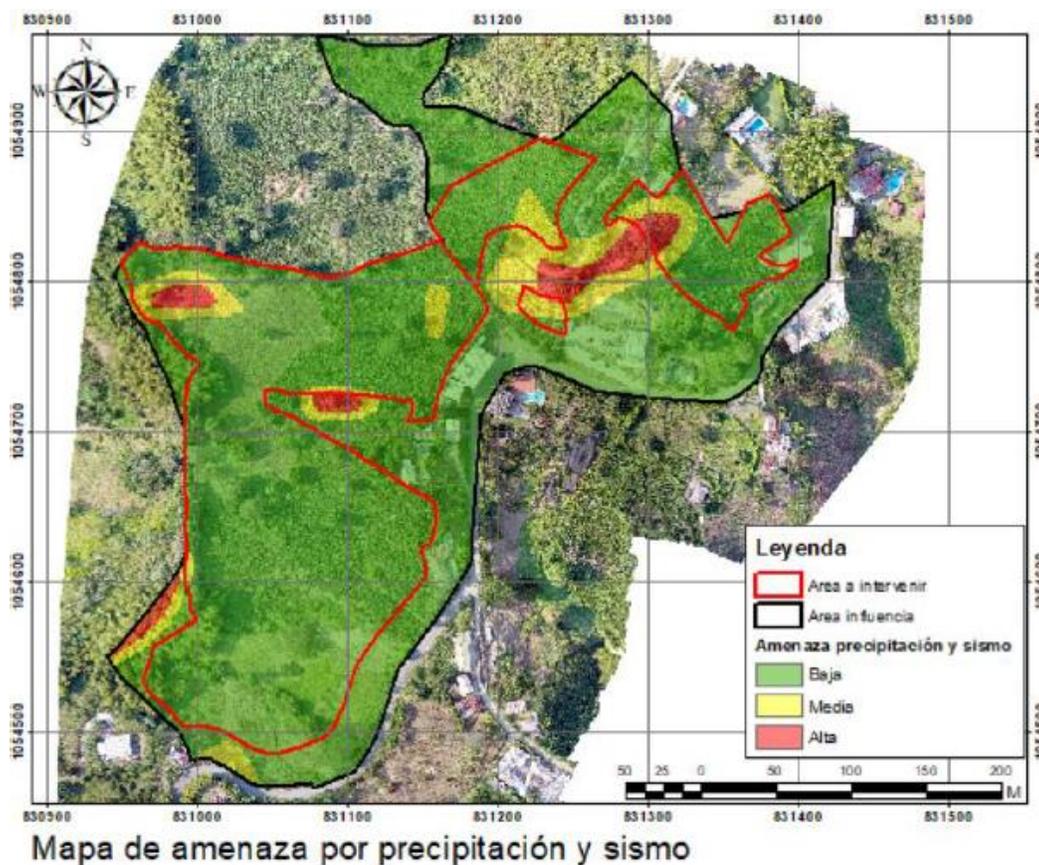
E10	2,274	2,296	2,274	2,274
E11	3,759	3,823	3,753	3,753
F2	2,676	2,66	2,669	2,66
F3	3,091	3,14	3,088	3,088
F4	1,775	1,784	1,776	1,775
F5	1,787	1,919	1,805	1,787
F6	2,079	2,086	2,075	2,075
F7	1,71	1,723	1,706	1,706
F8	1,754	1,765	1,748	1,748
F9	2,599	2,574	2,592	2,574
G2	2,117	2,125	2,111	2,111
G3	1,403	1,407	1,401	1,401
G4	1,199	1,164	1,199	1,164
G5	1,89	1,87	1,889	1,87
H1	5,53	5,411	5,524	5,411
H2	3,137	3,174	3,131	3,131
H3	2,331	2,36	2,33	2,33
H4	1,113	1,099	1,113	1,099
H5	2,034	2,026	2,036	2,026
H6	8,401	8,648	8,394	8,394
I1	3,463	3,301	3,471	3,301
I2	3,608	3,606	3,605	3,605
I3	1,312	1,285	1,308	1,285
I4	1,177	1,155	1,178	1,155
I5	2,794	2,802	2,797	2,794
I6	3,221	3,281	3,218	3,218
J3	2,104	2,13	2,099	2,099
J4	2,297	2,332	2,295	2,295
J5	3,101	3,145	3,094	3,094
J6	7,365	7,228	7,363	7,228
K3	7,29	6,987	7,288	6,987
K4	3,221	3,279	3,215	3,215
K5	3,927	3,866	3,925	3,866
L3	5,274	5,274	5,261	5,261
L4	2,804	2,729	2,791	2,729
	MINIMO			1,099

Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Dado que se tienen 75 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.

El escenario de sismo se torna más crítico para estos análisis de estabilidad pues el factor de seguridad mínimo obtenido es de 1,099, 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, media y baja como se muestra en el Mapa 23.

Mapa 23. Zonificación de la amenaza en escenario de lluvia y sismo.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Baja: Laderas que cuando son sometidas simultáneamente a lluvia y sismo, las cargas ocasionadas por la sobrepresión de poros y por la propagación de ondas sísmicas, no son suficientes para propiciar la inestabilidad.

Media: Laderas que cuando son sometidas simultáneamente a lluvia y sismo, las cargas ocasionadas por la sobrepresión de poros y por la propagación de ondas sísmicas, alcanzan a reconfigurar la estructura interna de los materiales y a modificar algunas propiedades geomecánicas como el grado de saturación y la relación de vacíos, entre otras, pero no son suficiente para generar un colapso.

Alta: Laderas que cuando son sometidas simultáneamente a lluvia y sismo, las cargas ocasionadas por la sobrepresión de poros y por la propagación de ondas sísmicas, son lo suficientemente influyentes como para hacer que haya colapso.

11. Discusión

Los resultados obtenidos en la elaboración de este estudio permiten analizar la amenaza en diferentes escenarios, los cuales contemplan los factores detonantes: que en este caso son lluvia y sismo, adicional a esto, se evalúa en un escenario combinando los factores antes mencionados. Con la finalidad de identificar la amenaza y obtener el resultado del factor de seguridad y definir la amenaza por movimientos en masa, es importante tener en cuenta las propiedades geomecánicas de los suelos como lo son su espesor, ángulo de fricción, cohesión y peso unitario, además, se tienen en cuenta las condiciones topográficas del terreno ya que con estas se definen las geoformas que componen el área de interés.

Durante todo el proceso se recolecta información preliminar, encontrando cierta ambigüedad en datos geológicos para las unidades presentes ya que la escala de trabajo disponible para el público es 1:100.000, pese a esto y con las evidencias encontradas en campo además de los conocimientos de las características geológicas y litológicas de la región, se definen y asocian las unidades de suelo encontradas a partir de las características de los suelos encontrados, que se asocian a rocas de composición básica y, que a su vez, mostraron evidencias de Saprolito con estructura pertenecientes a rocas metamórficas.

Esta situación, nos lleva a contemplar dentro de los estándares cartográficos del país poder entrar a definir unidades de manera más detallada, evitando estos sucesos, además de homogenizar las planchas cartográficas para las diferentes regiones y/o municipios de Colombia.

Cabe resaltar que los conocimientos adquiridos y correlaciones previas son de vital importancia para poder definir las unidades litológicas. Finalmente, y de acuerdo a todas las características que permiten definir la amenaza y susceptibilidad frente a movimientos en masa se puede resaltar que: en primer lugar las condiciones actuales no son propicias para generar movimientos en masa y, en segundo lugar; al evaluar las condiciones en escenarios críticos permite focalizar los puntos de mayor amenaza para priorizarlos, permitiendo mitigar posibles movimientos en masa, que de acuerdo a la complejidad que se tenga en el terreno se pueden brindar pequeñas o grandes acciones de corrección.

12. Conclusiones

Se identifica, describe y caracteriza la unidad geológica del área de estudio. la cual corresponde a los esquistos cuarzo – sericíticos con grafito (Kies) y esquistos anfibólicos, que se encuentran cubiertos por una capa de ceniza volcánica, la cual se diferencia en 2 capas, la primera capa se asocia al Set II, del cual se define una subdivisión en Set IIA y IIB, donde en este caso específico corresponde al Set IIA, el cual es tiene niveles de ceniza media a fina de colores pardos con presencia ocasional de pómez; la segunda capa se correlaciona con el Set III definido por Aguirre y Dunoyer (1997), se caracteriza por presentar potentes capas de ceniza fina, de color abano a grisáceo con alto contenido de humedad, lo cual es correspondiente con que se tengan partículas más arenosas inmersas en un estrato de características muy similares al inmediatamente suprayacente y de color gris.

Se evidencian 5 procesos erosivos, dos en el área de influencia, de los cuales se encuentra un movimiento en masa tipo deslizamiento de subtipo rotacional situado sobre el comando de policía, aparentemente se encuentra inactivo, pero si no se toman las medidas correctivas adecuadas este podría reactivarse. El segundo corresponde a un agrietamiento del suelo el cual se ha producido por erosión pluvial, en donde corre un pequeño cauce; y tres fuera de la zona estudiada no teniendo afectación directa en ella, estos son: dos deslizamientos de magnitud pequeña que se encuentran inactivos y una reptación que se ha generado por efecto del ganado.

De los mapas de pendientes y curvatura además del reconocimiento en campo se pudo interpretar que en el área de influencia predominan las pendientes con ángulos entre 15° y 27°, pero aun así

en el área también se encuentran pendientes entre 28° y 37° , siendo clasificada con base en su inclinación como abrupta; igualmente dentro de la zona estudiada predominan las formas convexas sobre las cóncavas, pero teniendo en cuenta que su proporción es muy similar.

Se define que los suelos estudiados son de humedad variable considerando que el nivel de aguas freáticas varía en profundidad según el sitio de análisis y estos se categorizan como suelos finos de tamaño limo cuyo contenido de humedad es variable y sus clasificaciones oscilan entre ML y MH, también se tiene un caso OL que es el correspondiente al material orgánico y en el cuarto estrato, hay cierta tendencia a que en algunos lugares tenga clasificación de SM.

Al analizar el factor de seguridad mínimo, de los 75 perfiles analizados, hace que todos los sitios sean estables a la vez que seguros, pues para condiciones estáticas el mínimo de factor de seguridad admitido es de 1.5 y se obtuvo un valor de 2.047, por tal razón la susceptibilidad a los movimientos en masa es baja en la totalidad del área de influencia además, se puede apreciar que el factor de seguridad se reduce con respecto al que se encontró para una condición de agua normal, sin embargo, el mínimo, sigue siendo estable y seguro, pues el factor de seguridad es de 1,766.

Se combina el escenario de lluvia y sismo en uno solo para estudiar la amenaza desde un escenario crítico, obteniendo un incremento de la amenaza teniendo un valor de factor de seguridad de 1,099 implicando 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, media y baja, esto

permite identificar las zonas que presentan amenaza alta para priorizarlas y realizar las respectivas intervenciones geotécnicas para así, evitar futuros deslizamientos.

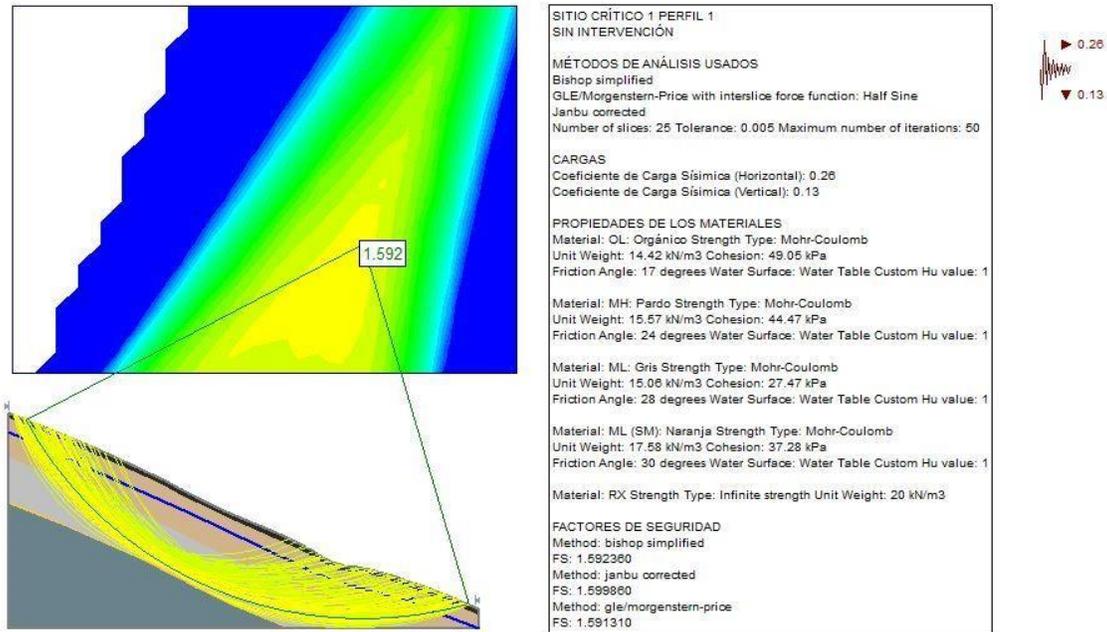
13. Recomendaciones

Es de vital importancia implementar los estudios detallados de amenaza cuando se plantea llevar a cabo la ejecución y/o construcción de viviendas, ya que esto permite evitar futuras catástrofes y riesgo para las poblaciones, además; las autoridades gubernamentales como las educativas, pueden vincularse y generar una cartografía más detallada para definir estas zonas para la ciudad de Manizales y en su respectivo caso para el país.

El estudio de la dinámica que conforma los movimientos en masa es una tarea que se debe priorizar para el municipio de Manizales, debido a las características topográficas que se identifican en la ciudad, esto con el fin de mitigar riesgos y definir las zonas de expansión urbana, como para el caso de este estudio, en el corregimiento el Remanso vereda La Cabaña se deben tener priorizadas las zonas que dieron como resultado una amenaza alta en escenario crítico para así evitar futuros desastres.

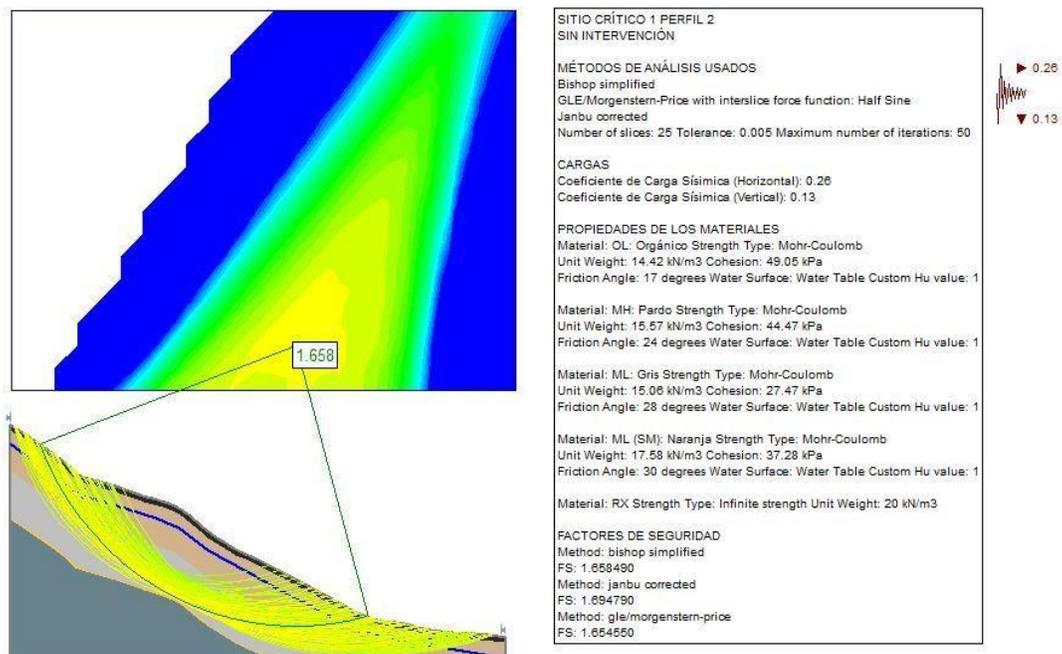
14. Anexos

Figura 8. Perfil de análisis 1 en el sitio crítico 1



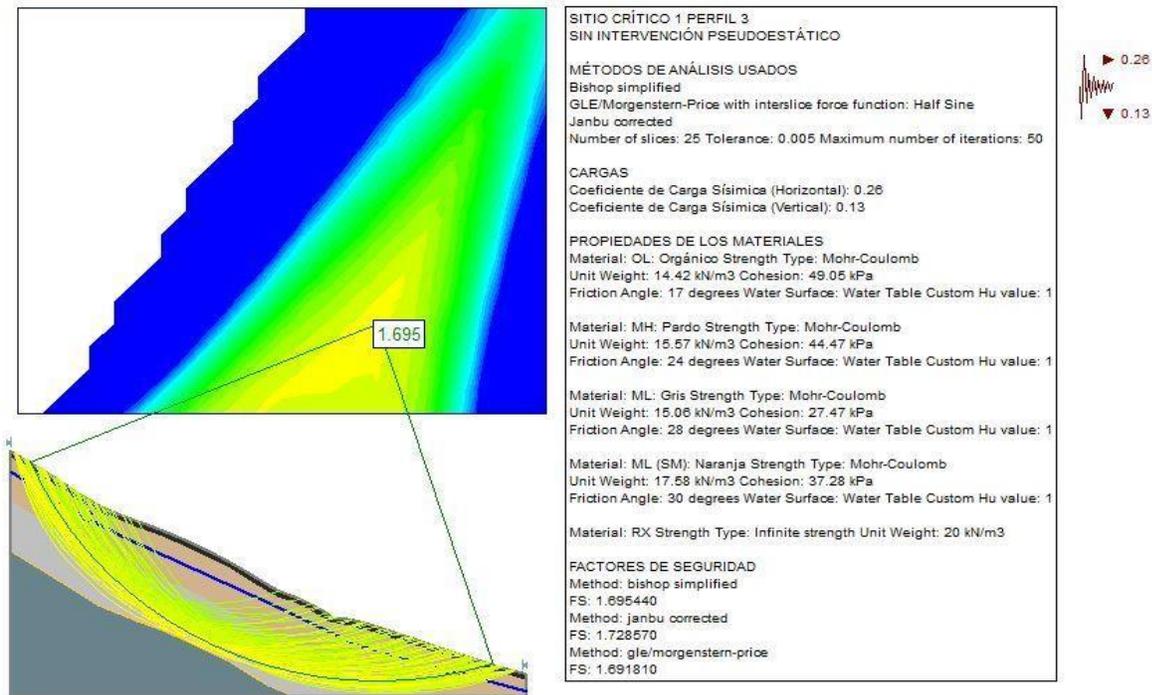
Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Figura 9. Perfil de análisis 2 en el sitio crítico 1.



Fuente: Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Figura 10. Perfil de análisis 3 en el sitio crítico 1.



Fuente:

Zenit - Ingeniería y Consultoría. (2020)

Los factores de seguridad cumplen con los mínimos establecidos por la NSR-10. La zona como tal está en amenaza alta, a pesar de ello, los perfiles detallados de análisis de esa cicatriz se muestran estables, recalando que esta condición es sin edificaciones o alteraciones en el terreno ya que los procesos constructivos de estas viviendas pueden tornar inestable la ladera además, que el peso de las casas puede contribuir a la inestabilidad.

15. Bibliografía

Alcaldía de Manizales. (2013). REVISIÓN GENERAL DEL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE MEDIANO Y LARGO PLAZO EN EL MUNICIPIO DE MANIZALES. COMPONENTE RURAL DIAGNOSTICO CORREGIMIENTOS MUNICIPIO DE MANIZALES. Manizales: Alcaldía de Manizales.

Alcaldía de Manizales, Diana Marcela Villada Marín. (2013). Componente Rural Diagnóstico Corregimientos municipio de Manizales. Manizales: Alcaldía de Manizales.

Borrero, C. A., Parra, Y. A., & Ospina, J. C. (2006). Origen del Depósito Freatomagmático de La Cabaña, Cuenca Baja del Río Chinchiná, Caldas Colombia. Boletín de Geología, UIS, 28(1), 11. Obtenido de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/3319/3505>

Borrero, C., & Corpocaldas. (2012). Contrato Corpocaldas No. 089. Manizales.

Carvajal, J. H. (2011). Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia. Bogotá: INGEOMINAS.

Cenicafé. (Agosto de 30 de 2019). Agroclima. Obtenido de Cenicafé: <https://agroclima.cenicafe.org/web/guest/registros-historicos>

Corpocaldas & Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. (2014). Plan de ordenación y manejo ambiental de la cuenca del río Chinchiná en el departamento de Caldas POMCA. Manizales.

Gómez Tobón, L., & Aristizábal Arias, J. (2002). Obtención de curvas de Intensidad - Frecuencia - Duración para el Departamento de Caldas. Medellín: Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C: República de Colombia.

Servicio Geológico Colombiano. (2017). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por remoción en masa. Bogotá: Ministerio de Minas.

Servicio Geológico Colombiano. (2017). Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1: 25.000. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.

SGC. (2001). Geología de la plancha 205 Chinchiná. INGEOMINAS, 93.

SGC. (2012). Propuesta Metodológica Sistemática para la Generación de Mapas Geomorfológicos Analíticos aplicados a La Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:100.000. Bogotá: SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO.

Aprobado por

Santiago Cano B