

**ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE TALUDES PARA UN PUNTO CRITICO
POTENCIALMENTE AFECTADO POR MOVIMIENTOS EN MASA EN UN
SECTOR DEL BARRIO EL ZAFIRO EN EL MUNICIPIO DE PEREIRA-
RISARALDA, REALIZADO EN LA PRACTICA ACÁDEMICA EN ZENIT
INGENIERIA Y CONSULTORIA.**

Trabajo de grado presentado para optar el título de Geólogo de

YORDANO DI DAJOME ESTACIO

ID: 6223

UNIVERSIDAD DE CALDAS

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

PROGRAMA DE GEOLOGÍA

MANIZALES

2023

**ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE TALUDES PARA UN PUNTO CRÍTICO
POTENCIALMENTE AFECTADO POR MOVIMIENTOS EN MASA EN UN
SECTOR DEL BARRIO EL ZAFIRO EN EL MUNICIPIO DE PEREIRA-
RISARALDA, REALIZADO EN LA PRACTICA ACÁDEMICA EN ZENIT
INGENIERIA Y CONSULTORIA.**

YORDANO DI DAJOME ESTACIO

Trabajo como requisito para optar al título de:

Geólogo

DIRIGIDO POR

SANTIAGO CANO BEDOYA

Geólogo-Ingeniero Civil

Especialista en Geotecnia

MSc. Ciencia de la Tierra: Énfasis en Geología Ambiental

UNIVERSIDAD DE CALDAS

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

PROGRAMA DE GEOLOGÍA

MANIZALES

2023

NOTA DE APROBACIÓN

APROBADO

Santiago Cano B

Santiago Cano Bedoya

Director Académico

Manizales, 2023

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, por permitir que este servidor hoy este culminando un sueño que hace mucho tiempo se anhelo, así mismo, agradecer a Dios por darme a mis padres (*Florentino Dajome y Pascuala Estacio*) y hermanos, porque con la ayuda de ellos fue más fácil obtener este logro.

De manera muy especial agradezco enormemente a mi hermano, *Din Rafael Solís Estacio*, por haber estado siempre en el proceso de mi formación, como sujeto son cosas que nunca olvidaré.

También agradezco a cada uno de los compañeros y amigos en especial a *Angie Liseth Rosero Pazmiño, Daniela Grajales Gil y Zayda Cáceres* por darme su amistad, aceptarme y brindarme su apoyo cuando necesite de ellos, solo me basta decir, marcaron un antes y un después en mi vida como persona y más una como profesional.

Agradezco a mi director de práctica *Santiago Cano Bedoya*, por su amistad y compañerismo, por su disposición y entrega, durante y después del proceso de formación como practicante, también por permitir la realización de la pasantía en su empresa y por darme ese voto de confianza en la misma.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	9
2. Objetivos	10
2.1 OBJETIVO GENERAL	10
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3. Localización	11
4. Marco Teórico	13
5. Marco Normativo	21
6. Contexto Geológico.....	23
6.1 MARCO GEOMORFOLÓGICO.....	23
6. 2 GEOLOGÍA REGIONAL.....	27
7. Metodología.....	33
7.1 ETAPA 1: TRABAJO DE CAMPO.....	33
7.2 ETAPA 2: RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	33
7.3 ETAPA 3: PROCESAMIENTO DE DATOS	34
7.4 ETAPA 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LABORATORIO.....	35
7.5 ETAPA 5: DETERMINACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA.....	35
7.6 ETAPA 6: CARACTERIZACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD POR MOVIMIENTO EN MASA.....	36
8. Resultados	37
8.1 ETAPA 1: TRABAJO DE CAMPO.....	37
8.1.1 <i>Estratigrafía</i>	37
8.2 ETAPA 2: RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	51
8.2.1 <i>Geología Local</i>	51
8.2.2 <i>Geología Estructural</i>	52
8.2.3 <i>Geomorfología a nivel de elementos</i>	53
8.3 ETAPA 3: PROCESAMIENTO DE DATOS	59
8.4 ETAPA 4: ANÁLISIS DE LABORATORIO	62
8.5 ETAPA 5: DETERMINACIÓN DE LA AMENAZA, CARACTERIZACIÓN Y ZONIFICACIÓN LA VULNERABILIDAD, SUSCEPTIBILIDAD Y RIESGO.	68
8.6 ETAPA 6. CARACTERIZACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD POR MOVIMIENTO EN MASA.....	85
8.6.1 <i>Identificación y localización de los elementos expuestos</i>	85
8.6.2 <i>Caracterización de los elementos expuestos</i>	85
8.6.3 <i>Fragilidad</i>	89
8.6.4 <i>Escenarios de vulnerabilidad</i>	91
8.6.5 <i>Cálculo y zonificación de la vulnerabilidad</i>	94
8.6.6 <i>Caracterización y zonificación del riesgo</i>	95
9. Discusión	97
10. Conclusión.....	98
11. Recomendación	101
12. Referencias	102

LISTA DE FIGURAS

figura 3.1 Mapa de localización del Municipio de Pereira	11
figura 3.2 Localización general del sitio de interés ubicado al E de la cabecera municipal	12
figura 3.3 Localización específica de los sitios de interés.	12
figura 4.1 Bloque diagrama con las partes de un deslizamiento	18
figura 6.1 Jerarquización geomorfológica. carvajal (2008).	23
figura 6.4 Mapa de geología regional del municipio de pereira (risaralda)	32
figura 8.1 Localización de las perforaciones	37
figura 8.2 Esquema representativo del perfil del suelo.....	38
Figura 8.3 Formato modificado para inventario de movimiento en masa (versión 2012 para el proyecto multinacional Andino.	38
descripción de las perforaciones:.....	39
Figura 8.4 Mapa de Unidades Geológicas Superficiales	52
Figura 8.5 Egeomorfológico del área de influencia.....	58
Figura 8.6 Modelo de Elevación Digital del terreno (tin).....	59
Figura 8.7 Mapa de pendiente del área de influencia	60
Figura 8.8 Mspectro elástico de aceleraciones	67
Figura 8.9 Espectro elástico de velocidad	67
Figura 8.9 Espectro elástico de desplazamientos	68
Figura 8.10 Localización de los perfiles de análisis	72
Figura 8.11 Mapa de Zonificación de la amenaza por movimiento en masa.....	84
Figura 8.12 Zonas de exposición de los elementos expuestos.	88
Figura 8.13 Mapa de Zonificación de la Vulnerabilidad por movimientos en masa	95
Figura 8.14 Mapa de Zonificación del Riesgo por movimiento en masa	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Clasificación de los Deslizamientos Varnes (1978).....	16
Tabla 6.1 Provincias Geomorfológicas (adaptado de SGS, 2012).....	24
Tabla 7.1 Caracterización de Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza según los factores de Seguridad.	36
Tabla 8.1 Distribución de Sondeos dentro del áreas de Influencia.	49
Tabla 8.2 Grado de dificultad de las Excavaciones	50
Tabla 8.1 Rangos de Relieve Relativo	54
Tabla 8.2 Rangos de Inclinación de la Ladera	54
Tabla 8.3 Rangos de Longitud de ladera	55
Tabla 8.4. Movimientos en Masa asociado de acuerdo a la forma de la Ladera.....	56
Tabla 8.5 Resumen características Geomorfológicas del área de estudio.....	58
Tabla 8.6 Clasificación de las Pendientes.....	61
Tabla 8.7 Distribución de las pendientes en el área de Estudio (área en m ²).....	62
Tabla 8.8 Propiedades Geomecánica estrato pardo.	62
Tabla 8.9 Propiedades Geomecánica estrato naranja.....	63
Tabla 8.10 Valores de Aa y Av para los municipios de Risaralda NSR-10.....	64
Tabla 8.11 Coeficientes espectrales de Diseño para la ciudad de Pereira.....	64
Tabla 8.12 Clasificación del perfil de Suelo.....	65
Tabla 8.13 Consideraciones para establecer si un estrato de suelo se clasifica como perfil tipo E según sus propiedades Geomecánicas	65
Tabla 8.14 Coeficientes espectrales para Diseño.....	66
Tabla 8.15 Valores de Kst/Amx mínimos para análisis Pseudoestáticos de taludes.....	70
Tabla 8.16 Factores de seguridad mínimos.....	71
Tabla 8.17 Categorías de Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza según los Factores de Seguridad. .	73
Tabla 8.18 Factores de Seguridad resultantes de los Análisis de Estabilidad.....	83
Tabla 8.19 Identificación de Elementos Expuestos.	85
Tabla 8.20 Factor de Fragilidad por Tipología de la Estructura	90
Tabla 8.21 Factor de Fragilidad por Altura de la Edificación.....	90
Tabla 8.22 Factor e Fragilidad por Estado de Conservación de la Edificación	90
Tabla 8.23 Factor de Fragilidad por Edad de la Edificación.....	91

Tabla 8.24 Relación Presión de impacto de Deslizamiento / Presión Horizontal Límite de Estructura.	92
Tabla 8.25 Relación profundidad del Deslizamiento / Altura de la Edificación.....	93
Tabla 8.26 Clasificación de la Vulnerabilidad	94
Tabla 8.27 Regla de decisión para El Riesgo	96

1. Introducción

El análisis de estabilidad de talud es importante en la realización de proyectos o la construcción futura de una obra ingenieril, por ende, si no tiene en cuenta estudios de estabilidad estas zonas podrían representar riesgo y en lo peor de los casos presentar pérdidas de vidas humanas e infraestructuras circundantes.

El presente trabajo se realiza en el municipio de Pereira (Risaralda), específicamente a un costado del Conjunto Residencial Mirador del Zafiro, en donde se identificó un punto crítico que compromete la estabilidad y correcto funcionamiento del sistema de alcantarillado del sector por un movimiento en masa que lo hizo colapsar. Para realizar dicho estudio se ejecuta una investigación geomecánica de suelo detallada específicamente para el punto crítico mencionado que dará cuenta de cuáles, y cuantos materiales aparecen en la zona de estudio, cuáles son sus propiedades geotécnicas, que cimentación se puede recomendar a partir de sus condiciones particulares. De igual forma se plantearán una serie de alternativas que contribuyan a la estabilidad y seguridad de población e infraestructura.

Para tal propósito se exponen los resultados del “estudio detallado de estabilidad para un punto crítico en el sector del barrio el Zafiro, municipio de Pereira-Risaralda” realizado en la empresa Zenit Ingeniería y Consultoría S.A.S, en el cual se presentan estudios detallados de cartografía geológica y geomorfológica representativa a escala 1:500, en adición se generan e interpretan análisis de estabilidad con el fin de obtener factores de seguridad utilizando métodos determinísticos para definir, analizar y calcular la amenaza que presenta el punto crítico.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

- Apoyar el equipo de geotecnia en la consultoría realizada del estudio detallado de estabilidad del punto crítico en el sector del barrio el Zafiro de Pereira-Risaralda.

2.2 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 de modelos geológico-geotécnicos de la zona de interés.
- Apoyar al equipo de geotecnia en los análisis de estabilidad de laderas.
- Apoyar al equipo de geotecnia en la generación de los mapas de zonificación de amenaza por remoción en masa a escala detallada.
- Procesar fotografías aéreas levantadas con drone para generación de insumos y fotointerpretación.
- Construir mapas digitales de geología, unidades geológicas superficiales, geomorfología a nivel de elementos, morfometría, morfodinámica.
- Apoyar la construcción de geodatabase con base en los términos de referencia de la ANLA.

3. Localización

Pereira, capital del departamento de Risaralda, es un municipio localizado a 4°49' de latitud norte, 75°42' de longitud este, en el centro de la región occidental del país, en un valle formado por un contra fuerte que se desprende de la cordillera central, se encuentra limitado al sur por el departamento del Valle del Cauca y del Quindío, al oriente por el departamento del Tolima y al occidente por el departamento del Valle del Cauca (Alcaldía de Pereira, 2020).

Figura 3.1 Mapa de localización del Municipio de Pereira



Figura 3.1 Mapa de localización del Municipio de Pereira, tomado de

Es el municipio más poblado de la región del eje cafetero con 488.839 habitantes, de los cuales el 84% se encuentran ubicados en el área urbana y el 16% en el área rural. Presenta una extensión geográfica de 702km² y altura promedio de 1411 msnm, con gran variedad en sus pisos térmicos, los cuales van desde nieves perpetuas (5200 msnm) hasta pisos cálidos (900msnm), por lo que presenta gran diversidad agrícola, Pereira se encuentra principalmente en un clima medio (60.7%), seguido por páramo (17.7%), frío (11.5%) y cálido (9.9%), con precipitaciones anuales de 2750mm y temperatura promedio de 21°, esta variedad climática favorece a riqueza paisajística de la región. (Alcaldía de Pereira, 2020).

Figura 3.2 Localización general del sitio de interés ubicado al E de la cabecera municipal

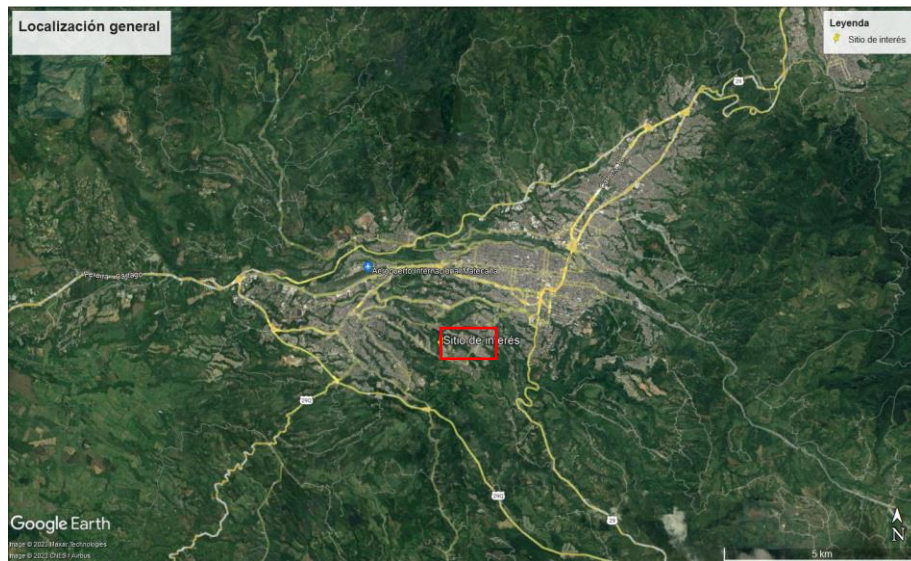


Figura 3.2 Localización general del sitio de interés ubicado al E de la cabecera municipal de Pereira, Tomado de Google Earth 2022- imagen satelital tomada en el año 2015.

Figura 3.3 Localización específica de los sitios de interés.

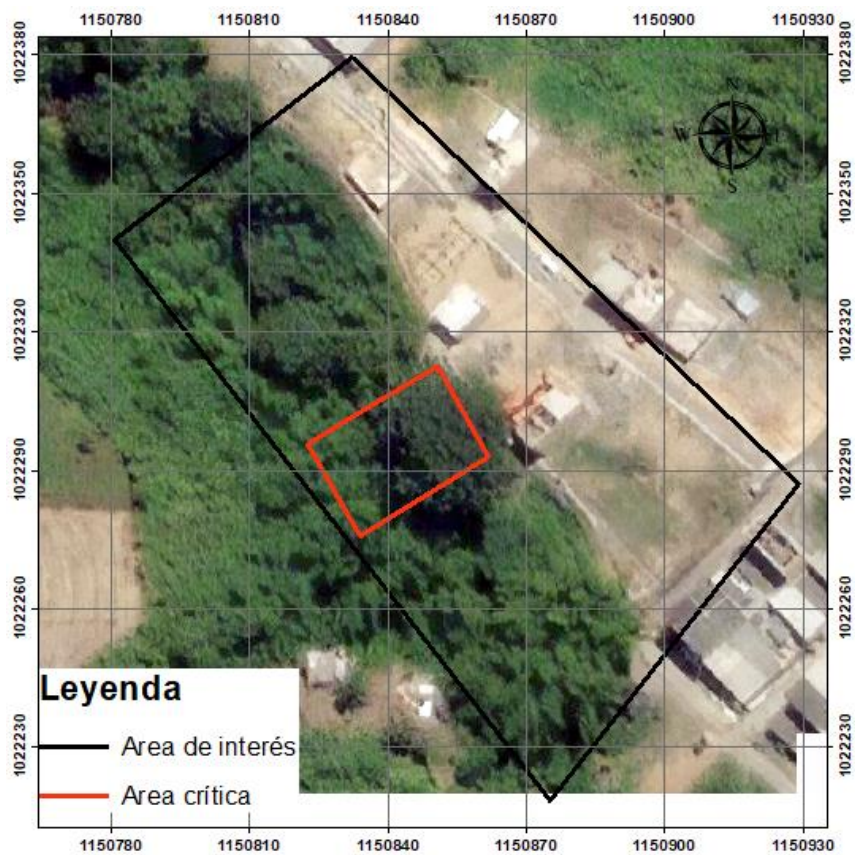


Figura 3.3 Localización específica de los sitios de interés, tomada de SAS Planet 2022 - imagen satelital tomada en el año 2020

4. Marco Teórico

La gestión del riesgo definida por la ley 1523 de 2012 (Congreso de la República de Colombia, 2012), está asociada con la planeación del desarrollo seguro, teniendo esto en cuenta, la gestión del riesgo de desastres comprende 3 componentes principales: el conocimiento del riesgo, la reducción del riesgo y el manejo de desastres, para llegar a determinar estas tres se hace necesario realizar un análisis de la amenaza y la vulnerabilidad como parte fundamental en la gestión del riesgo de desastres.

Por su parte el artículo 4 de la misma ley 1523, define la amenaza como un peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de modo accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales, así mismo define la vulnerabilidad como una susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos.

Ahora bien, se entiende el riesgo definido en la guía metodológica para estudios de amenaza vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa como la medida de la probabilidad y severidad de un efecto adverso a la vida, salud, propiedad o el ambiente, esto es equivalente a daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a eventos físicos peligrosos de origen natural, socio natural, o antrópico no intencional, en un periodo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente el riesgo es el derivado de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad, según la manera como se defina el elemento de riesgo, el riesgo puede medirse según la pérdida económica esperada, según el número de vidas perdidas o según la extensión del daño físico a la propiedad.

El presente trabajo trata de la estabilización de un punto crítico para un factor de riesgo por movimiento en masa, por tal razón se hace necesario entender dichos

procesos Hutchison (1968) menciona que los movimientos en masa son el desplazamiento de una masa de material a lo largo de una superficie de falla, el cual puede ser causado por la gravedad y otros factores externos tales como la humedad o la actividad sísmica, sin embargo Crozier (1986) define los movimientos en masa como un movimiento externo que tiene por agente de transporte el agua que impregna y dirige el material litológico pendiente abajo, por el contrario, Mougín (1973) describe el movimiento de terreno como el desplazamiento de suelo, roca u otros materiales en una pendiente, generalmente causado por la acción de la gravedad, las lluvias intensas o la actividad sísmica, sin embargo autores como Foucault y Raoult (1992) definen los movimientos en masa como un término global que designa todo movimiento más o menos rápido de material sobre una pendiente, no necesariamente por un agente de transporte como el agua.

Además, para una mayor comprensión del tema a tratar, es necesario entender la definición de ciertos términos tales como, ladera y talud:

En geología y geotecnia según Terzaghi (1948), un talud se refiere a una superficie inclinada o pendiente de un terreno o masa de roca, es la cara expuesta de una formación geológica o un corte en el suelo; a diferencia que Thornbury (1954) refiere a una pendiente o inclinación del terreno que se extiende desde la parte inferior hasta la parte superior de una colina, montaña o elevación similar, es una característica topográfica más amplia que puede incluir varias formas de relieve asociadas. No obstante, en la literatura técnica define como talud cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso artificial y ladera cuando su conformación tuvo un proceso natural.

Continuando con la comprensión de los movimientos en masa para tal propósito, es necesario recurrir al sistema propuesto originalmente por Varnes (1978), el cual utiliza el tipo de movimiento y la naturaleza del material. Es de mencionar que es una de las clasificaciones más comúnmente utilizadas:

Caída de roca (detrimento o suelo): En las caídas una masa de cualquier tamaño se desprende de un talud y de pendiente fuerte, a lo largo de una superficie, en la cual ocurre ningún o muy poco desplazamiento de corte y desciende principalmente a través del aire por caída libre, saltos o rodando Varnes (1978).

Inclinación o volteo (basculamiento): Es un fenómeno de rotación hacia adelante (afuera) de una masa de suelo o roca, alrededor de un punto o eje bajo el centro de gravedad de la masa desplazada, en algunas ocasiones este es causado por el empuje del material localizado ladera arriba y otras veces por el agua presente en las grietas Varnes (1978).

Deslizamiento: Un deslizamiento es un movimiento ladero debajo de una masa de suelos o rocas, que ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de ruptura o zonas relativamente delgadas de intensa deformación constante Varnes (1978).

- a) Deslizamiento rotacional: En un deslizamiento rotacional la superficie de falla es formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento.
- b) Deslizamiento traslacional: En este tipo de deslizamiento la masa se desliza hacia afuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo.

Esparcimiento lateral: Este tipo de movimiento hace énfasis a los movimientos con componentes principalmente laterales o de extensión lateral, y suele darse en taludes de baja pendiente, estos son muy comunes en los sedimentos glaciales y marinos, pero no lo son en las zonas de suelos tropicales residuales Varnes (1978).

Flujos: Se definen como los procesos que presentan una deformación continua e irreversible de material en respuesta a un esfuerzo Varnes (1978).

Generalmente el material que se moviliza se comporta como una masa viscosa cuyos movimientos intergranulares predominan sobre los movimientos a través de una superficie de ruptura Cruden & Varnes (1996).

Es de mencionar que estos movimientos en masa pueden ser de roca, detritos (residuos) suelo e incluso hasta de lodo, como es el caso de los flujos; a continuación, se presenta la tabla de clasificación de los deslizamientos según Varnes (1978).

Tabla 4.1 Clasificación de los deslizamientos Varnes (1978).

Tipo de movimiento		Tipo de material		
		Roca	Suelo	
			De grano grueso	De grano fino
Caídas		Caídas de roca	Caídas de detritos	Caídas de suelos
Basculamientos		Basculamiento de rocas	Basculamiento de detritos	Basculamiento de suelos
Deslizamientos	Rotacionales	Deslizamiento rotacional de rocas	Deslizamiento rotacional de detritos	Deslizamiento rotacional de suelo
	Traslacionales	Deslizamiento traslacional de roca	Deslizamiento traslacional de detritos	Deslizamiento traslacional de suelos
Separaciones laterales		Separación lateral en roca	Separación lateral en detritos	Separación lateral en suelos
Flujos		Flujos de rocas	Flujos de detritos	Flujos de suelos
Compuestos		Combinación de dos o más tipos		

Tabla 4.1 tabla donde se muestra la clasificación de los movimientos en masa por Movimiento de pendiente, tipo y procesos Varnes (1978)

No obstante movimiento en masa puede ser descrito en términos tanto específicos como generales según las características geomorfológicas de la masa desplazada y del terreno alrededor del movimiento, estos elementos han sido descritos por Varnes (1978) como:

Corona: Representa la parte superior del movimiento. Ella forma una línea límite entre la parte superior del terreno fallado (escarpe principal) y el terreno intacto. Comúnmente, presenta una forma o contorno semicircular o semi rectangular. Hacia la parte posterior de la corona, se pueden presentar las fisuras o grietas que son definidas como fisuras de corona.

Escarpe principal: es también llamado grada principal o cicatriz de arranque principal. Representa la superficie inclinada o vertical visible que contornea la parte

superior del movimiento. El escarpe principal indica el desplazamiento vertical del movimiento.

Superficie de ruptura principal: También llamada superficie de falla. Se desarrolla siguiendo la componente horizontal del movimiento. En los materiales arcillosos se presenta como una superficie pulida (espejo), con desarrollo de estrías paralelas a la dirección del movimiento.

Los flancos: Forman los límites laterales del movimiento. Ellos pueden ser definidos como derecho o izquierdo mirando hacia abajo desde la corona. En algunos casos, los flancos están conformados por escarpes que contienen otros movimientos satélites menores.

La masa desplazada o de deslizamiento comprende cuatro zonas morfológicas principales: El cuerpo principal, el pie, el frente y la pata.

Cuerpo principal. Representa la masa de deslizamiento que se localiza por encima de la superficie de falla o de ruptura. La parte superior se denomina cabeza, la cual generalmente desarrolla una depresión con pequeñas terrazas escalonadas limitadas por escarpes y contraescarpes secundarios. La parte inferior del cuerpo principal se denomina cuerpo. El cuerpo presenta una morfología deprimida de superficie más homogénea y con zonas pantanosas.

Pie: el pie representa la zona de material deslizado localizado en el límite inferior de la superficie de falla y la superficie inicial del terreno intacto. Generalmente, esta zona es la más estrecha del movimiento y desarrolla una morfología levantada y abombada con fisuras o grietas dispuestas radiales y transversalmente al sentido de movimiento.

Frente: Representa la zona inferior de la masa deslizada que reposa sobre el terreno intacto o in situ. Esta zona es por lo general la más viscosa y explanada. La forma de este depósito de material permite caracterizar el movimiento.

Pata: es la parte más baja del frente del movimiento. Adicionalmente la morfometría de los movimientos en masa resulta de importancia a la hora de caracterizarlos, estos aspectos hacen referencia a la forma de la superficie afectada, la longitud de ruptura, la longitud de desplazamiento, el ancho máximo, la profundidad máxima, la pendiente inicial, la pendiente después del movimiento, la altitud relativa, y el volumen

desplazado. En la figura 2 se puede observar una representación gráfica en un bloque diagrama realizado por Varnes (1978).

Figura 4.1 Bloque diagrama con las partes de un deslizamiento

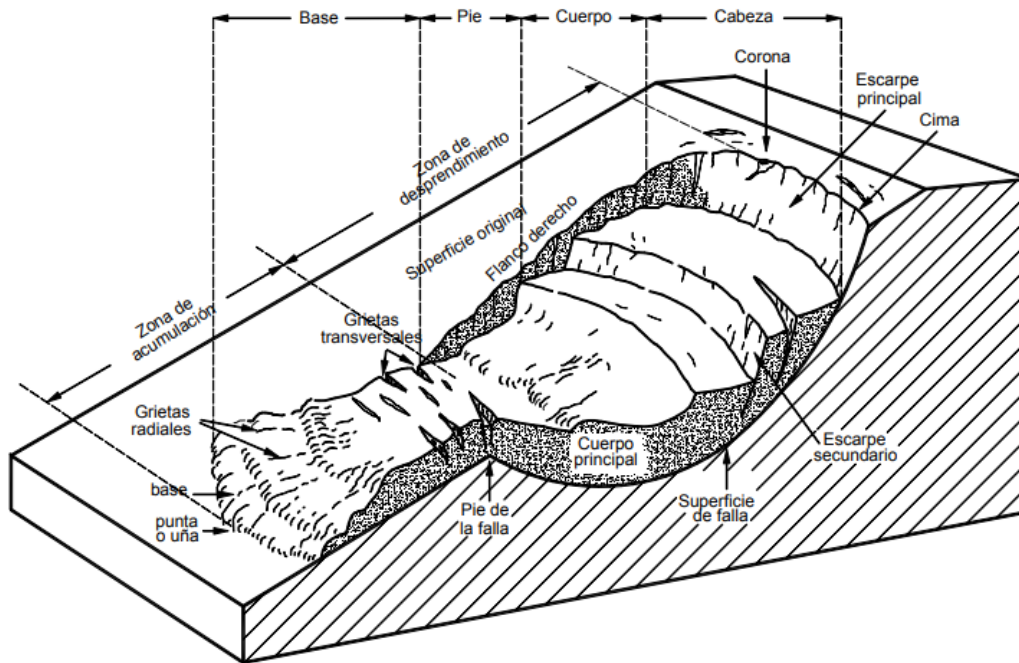


Figura 4.1 Bloque diagrama con las partes características de un deslizamiento, tomado de Varnes (1978)

Si bien los movimientos en masa pueden ocurrir bajo condiciones “normales” sobre el terreno, existen ciertos factores considerados como detonantes a la hora de la ocurrencia de estos fenómenos. Vargas (2000) denomina estos como agentes detonantes, los cuales se clasifican según su agente detonante en: Sismotectónicos, hidrológicos, meteorológicos y antrópicos.

Movimientos en masa de origen sismotectónico: La ocurrencia de un sismo asociado a una falla geológica, puede generar un gran número de movimientos en masa.

Movimientos en masa de origen hidrológico: las corrientes de agua superficial o subterránea, pueden constituir el agente detonante de los movimientos en masa.

Movimientos en masa de origen meteorológico: Las precipitaciones y los vientos huracanados pueden ser los agentes detonantes de movimientos en masa.

Movimientos en masa de origen antrópico: Los movimientos en masa pueden ser generados o inducidos por las actividades antrópicas.

Adicionalmente como causas de los movimientos en masa se tienen dos tipos de factores, los factores externos asociados a cortes en el terreno, efectos climáticos, sobrecargas, choques y vibraciones; y como factores internos se tienen las características texturales y mineralógicas de los materiales, el grado de alteración y meteorización, el grado de fracturamiento, cambios en el nivel freático y aumento de la presión de poros.

Por último, pero no menos importante esta la pendiente, que sin duda ha tenido significativa importancia en términos de formación, progreso y susceptibilidad de deslizamientos y es un parámetro de entrada en los estudios de susceptibilidad, complementando lo anterior la pendiente se entiende como la medida de la inclinación y es medida en grados con un rango ente 0° y 90° , donde 0° representa una superficie horizontal y 90° representa una superficie vertical (Yilmaz et al., 2012).

La pendiente se deriva de los modelos de elevación digital, los cuales representan visual y matemáticamente los valores de altura del terreno con respecto al nivel medio del mar. Estos modelos permiten caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Como bien se mencionó anteriormente dentro de los factores internos se tienen propiedades texturales de los materiales, ahora bien, no solo son propiedades texturales sino propiedades geomecánicas para cada uno de los materiales que interactúan en el deslizamiento.

Entendiendo el suelo como un sistema en el cual se distinguen 3 fases constituyentes: la sólida, la líquida y la gaseosa, la fase sólida son las partículas minerales del suelo, la líquida corresponde al agua libre y la fase gaseosa comprendida por el aire principalmente, cuando el agua invade los poros que contienen aire se considera entonces un suelo totalmente saturado (Duque & Escobar, 2016). Estas fases son fácilmente calculadas en términos de Peso y volumen, una vez conocidos los volúmenes se realizan diferentes relaciones volumétricas y relaciones gravimétricas.

Por medio de estas relaciones volumétricas es posible obtener diferentes propiedades como la porosidad que es una relación entre el volumen de vacíos sobre el volumen total, la relación de vacíos, la densidad relativa, el grado de saturación y el contenido de humedad. Por medio de las relaciones gravimétricas es posible determinar el peso unitario en condiciones naturales, el peso unitario en condiciones saturadas, el peso unitario en condiciones secas y la gravedad específica.

Los suelos son sometidos a ensayos de laboratorio incluidos el de peso unitario, compresión inconfiada del cual se obtienen los diferentes pesos específicos del suelo, corte directo del cual se obtienen el ángulo de fricción y la cohesión, clasificación granulométrica bajo el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) por medio del cual se determina el contenido de gravas, arenas y el contenido de material fino. Por último, pero no menos importante el ensayo de los límites de Atterberg, el cual determina el contenido de agua o porcentaje de humedad con el fin de calcular el límite líquido y límite plástico.

El conocimiento de tales propiedades geomecánicas se hace indispensable a la hora de realizar una zonificación de amenaza por movimientos en masa, estudios de estabilización de taludes en donde se conocen zonas críticas, en especial zonas con cierto factor de riesgo a partir del cálculo de factor de seguridad, el cual se define como la relación de las fuerzas resultantes y las fuerzas actuantes, y se usa para evaluar el límite de falla sobre el terreno, el factor de seguridad se expresa de la siguiente manera.

$$FS = \frac{FR}{FA}$$

Dónde: FS = Factor de seguridad

FR = Fuerzas resultantes

FA = Fuerzas actuantes

Por medio del valor obtenido tras el cálculo del factor de seguridad utilizando el software Slide, es posible categorizar la amenaza por movimientos en masa simulando los diferentes escenarios con cada uno de los agentes detonantes mencionados anteriormente, siendo esta clasificación amenaza baja para valores obtenidos superiores a 1,5, media para valores obtenidos entre 1,1 y 1,5 y alta para valores inferiores a 1,1 como se describe en la tabla 7.1 de la metodología apartado 7.

5. Marco Normativo

De acuerdo con el Reglamento de Construcción Sismo Resistencia del año 2010 (NSR-10) del ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, el cual dicta disposiciones que se deben tener en cuenta para cualquier construcción, obra geotécnica. Define un estudio geotécnico como, el 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, de igual forma, la NSR-10 en el título H apartado H.1.1.2, insta a la obligatoriedad de los estudios geotécnicos donde hace mención de que los estudios geotécnicos definitivos son obligatorios para todas las edificaciones urbanas y suburbanas de cualquier grupo de uso.

Asimismo, el Ministerio de Desarrollo Económico en el Título G del RAS, en el artículo 191 exige que los estudios geotécnicos son de obligatorio cumplimiento en todas las obras o trabajos de excavación destinados a la instalación de ductos o redes, construcciones de tanques de almacenamiento, estaciones de bombeo, plantas de tratamientos y en general estructuras propias del sector de agua potable y saneamiento básico.

De conformidad con el Título H de la NSR-10, en el capítulo 5 donde hace mención de los estudios de estabilidad de taludes y laderas, el cual dice que toda edificación u obra cuya implantación se proyecte realizar total o parcialmente sobre una ladera o que se encuentre en el borde o pie de una de ella, el ingeniero geotecnia junto con la asesoría de un geólogo o ingeniero geólogo, debe realizar un análisis de estabilidad de los taludes que representen una amenaza para el proyecto y diseñar las obras y medidas necesarias para lograr un nivel de estabilidad aceptable en términos de factores de seguridad (NRS-10, 2010).

En base al artículo 3 del decreto 1807 de 2010, advierte que se deben elaborar estudios de suelos urbanos, de expansión urbana y rural para los fenómenos de inundación, avenidas torrenciales y movimientos en masa y deben contener la zonificación de las áreas con condición de amenaza en las que se requiere adelantar los

estudios detallados y la delimitación de áreas con condición de riesgo en las que se requiere avanzar a los estudios detallados y la determinación de las medidas de intervención de normas urbanísticas.

Por consiguiente, el artículo 4 del mismo decreto, determina que los estudios detallados están orientado a determinar la categorización del riesgo y establecer las medidas de mitigación correspondientes (Decreto 1807, 2014).

6. Contexto Geológico

6.1 Marco Geomorfológico

La geomorfología involucra y relaciona al paisaje con los procesos que le dieron origen y sus condiciones ambientales. Según esto, la interpretación de la geomorfología tiene por finalidad la descripción de las formas del terreno, y la explicación de su génesis (origen), evolución a través del tiempo geológico, la definición de la naturaleza de los materiales, la clasificación de los paisajes según el proceso o agente natural dominante, composición, edad, y la explicación de la magnitud de los agentes y procesos geomorfológicos modeladores (SGC, 2012).

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 microrelieves asociados con unas características litológicas del estudio, permitiendo el análisis de la evolución geomorfológica y geológica de la misma (Carvajal, 2011).

A continuación, se describe el proceso de jerarquización geomorfológica presentado en la figura 6.1 y que es empleado en este estudio, sus descripciones y los resultados obtenidos en cada uno de ellos:

Figura 6.1 Jerarquización geomorfológica. Carvajal (2008).

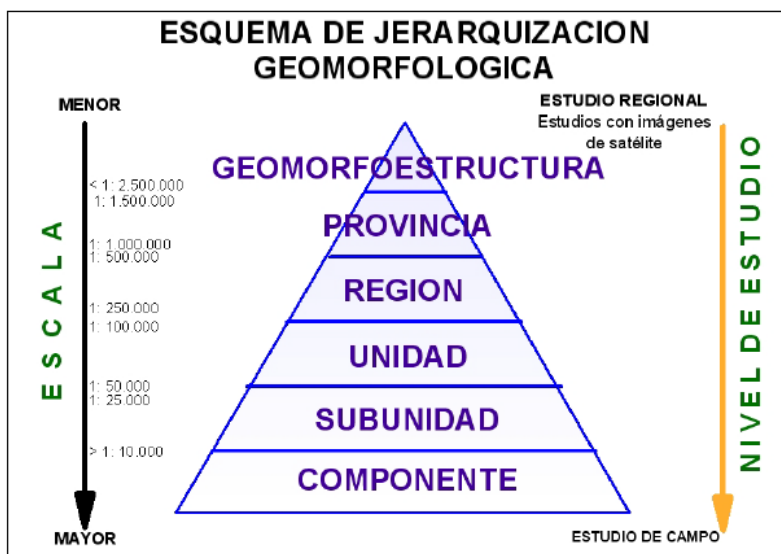


Figura 6.1 Esquema de Jerarquización Geomorfológica propuesto para INGEOMINAS (Carvajal, 2008; SGC, 2012)

Geomorfoestructura: se refiere a grandes áreas geográficas o amplios espacios continentales o intracontinentales caracterizados y definidos por estructuras geológicas y topográficas regionales que han tenido deformación o basculamiento y posiblemente metamorfismo o intrusión ígnea. El nombre propuesto para las geomorfoestructuras es compuesto y hace hincapié al Sistema asociado Morfológico de macrorelieve combinado con un nombre geográfico regional reconocido (Carvajal, 2011).

Por tal razón, la zona de interés se encuentra en la geomorfoestructura denominada como Sistema orogénico Andino, teniendo en cuenta la manera como debe clasificarse y la ubicación geográfica del lugar.

Esta se define como una cadena de montañas que están unidas, estas sucesiones montañosas se formaron en los límites continentales a partir de la acumulación de sedimentos, ya que la compresión ejercida por la presión lateral produjo plegamientos y generó las elevaciones.

Provincias geomorfológicas: Se diferencian y delimitan las formas del relieve tomando como base sus características geológicas, morfológicas y geográficas. Se definen en términos tales como; cinturones montañosos, llanuras, peneplanicies, cordilleras, serranías y están establecidas para escalas entre 1:1.000.000 – 1.500.000. El nombre propuesto para la provincia geomorfológica es compuesto y consiste de un término morfológico de macro relieve, combinado con un nombre geográfico definido por el nombre del terreno geológico o región natural respectiva (Carvajal, 2011). El área de influencia se localiza en la provincia geomorfológicas denominadas como Cordillera Central.

En el territorio colombiano se distinguen las siguientes provincias (Tabla 6.1)

Tabla 6.1 Provincias Geomorfológicas (Adaptado de SGC, 2012)

Provincias geomorfológicas en Colombia	
Baja Guajira	Plataforma continental del Pacífico
Catatumbo	Plataforma continental pacifica

Provincias geomorfológicas en Colombia	
Cerros Aislados del Guania	Serranía Araracuara
Cinturón Montañoso del Sinú	Serranía Caranacoa
Cordillera Central	Serranía de Chiribiquete
Cordillera Occidental	Serranía de la Macarena
Cordillera Oriental	Serranía de San Jacinto
Cuenca del Cesar Ranchería	Serranía de San Lucas
Cuencas bajas del Magdalena y Cauca	Serranía de Taraira
Fosa de plato	Serranía del Aguilla
Lomas de canaleta	Serranía del Baudó
Mesas del Caruru	Serranía del Darién
Mesas del Vaupes	Serranía del perijá
Montes de Maria	Serranía Naquén
Peneplanicies de la Amazonía	Serranía Tunahí
Peneplanicies y llanuras de la Orinoquía	Serranías de cocinas y Simarua
Planicies cratonicas del Vaupes y Guainia	Serranías de la Alta y baja Guajira
Planicies de la Media y Baja Guajira	Serranías de Macuira y Jarara
Planicies del Pacífico	Sierra Nevada de Santa Marta
Planicies y fosas del Caribe	Valle interandino Cauca - Patía
Planicies y fosas del pacífico	Valle interandino Cesar
Plataforma Continental Caribe	Valle interandino Magdalena

Tabla 6.1 Provincias geomorfológicas. Fuente Equipo consultor a partir de Carvajal 2012; SGC, 2012.

Región geomorfológica: Involucra a las geoformas relacionadas a la génesis de los paisajes, y definidas por un marco de ambiente morfogenético definido y afectados por procesos dinámicos parecidos. El nombre dado está definido por un término morfológico de meso relieve, asociado con el nombre del ambiente morfogenético correspondiente (SGC,2012).

Teniendo en cuenta que la provincia geomorfológica del área de estudio es la Cordillera Centra, se toma el nombre de Colina, 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 estas (Carvajal, 2011).

Los ambientes morfogénicos se agrupan de manera general en: ambiente morfoestructural (S), ambiente volcánico (V), ambiente denudacional (D), ambiente fluvial y lagunar(F), ambiente marino y Costero (M), ambiente glacial y periglacial (G), Ambiente eólico (E), Ambiente kárstico (K), ambiente antropogénico (A). (Carvajal, 2011).

A partir de los datos históricos recopilados de la zona y las características geomorfológicas tanto regionales como las identificadas en campo, se podría interpretar la existencia de tres ambientes geomorfológicos correspondientes a un ambiente denudacional, Antrópico y fluvial, en donde se han sufrido cambios debido a la acción climática durante su evolución geológica, ocasionando que la litología preexistente sufra procesos de acumulación y erosión. Son geoformas generadas por la dinámica interna de la tierra, especialmente las asociadas a plegamientos y fallamientos.

Sin embargo, con las observaciones hechas en campo de la zona fue posible interpretar los ambientes correspondientes para el área de trabajo. En ese orden de ideas los ambientes geomorfológicos principales son denudacional (D), Antrópico (A) y en menor medida ambiente Fluvial(F).

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 preexistentes. (Carvajal, 2011).

Teniendo en cuenta lo anterior y en base a la morfología de colina y que el ambiente geomorfológico principal es el denudacional, se considera que la región geomorfológica es Colina denudacional.

Unidad geomorfológica: Es la unidad básica de la cartografía geomorfológica. El término unidad geomorfológica se define como una geoforma individual genéticamente homogénea, generada por un proceso geomórfico de acumulación o erosión, típico de un ambiente morfogenético dado. Está determinada con criterios genéticos,

morfológicos y geométricos en función de la escala de trabajo propuesta de 1:100.000 a 1: 50.000 (Carvajal, 2008).

La principal unidad geomorfológica base puede considerarse como cerros residuales, para el ambiente antrópico planicies antrópicas, y para el ambiente fluvial se tiene cauces activos.

Subunidad Geomorfológica: Categoría que corresponde a una subdivisión de las unidades geomorfológicas. Está determinada fundamentalmente por los contrastes morfológicos y morfométricas, que relacionan el tipo de material o la disposición estructural de estos con la correspondiente topografía del terreno. Igualmente, está definida por el contraste dado por las formaciones superficiales asociados a procesos morfodinámicos actuales de meteorización erosión, transporte y acumulación (Carvajal, 2012). La escala de trabajo oscila entre 1:10.000 y 1:25.000.

Se tiene que el departamento de Risaralda se compone de tierras alta, especialmente. Los paisajes que se encuentran dentro del área de estudio son laderas denudacionales, deslizamientos y planos de explanación.

6. 2 Geología Regional

El municipio de Pereira, Risaralda se encuentra ubicado en la Cordillera central de Colombia, su geología regional está compuesta por distintas unidades que serán descritas a continuación y la información se obtuvo a partir de la cartografía realizada por el Servicio Geológico Colombiano (anterior Ingeominas), en los informes y Planchas correspondientes como:

- Geología de la Plancha 224- Pereira.

Unidades del Paleozoico

✓ Complejo Cajamarca, grupo básico (Pev)

Es un conjunto de rocas metamórficas que constituyen el núcleo de la cordillera central, estas afloran al este de la Falla San Jerónimo, es una secuencia sin techo ni base definidas debido a que no es posible definir con precisión su espesor por la intensidad del plegamiento y ausencia de capas guías, presenta gran variedad composicional producto de varios episodios metamórficos regionales, seguidos por efectos térmicos y dinámicos locales de intensidad variable, las paragénesis metamórficas indican un bajo grado de metamorfismo donde predominan las facies esquisto verde, aunque localmente

se encuentran rocas de facies anfibolita, el complejo se divide en 3 grupos composicionales:

- Grupo Pelítico (Pes)
- Grupo Cuarzoso (Pq)
- Grupo Básico (Pev)

En la región de estudio se encuentra el Grupo Básico (Pev), el cual está compuesto por Esquistos Actinolíticos – Cloríticos, conocidos como “esquistos verdes” por su tonalidad, son rocas macizas a esquistosas con foliación definida paralela – subparalela del anfíbol fibroso y la clorita, los minerales predominantes son: epidota, clorita y anfíbol en proporciones similares, estos esquistos se encuentran principalmente como cuerpos alargados en dirección norte – sur o como esquistos cuarzo sericíticos con la misma tendencia estructural, su composición y alternancia con esquistos cuarzo sericíticos de protolito sedimentario, indican que los esquistos verdes se formaron en eventos volcánicos que alternaban con depositación sedimentaria. El Complejo Cajamarca es un Complejo polimetamórfico en la cual la mayoría de las edades obtenidas K/Ar indican edades entre el Carbonífero tardío y el Triásico (SGC, 2001).

Unidades del Mesozoico

- ✓ Complejo Quebradagrande (Kvc, Ksc)

Es un conjunto de rocas sedimentarias y volcánicas que componen gran parte del flanco occidental de la Cordillera Central, se encuentra al oeste de la Falla San Jerónimo. Se ha generado gran controversia por la ausencia clara del techo y la base, también se le asigna el nombre de Formación Quebradagrande, pero según Maya y González (1995) se considera como una unidad de rango estratigráfico mayor, limita al este con la Falla San Jerónimo, que lo separa del Complejo Cajamarca anteriormente descrito, y limita al oeste con la Falla Silvia Pijao, que lo separa del Complejo Arquía, donde aparecen rocas ultramáficas serpentinizadas que indican una sutura entre un terreno de corteza continental al este y un terreno de corteza oceánica al oeste, se caracteriza por intercalaciones de rocas volcánicas con variaciones entre flujos volcánicos - lavas piroclásticas, y rocas sedimentarias con gran variedad litológica. La litología del complejo se ha agrupado en 2 miembros (González, 1980).

Miembro Volcánico (Kvc)

Constituido por espilitas, basaltos y diabasas de características toleíticas con poca variación química asociado a un magma que ha sufrido poca diferenciación, Un estudio

geoquímico detallado y su relación con diferentes litofacies indicarían diferentes ambientes de formación, un ambiente asociado a secuencias ofiolíticas, y el otro a un ambiente asociado a arco de islas (Álvarez, 1987), este miembro presenta brechas de flujo y tobas en franjas alargadas en dirección norte – sur, se encuentra en contacto con el Miembro Sedimentario a lo largo del sistema de Fallas Romeral. Las rocas más características de este miembro son masivas, de color verde en varias tonalidades, de composición espilita con textura ofítica - subofítica, compuestas por plagioclasa sódica y clinopiroxeno de la serie augita – pigeonita (o por alteración actinolita, clorita, epidota, calcita, hematita), localmente se encuentran estructuras almohadilladas con zonación estructural y composicional, cerca de las zonas de falla, por metamorfismo dinámico se encuentran rocas de estructura esquistosa de color verde.

Según los fósiles encontrados en los sedimentos intercalados, la edad corresponde a Cretácico Inferior, Albiano- Aptiano (Gonzales, 1980), en dataciones radiométricas se han obtenido edades desde el Cretácico temprano (magmatismo) hasta el Cretácico tardío (evento metamórfico de bajo grado) (Restrepo et., al 1982; Maya, 1992).

Miembro Sedimentario (Ksc)

Estas rocas se encuentran intercaladas con el Miembro Volcánico, por lo que se facilita determinar la edad de estas, compuesto principalmente por lutitas carbonosas, y en menor proporción por grauvacas, arenitas feldespáticas, limolitas, liditas y algunas capas de calizas, son comunes las venas de cuarzo lechoso paralelas al plano de estratificación o planos de cizalladura, las arenitas tienen un tamaño de grano fino – medio con clastos bien seleccionados de líticos principalmente volcánicos, plagioclasa y escaso cuarzo, generalmente presenta características de turbiditas, las liditas son de color negro debido a la presencia de materia carbonosa y óxidos de hierro diseminados, con espesor variable y muy fracturadas y plegadas (SGC, 2001).

✓ Stock gábrico de Pereira (Kgp)

Está compuesto predominantemente por grabrodiorita con variaciones a cuarzodiorita, presenta textura homogénea, masiva de grano grueso, es leucocrática de tonalidad verdosa, contiene cuarzo, plagioclasa y ferromagnesianos, el Stock Gábrico de Pereira esta intruyendo rocas metamórficas, está en contacto no definido con rocas volcánicas básicas, presenta una extensión aproximada de 30km², está cubierto discordantemente por la Formación Amaga y flujos de lodo cuaternarios. El emplazamiento del Stock de

Pereira se asocia al Sistema de Fallas Romeral y su edad está relacionada con eventos cretácicos tempranos (SGC, 1984)

✓ Grupo diabásico (Kvo)

Definido por Nelson (1957), está compuesto por basaltos, diabasas, gabros, hialoclastitas con intercalaciones de chert, este grupo puede correlacionarse con la Formación Barroso, se encuentra intruido por rocas de composición ácida – intermedia (Galvis Vergara, 1980), se le asigna una edad del cretácico tardío, (SGC, 1984)

Unidades del Cenozoico

✓ Formación Cauca Superior (Tocp)

Está constituida por areniscas clásticas de tonalidad verde hasta pardo rojizas, con tamaño de grano variable, con clastos de cuarzo lechoso, plagioclasa, micas y fragmentos de roca sub-redondeados, posee una matriz microcristalina de composición arcillosa de color parduzco, además, presenta intercalaciones con conglomerados polimícticos mal seleccionados entre 1-30 cm, sub-angulares, y arcillolitas verdosas lenticulares abigarradas, la Formación Cauca Superior se encuentra en contacto fallado al oeste con la formación la paila, al este se encuentra suprayacida por flujos de lodo y cenizas volcánicas discordantes, se le asigna una edad con base en datos palinológicos de Van Der Hamen, (1958) entre el eoceno inferior y oligoceno superior (SGC, 1984).

✓ Formación Zarzal (Tplz)

secuencia sedimentaria compuesta de diatomitas, arcillolitas y arenas tobáceas, se encuentra suprayaciendo de manera inconforme a la Formación la paila, de espesor variable y no definido, a su base se encuentran intercalaciones de areniscas y arcillas diatomáceas entre 2 y 5 cm, la parte media se compone de conglomerados mal seleccionados con clastos redondeados de diferente tamaño intercalados con diatomitas y tobas arenosas, la parte superior se compone de diatomitas intercaladas con tobas y areniscas con algunos niveles conglomeráticos, la composición de los clastos consta de chert y diabasa de tamaño variable, poco compactada con matriz areno-arcillosas de color marrón, la unida se caracteriza por su horizontalidad o leve inclinación, además presenta leve bandeamiento definido por óxidos de hierro entre 1 y 2 cm de espesor (SGC,2001).

✓ Rocas efusivas e hipoabisales (Qa)

Corresponden a lavas masivas con pocos metros de espesor de color gris claro, levemente porfíricas con matriz vítrea, asociadas a los cuellos volcánicos de El

Contento y Paramo de Herveo, se encuentran como flujos de composición andesítica, sin afectaciones por las glaciaciones pleistocenas, cubiertos por depósitos de caída piroclástica, se pueden dividir en dos fases composicionales; lavas con olivino; su composición varía de basalto a andesita, conformada por plagioclasa cálcica, piroxeno, y olivino, la matriz está constituida por vidrio color pardo.

Lavas con biotitas y hornblenda; de composición andesítica con textura porfiríticas, conformada por cristales de plagioclasa intermedia a cálcica, piroxeno, biotita y hornblenda, con matriz hialomicroclítica con abundantes vesículas.

Las primeras erupciones se datan de 0.76 y 0.8 Ma (Thouret, 1985) y la actividad más reciente se encuentra entre 7000 y 3600 AP (Thouret, 1984, 1989) (SGC, 2001).

✓ Flujos de lodo volcánico (Qflv)

Ubicados en el flanco occidental de la Cordillera Central, constituidos principalmente por rocas piroclásticas, lapilli y fragmentos de rocas volcánicas, los bloques que lo componen son rocas metamórficas e intrusivas de tamaño variable de cm hasta 5m, se considera un espesor aproximado de 50m que forman pendientes fuertes y escarpes casi verticales, estos son de origen fluvio-lacustre y se encuentran cubriendo formaciones mesozoicas (SGC, 1984).

✓ Depósitos aluviales no diferenciados (Qar)

Corresponde a depósitos no consolidados de material aluvial y coluvial, compuesto principalmente por bloques y gravas de diferentes tamaños en una matriz arcillo-arenosa con variabilidad en su grado de cementación, se encuentran en los cañones y ríos de algunas quebradas con espesor variable (aproximadamente 20m) que disminuye hacia la parte inferior del curso del río donde empieza a disminuir su energía, la edad de estos depósitos corresponde al Holoceno (SGC, 2001).

✓ Rocas Piroclásticas Qto)

Son producto de la actividad cuaternaria de los volcanes el Complejo Ruiz – Tolima, este compuesto principalmente por depósitos de lapilli pumítico y bombas volcánicas, localmente se pueden encontrar intercalados con niveles arcillosos, lo que indica una depositación en un medio acuoso, generalmente se encuentran con un grado de litificación bajo suavizando la morfología del terreno, se estima que se encuentra en el intervalo Pleistoceno tardío – Holoceno (SGC, 2001).

✓ Depósitos de pendiente (Qtl)

Son producto de la erosión, constituidos principalmente por bloques de rocas volcánicas básicas, que no presentan selección o compactación preferente, estos depósitos no presentan gran extensión (SGC, 1984). 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 gran extensión y están constituidos por gravas, arenas y limo (SGC; 2001).

Figura 6.4 Mapa de geología regional del Municipio de Pereira (Risaralda)

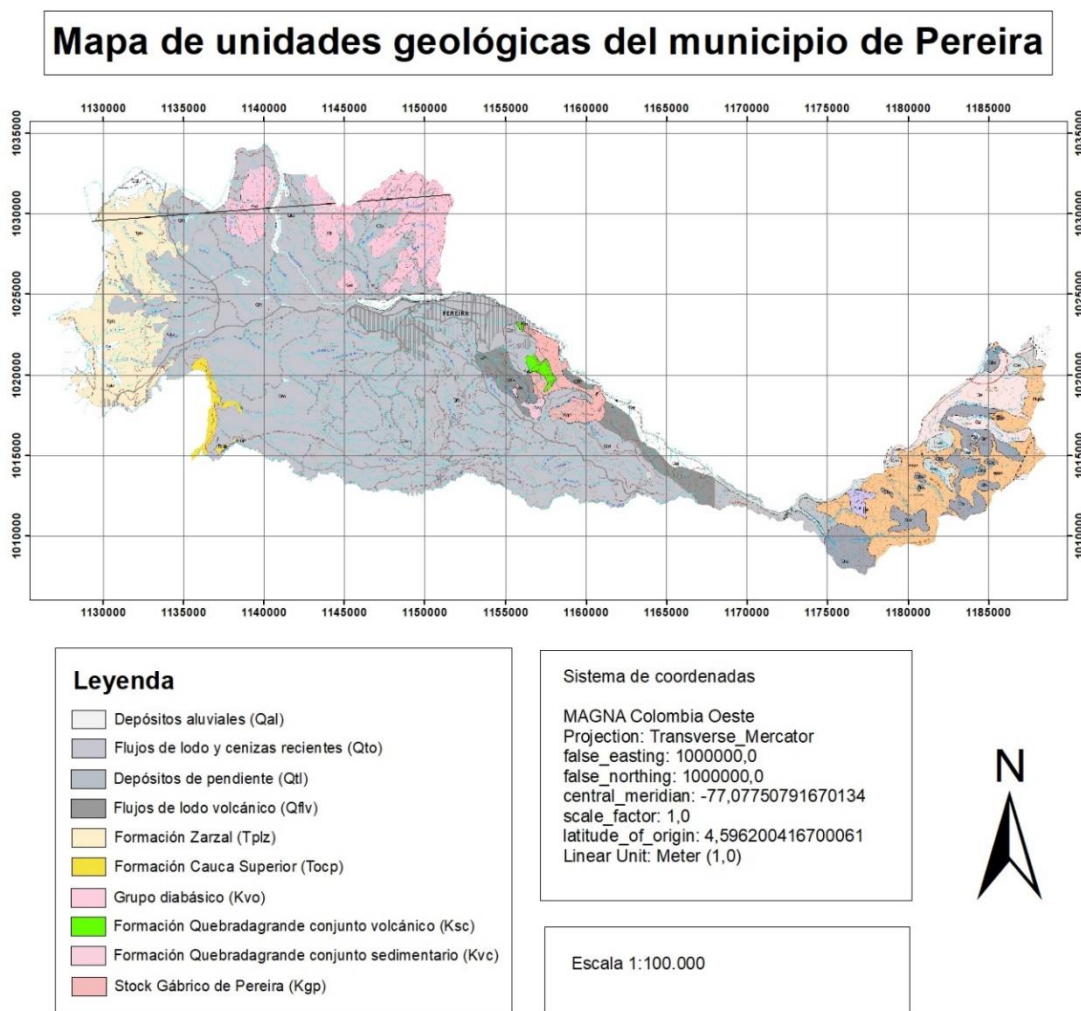


Figura 6.4 Mapa geológico del municipio de Pereira, Equipo consultor (2023)

7. Metodología

El desarrollo del estudio detallado de estabilidad de talud para un punto crítico por factor de riesgo por movimiento en masa en el sector El Zafiro, municipio de Pereira – Risaralda, se divide en 6 etapas: trabajo de campo, recopilación bibliográfica, procesamiento de datos, análisis de resultados de laboratorio, determinación de amenaza, caracterización y zonificación de la vulnerabilidad por movimiento en masa y propuesta para mitigar la amenaza por el factor de riesgo de movimiento en masa.

7.1 Etapa 1: trabajo de campo

Durante el trabajo de campo se realiza un reconocimiento de la zona y se identifican los puntos claves distribuidos en toda la zona para la realización de sondeos con el fin cartografiar unidades geológicas, esto con el objetivo de identificar y describir las características físicas del suelo como el color, la textura, la plasticidad, el índice de humedad y la consistencia, se realizan en el área de interés un total de cinco (5) sondeos semimecánicos en suelos a través del método de rotación con recuperación de muestras, los cuales fueron georreferenciados cada uno por medio de un dispositivo GPS, durante este proceso se identifican los diferentes tipos de suelo y sus respectivos espesores, además se realiza la recolección de muestras de suelo inalteradas en tubos de pared delgada (Shelby) de cada una de las diferentes unidades de suelo encontradas durante el sondeo, esto con el fin de conocer sus propiedades geomecánicas para interpretar su comportamiento en los diferentes escenarios estáticos, pseudoestáticos y de lluvia, además se identifican las características de los componentes geomorfológicos como pendientes, forma de la ladera, curvatura, rugosidad, uso del suelo y cobertura del suelo.

Adicionalmente, en la figura 8.3 Se muestra un formato que se empleó en campo, el Formato modificado para inventario de movimiento en masa (versión 2012 para el Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas) (SGC, 2012).

7.2 Etapa 2: Recopilación de información

Una vez obtenida la información recolectada en campo se lleva a cabo una recopilación de información previa existente con el fin de enlazar las características geológicas, estructurales y geomorfológicas encontradas en campo con la información de la región descrita en documentos y estudios previos, además de la síntesis de

información sobre características morfológicas y topográficas; es de anotar que en este apartado solo se tendrán en cuenta la información que respecta a la geología local, las unidades geológicas superficiales, la geomorfología a nivel de elementos, morfometría, geología estructural; todo lo anterior permite comprender la zona de estudio (zona local), para desarrollar la metodología propuesta; además, en el apartado 6 lo que respecta el contexto geológico se describe un poco de la información recopilada.

Dentro de la literatura consultada se destaca información de los siguientes documentos:

- Memoria explicativa de la plancha 224 Pereira (SGS, 1984)
- Guía metodológica para la zonificación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa, del Servicio Geológico Colombiano. (Servicio Geológico Colombiano, 2017)
- Reglamento Técnico del Sector de Aguas Potable y Saneamiento (RAS,2000)
- Servicio geológico colombiano, sistema de información de movimientos en masa (SIMMA).
- Estudio de Catastro de Redes del año 2003 y el Sistema de Información Geográfica de (SIG) de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira S.AS-E.S.P
- Reglamento Colombiano de Construcción de Sismo Resistente (NSR-10). (NSR, 2010).
- Formato modificado para inventario de movimiento en masa (versión 2012 para el Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas) (SGC, 2012).

7.3 Etapa 3: Procesamiento de datos

Para el levantamiento de información topográfica, se toma la base de dato del Sistema de Información Geográfica de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira, esta proporciona toda la información (cartográfica y topográfica) la cual sirve como insumo para generar los Modelo de Elevación Digital (DEM) de la zona de interés, el cual se elabora empleando el software de ArcMap del paquete de ArcGis, este modelo es utilizado en durante varios procedimientos para la generación de diferentes mapas en la

etapa 5. Durante la etapa 6 nuevamente se hace indispensable el uso de dicho modelo con el fin de obtener los perfiles sobre los cuales se realizan los análisis de estabilidad por medio del software Slide del paquete Rocscience.

7.4 Etapa 4: Análisis de resultados de laboratorio

Las muestras recolectadas en campo son enviadas al laboratorio TRADING LAB S.A.S, para la realización de los diferentes ensayos de humedad natural, límites de atterberg, granulometría, peso unitario, compresión inconfiada y corte directo. Una vez recibidos los resultados de laboratorio se construyen tablas donde se sintetiza la información geomecánica de cada uno de los estratos de suelo encontrados, para el presente caso se identifican 3 tipos de suelos diferentes, cada uno con propiedades asociadas, con base en estas propiedades se evalúa el comportamiento del suelo tanto en condiciones actuales como en condiciones de amenaza.

7.5 Etapa 5: Determinación y zonificación de la amenaza

Mediante la utilización del software ArcMap se genera un mapa de distribución de los perfiles de análisis de acuerdo a la escala detallada utilizada de 1:500, la cual se ubica de tal manera que cubra toda la zona de estudio. Una vez establecidos y numerado cada perfil, se realiza en *Global Mapper*, luego son llevados al programa AutoCAD, donde son editados, agregando información en profundidad de los suelos encontrados procesados en los mapas de distribución de los estratos, una vez agregada dicha información, los perfiles son procesados en el software Slide utilizando el método determinístico donde a partir de las propiedades geomecánicas de los suelo se evalúan las diferentes posibilidades de ocurrencia de movimientos en masa bajo condiciones actuales y adicionando factores detonantes como la lluvia, los sismos y factores antrópicos, por último, se genera un escenario crítico resultado de la combinación de todos los factores detonantes; mediante esta evaluación se obtienen los factores de seguridad para cada uno de los escenarios mencionados, para un mejor entendimiento de los factores de seguridad, todos esos criterios ayudan a determinar la estabilidad de la ladera (la cual se encuentra en amenaza), a partir de los métodos de Bishop simplificado, Janbu simplificado, y Gle/Morgenstern – Price. En la tabla 1 se muestran los rangos de clasificación para los factores de seguridad.

Tabla 7.1 Caracterización de zonificación de susceptibilidad y amenaza según los factores de seguridad.

Valor del factor de seguridad (FS)	Clasificación de la amenaza
Inferior a 1.1	Amenaza alta
Entre 1.1 -1.5	Amenaza media
Superior a 1.5	Amenaza baja

Tabla 7.1 Fuente: Servicio Geológico colombiano (2017)

7.6 Etapa 6: Caracterización y zonificación de la vulnerabilidad por movimiento en masa

En este apartado se tiene en cuenta cada uno del elemento que están cerca o sobre la zona de interés los cuales los cuales pueden llegar a ser afectados por los movimientos en masa, todo esto se determinó con base de visitas de campo, información recopilada del servicio geológico y procesamientos realizado en el Software de *Arc Map*, lo cual permitió obtener mapas de zonificación respecto la vulnerabilidad, fragilidad de los elementos expuestos.

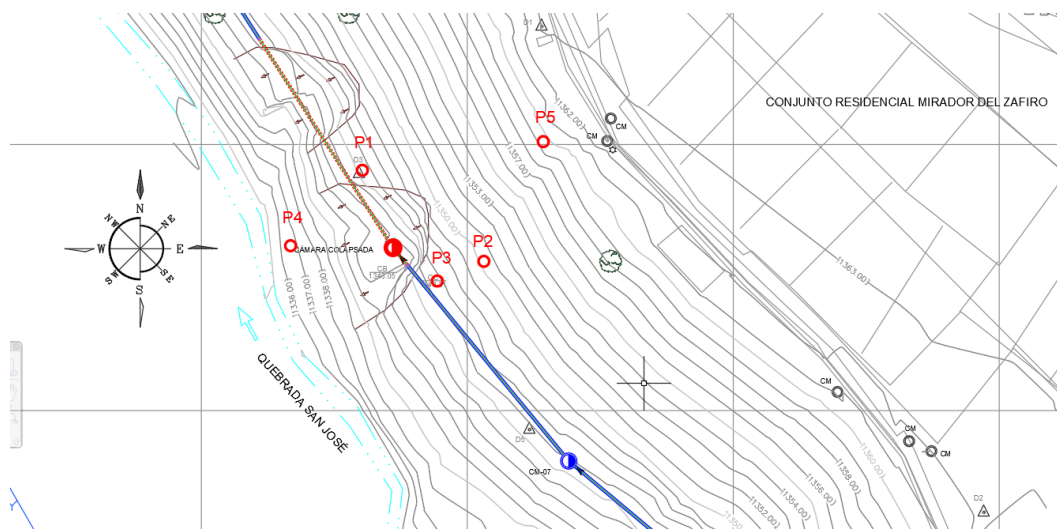
8. Resultados

8.1 Etapa 1: trabajo de campo

8.1.1 Estratigrafía

Para la construcción del modelo geológico geotécnico realiza una prospección geotecnia distribuyendo cinco (5) sondeos alrededor de la zona de inestabilidad, como se observa en el mapa se ubican los sondeos distribuidos en la zona de estudios de tal manera que se abarque el área directa a intervenir, con el objeto de saber la distribución estratigráfica de cada una de las perforaciones; como lo indica la Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo del servicio geológico colombiano (2017), además en la tabla 8.1 de distribución de las perforaciones se ubica, la profundidad, una pequeña descripción del sitio donde se ubica cada sondeo y las coordenadas las cuales se pueden visualizar en la Figura 8.1, además, en la figura 8.3 se visualiza el formato de movimiento en masa.

Figura 8.1 Localización de las perforaciones



. Figura 8.1 En esta figura se visualiza la localización de las perforaciones

Figura 8.2 Esquema representativo del perfil del suelo

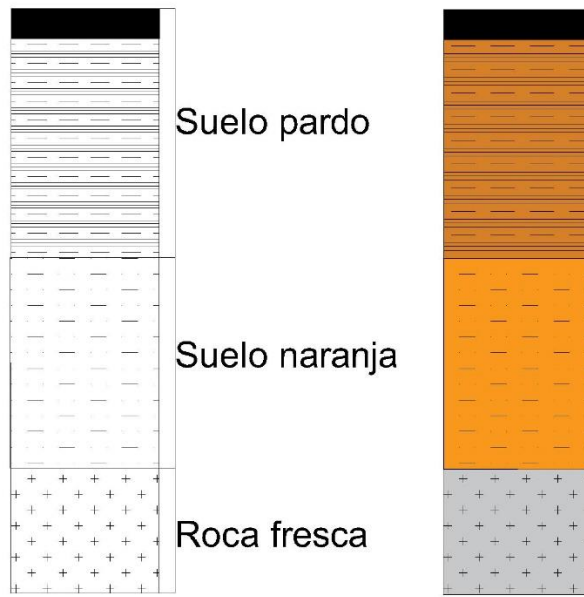


Figura 8.2 Se puede evidenciar un esquema representativo del perfil del suelo, fuente propia (2023).

Figura 8.3 Formato modificado para inventario de movimientos en masa (versión 2012 para el Proyecto Multinacional Andino).

FORMATO MODIFICADO PARA INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA Vs 2012									
Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas									
DATOS DE REGISTRO									
ENCUESTADOR*	Fecha Inicio*		Fecha Reporte*		INSTITUCIÓN*		COD. GRUPO		IMPORTANCIA*
Jordano Di Dajome	01/02/23		Zenit Ingeniería y Consultoría						Alta <input checked="" type="checkbox"/> Media <input type="checkbox"/> Baja <input type="checkbox"/>
LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA		REFERENTES GEOGRÁFICOS		PLANCHAS		DOCUMENTACIÓN			
Departamento: Cuzco		Deslizamiento localizado al costado del conjunto residencial el Zapizo		AÑO: 2023		FOTOS AERIAS			
Municipio: Petateño		Sitio: El Zapizo		ESCALA: 1:500		Foto tomada de en la Fuente y lateral del deslizamiento			
Vereda: Santa Rosa		Coordenadas UTM: 1240730 N, 7340730 E		EDITOR: F. J. J.					
ACTIVIDAD DEL MOVIMIENTO		DISTRIBUCIÓN		DESCRIPCIÓN		LITOLOGÍA Y ESTRUCTURA			
TIPO <input type="checkbox"/> < 1 año <input type="checkbox"/> 1-5 años <input type="checkbox"/> 6-10 años <input type="checkbox"/> 11-15 años <input type="checkbox"/> 16-20 años		ESTADO <input type="checkbox"/> Activo <input type="checkbox"/> Reservado <input type="checkbox"/> Suspendido <input type="checkbox"/> Inactivo <input type="checkbox"/> Latente <input type="checkbox"/> Abandonado <input type="checkbox"/> Estabilizado <input type="checkbox"/> Reflicto		DESCRIPCIÓN Deslizamiento rotacional en suelo de consistencia blanda, de textura un poco limosa, plasticidad media humedad media		ESTRUCTURA Estratificación, Foliación, Diaclasas, Falla, Discordancia, Esquistosidad			
TIPO MOVIMIENTO		SUBTIPO MOVIMIENTO		TIPO MATERIAL		HUMEDAD		PLASTICIDAD	
<input type="checkbox"/> Caída de roca <input type="checkbox"/> Caída de detritos <input type="checkbox"/> Deslizamiento <input type="checkbox"/> Flujos <input type="checkbox"/> Proyección Lateral <input type="checkbox"/> Rotación <input type="checkbox"/> Deform. Global <input type="checkbox"/> Profundiz.		<input type="checkbox"/> Desliz. traslacional <input type="checkbox"/> Desliz. en cuña <input type="checkbox"/> Desliz. traslacional en cuña <input type="checkbox"/> Desliz. traslacional planar <input type="checkbox"/> Avalancha de rocas <input type="checkbox"/> Flujos de detritos <input type="checkbox"/> Flujos de turbas <input type="checkbox"/> Desliz. licuación de arena <input type="checkbox"/> Desliz. licuación de lodo		<input type="checkbox"/> Roca <input type="checkbox"/> Detritos <input type="checkbox"/> Lodos <input type="checkbox"/> Turba		<input type="checkbox"/> Mojado <input type="checkbox"/> Muy Húmedo <input type="checkbox"/> Húmedo <input type="checkbox"/> Uer. Húmedo <input type="checkbox"/> Seco		<input type="checkbox"/> Alta <input type="checkbox"/> Media <input type="checkbox"/> Baja <input type="checkbox"/> No plástica	
VELOCIDAD		VELOCIDAD		SISTEMA DE CLASIFICACIÓN*					
<input type="checkbox"/> Extr. rápido (>5 m/año) <input type="checkbox"/> Muy rápido (>3 m/año) <input type="checkbox"/> Rápido (>1.5 m/año)		<input type="checkbox"/> Moderado (>13 m/mes) <input type="checkbox"/> Lento (>1.6 m/año) <input type="checkbox"/> Muy lento (>16 mm/año)		Hutzchinson, 1988 <input type="checkbox"/> Cruden y Varnes, 1996 <input type="checkbox"/> Huner et al., 2001					
DIMENSIONES DEL TERRENO		MORFOMETRÍA		DEFORMACIÓN TERRENO		GEOFORMA			
Diferencia de altura corona a punta (m): 7m Longitud horizontal corona a punta (m): 6m Falt-Höschung (grados): Pendiente de ladera en Fren-Falla (grados): 45/47/48 Pendiente de ladera en Fren-Falla (grados): 41/47/48 Dirección del movimiento (grados): Azimut del talud (grados):		Archo de la masa desplazada Wd (m): 7m Archo de la superficie de ruptura Wv (m): 5m Longitud de la masa desplazada Lt (m): Longitud de superficie de ruptura Lr (m): Espesor de la masa desplazada Dt (m): Profundidad de superficie de ruptura Dr (m): Longitud total Lt (m):		Volumen inicial (m3): Volumen desplazado (m3): Área inicial (km2): Área total afectada (km2): Run up (m): Distancia de viaje (Km):		Modo: Ondulación Escalonamiento SEVERIDAD: Leve Media Severa			
CAUSAS DEL MOVIMIENTO		CONTRIBUYENTES - DETONANTES							
INCIDENTES <input type="checkbox"/> Material fluído y asentado <input type="checkbox"/> Orientación inadecuada de discontinuidades <input type="checkbox"/> Contraste de permeabilidades de materiales <input type="checkbox"/> Contraste de resistencias de materiales <input type="checkbox"/> Material meteor. físicamente <input type="checkbox"/> Material meteor. químicamente <input type="checkbox"/> Material fallado por corte <input type="checkbox"/> Movimiento tectónico <input type="checkbox"/> Sismo M = 1 De = P <input type="checkbox"/> Erosión volcánica <input type="checkbox"/> Lluvias (mm) 24h = 48h = 72h = Mes = <input type="checkbox"/> viento <input type="checkbox"/> Lanchillo <input type="checkbox"/> Avance/Retroceso de glaciares <input type="checkbox"/> Rompimiento de lagos en cráteres <input type="checkbox"/> Ransamiento de presas		<input type="checkbox"/> Desembalse rápido de presas <input type="checkbox"/> Erosión cata del talud por glacares <input type="checkbox"/> Socavación cata del talud por corriente agua <input type="checkbox"/> Socavación cata del talud por oleaje <input type="checkbox"/> Socavación de margenes de ríos <input type="checkbox"/> Erosión fluvial <input type="checkbox"/> Caída en la corona del talud <input type="checkbox"/> Erosión subterránea (disolución, tubificación) <input type="checkbox"/> Intoxicación		<input type="checkbox"/> Mantenimiento deficiente sistema de drenaje <input type="checkbox"/> Escapes de agua de tuberías <input type="checkbox"/> Deforestación o ausencia de vegetación <input type="checkbox"/> Minería <input type="checkbox"/> Disuasión deficiente de esteriles/escombros <input type="checkbox"/> Vibración artificial (trafico, explosiones, hincado pilotes) <input type="checkbox"/> Erosión fluvial NOTAS: C. Condicionante, D. Detonante, I. Inherente 24h/mm; Lluvia acumulada antes del movimiento - M.					


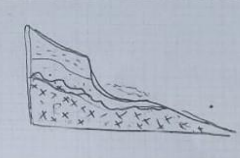
TIPO DE EROSION		ESTADO		FLUVIAL		EOLICA			
SUPERFICIAL Tierras malas <input checked="" type="checkbox"/> Surcos <input type="checkbox"/> Hondonadas <input type="checkbox"/> Laminar <input type="checkbox"/>		SUBSUPERFICIAL Cavernas <input type="checkbox"/> Tubificación <input type="checkbox"/>		Reciente <input checked="" type="checkbox"/>		Baja Moderada <input type="checkbox"/> Severa <input checked="" type="checkbox"/>		Socav. fondo <input type="checkbox"/> Socav. lateral <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	
COBERTURA DEL SUELO Veg. Herbácea <input checked="" type="checkbox"/> Cárnicos <input type="checkbox"/> Ganadería <input type="checkbox"/>		COBERTURA Y USO DEL SUELO Bosques/Selva <input type="checkbox"/> Construcciones <input type="checkbox"/> Agrícola <input type="checkbox"/>		VISO DEL SUELO Matorrales <input type="checkbox"/> Pastos <input type="checkbox"/> Recreación <input type="checkbox"/>		Vías <input type="checkbox"/> Zona arqueológica <input type="checkbox"/>		Vivienda <input type="checkbox"/> Zona industrial <input type="checkbox"/>	
Cuerpo de agua <input checked="" type="checkbox"/> Sin cobertura <input type="checkbox"/> Minería <input type="checkbox"/> Sin uso <input type="checkbox"/>				AUTOR / /		AÑO / /		REFERENCIAS TÍTULO: Aguas XX1 EDITOR: Aguas XX1 CIUDAD: Perote	
TIPO (COSTA & Schuster 1988) I <input type="checkbox"/> II <input type="checkbox"/> III <input type="checkbox"/> IV <input type="checkbox"/> V <input type="checkbox"/> VI <input type="checkbox"/>		MONICIONERIA DE LA PRESA Longitud (m) _____ Volumen (m³) _____ Altura (m) _____ Talud arriba (1) _____ Ancho (m) _____ Talud abajo (1) _____		EL PRESALTIENDO LONGITUD DE LA EMBALESA Longitud (m) _____ Área (m²) _____ Área (m²) _____ Caudal entrada _____ Volumen (m³) _____ Caudal salida _____ Nivel agua bajo corona (m) _____ Tasa de llenado _____		CONDICIONES DE LA PRESA Obstrucción parcial <input type="checkbox"/> Moderadamente socavada <input type="checkbox"/>		OTROS EFECTOS Inundación <input type="checkbox"/> Tsunami <input type="checkbox"/>	
POBLACION AFECTADA Heridos _____ Vidas _____ Desaparecidos _____ Personas _____ Familias _____		DAÑOS TIPO INFRAESTRUCTURA, ACTIVIDADES ECONOMICAS, DAÑOS AMBIENTALES CANTIDAD UNIDAD TIPO DAÑO VALOR (US\$)		TIPO DAÑO DL DM DS DT NC		VALOR (US\$) 0			
TIPO DE DAÑO: Infraestructura: edificios, carreteras, inst. educativa, puentes, servicios públicos, vía férrea, torre conducción eléctrica, obras lineales, planta eléctrica, torre de energía, capa asfáltica, galpones, tanque almacenamiento, espaldones, diámetro riego, puentes pastorales, puentes viales, acueducto. Económicos: agricultura, ganadería, cultivos, semovientes, transporte pasajeros y carga. Ambientales: parques, bosques, planta tratamiento de agua.		NOTA: I: Infraestructura, E: Económicos, A: Ambientales, DL: Daño leve, DM: Daño moderado, DS: Daño severo, DT: Daño total, NC: No cuantificable							
NOTAS Es evidente mayor magnitud de sedimentación por mva.		APERCIACION DEL RIESGO Riesgo alto, debido al volumen en su totalidad del sistema de aguas residuales		ANEXO FOTOGRAFICO FECHA: 01/07/23 FOTOGRAFIA: 14 AUTOR/DERECHOS: Zenit OBSERVACIONES: estudio inmediato					
ESQUEMA DEL MOVIMIENTO PLANTA 		PERFIL 		FECHA: 01/07/23 OBSERVACIONES: Destemplamiento activo, sin su intervención puede generar					

Figura 8.3 Se observa la descripción del formato que se empleó para la caracterización del movimiento en masa, en el sector el Zafiro. Fuente: equipo consultor, tomado de Geociencias para las Comunidades Andinas) (SGC, 2012).

Descripción de las perforaciones:

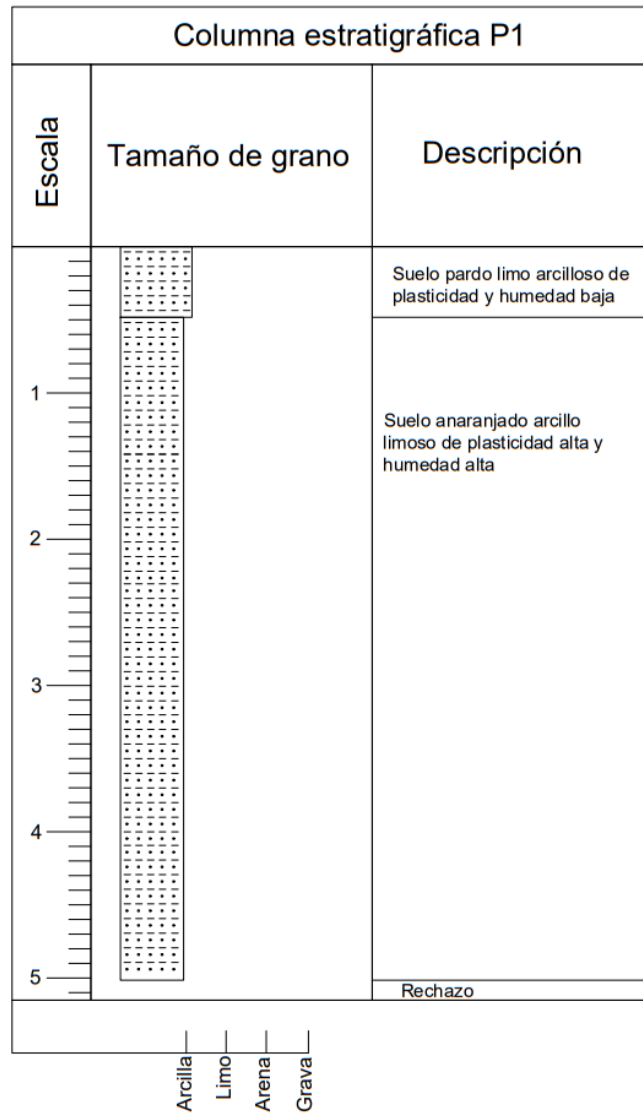
Perforación 1

Se inicia la perforación encontrando una capa de 0.5m de espesor de color pardo de textura limo arcillosa el cual presenta plasticidad baja, humedad baja con consistencia suave, posteriormente se encuentra un estrato de 4,5m de espesor de suelo color anaranjado de textura arcillo limoso el cual presenta plasticidad alta y humedad media a alta con consistencia suave, se toma muestra inalterada (Shelby) a la profundidad de 2m PER-P1-M1-1,5m este suelo permanece continuo hasta la profundidad de 5m donde finaliza la perforación por rechazo, es necesario mencionar que en lo corrido de la perforación no se encontró el NAF.



Fotografía 1. Perforación 1.

Columna estratigráfica P1



Columna estratigráfica P1.

Fuente: Equipo consultor (2023).

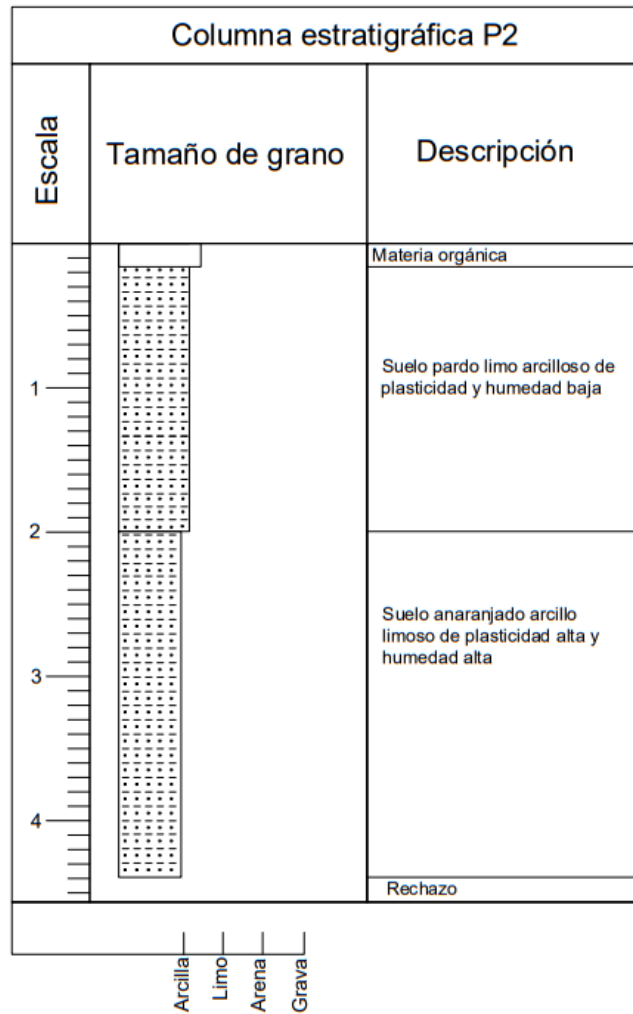
Perforación 2

Se inicia la perforación encontrando una capa de 0,15m de espesor de materia orgánica, posteriormente se encuentra un estrato de 1,8m de espesor de suelo color pardo de textura limo arcillosa el cual presenta plasticidad media a baja y humedad media con consistencia suave, se toma muestra inalterada (Shelby) a la profundidad de 1,5m PER-P2-M1-1,5m posteriormente se encuentra un estrato 2,4m de espesor de suelo de color anaranjado con textura arcillo limosa de plasticidad media-alta y humedad media, se toma muestra inalterada (Shelby) a la profundidad de 2,2m PER-P2-M1-2,2m este suelo permanece continuo hasta la profundidad de 4,35m donde finaliza la perforación por rechazo, en el recorrido de la perforación no se encontró el NAF.



Fotografía 2. Perforación 2.

Columna estratigráfica P2



Columna estratigráfica P2.

Fuente: Equipo consultor (2023).

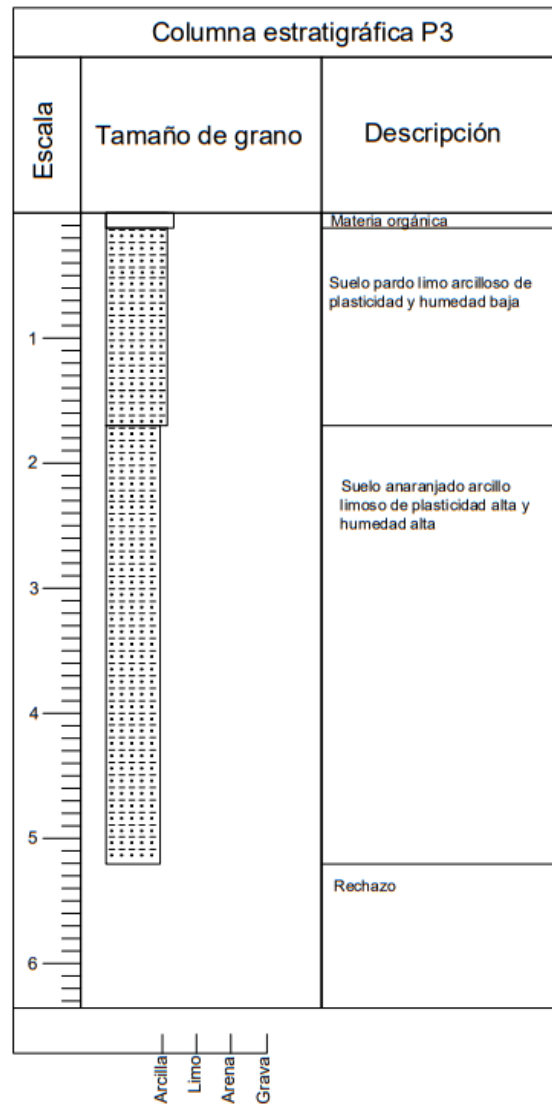
Perforación 3

Se inicia la perforación encontrando una capa de 0,1m de espesor de materia orgánica, posteriormente se encuentra un estrato de 1,6m de espesor de suelo color pardo de textura limo arcillosa el cual presenta plasticidad media a baja y humedad media con consistencia suave, posteriormente se encuentra un estrato 3,5m de espesor de suelo de color anaranjado con textura arcillo limosa de plasticidad media-alta y humedad media, este suelo permanece continuo hasta la profundidad de 5,2m donde finaliza la perforación, en el recorrido de la perforación no se encontró el NAF.



Fotografía 3. Perforación 3.

Columna estratigráfica P3



Columna estratigráfica P3.

Fuente: Equipo consultor (2023).

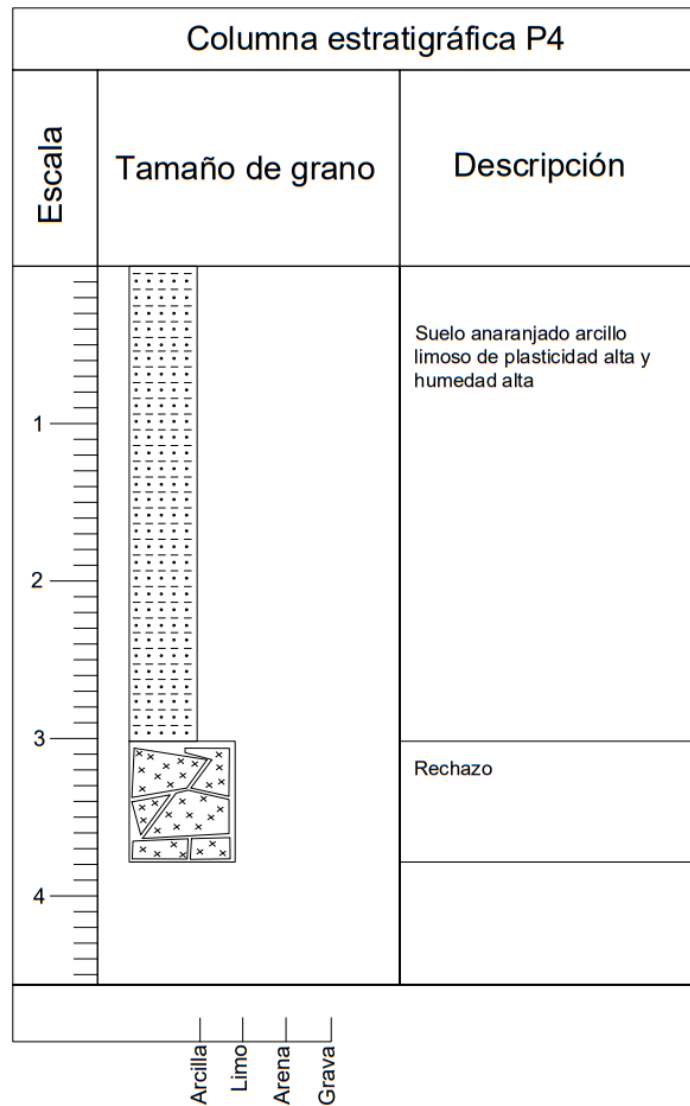
Perforación 4

Se inicia la perforación encontrando un estrato de 3m de espesor de suelo color anaranjado con textura arcillo limosa de plasticidad alta y humedad media a alta de consistencia suave, este suelo permanece continuo hasta la profundidad de 3 m donde finaliza la perforación por rechazo, en el recorrido de la perforación no se encontró el NAF.



Fotografía 4. Perforación 4.

Columna estratigráfica P4



Columna estratigráfica P4.

Fuente: Equipo consultor (2023).

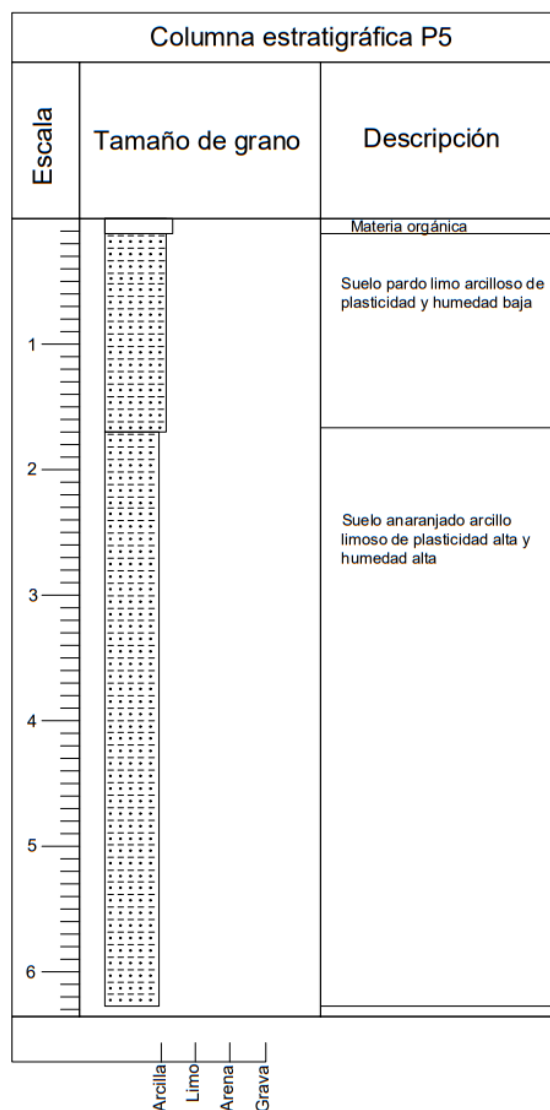
Perforación 5

Se inicia la perforación encontrando una capa de 0,1m de espesor de materia orgánica, posteriormente se encuentra un estrato de 3m de espesor de suelo color pardo de textura limo arcillosa el cual presenta plasticidad baja y humedad baja con consistencia moderada, posteriormente se encuentra un estrato 3m de espesor de suelo de color anaranjado con textura arcillo limosa de plasticidad media-alta y humedad media, este suelo permanece continuo hasta la profundidad de 6,1m donde finaliza el sondeo, en el recorrido de la perforación no se encontró el NAF.



Fotografía 5. Perforación 5.

Columna estratigráfica P5



Columna estratigráfica P5.

Fuente: Equipo consultor (2023).

Tabla 8.1 Distribución de sondeos dentro del áreas de influencia.

SONDEO	DESCRIPCIÓN	WGS 84		MAGNA ORIGEN OESTE		PROF
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE	

P1	Flanco izquierdo del deslizamiento	75° 43' 04.38"	4° 47' 47.34"	1150840.139	1022297.581	5,0 m
P2	Corona del deslizamiento	75° 43' 04.01	4° 47' 47.06	1150851.555	1022289.024	4,0 m
P3	Flanco derecho del deslizamiento	75° 43' 04.15	4° 47' 47.01	1150847.182	1022287.178	5,2 m
P4	Pie del deslizamiento	75° 43' 04.60	4° 47' 47.11	1150833.390	1022290.492	3,0 m
P5	Zona alta de la ladera	75° 43' 03.83	4° 47' 47.43	1150857.145	1022300.276	6,1 m

Clasificación de Excavaciones:

De acuerdo al RAS (numeral G .2.3.1.1) las excavaciones se clasifican de acuerdo con el tipo de suelo, el grado de dificultad de la misma y la variabilidad del suelo, como lo indica la tabla #, la cual tiene en cuenta la profundidad de las excavaciones y el tipo de suelo.

Tabla 8.2 Grado de dificultad de las excavaciones

PROFUNDIDAD DE LA EXCAVACIÓN (m)					
TIPO DE SUELO	H<2.5	2.5 < H < 4	4 < H < 7.5	7.5 < H < 10	H > 10
1	Bajo	Medio	Medio	Medio Alto	Medio Alto
2	Bajo	Medio	Medio Alto	Alto	Alto
3	Medio	Medio Alto	Alto	Alto	Alto
4	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
5	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
6	Medio	Medio	Medio Alto	Alto	Alto
7	Medio	Medio Alto	Alto	Alto	Alto
8	Bajo	Bajo	Medio	Medio Alto	Medio Alto
9	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Medio

Tabla 8.2 Fuente: RAS (2000)

8.2 Etapa 2: Recopilación de información

8.2.1 Geología Local

El área de interés se localiza sobre la litología conocida como Flujos de lodo y cenizas recientes (Qto), compuesta por material volcánico producto de la actividad cuaternaria de los volcanes del Complejo Ruiz – Tolima, principalmente consta de material lapilli hacia la zona de estudio, y estas se encuentra alteradas por efectos de la meteorización y la erosión, se caracteriza su color anaranjado debido a la oxidación.

Para esta zona se presenta una distribución principalmente de 3 tipos de suelo los cuales forman las unidades geológicas superficiales como se puede observar en la Figura .

- Suelo transportado limo-arcilloso de material volcánico pardo (Stlavp)

Esta unidad corresponde a suelos que se han formado a partir de depositación de material volcánico de caída piroclástica del complejo Ruiz – Tolima, esta unidad alcanza espesores de hasta 4m hacia la parte alta de la ladera, sin embargo, está ausente hacia la zona baja de la ladera, su textura predominante es limo-arcillosa y su color es pardo.

- Suelo residual arcillo-limoso de material volcánico naranja (Sralvn)

Esta unidad corresponde a suelos que se han formado a partir de la meteorización de flujos de lodo provenientes del complejo volcánico Ruiz – Tolima, esta unidad alcanza espesores de hasta 4m hacia la parte baja de la ladera y siendo muy homogéneo en general, su textura predominante es arcillo-limosa y su color es naranja.

- Depósitos aluviales recientes (Qal)

Corresponde a depósitos aluviales recientes asociados a la quebrada la dulcera

Figura 8.4 Mapa de unidades geológicas superficiales

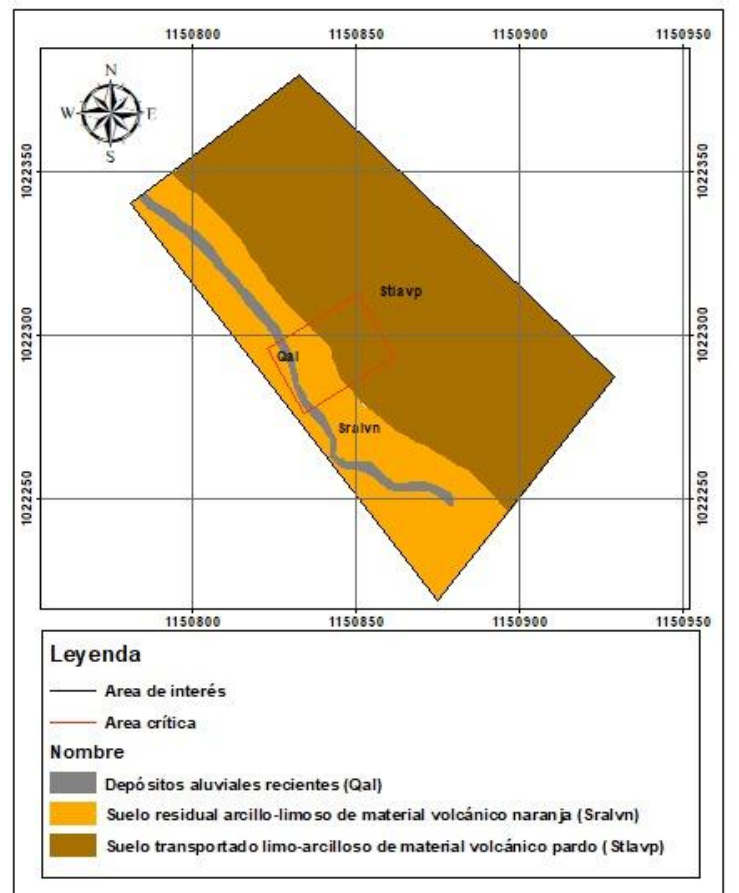


Figura 8.4 Mapa de la geología local del área de influencia. Fuente: Equipo consultor (2023)

8.2.2 Geología Estructural

El área del municipio de Pereira, Risaralda está ubicada en la depresión intramontañosa del Cauca entre las Cordilleras Central y Occidental. La cuenca de la quebrada Dosquebradas está enmarcada dentro del gran dominio tectónico del Sistema de Fallas Romeral, y se localiza en el borde de la Cordillera Central. Las fallas que se encuentran son La Negra, Santa Rosa, El Rodeo, Boquerón, Agua Azul, Gutiérrez, La Fría, Frailes, San Roque y Filo Bonito.

Dos grupos principales de fallas cruzan la plancha 224; al Este sobre la Cordillera Central, existen varias trazas pertenecientes a la zona de Falla Romeral mientras que por la Cordillera Occidental cruza la Falla de Toro sensiblemente paralela a la anterior quizás pertenecientes al mismo sistema de

Fallas del Cauca.

Fallas del sistema Romeral.

Este sistema de fallas tal vez es uno de los mejor conocidos en el país (Barrero, et al, 1969; González. 1977). Se encuentra representado en la plancha, por alguna de sus trazas más occidentales; solo se manifiesta en extensiones no mayores a los 10 kms. Esta falla pone en contacto sedimentos del Cretáceo con tres unidades diferentes: Neis de Chinchiná, el gabro de Santa Rosa y algunos sedimentos de la Formación Amagá. El sistema de Fallas Romeral localizado en el flanco occidental de la Cordillera Central atraviesa todo el país desde el Sur del departamento de Nariño hasta el extremo Norte de la Cordillera donde desaparece bajo sedimentos Terciarios.

Falla de Toro

Este nombre fue dado por Gómez, H. (1970), a una fractura que se extiende desde el Sur de la Plancha 223, hasta el Norte del municipio de Balboa y continua fuera de la plancha hacia el Norte donde desaparece bajo los sedimentos recientes del río Risaralda. Pone en contacto los sedimentos del Grupo Dagua con los basaltos y diabasas del Grupo Diabásico. Es una falla inversa de ángulo alto a vertical que buza hacia el W.

8.2.3 Geomorfología a nivel de elementos

Elementos o componentes geomorfológicos: Representan el máximo nivel de detalle de jerarquía en la subdivisión propuesta (escala 1:2000 a 1:10.000). Esta categoría está determinada por los rasgos del relieve, definidos en sitios puntuales y determinados por la morfometría detallada del terreno en una subunidad geomorfológica. Igualmente puede estar definida por microrelieves asociados con una característica litológica o sedimentaria establecida con base en análisis detallados. (Velásquez, 1999; Ingeominas, 1999; Meijerink, 1988; Damen, 1990; en (Carvajal, 2011).

Para identificar los elementos geomorfológicos 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. También se incluye la comparación según la relación geométrica entre las diferentes posiciones espaciales (SGC, 2012). Los componentes del terreno para su descripción son:

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, independiente de la altura absoluta o el nivel del mar. Es un atributo que indica la energía potencial de un sistema

de drenaje y los materiales constitutivos de la geoforma, en la tabla 4 se presentan los rangos de relieve relativo (SGC, 2012).

Tabla 8.1 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.

Tabla 8.1 Tabla donde se evidencia el rasgo de la zona de influencias. Fuente: (SGC,2012)

A partir de los datos de relieve anteriormente mencionados y teniendo en cuenta las alturas topográficas en las que se encuentra el área de estudio, se determina que el relieve de la ladera es **muy bajo** obteniendo un valor de 26 m dentro de <50 m, por lo que se considera material muy blando erosionable.

Inclinación de la ladera: Es el ángulo que forma una ladera o terreno respecto a un plano horizontal. La inclinación de la ladera está 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 6.3 se presentan los rangos de inclinación (SGC, 2012).

Tabla 8.2 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.

Tabla 8.2 Fuente: (SGC, 2012)

Para el área de interés los valores son variables dependiendo del elemento geomorfológico, para las laderas denudacionales es de 20 a 35° abrupta a escarpada, y para las zonas de explanación están alrededor de 11° o menos, lo cual corresponde a laderas muy inclinadas.

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 6.4 se presentan los rangos de longitud de ladera (SGC, 2012).

Tabla 8.3 Rangos de longitud de 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.

Tabla 8.3 Fuente: (SGC,2012)

La longitud de la ladera en estudio se encuentra en una longitud <50m, catalogándose como muy corta.

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 8.4 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 8.4. 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

Tabla 8.4 Fuente: (SGC, 2012)

Para la ladera denudacional se cuenta con una curvatura convexa. De acuerdo con lo anterior y verificación en campo se identificaron los siguientes elementos geomorfológicos.

8.2.3.1 Superficie de aplanamiento convexas con inclinación plana a suavemente inclinada y relieve relativo bajo

Es entendida como porción de terreno extensa, plana, no confinada, de posición baja y pendiente plana a suave, generalmente menor a 5°.

Morfogénesis: Se generan por acción del hombre, el cual modifica de manera permanente la superficie de la tierra, por medio de cortes o explanaciones de acuerdo a la necesidad. (SGC, 2015)

Morfografía: Este elemento lo representan zonas planas con pendientes menores al 3%, en las cuales se identifican elementos como cortes o superficies de explanación.

Morfodinámica: Esta geoforma no presenta ocurrencia de movimientos en masa, dada su baja pendiente.

8.2.3.2 Escarpe de erosión menor concavos con inclinación muy inclinada, longitud de ladera muy corta y relieve relativo muy bajo

Ladera abrupta de longitud corta de forma cóncava o convexa o en ocasiones recta, con pendiente escarpada a muy escarpada, generado por procesos de erosión.

Morfogénesis: Se generan por la erosión y meteorización mecánica diferencial acentuada en geoformas más elevadas.

Morfografía: Este elemento representa laderas escarpadas, y zonas de escarpe de erosión abruptos de pendiente más alta y otras zonas con pendientes menos abruptas que corresponden a zonas más blandas, su concavidad puede variar entre cóncavo y convexo.

Morfodinámica: Esta geoforma presenta alta ocurrencia de movimientos en masa, dado que, cuenta con una alta pendiente y está compuesta por material muy blando.

8.2.3.3 Cauce activo

Corrientes de aguas naturales que se encuentran en los valles de la superficie.

Morfogénesis: Se generan de las partes más bajas de las montañas o laderas, en donde las corrientes corren por los materiales mientras los socavan poco a poco, mientras el material sea más blando, más será removido por las corrientes.

Morfografía: Este elemento presenta formas cóncavas por donde van las corrientes.

Morfodinámica: El río presenta un patrón rectilíneo con poca sinuosidad.

Tabla 8.5 Resumen características geomorfológicas del área de estudio.

GEOMORFO-ESTRUCTURA	PROVINCIA GEOMORFOLÓGICA	REGIÓN GEOMORFOLÓGICA	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA	SUBUNIDAD GEOMORFOLÓGICA	ELEMENTO O COMPONENTE	ÁREA	%
Sistema orogénico Andino	Cordillera Central	Ambiente denudacional	Cerros residuales	Ladera denudacional	Cerros residuales convexos con inclinación muy inclinada, longitud de ladera muy corta y relieve relativo bajo	0.583863	53.98
			Cerros residuales	Ladera denudacional	Deslizamiento	0.018362	1.69
		Ambiente antrópico	Planicies	Planicies <u>deposicional</u>	Superficies de aplanamiento convexos con inclinación plana a suavemente inclinada y relieve relativo bajo	0.460469	42.59
		Ambiente Fluvial	Planicies aluviales	Cauce activo	Cauce activo	0.018742	1.74

Tabla 8.5 Fuente: Equipo consultor, 2023

Figura 8.5 Elemento geomorfológico del área de influencia

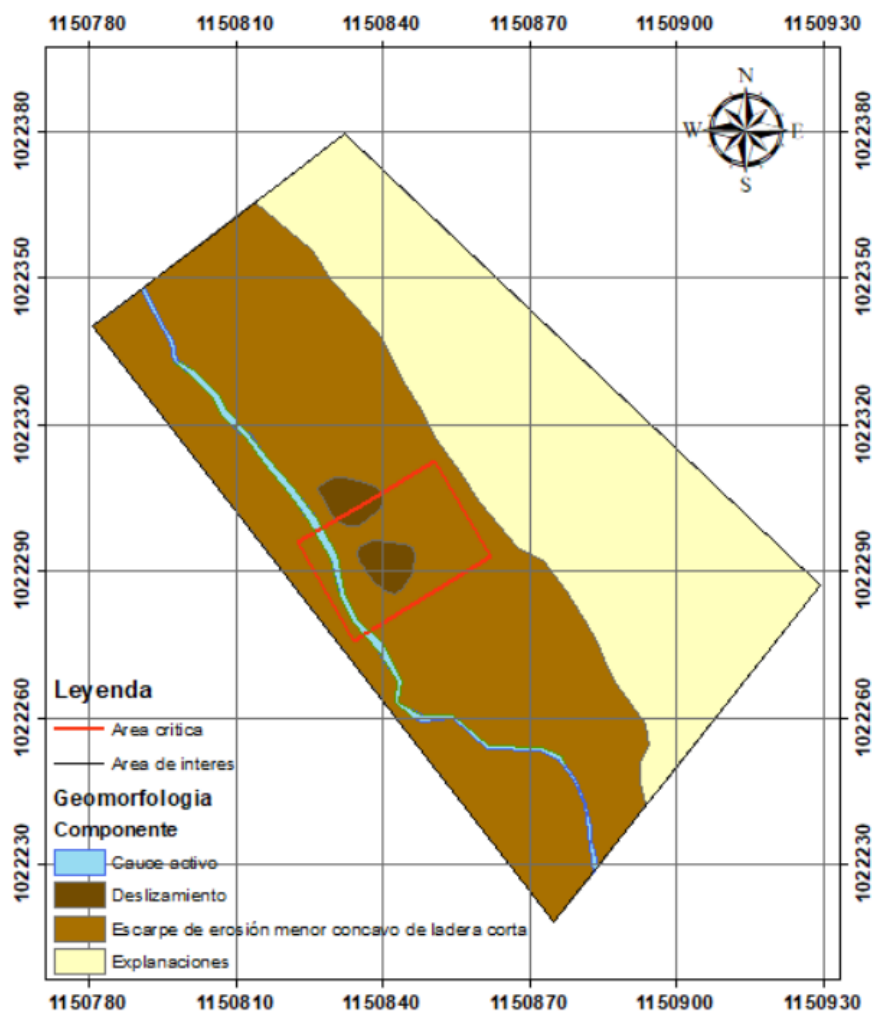


Figura 8.5 Mapa de elementos geomorfológicos del área de influencia

8.3 Etapa 3: Procesamiento de datos

En este apartado se muestran los resultados, producto de la interacción de la información topográfica, insumo obtenido a partir del Sistema de Información Geográfica de (SIG) de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira S.AS-E.S.P; con el cual se desarrolla el DEM, como así insumo de la información recopilada; pero por temas de visualización se muestra un TIN y mapa de pendiente del sitio, el cual se construye a partir de información topográfica, el cual debe ser categorizado a partir de la metodología del servicio geológico colombiano como se muestra en la siguiente figura 8.7.

Figura 8.6 Modelo de elevación digital del terreno (TIN).

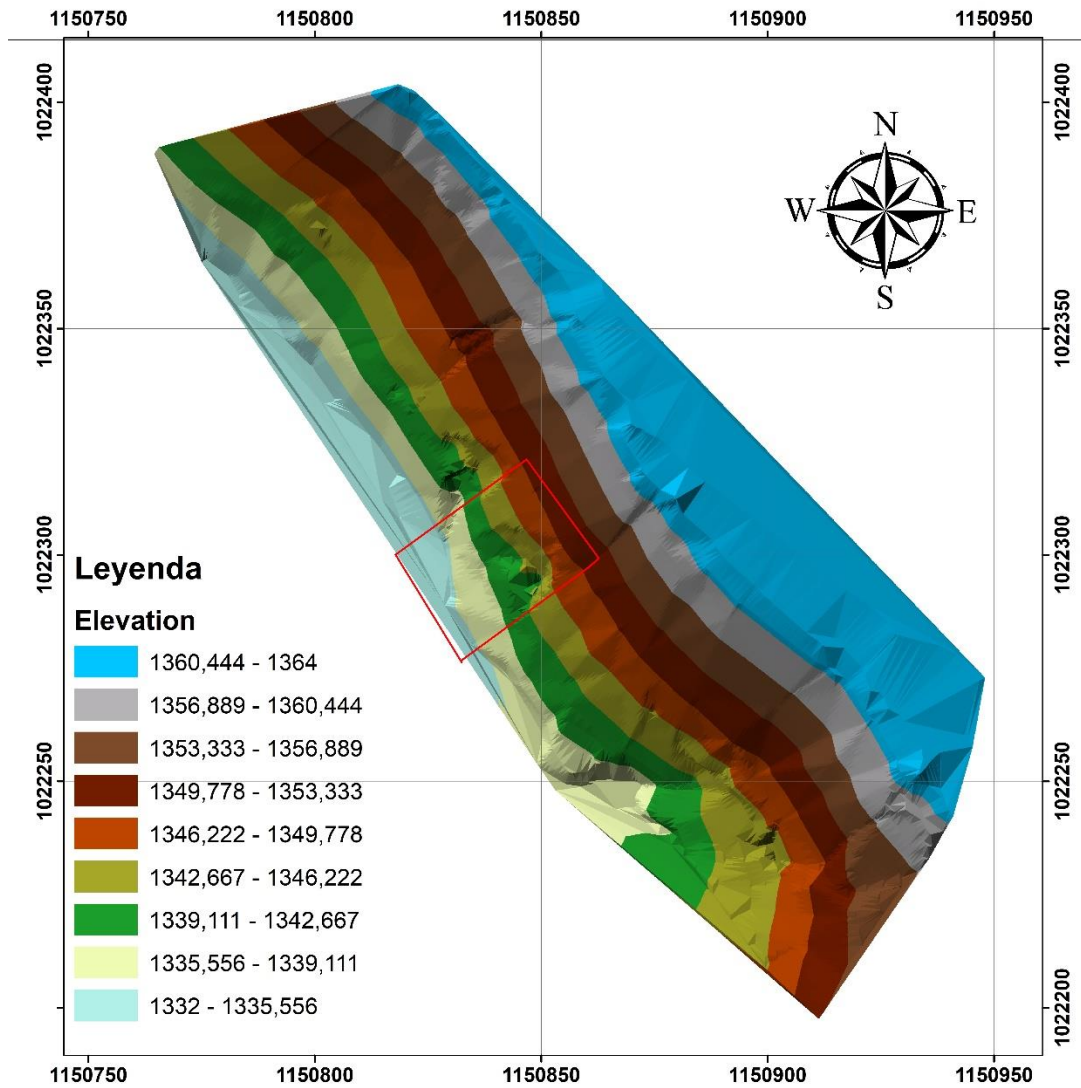


Figura 8.6 Modelo de elevación digital de terreno. Fuente: Propio (2023)

Análisis de Pendiente: Mapa que se construye a partir de información topográfica, el cual debe ser categorizado a partir de la metodología del servicio geológico colombiano como se muestra en la siguiente figura 8.7

Figura 8.7 Mapa de pendiente del área de influencia

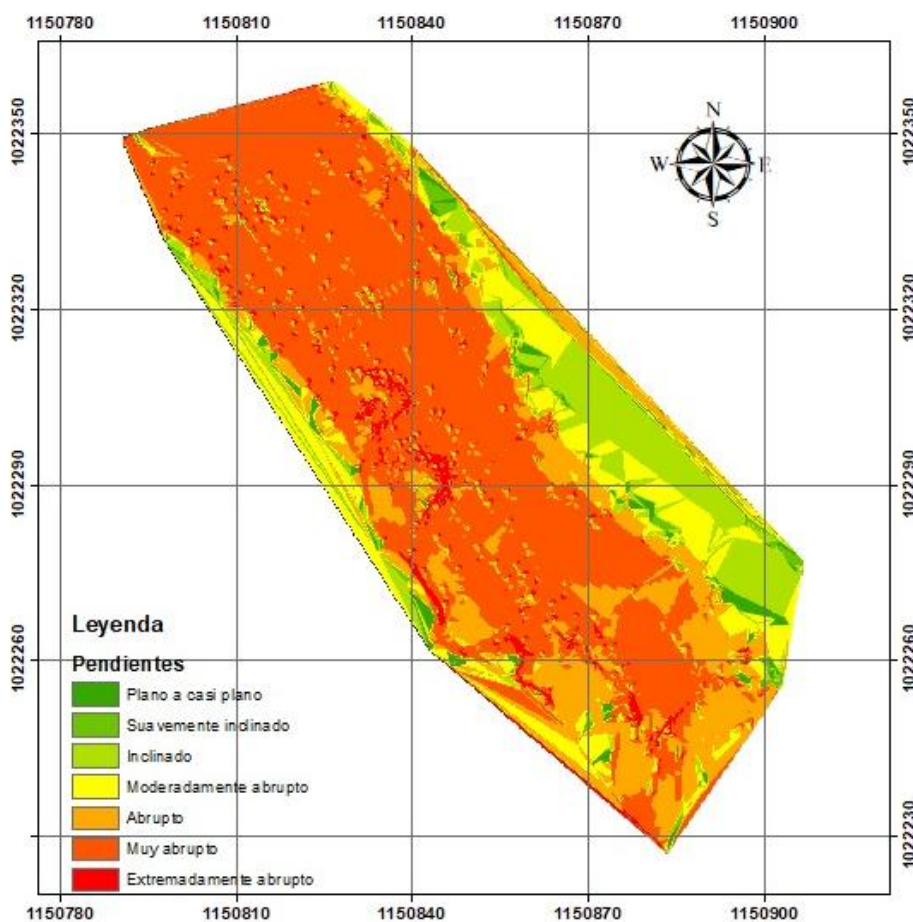


Figura 8.7 Se observa el mapa de pendiente del área de influencia, realizado en la empresa Zenit equipo consultor (2023)

Tabla 8.6 Clasificación de las 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 (soliflucción) 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 soliflucción 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.

Tabla 8.6 Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

Tabla 8.7 Distribución de las pendientes en el área de estudio (área en m²)

Pendiente	Área	Porcentaje
Plano a casi plano (0° - 2°)	124,7	2%
Suavemente inclinado (2° - 4°)	132,6	2%
Inclinado (4° - 8°)	733,6	11%
Moderadamente abrupto (8° - 16°)	787,1	11%
Abrupto (16° - 35°)	1376,2	20%
Muy abrupto (35° - 55°)	3540,2	51%
Extremadamente abrupto (mayor a 55°)	212,5	3%
	6906,9	100%

Tabla 8.7 Fuente: Equipo consultor (2023)

8.4 Etapa 4: Análisis de laboratorio

En el apartado de estratigrafía se presentaron las columnas estratigráficas correspondientes a cada perforación, con base en los espesores determinados se pudieron agrupar los parámetros geomecánicos según si pertenecían a un estrato u otro, con lo que se consiguió asignar parámetros geotécnicos definitivos a cada uno de los estratos, así como se muestran en las siguientes tablas.

Suelo residual –Horizonte más superficial

Tabla 8.8 Propiedades geomecánica estrato pardo.

ENSAYO	VALOR PROMEDIO
Clasificación	SC
Humedad	80%
Límite líquido	96
Límite plástico	68
Índice de plasticidad	28
Peso unitario húmedo	1,38 ton/m ³
Peso unitario seco	0,78 ton/m ³
Compresión inconfiada	4,00 ton/m ²
Cohesión	5,41 ton/m ²

ENSAYO	VALOR PROMEDIO
Ángulo de fricción	28°

Tabla 8.8 Se muestra los resultados de laboratorio de la muestra tomada en campo" Horizonte más superficial".
Fuente: equipo consultor (2023)

Suelo residual –Horizonte de transición suelo-roca

Tabla 8.9 Propiedades geomecánica estrato naranja

ENSAYO	VALOR PROMEDIO
Clasificación	MH
Humedad	73%
Límite líquido	72
Límite plástico	55
Índice de plasticidad	17
Peso unitario húmedo	1,601 ton/m ³
Peso unitario seco	0,925 ton/m ³
Compresión inconfiada	8,85 ton/m ²
Cohesión	10,924ton/m ²
Ángulo de fricción	27°

Tabla 8.9 Se visualizan los resultados de laboratorio, realizado al suelo de transición. Fuente: equipo consultor (2023)

Estos resultados de laboratorio en complemento con datos de microzonificación sísmica, permiten definir el perfil del suelo como también la determinación de la zona de amenaza.

Perfil de suelo: De acuerdo a los efectos locales descritos en el NSR-10 reglamento Colombiano de Construcciones sismo resistente, el perfil del suelo en la zona de estudio, se tiene de acuerdo a la tabla A.2.4-1 y A.2.3-2.

Definición de la zona de amenaza

Tabla 8.10 Valores de A_a y A_v para los municipios de Risaralda NSR-10.

Departamento de Risaralda						
Municipio	Código Municipio	A_a	A_v	Zona de Amenaza Sísmica	A_e	A_d
Pereira	66001	0.25	0.25	Alta	0.20	0.10
Apía	66045	0.30	0.30	Alta	0.20	0.10
Balboa	66075	0.25	0.30	Alta	0.20	0.10
Belén de Umbría	66088	0.25	0.30	Alta	0.20	0.10
Dos Quebradas	66170	0.25	0.25	Alta	0.20	0.10
Guática	66318	0.25	0.30	Alta	0.20	0.10
La Celia	66383	0.30	0.30	Alta	0.20	0.10
La Virginia	66400	0.25	0.30	Alta	0.20	0.10
Marsella	66440	0.25	0.25	Alta	0.20	0.10
Mistrató	66456	0.30	0.30	Alta	0.20	0.10
Pueblo Rico	66572	0.30	0.30	Alta	0.20	0.10
Quinchía	66594	0.25	0.30	Alta	0.20	0.10
Santa Rosa de Cabal	66682	0.25	0.25	Alta	0.18	0.09
Santuario	66687	0.30	0.30	Alta	0.20	0.10

Tabla 8.10 Fuente: NSR-10

Para la ciudad de Pereira, se toma en cuenta la microzonificación sísmica realizada oficializada en el Decreto 932 del 19 de octubre de 2011. Dicho decreto identifica 7 zonas sísmicas en el casco urbano de Pereira, así:

Tabla 8.11 Coeficientes espectrales de diseño para la ciudad de Pereira

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7
T_o	0,08	0,10	0,17	0,19	0,07	0,17	0,15
T_c	0,40	0,50	0,80	0,90	0,32	0,80	0,70
T_L	3,5	4,0	5,8	5,8	2,8	6,4	6,2
A_a	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
A_v	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
F_a	1.76	1.60	1.44	1.28	1.76	1.60	1.76
F_v	1.47	1.67	2.40	2.40	1.17	2.67	2.57

Tabla 8.11 Fuente: Alcaldía de Pereira (2011)

Particularmente, la zona de estudio, está en la zona 3, conformada por colinas suavemente o aún semi planas, con disección de cauces baja a intermedia. El subsuelo está constituido por cenizas volcánicas con espesores de 20 a 25 metros, las cuales reposan sobre conglomerados de buena rigidez y cementación que alcanzan una profundidad superior a 150 metros, por lo que los coeficientes F_a y F_v serán, 1,44 y 2,40, respectivamente.

Definición del tipo perfil del suelo.

Tabla 8.12 Clasificación del perfil de suelo

Tabla A.2.4-1
Clasificación de los perfiles de suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $\bar{v}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s > $\bar{v}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s > $\bar{v}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) > $\bar{s}_u \geq 50$ kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²)
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	180 m/s > \bar{v}_s
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ 50 kPa (≈ 0.50 kgf/cm ²) > \bar{s}_u
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F ₁ — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F ₂ — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas ($H > 3$ m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F ₃ — Arcillas de muy alta plasticidad ($H > 7.5$ m con Índice de Plasticidad $IP > 75$) F ₄ — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda ($H > 36$ m)	

Tabla 8.12 Se visualiza la clasificación del perfil de suelo de acuerdo al Manual de Diseños Sismo Resistencia.
Fuente: NSR-10

No se tiene un dato específico ni de velocidad de la onda S, se cuenta con un dato de número de golpes de SPT en la perforación en roca y se cuenta con información geomecánica suficiente. Los suelos deben estar agrupados en tipos C, D o E pues A y B corresponde a rocas; los suelos tipo C no suelen aparecer en regiones de actividad sísmica alta y suelen tener resistencia a la compresión alta pero no se descarta la posibilidad de encontrarlos.

Para saber en qué perfil de suelo se clasifican los estratos identificados, la NSR-10 presenta la tabla anterior. 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 lo cual se determina por la resistencia a la compresión inconfínada. En los estratos encontrados se tiene que:

Tabla 8.13 Consideraciones para establecer si un estrato de suelo se clasifica como perfil tipo E según sus propiedades geomecánicas

Estrato	IP (%)	w (%)	Su (KPa)	Perfil?
Pardo	68	80	40	E
Naranja	17	73	88	E

Tabla 8.13 Fuente: Equipo consultor (2023)

Una vez conocidos el tipo de perfil de suelo y el coeficiente de aceleración pico horizontal y el de velocidad 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, sin embargo, éstos ya fueron identificados desde la microzonificación sísmica de Pereira.

El coeficiente de importancia que deberá usarse para el proyecto es $I = 1.0$ para edificaciones de ocupación normal del grupo I. Los coeficientes espectrales de diseño según la microzonificación sísmica del municipio y sus decretos complementarios que deberán usarse en el diseño de estructuras en esta zona son:

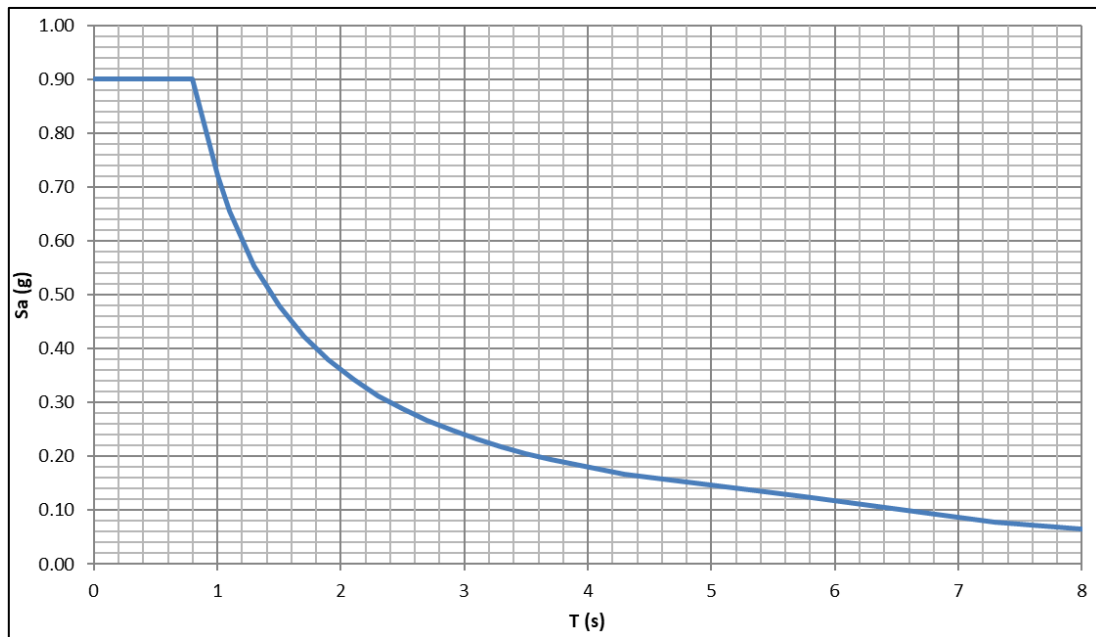
Tabla 8.14 Coeficientes espectrales para diseño

COEFICIENTE	MAGNITU D
To: Período de Vibración inicio de la zona de aceleración constante para períodos cortos del espectro	0.17
Tc: Período de Vibración para la zona de transición del espectro	0.80
TL: Período de Vibración inicio de la zona de aceleración constante para períodos largos del espectro	5.8
Aa: Coeficiente de Aceleración Pico Efectiva en Roca	0.25
Fa: Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos.	1.44
Fv: Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios	2.40

Tabla 8.14 Fuente: Equipo consultor (2023) a partir de Alcaldía de Pereira (2011)

La forma del espectro elástico de aceleraciones (S_a) expresada como fracción de la gravedad, para un coeficiente del 5% del amortiguamiento crítico que es el utilizado en diseño, se presenta a continuación:

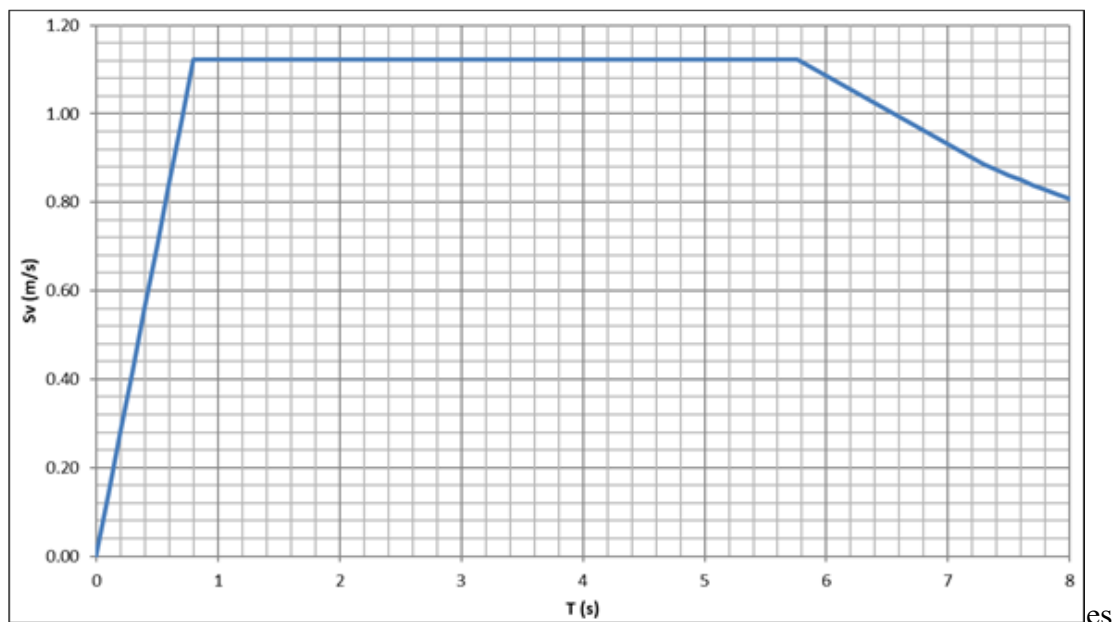
Figura 8.8 Espectro elástico de aceleraciones



Fuente: Equipo consultor (2023)

La forma del espectro elástico de velocidades en m/s, para un coeficiente del 5% del amortiguamiento crítico se presenta en la siguiente figura:

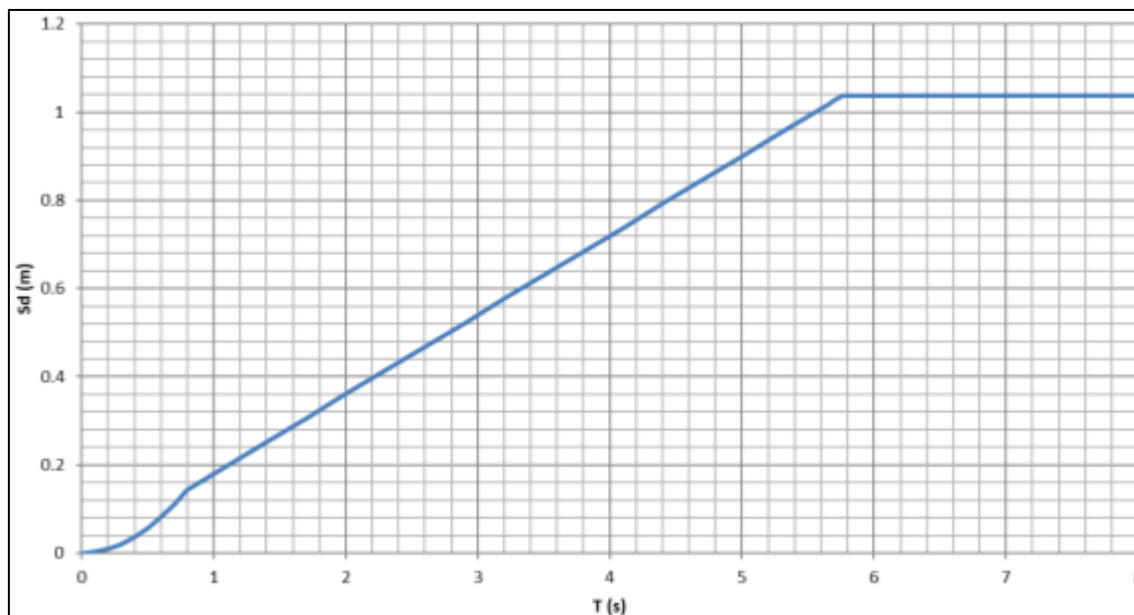
Figura 8.9 Espectro elástico de velocidad



Fuente: Equipo consultor (2023)

La forma del espectro elástico de desplazamientos en metros, para un coeficiente del 5% del amortiguamiento crítico es:

Figura 8.9 Espectro elástico de desplazamientos



Fuente: Equipo consultor (2023)

Empuje de tierras:

Según el estrato, el ángulo de fricción varía, a su vez, éste determina el empuje de tierras. Se tiene entonces que el ángulo de fricción más crítico identificado es de 27 grados, por lo tanto:

$$K_a = 0,37$$

$$K_p = 2,66$$

$$K_o = 0,54$$

8.5 Etapa 5: Determinación de la amenaza, caracterización y zonificación la vulnerabilidad, susceptibilidad y riesgo.

Para el desarrollo de la determinación de la amenaza se tuvieron en cuenta cierto criterio, tales como: Seguridad ante la falla, capacidad ante la falla y los factores de seguridad en suelos.

8.3.1 Seguridad ante falla

8.3.1.1 capacidad ante falla

8.3.1.1.1 Factor de seguridad en suelos

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
- El espesor del suelo y su variación
- La litoestratigrafía
- La posición del nivel freático
- Observación en campo
- Resultado de laboratorio

De los parámetros anteriores, más los ensayos de laboratorio se lograron encontrar los criterios 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.

8.3.1.1.2 Estabilidad de la ladera (Amenaza)

Como se mencionó en el apartado 7.6 el cuál trata de las generalidades que se deben de tener en cuenta para analizar las condiciones de estabilidad se requieren los siguientes datos:

- Topografía
- Geología
- Condiciones de agua: Aquí es importante menciona que, el nivel de aguas freáticas (NAF) no se encontró en las perforaciones en el área de estudio, sin embargo, dicho nivel se trabajará desde dos escenarios: suelo seco y suelo saturado, por lo anterior, no se hará un análisis detallado de la lluvia precedente.
- Condición de sismo: 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. Todos estos valores fueron presentados previamente.

$$a_{max}=1.44*1*0.25$$

$$a_{max}=0.36$$

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 8.15 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

Tabla 8.15 Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

Según lo anterior:

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

$$\frac{KST}{0,36} = 0,8$$

$$KST = 0,29$$

- Métodos de análisis: Los métodos utilizados serán Bishop simplificado, Janbu simplificado, y Gle/Morgenstern – Price, los cuales son considerados los métodos más rigurosos y completos de análisis de estabilidad, los cuales pueden ser utilizados para hallar el factor de seguridad de superficies de falla de cualquier forma y a taludes con perfiles de suelo heterogéneo.

Los factores de seguridad recomendados en la literatura para el análisis son los propuestos por en la “Norma Colombiana Sismo Resistente NSR – 10” los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8.16 Factores de seguridad mínimos

Tabla H.2.4-1
Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos

Condición	F _{SBM}		F _{SBUM}	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes – Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes – Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

(*) Nota: Los parámetros sísmicos seudo estáticos de Construcción serán el 50% de los de Diseño

Tabla 8.16 Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

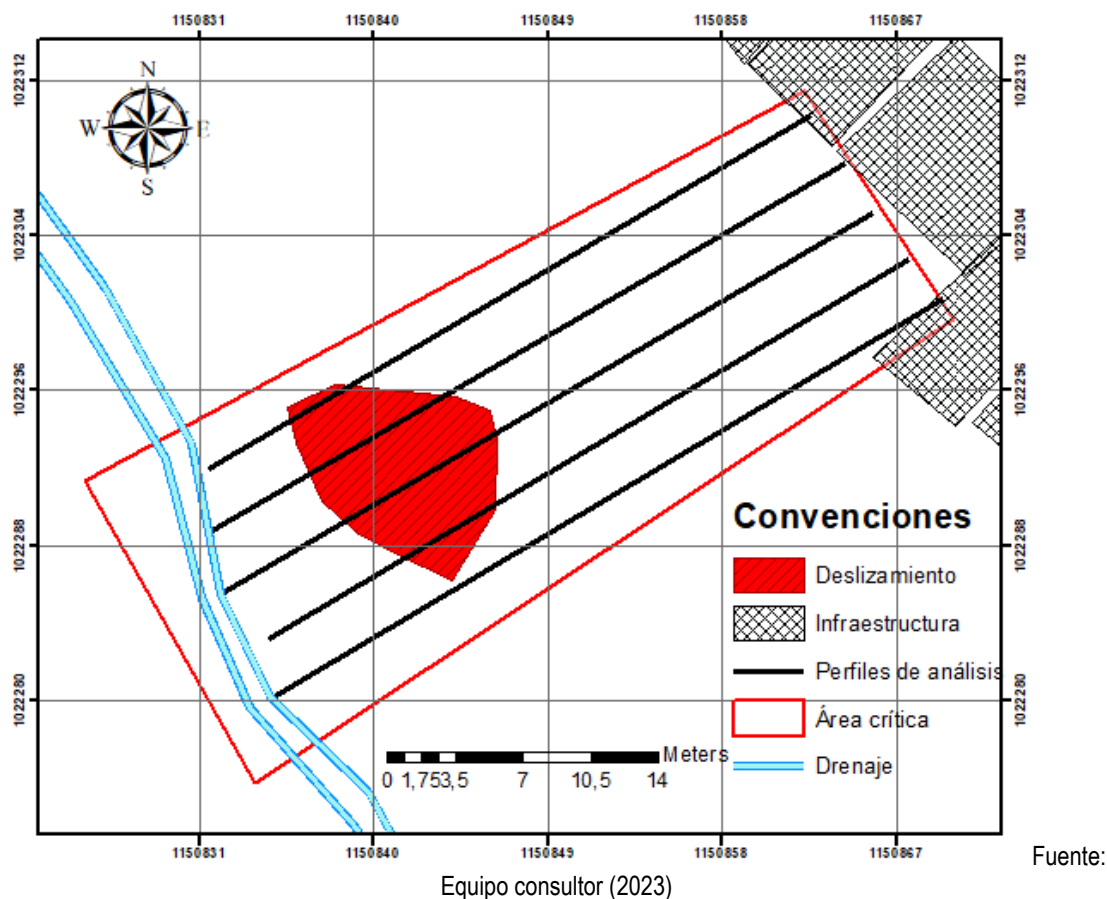
Para obtener los valores del factor de seguridad se empleará el programa llamado Slide V. 6.0 y se harán análisis en cuatro condiciones: 1) secas sin sismo, 2) secas con sismos, 3) saturadas sin sismo, y 4) saturada con sismo.

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.

Partiendo del hecho que la escala de trabajo mínima recomendada por el Decreto 1807 de 2014 y el Decreto 1077 de 2015 para estudios detallados en suelo urbano es de mínimo 1:2.000, y considerando la extensión del área de trabajo, se construyeron 5 perfiles de análisis.

Figura 8.10 Localización de los perfiles de análisis



Para el análisis de la amenaza por movimiento en masa del terreno se hizo aplicación de un método determinístico combinado con el conocimiento de la zona de estudio a partir de elementos geomorfológicos, criterios de campo y resultados de ensayos de laboratorio los cuales permitieron conocer las propiedades geomecánicas de los materiales.

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 amenaza están basadas en el factor de seguridad que se tiene en la ladera, discriminándose como se muestra a continuación:

Tabla 8.17 Categorías de zonificación de susceptibilidad y amenaza según los factores de seguridad.

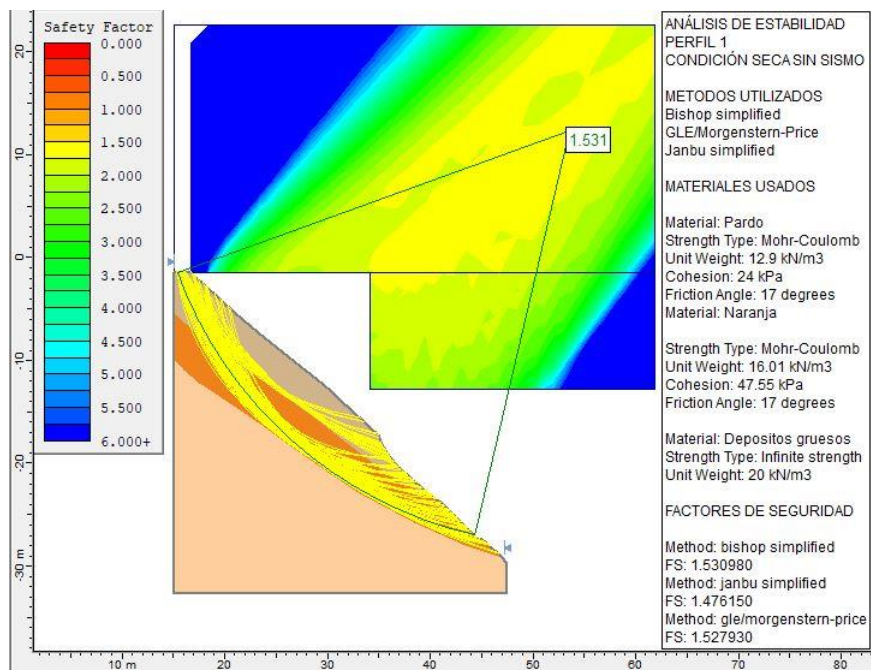
NIVEL DE AMENAZA	FACTOR DE SEGURIDAD
Alta	<1,1
Media	1,1-1,5
Baja	>1,5

Tabla 8.17 Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

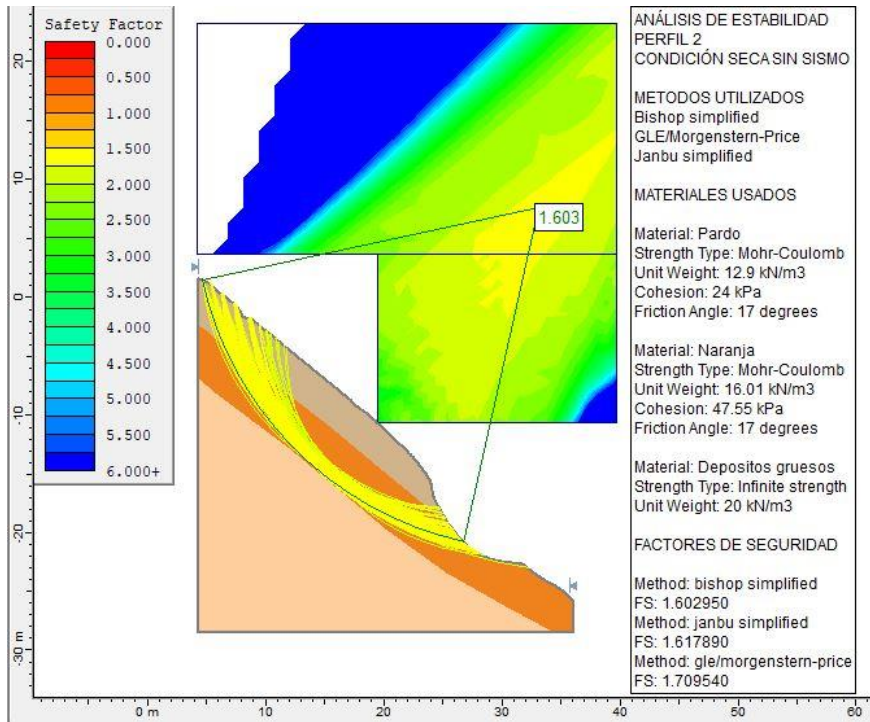
A continuación, se presentan las distintas condiciones en las cuales se corrieron cada uno de los perfiles y la tabla resumida de los resultados de los factores de seguridad, de los 5 perfiles de análisis.

Condición: Ladera seca y estática (sin sismo)

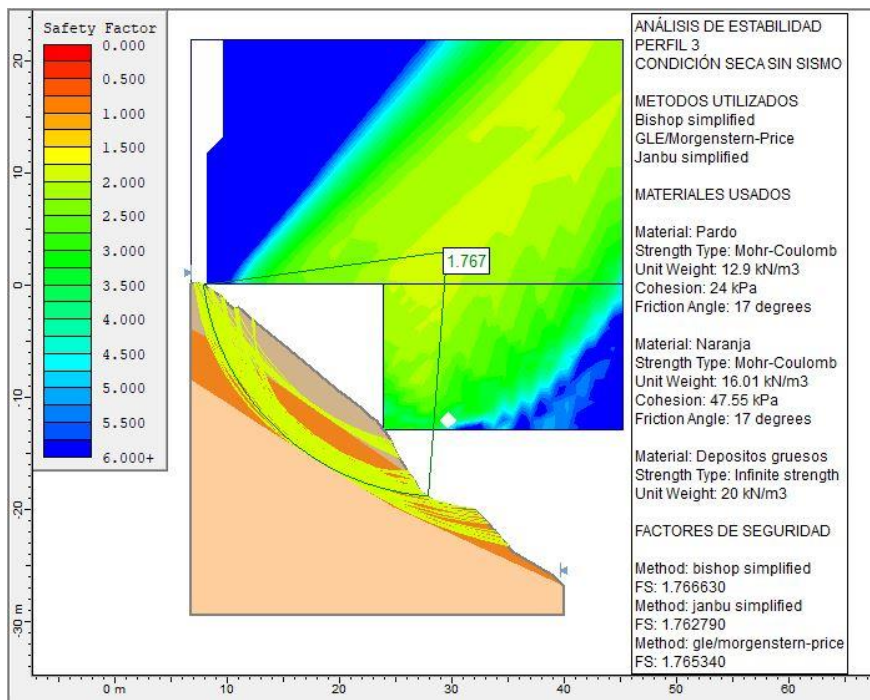
Perfil 1



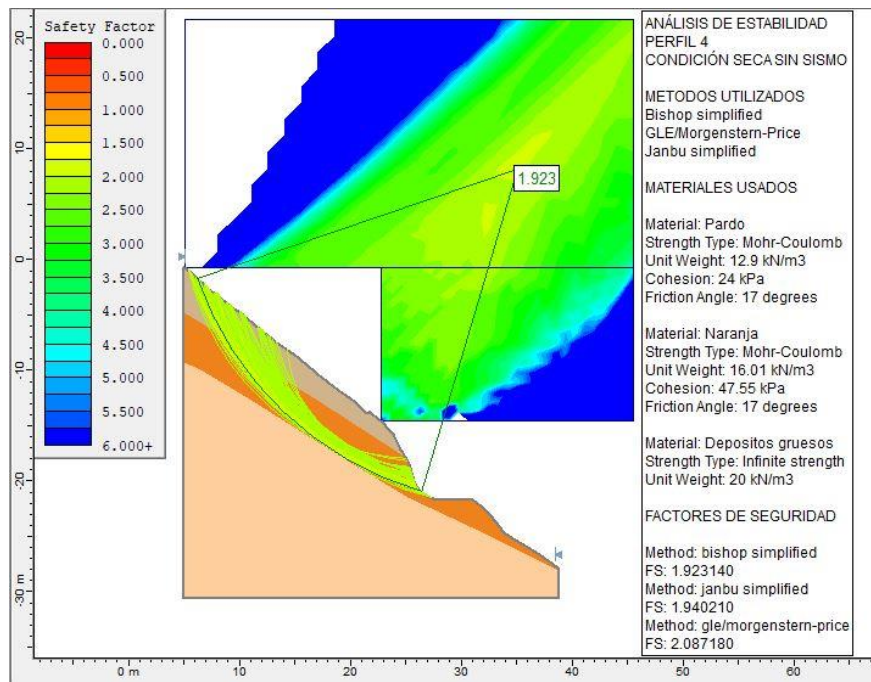
Perfil 2



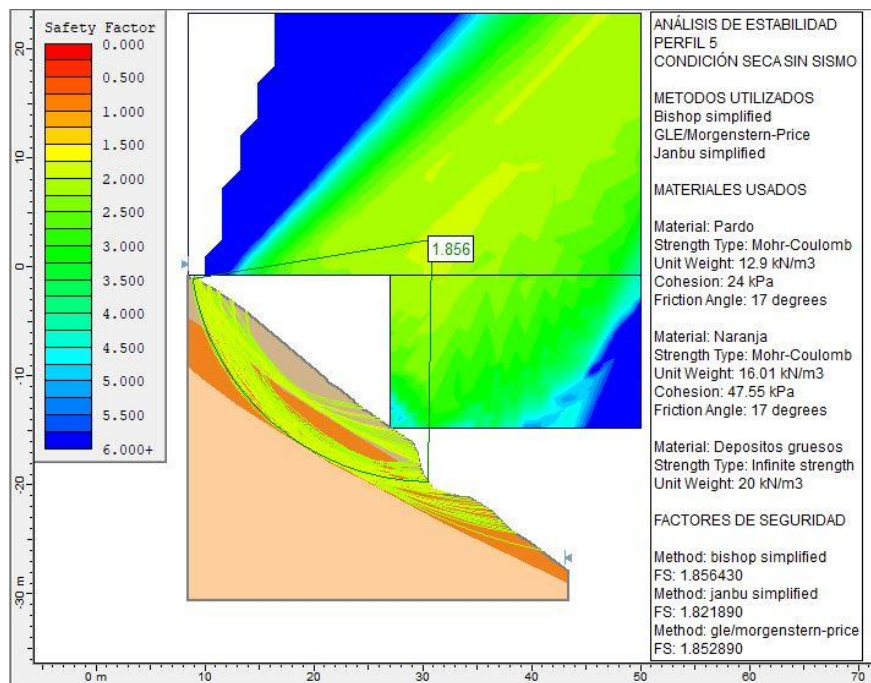
Perfil 3



Perfil 4

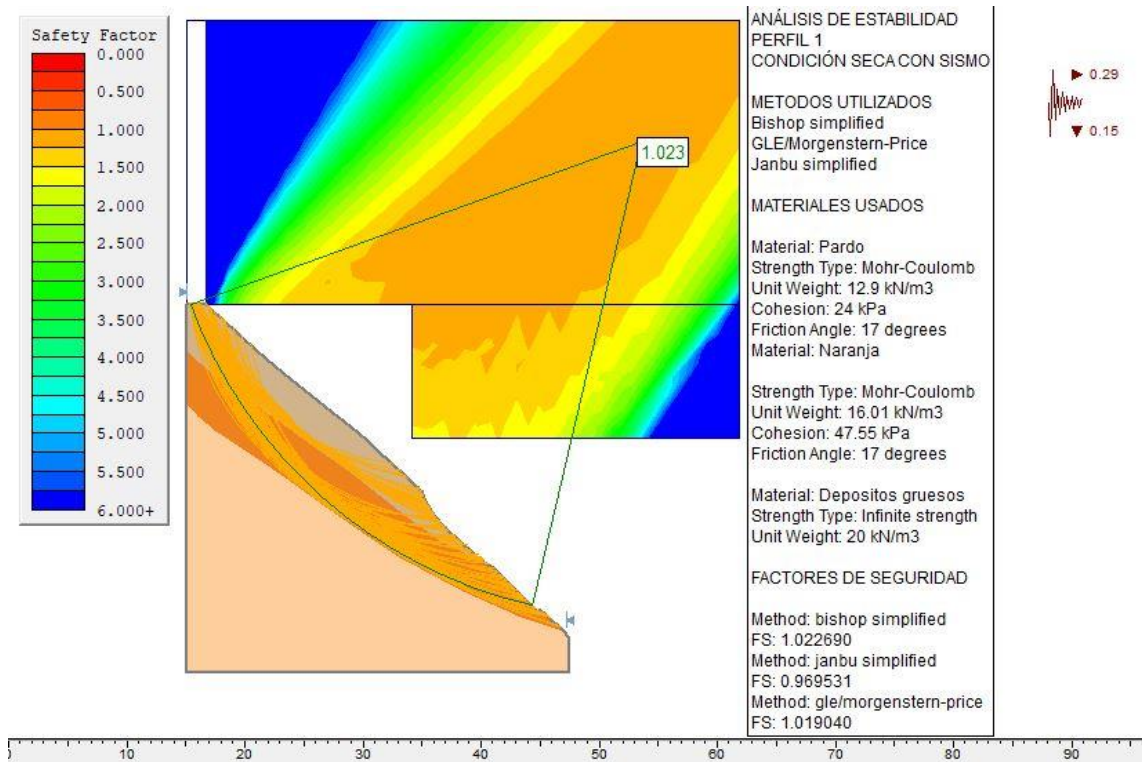


Perfil 5

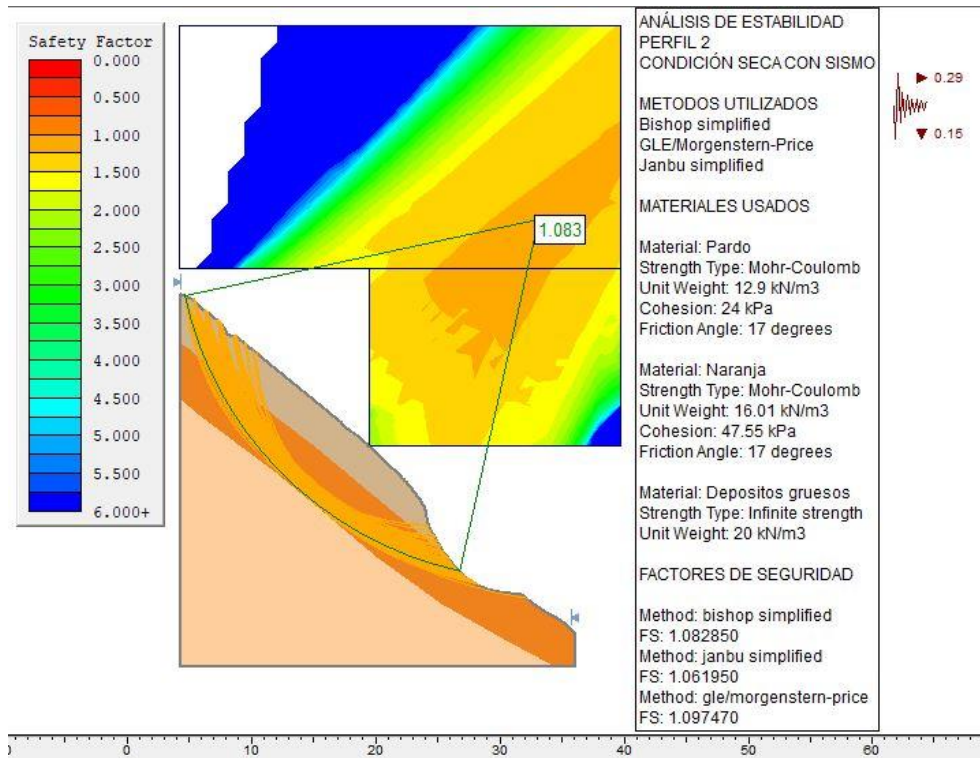


Condición: Ladera seca y pseudoestática (con sismo)

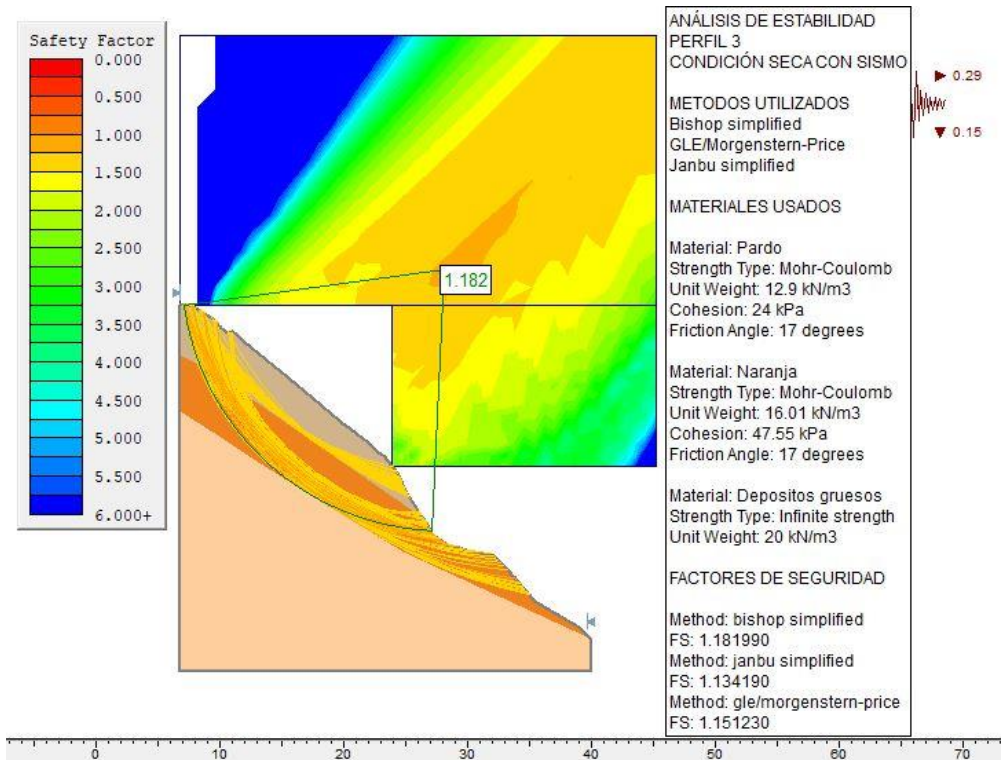
Perfil 1



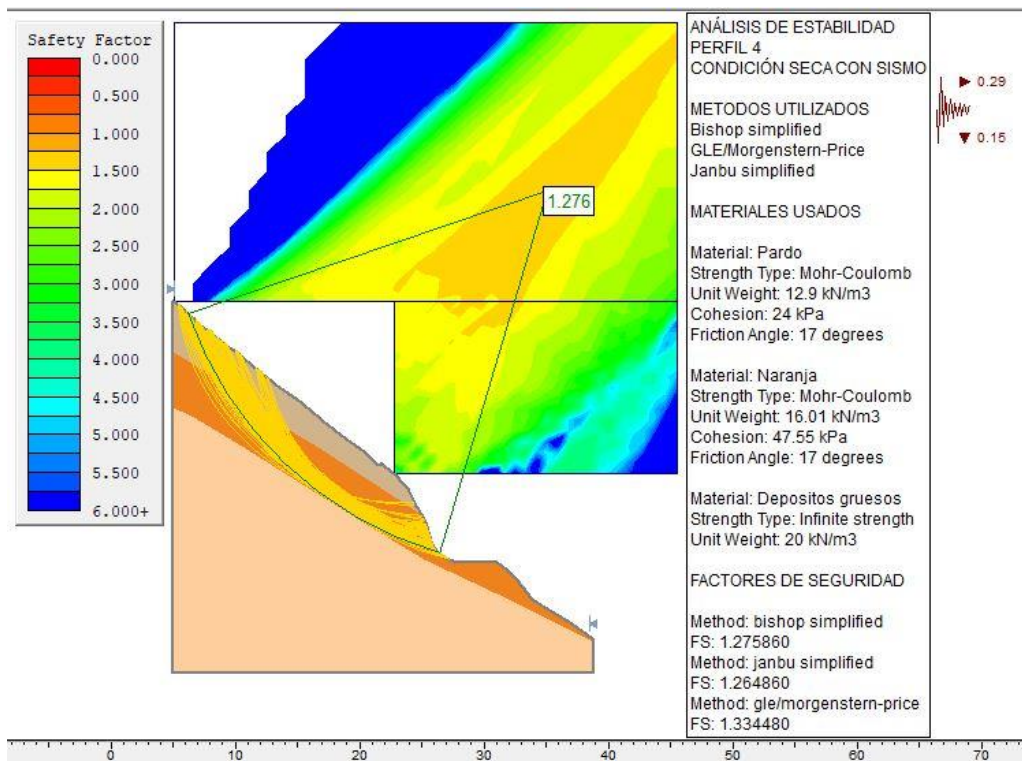
Perfil 2



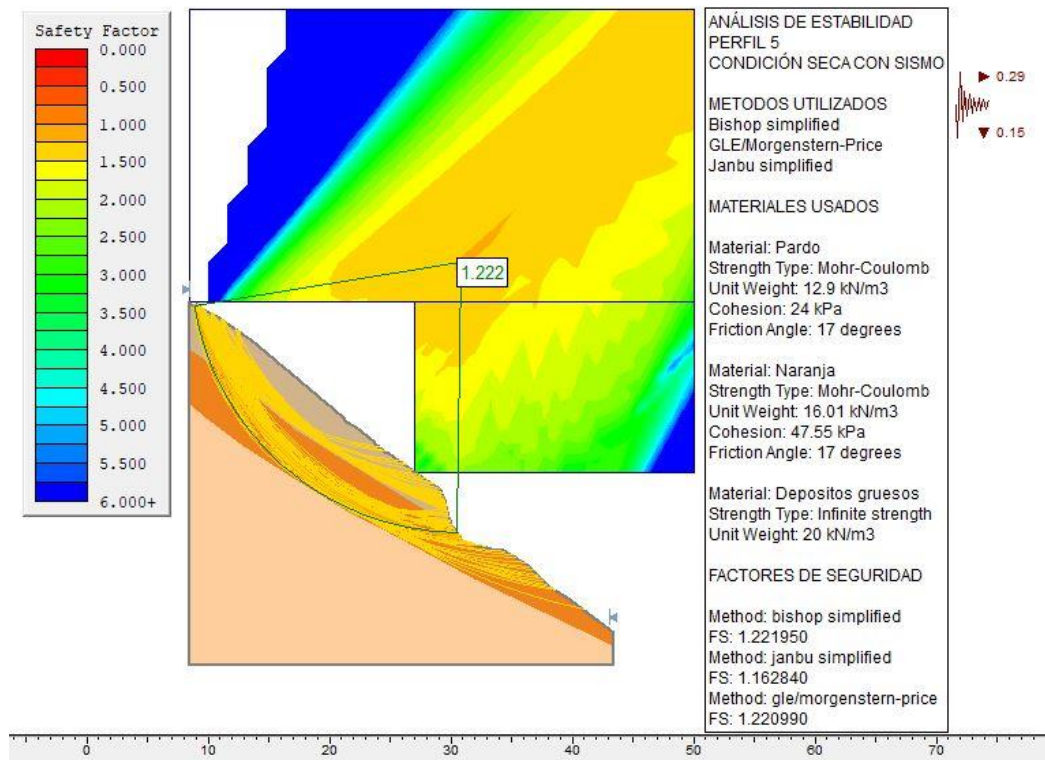
Perfil 3



Perfil 4

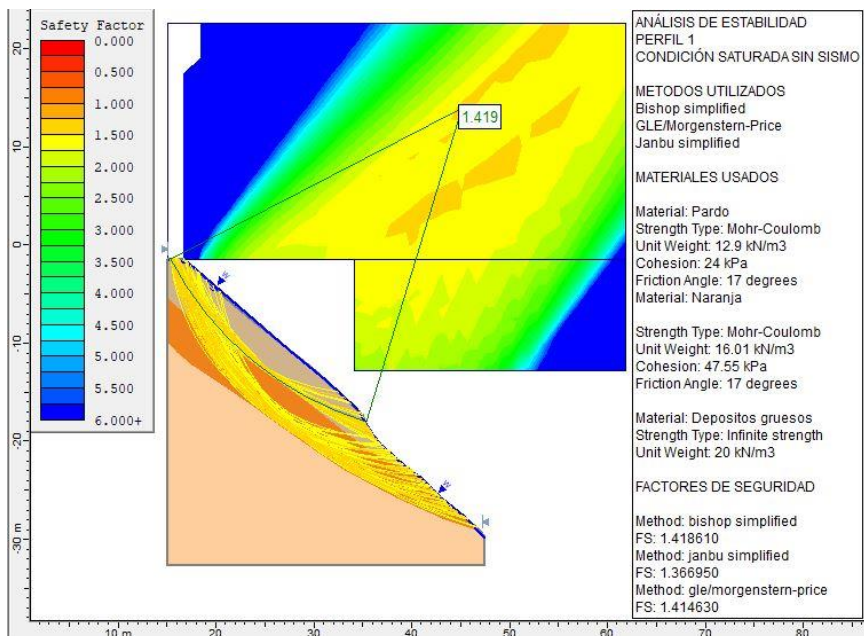


Perfil 5

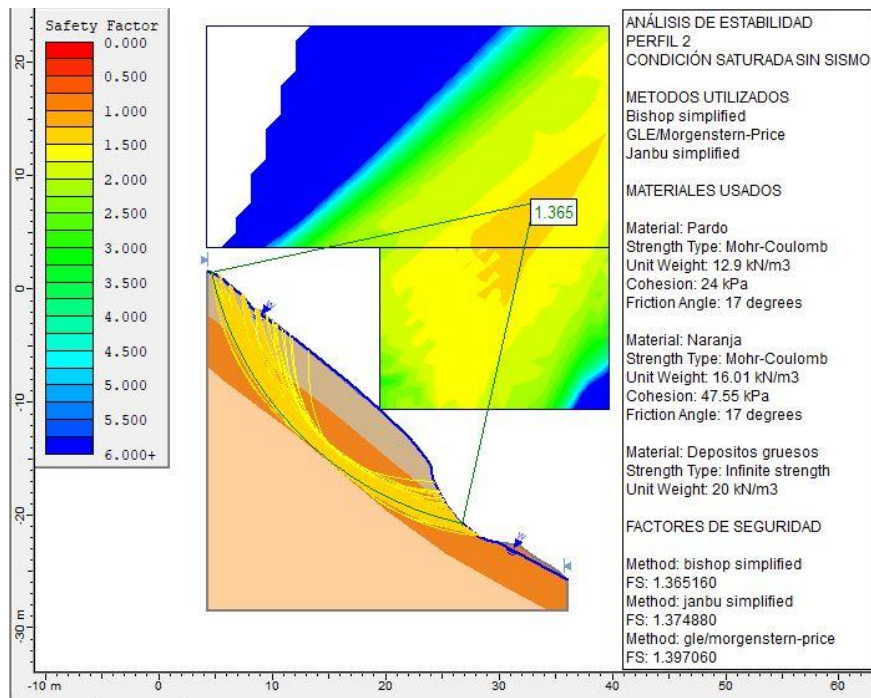


Condición: Ladera saturada y estática (sin sismo)

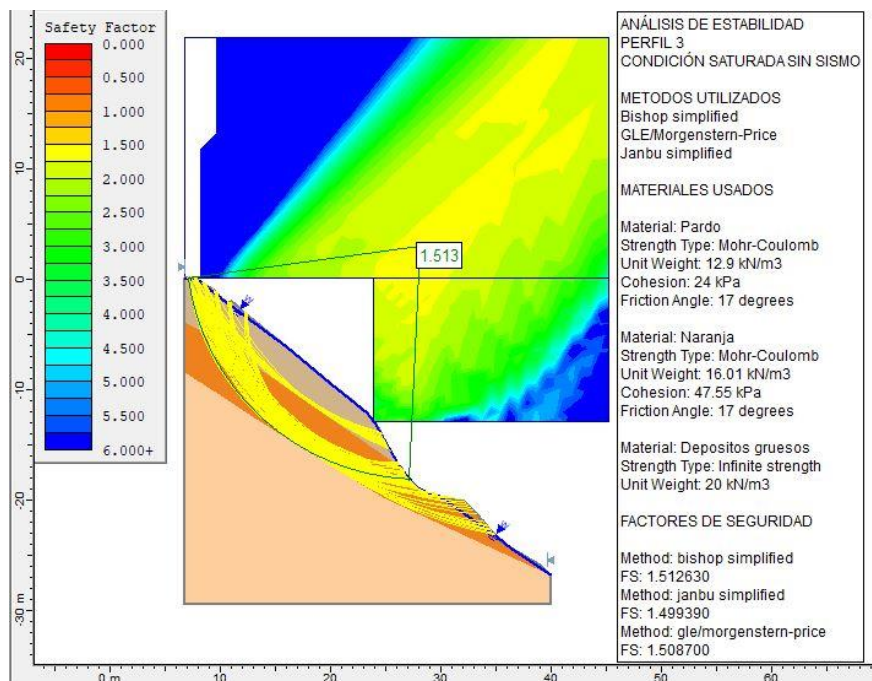
Perfil 1



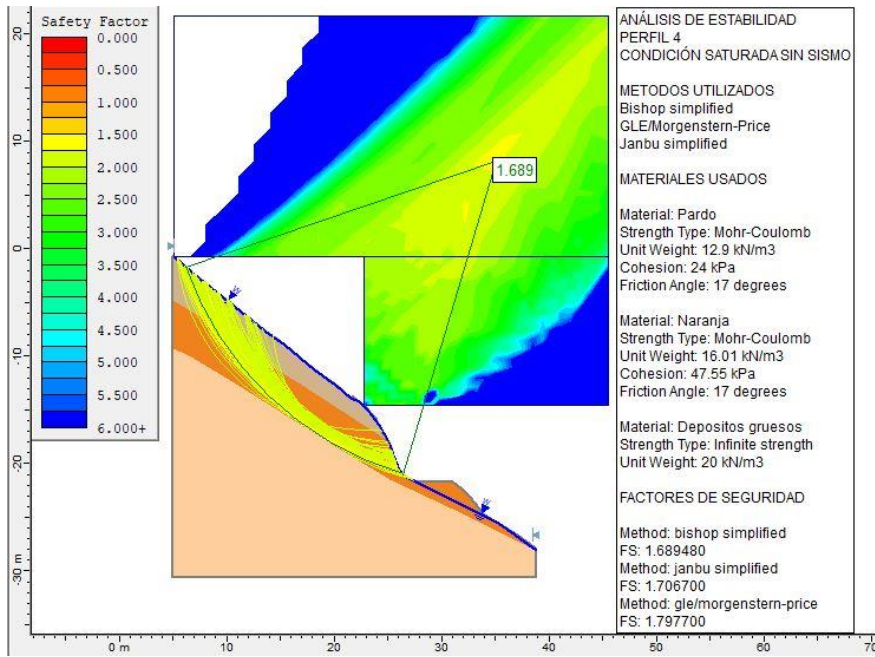
Perfil 2



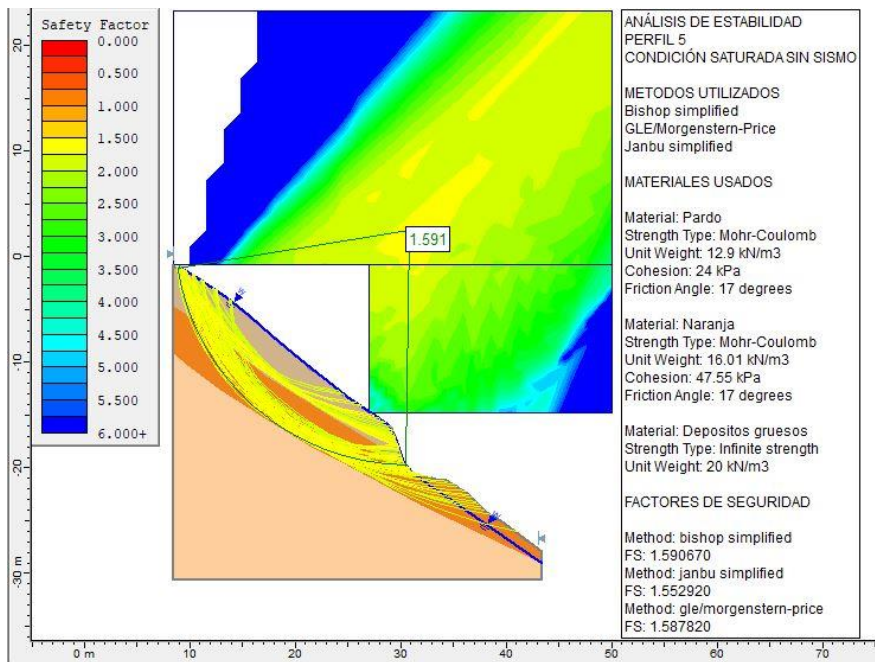
Perfil 3



Perfil 4

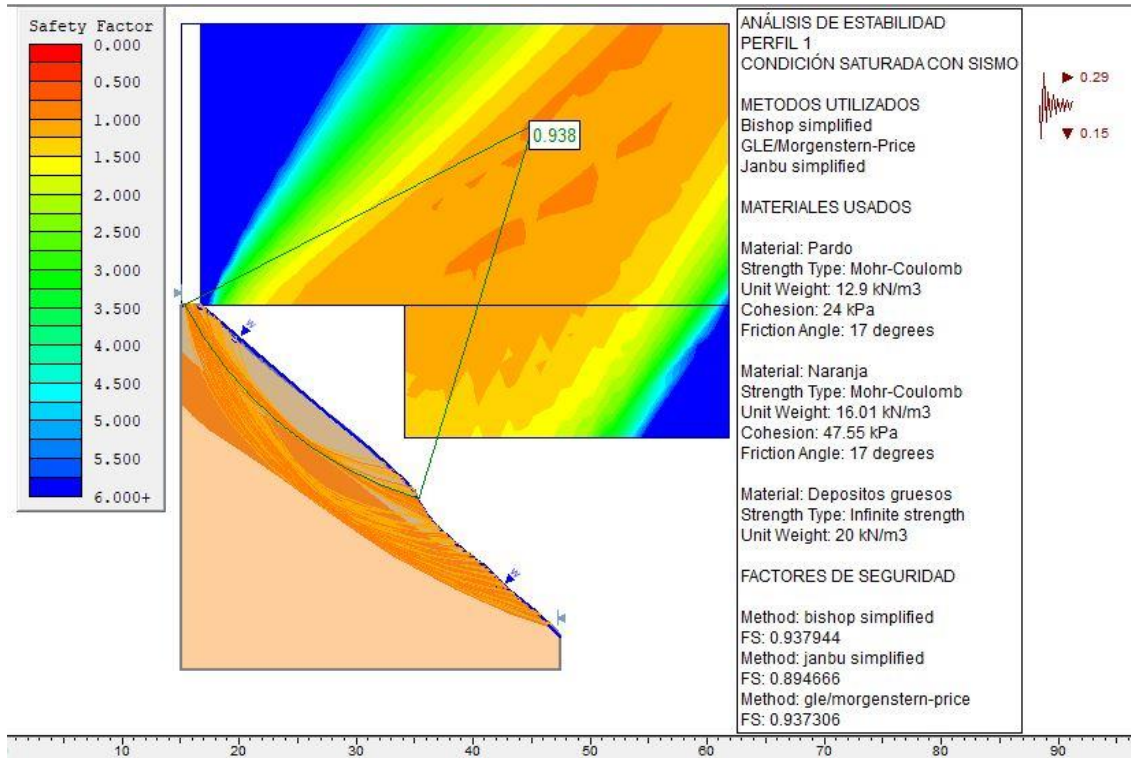


Perfil 5

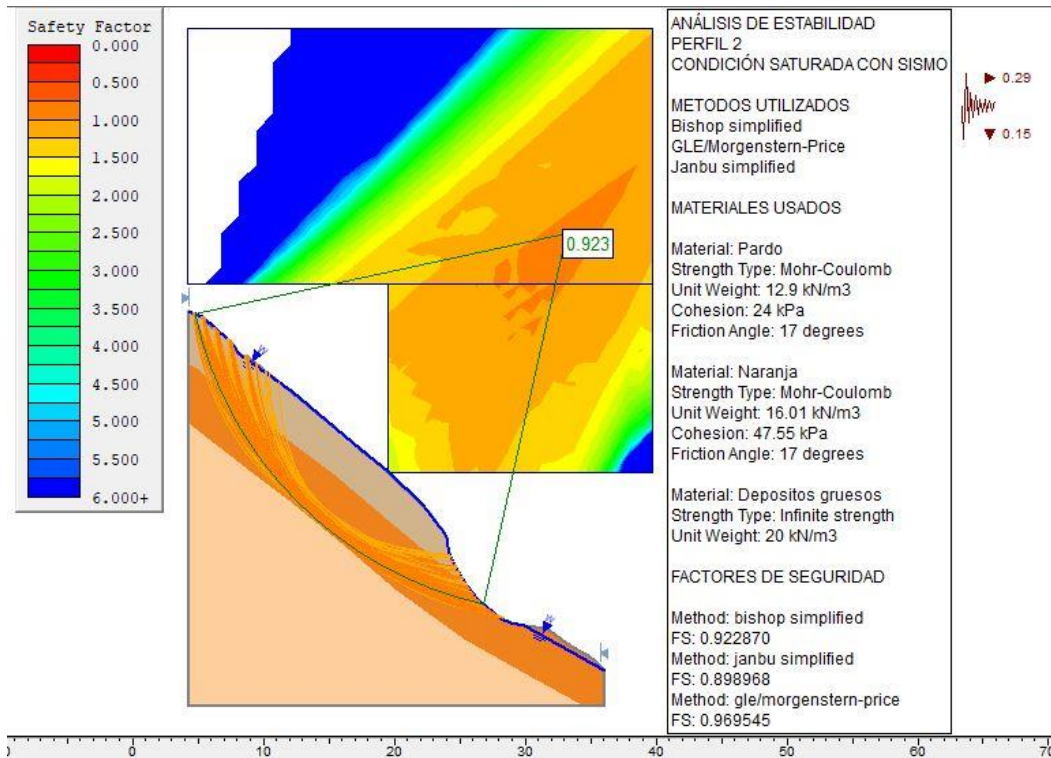


Condición: Ladera seca y pseudoestática (con sismo)

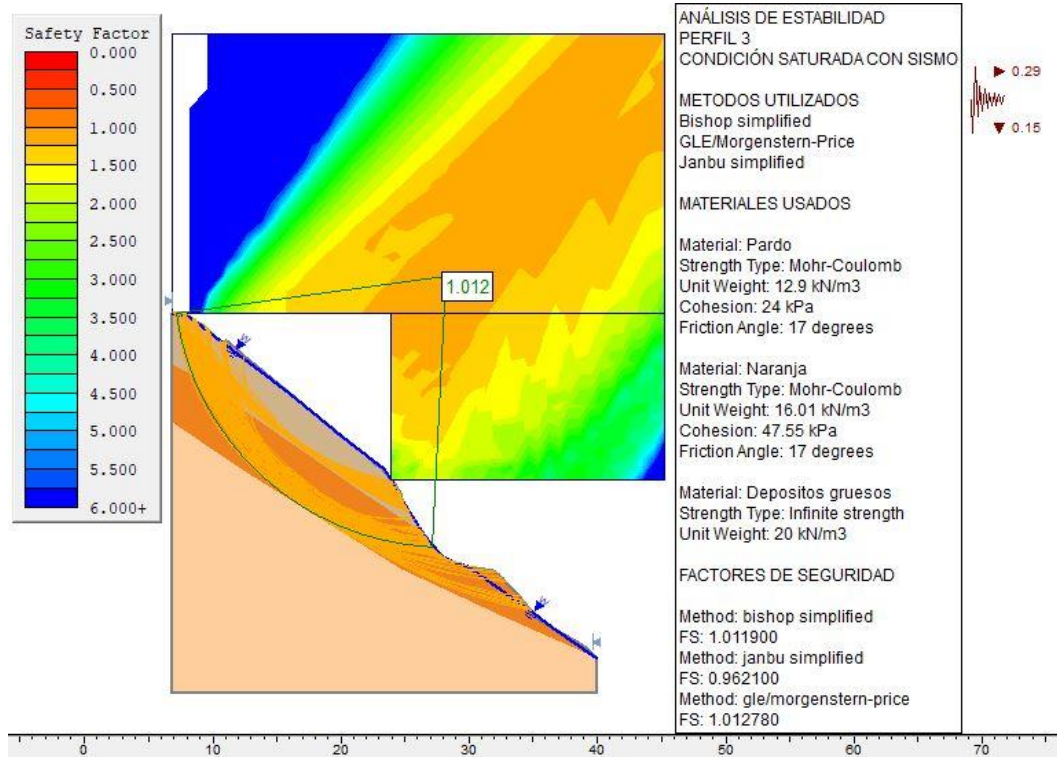
Perfil 1



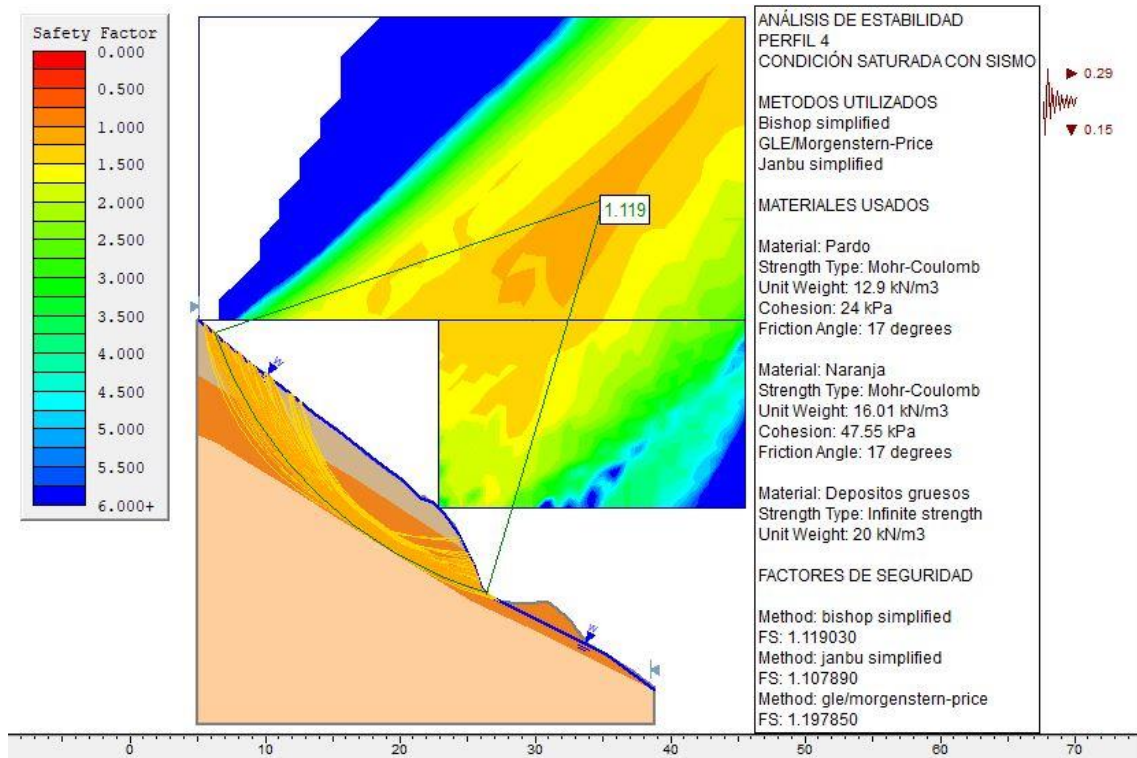
Perfil 2



Perfil 3



Perfil 4



Perfil 5

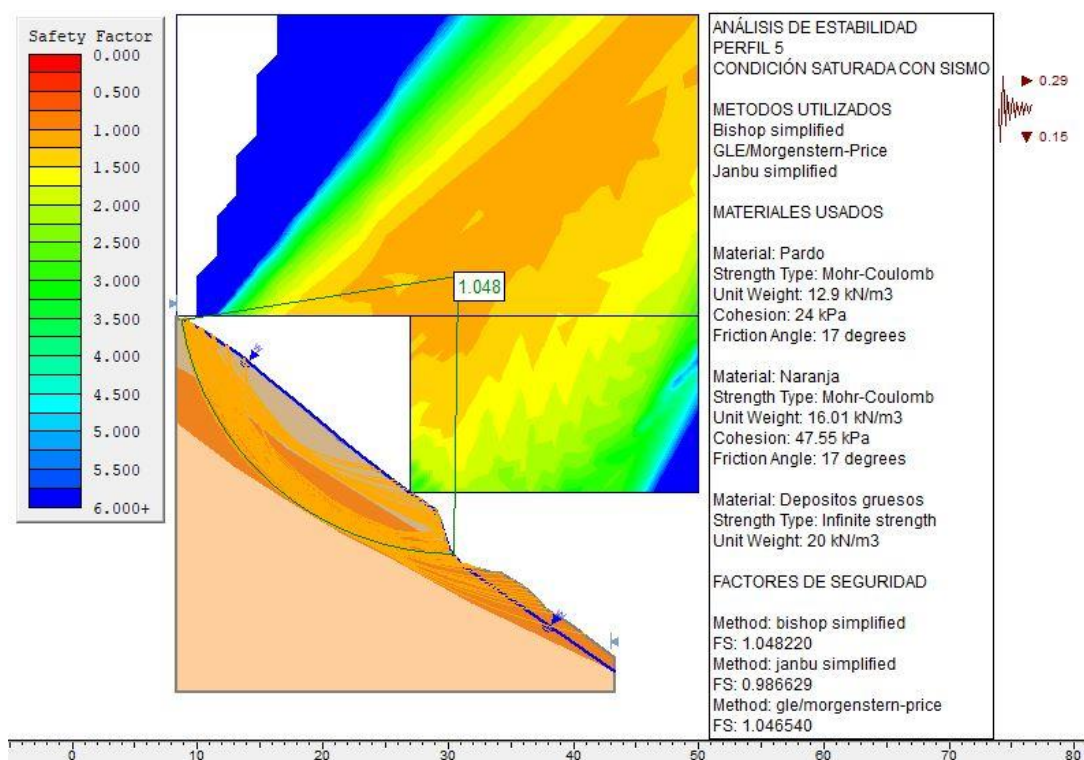


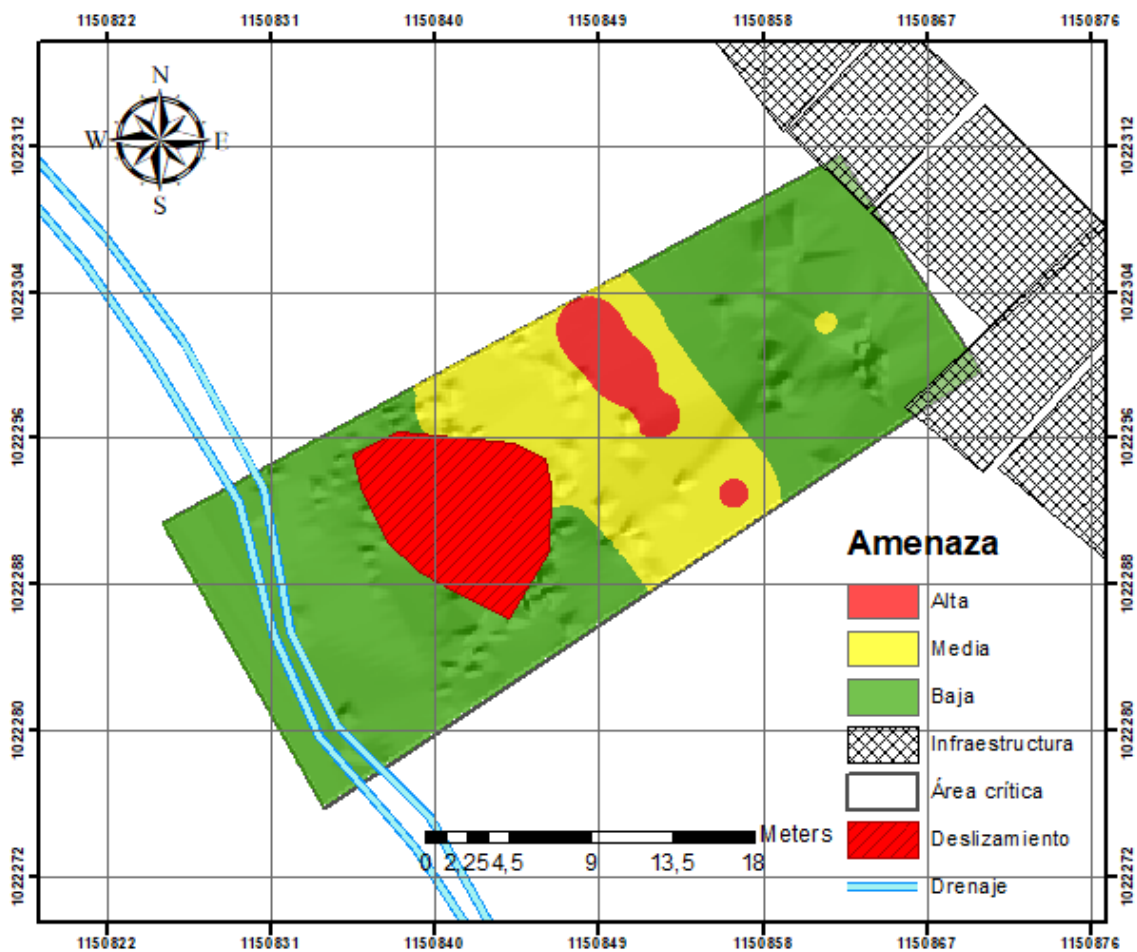
Tabla 8.18 Factores de seguridad resultantes de los análisis de estabilidad

Factores de seguridad				
Perfil	Bishop simplified	Janbu corregido	GLE/morgenstern-price	Mínimo
Condiciones secas y estáticas				
Perfil 1	1,53	1,47	1,52	1,47
Perfil 2	1,60	1,61	1,70	1,6
Perfil 3	1,76	1,76	1,76	1,76
Perfil 4	1,92	1,94	2,08	1,92
Perfil 5	1,85	1,82	1,85	1,82
Condiciones secas y pseudoestáticas				
Perfil 1	1,02	0,96	1,01	0,96
Perfil 2	1,08	1,06	1,09	1,06
Perfil 3	1,18	1,13	1,15	1,13
Perfil 4	1,27	1,26	1,33	1,26
Perfil 5	1,22	1,16	1,22	1,16
Condiciones saturadas y estáticas				

Perfil 1	1,41	1,36	1,41	1,36
Perfil 2	1,36	1,37	1,39	1,36
Perfil 3	1,51	1,49	1,50	1,49
Perfil 4	1,68	1,70	1,79	1,68
Perfil 5	1,59	1,55	1,58	1,55
Condiciones saturadas y pseudoestáticas				
Perfil 1	0,93	0,89	0,93	0,89
Perfil 2	0,92	0,89	0,96	0,89
Perfil 3	1,01	0,96	1,01	0,96
Perfil 4	1,11	1,07	1,97	1,07
Perfil 5	1,04	0,98	1,04	0,98

Tabla 8.18 Fuente: Equipo consultor (2023)

Figura 8.11 Mapa de Zonificación de la amenaza por movimiento en masa



Fuente: Equipo consultor (2023)

8.6 Etapa 6. Caracterización y zonificación de la vulnerabilidad por movimiento en masa

La caracterización de la vulnerabilidad es aplicable fundamentalmente a aquellas zonas ocupadas por edificaciones y que puedan llegarse a ver afectadas por los movimientos en masa.

8.6.1 Identificación y localización de los elementos expuestos

Los elementos expuestos incluyen tanto elementos físicos (bienes e infraestructura) como servicios ambientales, recursos económicos y sociales y bienes culturales que por su localización pueden resultar afectados por la materialización de una amenaza.

Tabla 8.19 Identificación de elementos expuestos.

CLASIFICACIÓN		IDENTIFICACIÓN	USO - COMPONENTES
Bienes Físicos	Edificaciones	Indispensables-Grupo IV (norma NSR-10)	Salud (pública/privada)
		Atención a la comunidad - Grupo III (norma NSR-10)	Seguridad
			Emergencia
			Educación
	Ocupación especial - Grupo II (norma NSR-10)	Institucionales	
		Gubernamentales	
		Centros comerciales	
	Ocupación normal - Grupo I (norma NSR-10)	Industria	
	Líneas Vitales	Red vial	Residencial y comercio
			Vías
Puentes vehiculares			
Servicios públicos		Puentes peatonales	
	Líneas de acueducto, alcantarillado y gas (tu- berías)		
		Redes eléctricas y comu- nicaciones	
Personas	Población		

Tabla 8.19 Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

Las edificaciones que se consideran en el barrio son de tipo ocupación normal, por lo cual se agrupan dentro del Grupo I. En cuanto a redes viales y servicios públicos, se cuenta con el propio sistema de alcantarillado objeto de este estudio, sin embargo, dado que este será mejorado, sus condiciones actuales son despreciables

8.6.2 Caracterización de los elementos expuestos

Edificaciones

Las edificaciones que existen actualmente en el sector y las que se planean construir serán definidas de acuerdo a los trabajos de Heinimann (1999) y Jam (2007). Se definen 7 categorías discriminadas así:

- A: Edificaciones de reforzamiento especial, cuando se construyen en concreto y acero con la exigencia máxima de diseño y generalmente corresponde a edificaciones de importancia III o IV.
- B: Edificaciones reforzadas, cuando se construyen en concreto y acero y hacen parte de los grupos de importancia I y II.
- C: Mampostería reforzada, cuando el sistema constructivo involucra el uso de ladrillos con refuerzo.
- D: Estructuras con confinamiento deficiente y estructuras híbridas, cuando hay muros cargueros, pero no hay un confinamiento adecuado.
- E: Estructuras ligeras, edificaciones con muros cargueros con materiales de baja calidad.
- F: Construcciones simples, cuando los materiales no tienen ningún tipo de calidad y suelen presentarse muros cargueros.
- G: Lotes vacíos

Con las visitas realizadas en campo y la inspección de las edificaciones se pudo observar que éstas están construidas en un sistema estructural aporcionado de vigas y columnas en concreto reforzado y cuyos espacios entre luces se rellenan con mampostería, que por ser del grupo I, se consideran de tipología B.

Fotografía 6. Perspectiva general de los lotes sin ocupar en el área de influencia y que se acogen a la tipología B





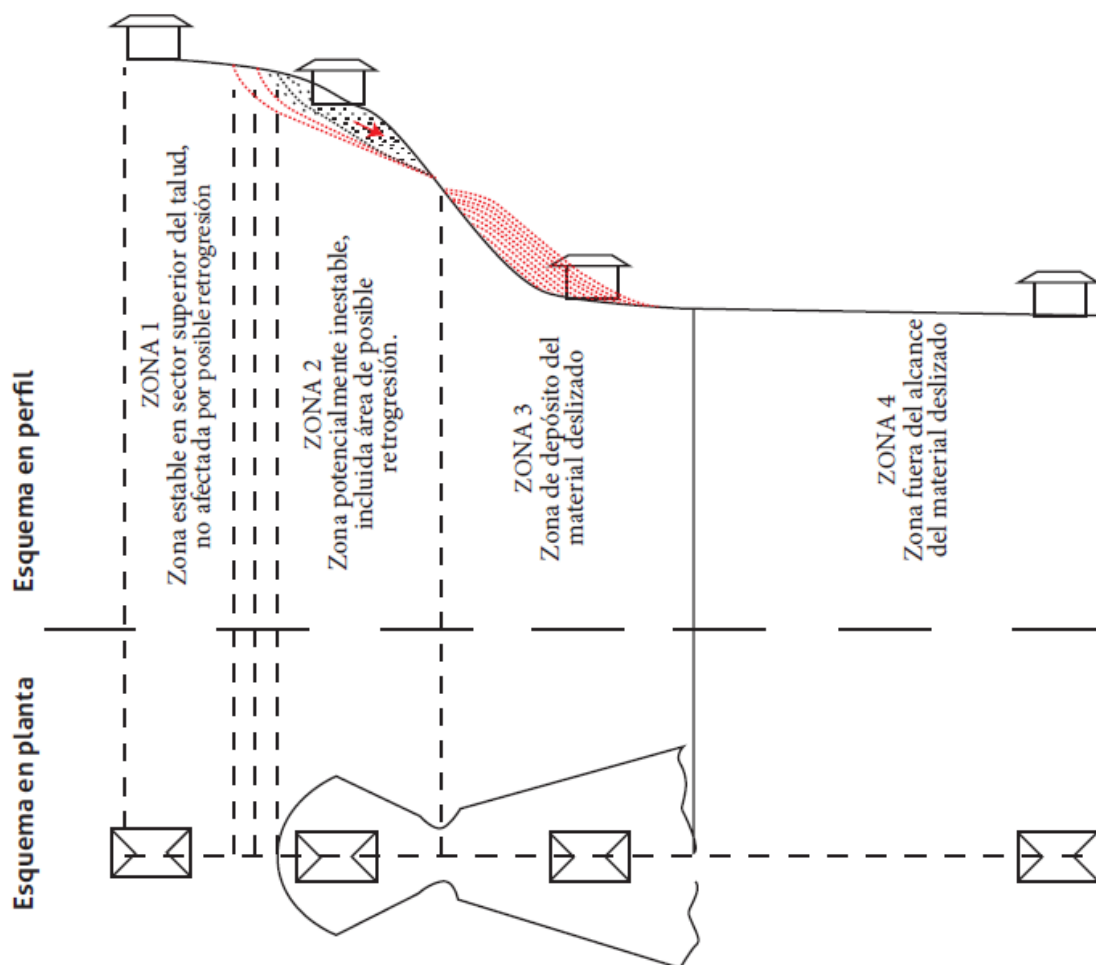
Fuente: Equipo consultor (2023)

Exposición

El grado de exposición depende de la ubicación de las edificaciones con respecto a la interacción de la propagación de los movimientos en masa. Se definen 4 zonas:

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

Figura 8.12 Zonas de exposición de los elementos expuestos.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

Las edificaciones están en la zona 1 por encontrarse en la parte alta de la ladera, además se demostró con los análisis de estabilidad que se encuentran en una zona no afectada por potenciales retrogresiones; sin embargo, y para dar mayor seguridad, se analizará de manera detallada la vulnerabilidad.

8.6.3 Fragilidad

Por fragilidad se entiende la respuesta de los elementos expuestos frente a las sollicitaciones generadas por la interacción de los movimientos en masa con dichos elementos. En bienes depende de sus características propias y en personas de la capacidad de respuesta a la emergencia.

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

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

Con base en las tablas propuestas por la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano se han asignado los coeficientes correspondientes las edificaciones que son todas muy similares en todos los aspectos, siguiendo las observaciones realizadas en campo, así:

Tabla 8.20 Factor de fragilidad por tipología de la estructura

TIPOLOGÍA		FRAGILIDAD	S_{tip}
F	Construcciones simples	Muy alta	1,00
E	Estructuras ligeras	Alta	0,90
D	Estructuras con confinamiento deficiente	Media	0,70
C	Mampostería reforzada	Baja	0,50
TIPOLOGÍA		FRAGILIDAD	S_{tip}
B	Edificaciones reforzadas	Muy baja	0,30
A	Edificaciones con reforzamiento especial	Extremadamente baja	0,10

Tabla 8.20 Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

Por ser edificaciones del grupo B, se considera de fragilidad muy baja y su coeficiente es de 0,30.

Tabla 8.21 Factor de fragilidad por altura de la edificación

TIPOLOGÍA	NÚMERO DE PISOS	S_{alt}
E, F	≥ 2	0,90
D	≥ 4	0,90
D	2 y 3	0,60
Demás tipologías y alturas		0,05

Tabla 8.21 Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

Por ser edificaciones del grupo B, sin importar su altura, el coeficiente asignado es de 0,05.

Tabla 8.22 Factor de fragilidad por estado de conservación de la edificación

ESTADO DE CONSERVACIÓN	DESCRIPCIÓN	SEPARACIÓN GRIETAS (mm)	S _{con}
Muy bueno	No se observan deformaciones, agrietamiento o envejecimiento.	0	0,00
Bueno	Solo se observan daños superficiales leves en los acabados.	0-0,5	0,05
Deformaciones leves	Fisuras en juntas horizontales en los extremos superior e inferior de elementos verticales.	0,5-1,0	0,25
Deformaciones medias	Desplazamiento relativo o movimiento en el plano fuera de él (pandeo).	1,0-5,0	0,50
Deformaciones graves	Inclinaciones del elemento fuera de su plano vertical.	5,0-10,0	0,75
Deformaciones muy graves	Unidades de mampostería con fallas por aplastamiento. Concreto con fallas por aplastamiento.	>10,0	1,00

Tabla 8.21 Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

Por lo observado en campo, las edificaciones solo presentan daños superficiales en los acabados, de ahí que se asigne un coeficiente de 0,05.

Tabla 8.23 Factor de fragilidad por edad de la edificación

RELACIÓN AÑOS DE SERVICIO/VIDA ÚTIL	S _{ed}
≤0,1	0,05
0,1-0,4	0,10
0,4-0,6	0,30
0,6-0,8	0,50
0,8-1,0	0,70
1,0-1,2	0,80
>1,2	1,00

Tabla 8.23 Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

Se asume una relación de años de servicio y vida útil baja, por lo que se asigna coeficiente de 0,05.

Según lo anterior se tiene que:

$$S_e = 1 - (1 - 0,30) (1 - 0,05) (1 - 0,05) (1 - 0,05)$$

$$S_e = 0,3998 = 0,40$$

8.6.4 Escenarios de vulnerabilidad

Los escenarios de vulnerabilidad son tres: deslizamientos de baja deformación (movimientos lentos), deslizamientos en etapa de falla (movimientos rápidos) y caída de rocas. De cada uno de ellos se debe calcular la intensidad con la que puede impactar a los elementos expuestos. Para este estudio sólo se tomarán en cuenta los escenarios de movimientos rápidos, dado que, a partir de las observaciones de campo y con base en las unidades geológicas superficiales definidas, no hay posibilidad de que se presente caída de rocas o reptaciones.

Así las cosas, en el escenario de vulnerabilidad por movimientos en masa rápidos, se toma en cuenta el mecanismo de impacto que se divide en dos categorías: enterramiento e impacto.

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

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

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

El parámetro f-pre depende de la relación presión de impacto de deslizamiento/presión horizontal límite de la estructura, así:

Tabla 8.24 Relación presión de impacto de deslizamiento / presión horizontal límite de estructura.

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

Tabla 8.24 Fuente: Du et al., (2014) en Servicio Geológico Colombiano (2017)

La presión de falla según el tipo de estructura depende de la tipología de la misma que para tipologías B es de 18 KPa. Por su parte la carga lateral depende la velocidad del movimiento, se asumirá el caso más crítico de un movimiento extremadamente rápido cuya velocidad es mayor a 5 m/s, y depende además de la densidad de la masa de suelo

que para este caso se usará el peso unitario de 1,38 ton/m³. Según lo anterior la presión de impacto se calcula según:

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

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

$$P=1/2(1380 \text{ kg/m}^3) (5 \text{ m/s})^2$$

$$P=17250 \text{ Pa}=17,2 \text{ KPa}$$

Con base en lo anterior, el coeficiente es de 0,90.

I f-prof es el parámetro de intensidad por la profundidad del deslizamiento. Este parámetro se presenta en función de la relación entre la profundidad del deslizamiento y la altura de la edificación. Se mencionó que la profundidad máxima estimada para los deslizamientos es de 3,2 m mientras que las edificaciones alcanzan una altura de 5 m, así las cosas, se toma en cuenta la siguiente tabla para asignar el coeficiente correspondiente:

Tabla 8.25 Relación profundidad del deslizamiento / altura de la edificación

RELACIÓN PROFUNDIDAD DEL DESLIZAMIENTO/ ALTURA EDIFICACIÓN	I_{f-prof}
<0,2	0,10
0,2-0,4	0,30
0,4-0,6	0,50
0,6-0,8	0,70
0,8-1,0	0,90
≥1,0	1,00

Tabla 8.25 Fuente: Du et al., (2014) en Servicio Geológico Colombiano (2017)

Con base en lo anterior, el coeficiente es de 0,70.

Así las cosas, la intensidad es:

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

$$I_{rap}=1-(1-0,90)(1-0,70)$$

$$I_{rap}=0,97$$

8.6.5 Cálculo y zonificación de la vulnerabilidad

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

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

Donde V es la vulnerabilidad, I es la intensidad y S es la fragilidad. Al final, la vulnerabilidad está dada según:

Tabla 8.26 Clasificación de la vulnerabilidad

0

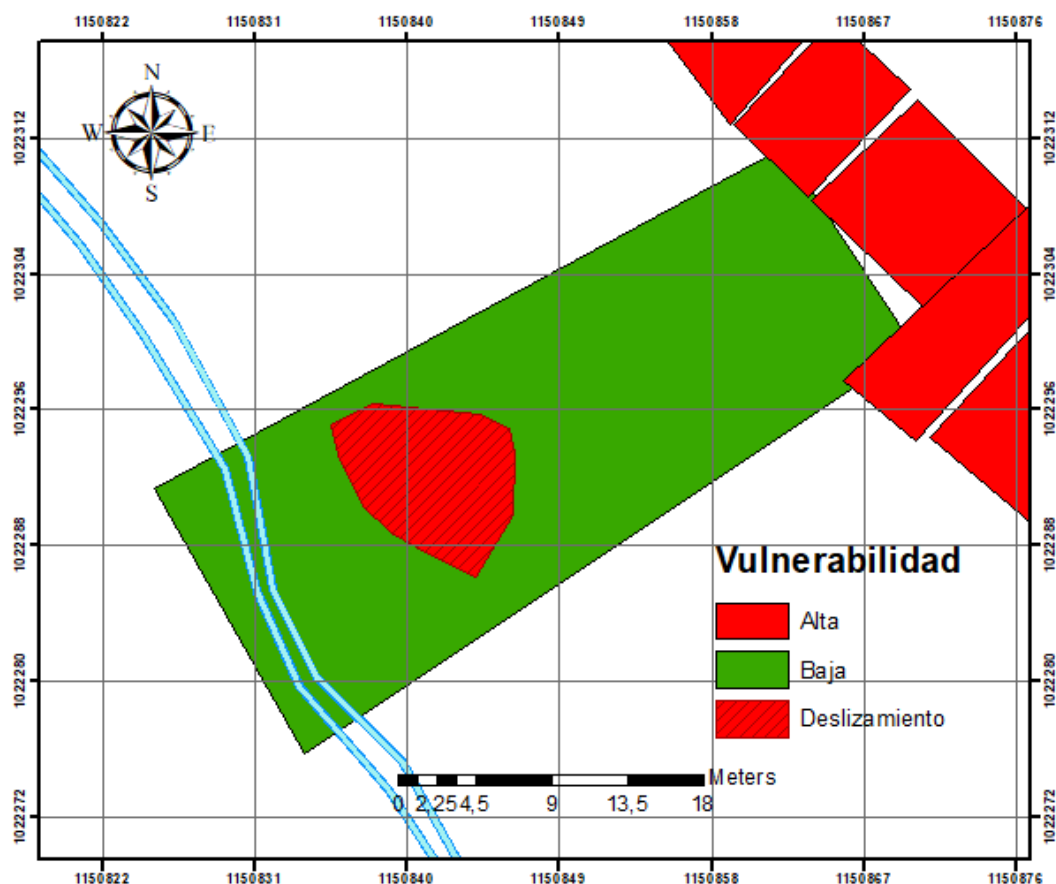
CLASIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	VALOR DE VULNERABILIDAD	NIVEL DE DAÑO
ALTA	0,50-1,00	Total-colapso
MEDIA	0,10-0,50	Grave
BAJA	0,02-0,10	Moderado
	0,00-0,02	Leve

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017)

Para las edificaciones, se calculó una fragilidad de 0,40 y la intensidad para movimientos rápidos es de 0,97. En consecuencia, se usa la ecuación 2 para evaluar la vulnerabilidad por movimientos rápidos.

$$V_{m \text{ rápidos}} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - 0,97}{0,40} \right)^2 = 0,998$$

Figura 8.13 Mapa de Zonificación de la vulnerabilidad por movimientos en masa



Fuente: Equipo consultor (2023)

8.6.6 Caracterización y zonificación del riesgo

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

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

Donde R_s es el riesgo específico o grado de pérdida para una amenaza de magnitud o intensidad (HI), que ha ocurrido en un área específica y en un tiempo dado. $P(HI)$ es la amenaza o probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa, V es la vulnerabilidad y E es el costo del elemento expuesto.

Para zonificar el riesgo se hará uso de la regla de decisión, la cual utiliza los valores de los rangos de amenaza y vulnerabilidad definida en los componentes anteriores. De igual manera, en función de determinar la probabilidad de que se generen daños y su

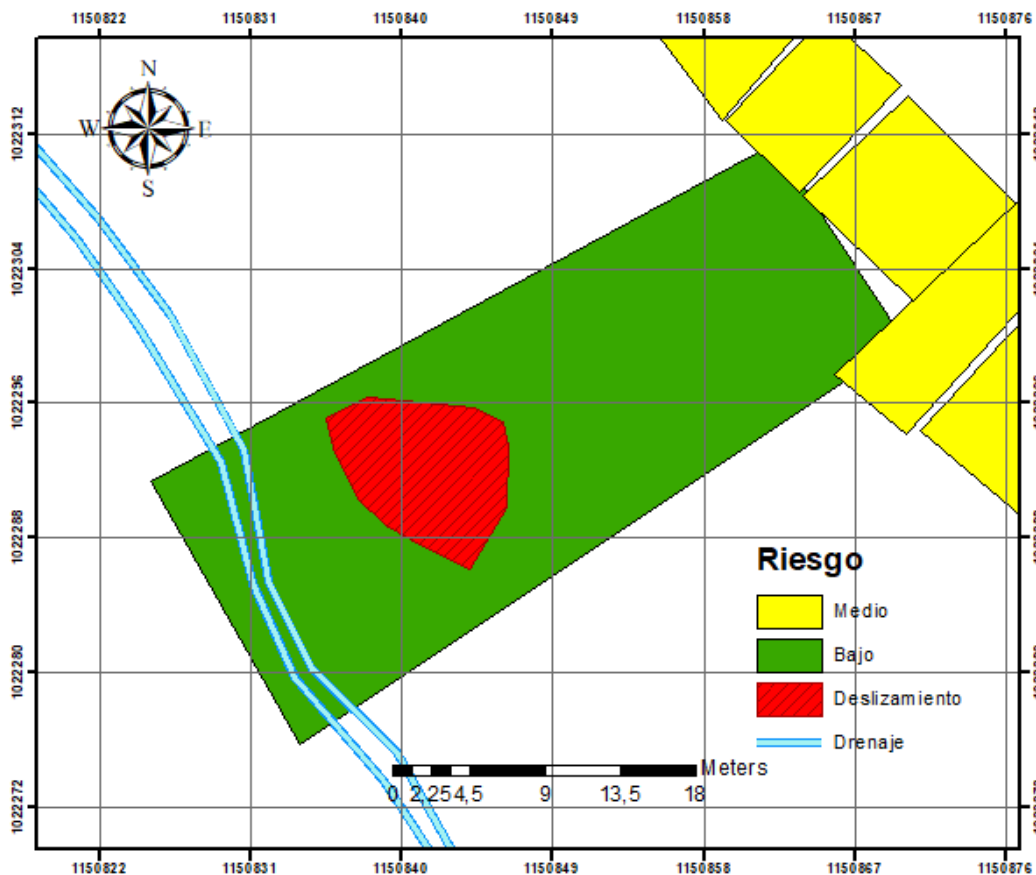
magnitud a partir de la vulnerabilidad y el fenómeno amenazante, se realizará la estimación de la probabilidad anual para la amenaza. Para el caso de los movimientos en masa esta probabilidad anual está en función de los periodos de retorno de los eventos de lluvia que tienen una incidencia sobre los movimientos en masa y de los sismos. Para el riesgo por personas se va a aplicar esta misma tabla de decisión.

Tabla 8.27 Regla de decisión para el riesgo

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

Tabla 8.27 Fuente: Phoon (2008)

Figura 8.14 Mapa de Zonificación del riesgo por movimiento en masa



Fuente: Equipo consultor (2023)

9. Discusión

La gestión del riesgo, es esencial en la planificación del desarrollo seguro, se compone de tres pilares fundamentales: el conocimiento del riesgo, la reducción del mismo y el manejo de desastres. En este contexto se hace imperativo llevar a cabo un análisis exhaustivo de la amenaza, vulnerabilidad y susceptibilidad en la gestión del riesgo de desastres. Estos criterios se conectan intrínsecamente con una serie de factores críticos en la ejecución de estudios seguros, tales como los análisis de estabilidad de taludes con potencial riesgo de movimientos en masa. Aquí, el rol del geólogo adquiere una relevancia fundamental al recopilar y procesar información geológica, aplicando pautas específicas para la caracterización e interpretación de materiales del subsuelo. Este conocimiento permite anticipar el comportamiento de los materiales ante posibles deslizamientos.

El geólogo, en sus criterios de evaluación tiene en cuenta la influencia de agentes como la lluvia, sismos e intervenciones humanas sobre el suelo, no solo para condiciones normales, sino también para situaciones críticas ligadas a la geotecnia, debido a la variabilidad que suelen presentar los materiales en la naturaleza; su estudio minucioso resulta imperativo antes de tomar cualquier tipo de decisión respecto a la geotecnia.

En el marco de la presente práctica académica, se abordaron preguntas claves para determinar las causas que generaron la ocurrencia del movimiento en masa en el sector del barrio El Zafiro, tales interrogantes son la: la capacidad portante de los materiales, la dificultad del terreno, la geología local y las posibles causas que generaron el movimiento en masa. Todo con el propósito de brindar a la comunidad parámetros seguros y duradero que aseguren la integridad del proyecto en el tiempo.

Durante la práctica en la empresa Zenit Ingeniería y Consultoría, uno de los aportes más destacados fue la implementación de un Modelo de Elevación Digital del Terreno (TIN), el cual se elabora mediante la metodología de triangulación. Esta herramienta se usó como recurso invaluable para el reconocimiento de parámetros geomorfológicos, permitiendo una visualización tridimensional de la información.

Con respecto a la importancia de mi papel como geólogo en el área de geotecnia y específicamente en la problemática abordada, considero que fue determinante la comprensión detallada de los procesos geológicos que influyen en la estabilidad del terreno, lo cual es esencial para evaluar y poder prever los posibles deslizamientos en el Barrio El Zafiro. En última instancia, en el campo de la geología, es especial en el área de la geotecnia, se debe tener presente la premisa que los materiales naturales varían considerablemente de un lugar a otro, lo cual subraya la necesidad de una investigación minuciosa antes de tomar decisiones que afecten las estructuras geotécnicas.

10. Conclusión

En el presente trabajo, se da un cumplimiento en su totalidad de los objetivos propuestos y los interrogantes que se presentaron al momento de realizar el estudio de estabilidad de talud por un factor de riesgo de movimiento en masa en el sector el Zafiro, municipio de Pereira, en donde se realizó la caracterización, correlación e interpretación de las unidades geológicas, los estratos del suelo y todo el método determinístico empleados en el presente estudio.

De la geología

- En la zona de estudio hay tres estratos principalmente, dos de ellos correspondientes a suelos y otro a roca. Los suelos corresponden a caída piroclástica y suelo residual, estos dos diferenciados tanto por sus propiedades físicas y texturales como sus propiedades geomecánicas respectivamente. En conjunto, los suelos en la zona alcanzan 7 m de espesor, profundidad a partir de la cual se encuentra la roca parental. Se aprovechan los suelos residuales para la cimentación.

De la Geomorfología

- Se evidencia dos procesos erosivos de tipo rotacional, de cuales uno, se encuentra dentro de la zona crítica y es este el que genera todo el problema de inestabilidad del presente estudio, además la zona de interés presente ladera abrupta de longitud corta y de forma cóncava, con pendientes escarpadas a muy escarpadas y de material blando, lo que en efecto hace que ocasiones se generen todos estos procesos erosivos, todo esto indica que la zona es susceptible a la ocurrencia de deslizamientos.

De la investigación del subsuelo

- Las excavaciones se consideran como de variabilidad baja, de alta dificultad de excavación y con suelos tipo 5. Todo lo anterior con base a las clasificaciones del RAS (2000).
- No se encontró el NAF en ninguna de las perforaciones, sin embargo, en la parte baja de la ladera hay un drenaje.

- La competencia geomecánica de los materiales es buena.
- Los suelos alcanzan espesores de 8-10 m hacia la parte alta de la ladera y un espesor de 4-5 m en la zona baja de la ladera.

Del mapa de pendiente

- Con base en el mapa de pendientes se puede concluir que la pendiente del terreno predominante corresponde a altas pendientes que van desde abruptas hasta muy abruptas, lo cual es un indicativo de que la zona posee una alta susceptibilidad a la erosión por deslizamientos, además coinciden con la zona de inestabilidad.
- El mapa de pendiente en conjunto con el modelo de elevación digital del terreno (TIN) muestran dos tendencias: i) hacia la parte nororiental y suroccidental del sitio donde están pendientes son normalmente inclinadas a moderadamente abruptas y estas son las que coinciden con las edificaciones y los drenajes; ii) predominio que van desde abrupto a muy abrupto.

De los análisis geotécnicos

- Los estratos son tipo E y se localizan en la zona 3 de acuerdo a la microzonificación sísmica del municipio de Pereira.
- El suelo 1 es el que se desliza, por lo tanto, se requiere de obras de estabilización para impedir que este material siga desplazándose.
- Después de analizar las condiciones de cimentación, se encuentra que la tubería quedará cimentada en el segundo estrato, es decir, el de suelo residual.

De los perfiles de análisis de estabilidad

- En la zona de estudio se distribuyen 5 perfiles, sobre los cuales se realizan análisis de estabilidad para condiciones normales, es decir, susceptibilidad, y simultáneamente para condiciones bajo la influencia de diferentes agentes detonantes como la precipitación, el sismo y factores antrópicos.

- Una vez realizado el análisis de susceptibilidad, se precia que el factor de seguridad mínimo de la ladera es de 0,89; lo cual hace que se tenga un nivel de amenaza alta, es decir, que el sitio no es estable para condiciones normales.

De los mapas de zonificación por movimiento en masa

- Del mapa de zonificación de la amenaza por movimiento en masa, la amenaza de la zona crítica es alta, lo cual coincide con los perfiles de análisis.
- Del mapa de zonificación de la vulnerabilidad, la zona crítica es de alta vulnerabilidad, incluyendo los elementos expuestos (edificaciones) cuyas características inherentes les proporciona alto grado de fragilidad ante la intensidad de los fenómenos de remoción en masa rápidos como deslizamientos rotacionales y traslacionales o caídas de debido a causas como presiones de impacto altas que posiblemente superarían la resistencia de la estructura. No obstante, estas edificaciones están en una zona donde la exposición les favorece y realmente no se verían tan afectadas por efecto del movimiento en masa presente en la zona de estudio. Por otro lado, donde no hay edificaciones, por no existir elementos expuestos, la vulnerabilidad es baja.
- Del mapa de zonificación del riesgo por movimiento en masa, respecto con lo anterior, el riesgo para edificaciones se consideraría estrictamente como alto, sin embargo, evaluando las condiciones del sitio y por lo observado en campo y por los resultados de las modelaciones, destaca el grado de exposición de las edificaciones. La exposición es tal que las edificaciones están por fuera de potenciales zonas de retrogresión del deslizamiento y por lo tanto, se categoriza el riesgo como medio. En los sitios donde no hay elementos expuestos, por tenerse vulnerabilidad baja, se tiene riesgo bajo.
-

11. Recomendación

Medidas estructurales

i) Considerando los resultados de la estabilidad de laderas, los resultados de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo, las observaciones en campo (tanto del terreno como de las obras previas), se considera que una opción que siga la tendencia de las obras previas es buena alternativa para la estabilidad de esta ladera.

Se recomienda la construcción de una estructura de contención que funcione como trinchos pero que haga uso de otro material, que para este caso sería concreto.

Dado que se tienen suelos finos principalmente (limosos a limo arenosos), donde se comprobó que es más el agua que fluye por escorrentía que la que se infiltra, la obra se enfoca a este tipo de materiales.

Lo primero es taponar las grietas. La excavación debe tener una profundidad mayor que la alcanzada por la grieta. Puede involucrar uno o dos de sus lados. Posteriormente, se apisona la parte profunda de la excavación utilizando el material de la excavación o material arcilloso de otro lugar. Si el material arcilloso de la zona, está muy húmedo, se puede mezclar con cal y luego apisonar con el pisón de madera. Por último, se rellena la excavación, compactando el material, para que desaparezca la grieta.

ii). Complemento biológico en las construcciones de las obras.

12. Referencias

- Congreso de la República de Colombia. (2012). Ley 1523.
- Crozier, H.j. (1986), Landslides: causes, consequences and environment. Croom Helm, London, England, 245pp
- Cámara de Comercio de Pereira. (2020). Pereira. Risaralda. Manizales.
- CARDER, 2000. Proyecto para la Mitigación del Riesgo Sísmico de Pereira Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal. Informe Final.
- Carvajal, J. H. (2011). Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia. Bogotá: INGEOMINAS.
- Catastro de Redes, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira S.A. E.S.P., 2003
- Congreso de la República de Colombia. (2012). Ley 1523.
- Duque Escobar, G & Escobar P. C. E. (2016) Geomecánica, universidad nacional de Colombia.
- Foucault, A., & Raoult, J. F. (1992). Geological control on the occurrence of large landslides in the French Alps. *Geomorphology*, 5(3-5), 381
- Hutchison, J. N. (1968). General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In *Proceedings of the Tokyo Symposium on Landslides* (pp. 3-34). Japanese National Committee on Large Dams.
- Mapa de zonificación sísmica de Pereira. CARDER. 1999.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia. (2010). Norma Colombiana de Diseño Sismo Resistente NSR-10. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. (2018). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable Y Saneamiento Básico (RAS). Bogotá, Colombia.
- Mougin, J.P. (1973). Les mouvements de terrain. Recherche sur les apports mutuels.
- Plan municipal para la gestión del riesgo y desastres PMGRD, 2016
- República, C. d. (2014). Decreto 1807.
- SGC. (2012). Formato modificado para inventario de movimiento en masa (versión 2012 para el Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas). Bogotá, Colombia.
- SGS. (1984). Memoria explicativa de la plancha 224 Pereira. Bogotá, Colombia
- Sistema de Información Geográfico (SIG) de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira S.A. E.S.P.

- Secretaría de Planeación, A. d. (2015). Diagnóstico socioeconómico de la comuna San Nicolás. Pereira.
- Servicio geológico colombiano, (2016), Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.
- Thornbury. W. D. (1954). Principles of Geomorphology. John Wiley & Sons.
- Terzaghi, K. (1948), Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons.
- Vargas Cuervo, G. (2000). Criterios para la clasificación y descripción de movimientos en masa,
- Varnes, D.J. (1978). Slope movement and types and processes in landslides: analysis and control.
- Yılmaz, Ç., Topal, T., & Süzen, M. L.: GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical

