ESTUDIO DETALLADO DE AMENAZA POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA DE LOS LOTES CON CBML 14170010024 Y 14170010025 UBICADOS EN LA CALLE 5F No 32 - 03 Y 30 – 135 MUNICIPIO DE MEDELLÍN (ANT)

INFORME FINAL

POR:

GEOS INGENIERÍA GEOLÓGICA S.A.S

PARA:

OLGA MARINA JARAMILLO GALLEGO

MEDELLÍN, NOVIEMBRE DE 2019

ESTADO DE REVISIÓN Y APROBACIÓN

Tipo de Documento: **Informe técnico**		Título: ESTUDIO DETALLADO DE AMENAZA POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA DE LOS LOTES CON CBML 14170010024 Y 14170010025 UBICADOS EN LA CALLE 5F No 32 - 03 Y 30 – 135, MUNICIPIO DE MEDELLÍN (ANT).			
Documento N°: 1					
Aprobación	**Número de revisión**			0	1
	Elaboró	Nombre	Sandra María Patiño Rojas	X	
		Profesión	Ingeniera Geóloga – Especialista en aprovechamiento de recursos hidráulicos		
		M.P	05223-234931		
		Firma			
		Nombre	Jessica Quiroz		
		Profesión	Ingeniera Civil – Magíster en Geotecnia		
		M.P	05202-251079		
		Firma			
		Fecha	13/11/2019		
	Revisó	Nombre	Marcos Julián Osorio Arenas		
		Profesión	Ingeniero Geólogo – Magíster en ingeniería Recursos Minerales		
		Fecha	14/11/2019		
	Presentó GEOS INGENIERÍA GEOLÓGICA S.A.S.	Nombre	Marcos Julián Osorio Arenas		
		Firma			
		Matricula Profesional	05223-234930		
		Fecha			
	Aprobación	Nombre	Olga Marina Jaramillo Gallego		
		Firma			
		Fecha			

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 7
1.1 OBJETIVO 7
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 8
2. CARACTERÍSTICAS GENERALES 9
3. METODOLOGÍA GENERAL DEL ESTUDIO 12
3.1 RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE 12
3.2 FOTOINTERPRETACIÓN 12
3.3 RECORRIDOS DE CAMPO GENERALES Y DETALLADOS 13
3.4 ANÁLISIS DE OFICINA TENDIENTES A REALIZAR MAPAS E INFORME FINAL 13
4. ESTUDIO DE AMENAZA POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA 14
4.1 DEFINICIÓN DE LA UNIDAD MORFODINÁMICA INDEPENDIENTE 14
4.2 GEOLOGíA 15
4.2.1 Geología regional 15
4.2.2 Geología estructural 17
4.2.3 Geología local 17
4.3 GEORMOFOLOGÍA 20
4.3.1 Geomorfología regional 20
4.3.2 Geomorfología local 22
4.4 HIDROGEOLOGÍA 31
4.5 CATÁLOGO DE MOVIMIENTOS EN MASA 32
4.6 SISMOLOGIA 37
4.7 USOS DEL SUELO 38
5. MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO 39
5.1 INVESTIGACIÓN Y EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA 39
5.2 ESTRATIGRAFÍA PERFIL GENERAL DE SUELO 41
5.3 CONDICIONES DE HUMEDAD NATURAL 45
5.4 MUESTREOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO 45
5.4.1 Ensayos de humedad y clasificación 45
5.4.2 Ensayo de corte directo 47
5.4.3 Ensayo de compresión simple 48
5.5 PRUEBAS IN SITU 50

5.6 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES 52
5.6.1 Caracterización del talud de estudio 52
5.6.2 Análisis de escenarios 56
5.7 CATEGORÍAS GEOTÉCNICAS 64
5.8 PROBABILIDAD DE FALLA 65
6. ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA 66
6.1 ZONAS GEOTECNICAMENTE HOMOGENEAS 67
6.2 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA 68
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 70
8. REFERENCIAS 74
9. ANEXOS (DIGITAL) 76
9.1 ANEXO 1 – FOTOGRAFÍAS AÉREAS. 76
9.2 ANEXO 2 – RESULTADOS LABORATORIO DE SUELOS 76
10. ANEXO 3 MATRICULAS PROFESIONALES 77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización, el lote en estudio en color rojo oscuro. 9
Figura 2. Localización del lote según la zonificación de amenaza por movimientos en masa del POT de Medellín. Información cartográfica tomada de la GDB del POT de Medellín (Acuerdo 048 de 2014). 10
Figura 3. Localización del lote según la zonificación de amenaza por inundación el POT de Medellín. Información cartográfica tomada de la GDB del POT de Medellín (Acuerdo 048 de 2014). 10
Figura 4. Metodología para el análisis de movimientos en masa lote Provenza-Poblado. Fuente: Elaboración propia. 12
Figura 5. Delimitación de la UMI de la zona en estudio en color fucsia. 15
Figura 6. Mapa geológico regional, adaptado del estudio de Microzonificación Sísmica, 2007 16
Figura 7. Mapa de geología local, con ubicación de sondeo y perfiles 17
Figura 8. Perfiles geológicos A-A' y B-B''. 18
Figura 9. Mapa de unidades geomorfológicas regionales. Adaptado del Estudio de Microzonificación sísmica, 2007. 21
Figura 10. Mapa de pendientes. 23
Figura 11. Vista de los drenajes existentes en el predio. 24
Figura 12. Mapa geomorfológico local. 27
Figura 13. Mapa de procesos morfodinámicos para la zona de estudio 30
Figura 14. Movimientos en masa cerca de la zona de estudio. UMI en color fucsia y triángulos beige y violeta de eventos registrados. Fuente: SIMMA. 33
Figura 15. Aceleración máxima de la zona en estudio (cuadro en color amarillo). Tomado de (Consorcio Microzonificación 2006, 2007). 37
Figura 16. Usos del suelo en el área de interés (polígono color amarillo). Tomado de POT Medellín, 2014. 38
Figura 17. Perforaciones realizadas en la zona de estudio (P1 a P4). 40

Figura 18. Perforaciones realizadas en la zona de estudio (P5). 41
Figura 19. Perforaciones realizadas en la zona de estudio (P6) 41
Figura 20. Estratigrafía general del predio en estudio 45
Figura 21. Esquema del aparato del corte directo. Tomado de Fundamentos de la Ingenieria Geotécnica de Braja M. Das (2001) 47
Figura 22. Envolvente de falla típica de Mohr – Coulomb. Tomado de Fundamentos de la Ingenieria Geotécnica de Braja M. Das (2001) 48
Figura 23. Esquema de funcionamiento de ensayo de compresión simple. Tomado y modificado de Fundamentos de la Ingenieria Geotécnica de Braja M. Das (2001). 49
Figura 24. Resultados de SPT perforaciones P1, P2, P3 Y P5 50
Figura 25. Resultados de SPT perforaciones P4 y P6. 51
Figura 26. Topografía de la zona de estudio 53
Figura 27. Ubicación de las secciones analizadas en la zona de estudio 54
Figura 28. Geometría del perfil 1 (Slide) 55
Figura 29. Geometría del perfil 2 (Slide) 55
Figura 30. Geometría del perfil 3 (Slide) 56
Figura 31. Obras planteadas entregadas por el contratista. 57
Figura 32. Sección transversal de obras planteadas entregadas por el contratista. 57
Figura 33. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones actuales para el Perfil 1 (Método Bishop). 58
Figura 34. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones actuales Perfil 2 (Método Bishop). 58
Figura 35. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones actuales para Perfil 3 (Método Bishop). 59
Figura 36. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones Normales y Extremas de Lluvia – Perfil 1 (Método Bishop) – Condiciones proyectadas. 59
Figura 37. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones Normales y Extremas de Lluvia – Perfil 2 (Método Bishop) – Condiciones proyectadas. 60
Figura 38. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones Normales y Extremas de Lluvia – Perfil 3 (Método Bishop) – Condiciones proyectadas. 60
Figura 39. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones seudo-estáticas Perfil 1 (Método Bishop) – Condiciones proyectadas. 62
Figura 40. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones seudo-estáticas Perfil 2 (Método Bishop) – Condiciones proyectadas. 63
Figura 41. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones seudo-estáticas Perfil 3 (Método Bishop) – Condiciones proyectadas. 63
Figura 42. Mapa de amenazas por fenómenos de remoción en masa e inundación del predio de interés. 68
Figura 43. Mapa de amenazas por fenómenos de remoción en masa e inundación del predio de interés. 69
Figura 44. Mapa de dirección preferencial de flujo. 71
Figura 45. Esquema de detalle de ronda de coronación para control de aguas de escorrentía en el talud, Modificado de Suárez (2009) 71
Figura 46. Obras de mitigación recomendadas 72

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Listado de fotografías aéreas. 13
Tabla 2. Rangos de pendientes, Acuerdo Metropolitano N°9 de 2012. 22
Tabla 3. Inventario de eventos ocurridos en la zona de estudio. Fuente: SIMMA. 32
Tabla 4. Eventos según el catálogo del DESINVENTAR Área Metropolitana. 33

Tabla 5. Profundidad de sondeos y nivel freático. 39
Tabla 6. Propiedades físicas de los materiales del suelo. 46
Tabla 7. Clasificación de suelos expansivos (Tabla H.9.1-1 – Titulo H NSR-10). 46
Tabla 8. Parámetros del suelo dados por el ensayo de Corte Directo. 48
Tabla 9. Parámetros del suelo dados por el ensayo de Compresión simple. 49
Tabla 10. Correlación de valores Resistencia a la compresión simple, con la consistencia del suelo (ASTM, 1996). 49
Tabla 11. Correlación de valores SPT con los parámetros de resistencia (ASTM, 1996). 51
Tabla 12. Parámetros de resistencia efectiva obtenidos según los resultados del ensayo SPT. 52
Tabla 13. Propiedades geomecánicas asignadas para el modelo. 53
Tabla 14. Parámetros de diseño considerados. 61
Tabla 15. Categoría geotécnica según nivel de amenaza. 64
Tabla 16. Probabilidad de Falla según Decreto 1626 de 2016. 65
Tabla 17. Zonificación de amenaza tomado de (Consorcio INGETEC - IGR, 2007). 66

LISTA DE FOTOS

Foto 1. Vista del depósito de vertiente que cubre la mayor parte del predio. 19
Foto 2. Vista del lleno antrópico localizado en la zona norte. 20
Foto 3. Cañada Villanita, en flechas azules dirección del flujo. 25
Foto 4. Quebrada La Escopetería costado oriente del proyecto 26
Foto 5. Unidad geomorfológica Superficies suaves en depósitos poco incisados (SSDPI) vista desde el cauce de la quebrada La Escopetería. 28
Foto 6. Unidad geomorfológica planicie (p). 29
Foto 7. Unidad geomorfológica de escarpes (e). 29
Foto 8. Muestra de suelo en la perforación P1 42
Foto 9. Muestra de suelo en la perforación P2. 42
Foto 10. Muestra de suelo en la perforación P3. 43
Foto 11. Muestra de suelo en la perforación P4. 43
Foto 12. Muestra de suelo en la perforación P5. 44
Foto 13. Muestra de suelo en la perforación P6. 44

ANEXOS DIGITALES

ANEXO 1. FOTOGRAFÍAS AÉREAS.

ANEXO 2. RESULTADOS LABORATORIO GEOTECNIA.

ANEXO 3. MATRICULAS PROFESIONALES INGENIEROS.

INTRODUCCIÓN

El siguiente informe contiene el estudio detallado de amenaza por fenómenos de remoción en masa de los predios identificados con el código catastral 14170010024 y 14170010025, ubicados en la carrera 32 sobre la calle 5f, sector Provenza, barrio El Poblado, municipio de Medellín. Estos predios serán cedidos a la alcaldía de Medellín como pago de obligaciones ambientales y será destinado a espacio público.

Los estudios son adelantados siguiendo las directrices y lineamientos del Anexo "Especificaciones técnicas para los estudios de detalle de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales, con sus respectivas medidas de intervención en el municipio de Medellín", Decreto 1626 de 2015, el Acuerdo 048 de 2014 Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Medellín, el Acuerdo Metropolitano N°009 del 25 de mayo de 2012 para intervenciones en zona de ladera del Valle de Aburrá y la guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano de 2016.

Según el Decreto 1626 de 2015 "*Estos estudios están orientados a categorizar la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo, y si este último es mitigable o no, en función del nivel de afectación esperada. Adicionalmente, sirven para establecer las medidas estructurales de intervención (obras de estabilización y/o mitigación) requeridas, con sus respectivos diseños y presupuestos; complementados con el seguimiento y monitoreo de las mismas, y las medidas no estructurales relacionadas con los usos que se deben promover para las zonas que se clasifiquen como de alto riesgo no mitigable*. (Decreto 1626 de 2015).

Se incluyen los resultados de los trabajos de campo efectuados durante el desarrollo del estudio, se describe en forma general y detallada las principales características de los lotes en los aspectos relacionados con la geología, geomorfología, procesos morfodinámicos y suelos presentes. Se resume la metodología utilizada, el estudio de amenaza por fenómenos de remoción en masa, el modelo geotécnico y por último se presenta una zonificación de amenaza por fenómenos de remoción en masa para dichos predios, en el que se define las aptitudes para el uso del lote y se dan las conclusiones y recomendaciones generales.

Para la realización del presente estudio se revisaron otros anteriores de carácter regional efectuados por parte del Área Metropolitana y el Municipio de Medellín como el estudio de microzonificación sísmica del Valle de Aburrá del año 2007 elaborado por Área Metropolitana, y las restricciones del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) vigente del municipio de Medellín.

1.1 OBJETIVO

El objetivo de estos estudios además de categorizar la amenaza, vulnerabilidad y el riesgo, es prevenir la ocurrencia de daños ocasionados por movimientos en masa, que afecten la habitabilidad, funcionabilidad, permanencia y confiabilidad estructural de las edificaciones e infraestructuras existentes o proyectadas. Estos estudios están orientados a categorizar la amenaza. Adicionalmente, sirven para establecer las medidas estructurales de intervención (obras de estabilización y/o mitigación) requeridas, y las medidas no estructurales. (Decreto 1626 de 2015).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un análisis y zonificación detallada de la amenaza

- Determinar las medidas para la mitigación de la amenaza.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES

El área de interés se localiza en el sector Provenza, barrio El Poblado, municipio de Medellín. Limita al norte con la calle 5G y la cañada Villanita o quebrada La Escopetería 2, al este con la calle 5f, al sur con la quebrada Escopetería y al oeste nuevamente con el curso de la cañada Villanita. Ver Figura 1.

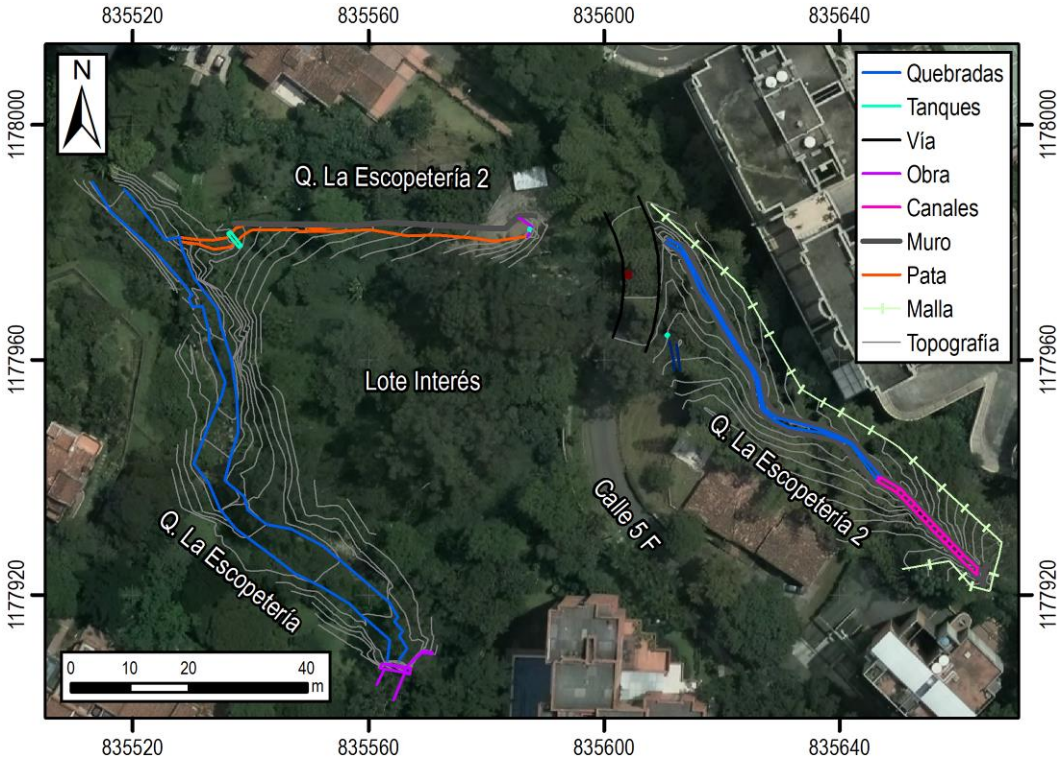

Figura 1. Mapa de localización, el lote en estudio en color rojo oscuro.

El área en estudio está incluida en su mayoría dentro de las categorías de amenaza media y alta por movimientos en masa y amenaza media por inundación de acuerdo con la zonificación de amenaza por movimientos en masa e inundación del POT vigente del Municipio de Medellín (Acuerdo 048 de 2014). Ver Figura 2 y Figura 3.

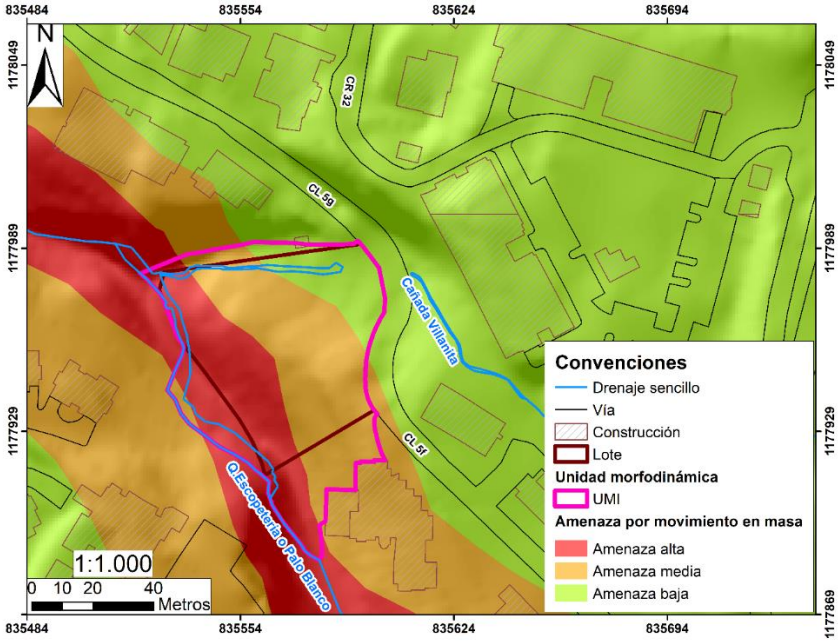

Figura 2. Localización del lote según la zonificación de amenaza por movimientos en masa del POT de Medellín. Información cartográfica tomada de la GDB del POT de Medellín (Acuerdo 048 de 2014).

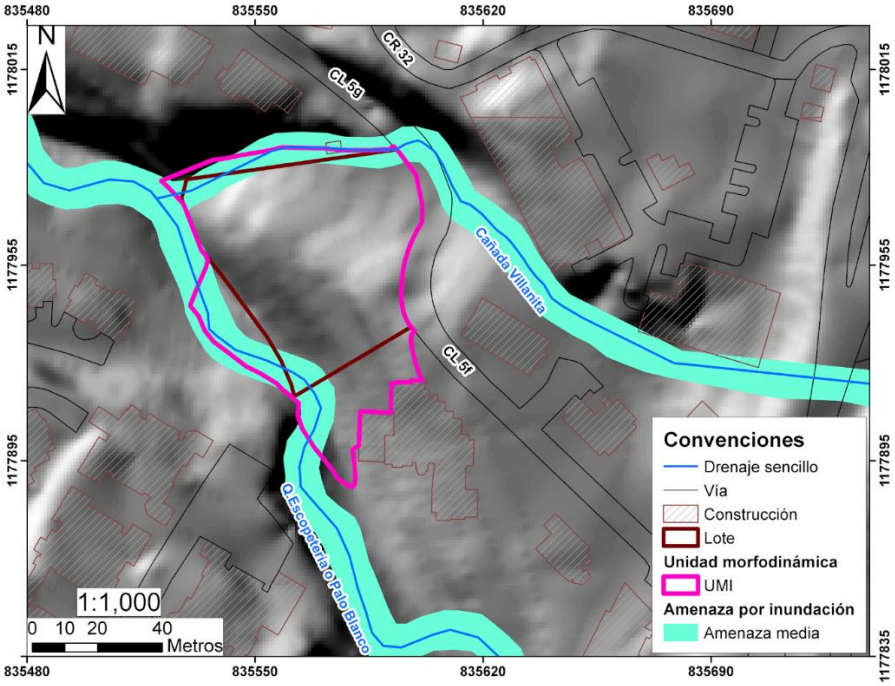

Figura 3. Localización del lote según la zonificación de amenaza por inundación el POT de Medellín. Información cartográfica tomada de la GDB del POT de Medellín (Acuerdo 048 de 2014).

Según el POT de Medellín, Acuerdo 048 de 2014 se describen las zonas de amenaza media como áreas con nivel medio de probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa por acción de la lluvia, la pendiente y factores antrópicos. Sus procesos morfodinámicos son generalmente inactivos o de poca densidad, pero suelen reactivarse si no se ejecutan acciones correctivas. Estas áreas están asociadas generalmente a las unidades geomorfológicas "Valle Medio Bloque Lomos (VMBL)" y Superficies Moderadas en Depósitos Moderadamente Incisados (SMDMI) (Alcaldia de Medellín, 2014).

Para el manejo de las zonas de amenaza media por movimientos en masa, la Alcaldía de Medellín (2014) establece que:

> "*Cuando el predio esté ubicado en zonas de amenaza media de origen geotécnico, se deberán adjuntar a las solicitudes de licencias urbanísticas los estudios detallados de amenaza por fenómenos de remoción en masa, siguiendo las especificaciones técnicas establecidas en la reglamentación que la administración municipal expida para tal efecto y en el numeral 4 del artículo 22 del Decreto Nacional 1469 de 2010 o norma que lo adicione, modifique o sustituya o el numeral 4 del artículo 23 de la misma norma, que permitan determinar la viabilidad del futuro desarrollo, siempre y cuando se garantice la mitigación de la amenaza*".

Según Alcaldía de Medellín (2014) las zonas de amenaza alta por movimientos en masa corresponden a áreas con alta probabilidad de que se presenten movimientos en masa debido a la acción de la lluvia, factores de la geología, geomorfología e intervenciones antrópicas, y por lo cual han presentado o pueden llegar a presentar procesos de remoción en masa. Dichas zonas están asociadas principalmente a la unidad geomorfológica "Valle Medio Bloque Lomos (VMBL)".

Para el manejo de áreas no urbanizadas que se encuentran dentro de áreas de amenaza alta por movimientos en masa, la Alcaldía de Medellín (2014) declara que:

> *"Las zonas no urbanizadas, ocupadas o edificadas categorizadas de amenaza alta, que pretendan ser desarrolladas urbanísticamente, deberán previamente elaborar los estudios de amenaza de detalle, siguiendo las especificaciones técnicas y el procedimiento para la incorporación de sus resultados en la cartografía oficial del Plan, establecidas en la reglamentación que expedirá la Administración Municipal para tal efecto, en consonancia con la normativa nacional vigente"*.

Según el POT la quebrada La Escopetería y caño Villanita presentan amenaza media por inundación.

En el estudio de Microzonificación Sísmica del Valle de Aburra del año 2007, la zona de estudio se encuentra catalogada como de susceptibilidad baja a deslizamientos detonados por sismo. Sin embargo, según el POT, son de obligatorio cumplimiento las normas relacionadas con este tema para toda edificación y urbanización, en particular las normas sobre sismo resistencia.

3. METODOLOGÍA GENERAL DEL ESTUDIO

Para la realización del estudio se ejecutaron diferentes actividades, las cuales básicamente corresponden a las expuestas en el Decreto 1626 de 2015. En la Figura 4 se puede observar el marco conceptual con la metodología realizada en el presente estudio.

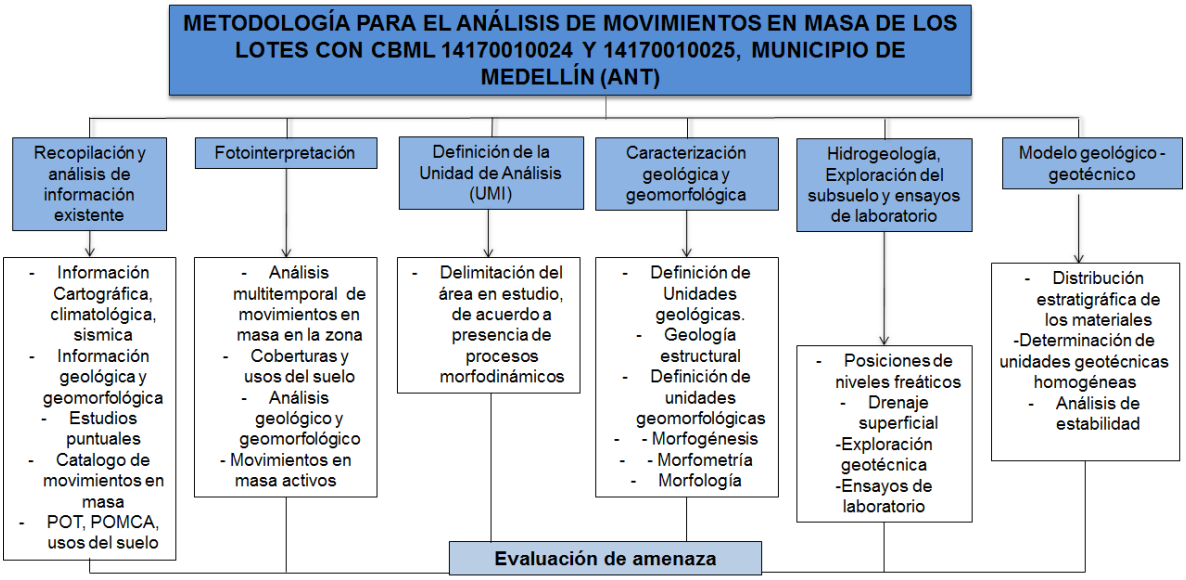

Figura 4. Metodología para el análisis de movimientos en masa lote Provenza-Poblado. Fuente: Elaboración propia.

El alcance del estudio es la evaluación y zonificación detallada de la amenaza por movimientos en masa, caracterizándola en baja, media y alta. (Decreto 1626 de 2015).

En términos generales las etapas que se siguieron son las siguientes:

3.1 RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

Se analizó toda la información de tipo local efectuada específicamente para el proyecto, y la información de tipo regional, como son los estudios contratados por el municipio de Medellín y el Área Metropolitana, como la microzonificación sísmica del Valle de Aburra por Consorcio Microzonificación 2006 (2007), el POT vigente del municipio de Medellín, el POMCA del río Aburrá e información climatológica cartográfica, sísmica, registros o reportes históricos de eventos en el catálogo de DESINVENTAR, Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales para Medellín y la región metropolitana, Universidad Nacional de Colombia, 2009.

3.2 FOTOINTERPRETACIÓN

Se realizó el análisis multitemporal con la interpretación de fotografías aéreas de diferentes años que cubren toda la zona de interés. Dichas fotografías aéreas fueron adquiridas en el centro de documentación del municipio de Medellín, en la Tabla 1 se enuncian las fotografías analizadas.

Tabla 1. Listado de fotografías aéreas.

No. Fotografía	No. de vuelo	No. Faja	Escala	Fecha
077	C889	06	1:5000	1959
078	C889	06	1:5000	1959
236	R827	12	1:5000	1981
237	R827	12	1:5000	1981
072	Geovial 65/1	28	1:5000	2004
073	Geovial 65/1	28	1:5000	2004

3.3 RECORRIDOS DE CAMPO GENERALES Y DETALLADOS

El estudio de amenaza por movimientos en masa se adelantó para la UMI definida que se presenta en el capítulo siguiente. Se realizaron recorridos por el lote de interés y zonas aledañas en diferentes ocasiones.

Inicialmente se realizó un recorrido general de reconocimiento donde se verificó información de tipo topográfica como límites del predio, drenajes existentes, entre otros. Posteriormente se realizaron otros recorridos con miras a identificar procesos morfodinámicos antiguos y recientes, delimitación de materiales constituyentes y características geomorfológicas locales. También se revisaron los cauces de la cañada Villanita y la quebrada Escopetería que discurren hacia los límites oeste y sur del predio respectivamente, para evaluar las condiciones de los cauces, la geometría y la presencia o no de depósitos aluviales.

Se llevaron a cabo dos visitas de campo realizadas el 16 de febrero y 5 de marzo de 2019 durante las cuales se realizaron las actividades anteriormente mencionadas, además de la rectificación de la UMI delimitada para considerar posibles cambios.

3.4 ANÁLISIS DE OFICINA TENDIENTES A REALIZAR MAPAS E INFORME FINAL

Se ajustó la base cartográfica que comprende curvas de nivel, drenajes, malla vial y desarrollo urbanístico para lograr el cubrimiento total de la UMI. Se empleó la topografía oficial del IGAC, específicamente las planchas 147IIIB1f y 147IIIB1k a escala 1:2.000, se utilizó también cartografía resultado del Acuerdo 048 del 2014 para el POT del municipio de Medellín y demás cartografía levantada en el predio a escala 1:250 utilizados en la elaboración de los mapas y para el estudio hidrológico e hidráulico.

Se realizaron mapas temáticos con ayuda de sistemas de información geográfica (SIG), mapas de modelamiento del terreno, pendientes y delimitación de unidades geológicas, geomorfológicas, y zonificación de amenazas.

Se adelantó la geología y geomorfología regional de la zona y de forma detallada la geología y geomorfología local.

4. ESTUDIO DE AMENAZA POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA

En este apartado se presenta inicialmente la definición de la Unidad Morfodinámica Independiente (UMI), la caracterización geológica, geomorfológica e hidrogeológica. Además del inventario de procesos morfodinámicos y el uso del suelo.

4.1 DEFINICIÓN DE LA UNIDAD MORFODINÁMICA INDEPENDIENTE

Para delimitar el área para la cual se realizará el estudio de amenaza por fenómenos de remoción en masa, se siguió el informe de "directrices y lineamientos para la elaboración de los estudios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidrogeológicos y geotécnicos para intervenciones en zonas de ladera, en el valle de Aburrá" por (AMVA, 2012).

De acuerdo con la definición de unidad morfodinámica independiente (UMI) propuesta por AMVA (2012) se entiende como:

> *La unidad de territorio que enmarca el predio de interés y que presenta un comportamiento independiente de las unidades adyacentes, dicha unidad podrá estar delimitada por divisorias de agua, drenajes o expresiones geomorfológicas. Se considera que cualquier proceso morfodinámico que se presente en el exterior no afecta su interior e igualmente, cualquier proceso morfodinámico que se presente en el interior no afecta las unidades adyacentes*.

Para el predio de interés se definió una unidad de análisis que cubre un área mayor a la del lote de estudio, puesto que se deben delimitar todos los procesos morfodinámicos que puedan causar algún tipo de afectación, incluyendo la dinámica de los cursos de la quebrada Escopetería y la Cañada Villanita.

Por lo tanto, la UMI definida para realizar el estudio se extiende en sentido noroeste-sureste, limitando al norte con el cambio de pendiente que se tiene con la construcción aledaña en este costado, al este por la calle 5f, hacia el costado sureste limita con la unidad residencial Villa del Poblado, al norte es delimitada por la quebrada Escopetería y hacia el costado oeste es acotada por la cañada Villanita. Ver Figura 5.

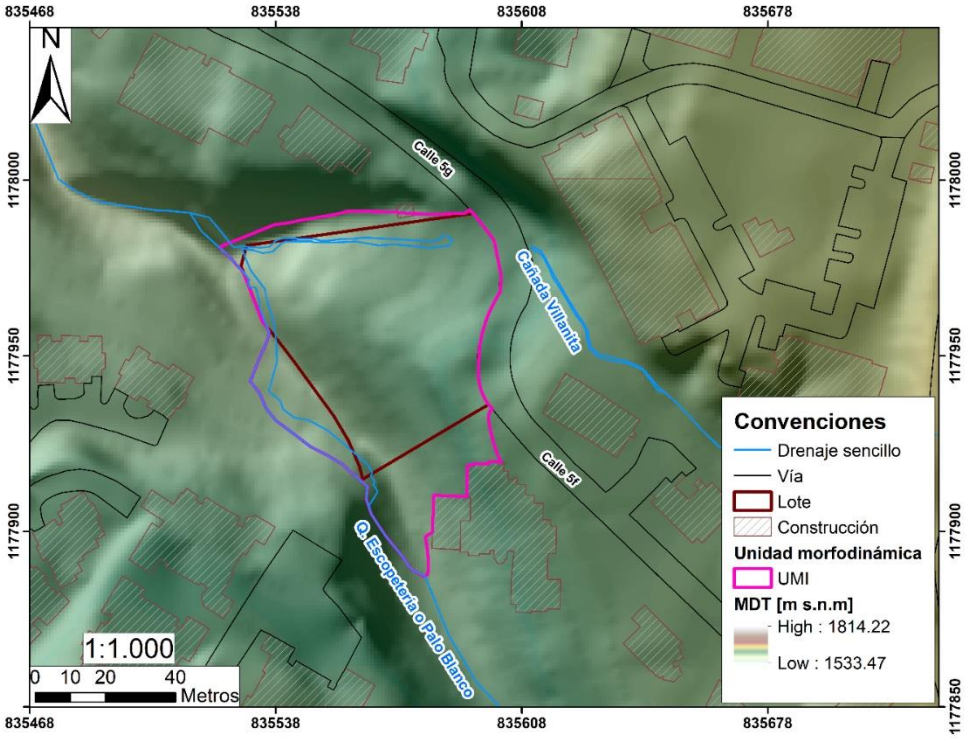

Figura 5. Delimitación de la UMI de la zona en estudio en color fucsia.

4.2 GEOLOGÍA

A continuación, se describe la geología regional, así como la geología local para la UMI definida, características que se definen con base a los recorridos de campo y las perforaciones realizadas dentro de la zona de estudio en el marco del estudio geotécnico.

4.2.1 Geología regional

Según el estudio de microzonificación sísmica realizado por Consorcio Microzonificación 2006 (2007), la zona de interés que cubre la UMI está constituida por la unidad de depósitos de vertiente, donde se diferencian tres depósitos de flujos de escombros y/o lodos (NFI, NQFII y QFIII) generados por diferentes series de eventos.

A continuación, se presenta la descripción de las unidades geológicas regionales que se encuentran cerca del área de estudio. En la Figura 6 se presenta el mapa geológico regional.

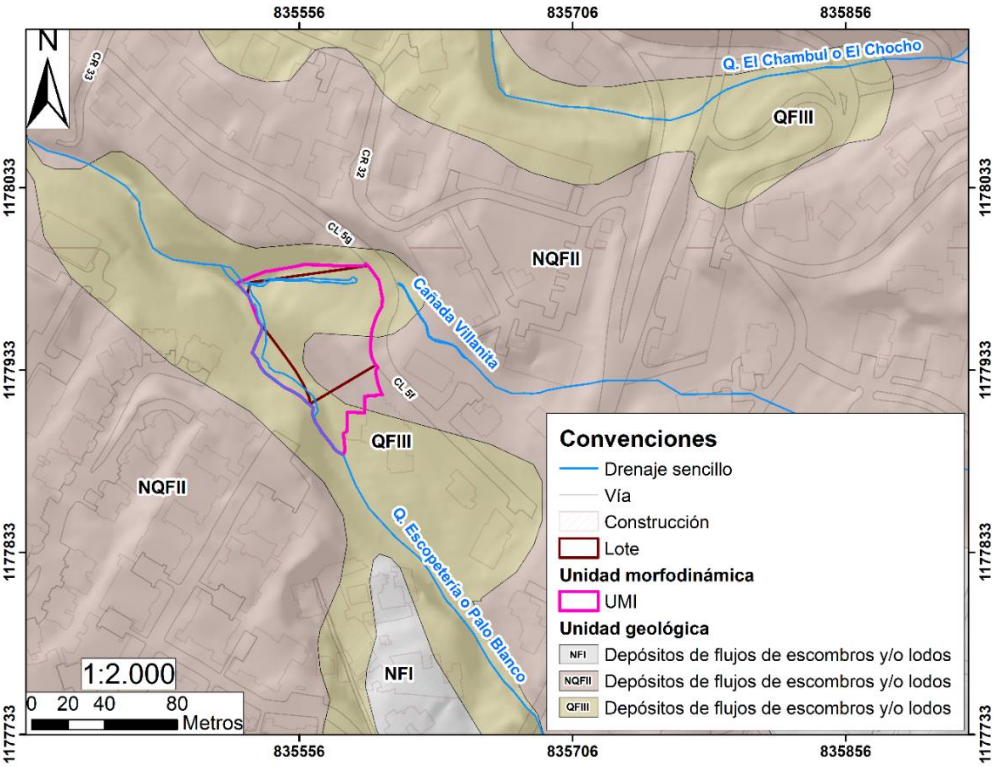

Figura 6. Mapa geológico regional, adaptado del estudio de Microzonificación Sísmica, 2007

4.2.1.1 Depósitos de vertiente

Corresponden a depósitos de edad variable que son agrupados en series de eventos con base a sus características de altura, consolidación, madurez, grado de incisión y pendiente.

Dentro del área de estudio se presentan tres series de eventos de escombros y/o lodos que se relacionan a esta unidad, del más antiguo al más reciente NFI, NQFII y QFIII. Estos depósitos presentan arreglo escalonado, donde los más antiguos se sitúan en las partes medias y altas de las laderas y los más jóvenes hacia la base (Consorcio Microzonificación 2006, 2007). A continuación, se describen las características generales de los depósitos de flujos de escombros y/o lodos.

4.2.1.1.1 Depósitos de flujos de escombros y/o lodos NFI, NQFII, QFIII

Constituidos por clastos de diferente grado de meteorización, y flujos de distintas edades relativas que fueron definidas según el grado de incisión, estabilidad y su altura respecto al fondo del valle. Son generados desde las partes altas de las vertientes debido a altas precipitaciones o eventos sísmicos, donde materiales de diversos tamaños se trasladan más o menos controlados por los cauces de los drenajes hasta encontrar condiciones de baja pendiente, dando como resultado un depósito mal seleccionado, que según su granulometría puede variar entre flujos de escombros (predominio de bloques) y flujos de lodo (predominio de limos o arcillas), aunque ambos tipos de flujos pueden estar dentro del mismo depósito en diferentes zonas. (Consorcio Microzonificación 2006, 2007)

4.2.2 Geología estructural

En la zona cercana al predio en estudio, no presenta estructuras geológicas regionales, sin embargo dentro del Valle de Aburrá además de los sistemas de Fallas claramente definidos, se presentan rasgos tectónicos definidos por geoformas como lomos deflectados, quebradas o corrientes asimétricas y cambios bruscos de pendientes, también aparecen a nivel de afloramiento zonas de cizalla, salvanda y un intenso fracturamiento de las rocas, pero donde no se alcanza a definir una zona de falla propiamente dicha.

4.2.3 Geología local

De acuerdo con los lineamientos del Acuerdo Metropolitano 09 de 2012, se presentan las unidades geológicas locales presentes en el área. Para la definición de estas unidades se contó con exploraciones directas de campo y recorridos detallados de campo en toda la zona, estas se presentan en detalle más adelante en el numeral 5. Para la UMI definida se tienen dos unidades geológicas a saber: depósito de vertiente (Qv) y lleno antrópico (Qll). En la Figura 7 se presentan las unidades geológicas en planta y en la Figura 8 los perfiles geológicos.

A continuación, se describen las unidades geológicas presentes en la zona de estudio.

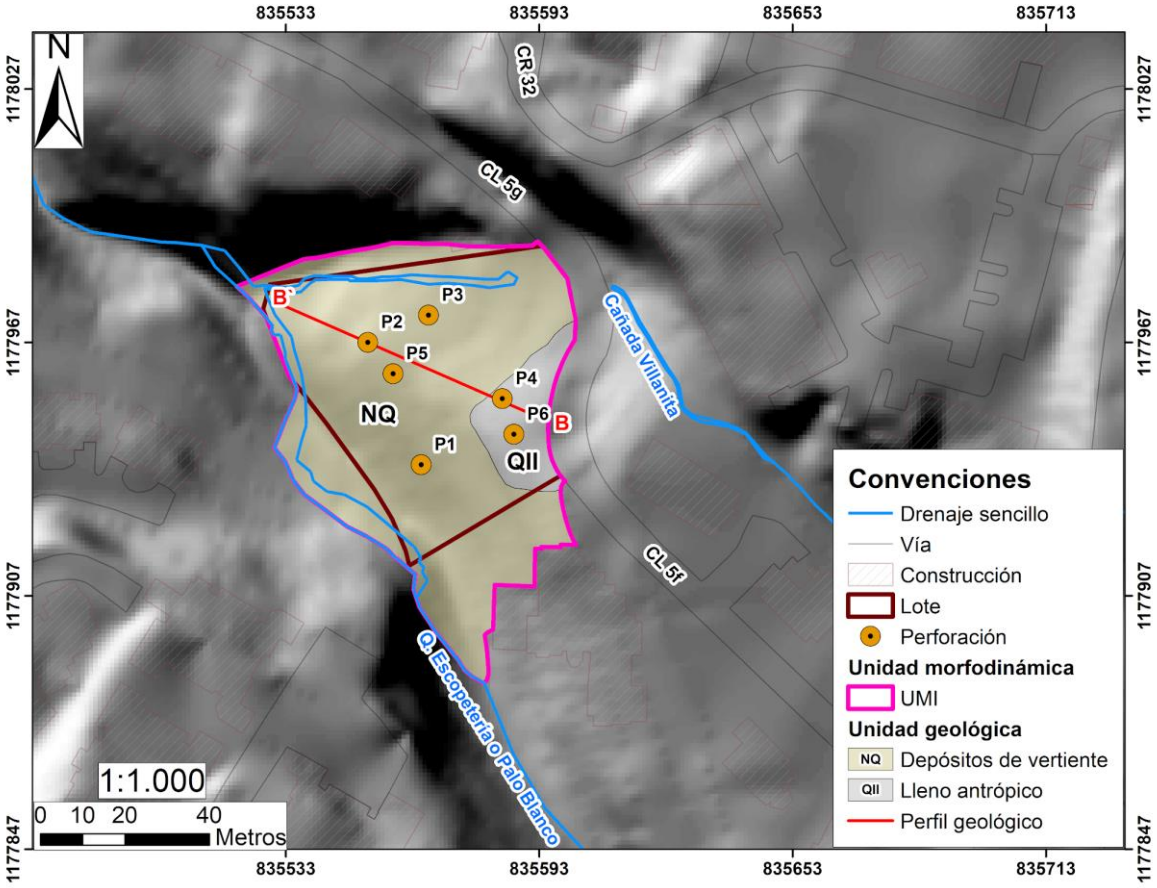

Figura 7. Mapa de geología local, con ubicación de sondeo y perfiles

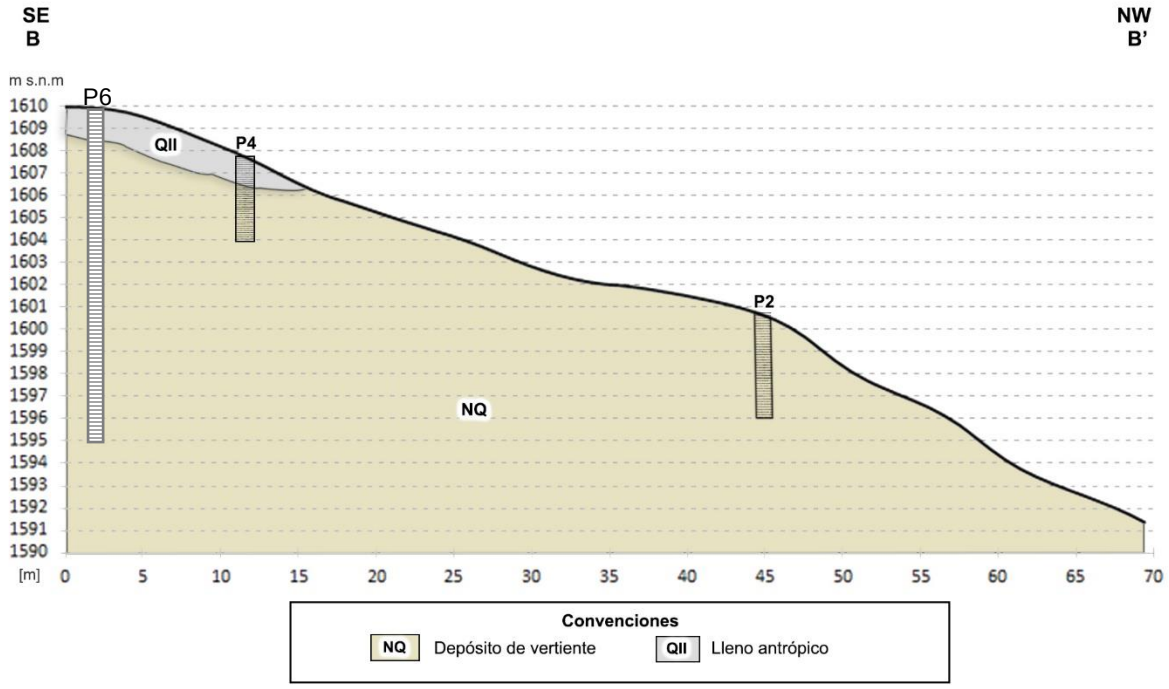

Figura 8. Perfiles geológicos A-A' y B-B''.

4.2.3.1 Depósitos de vertiente maduros (NQ)

Estos depósitos cubren el 100% del área de interés. Se caracteriza por presentar bloques de rocas, meteorizados principalmente, en una matriz limosa de color anaranjado. Los espesores de estos depósitos van desde 2 m has más de 20 m, según la profundidad de exploración de los sondeos realizados, pero según la geología regional son de mayor espesor. La expresión morfológica de este material en ladera presenta pendientes entre 10 a 15°.

El material corresponde como se indicó anteriormente, a un limo con bolas de rocas de color café claro, los cambios de tonalidad indican meteorización diferencial entre los componentes del flujo, por lo que ocasionalmente se confunden con suelos residuales. Esta matriz engloba bolas de rocas parcialmente alteradas. La parte fina presenta consistencia firme a dura y baja humedad, además no presenta textura heredada.

Los afloramientos de la unidad son visibles cerca al cauce de la quebrada La Escopetería, donde se observan taludes del orden de 2m de altura, con un porcentaje de bloques meteorizados del 60%.

Este material al ser disgregable puede ser lavado por el agua de escorrentía por tanto requiere protección con vegetación, en los taludes que pueden ser afectados por procesos de erosión superficial concentrada. Ver Foto 1.

Foto 1. Vista del depósito de vertiente que cubre la mayor parte del predio.

4.2.3.2 Lleno antrópico (Qll)

Se presenta un lleno antrópico hacia el límite este del lote, de más de 10 m de ancho, que se extiende desde la calle 5f hasta la quebrada Escopetería. Se trata de un botadero indiscriminado de escombros y otros residuos, donde la acumulación de estos se remonta a varios años, es identificado en las fotografías aéreas para el año 1981. El espesor de este lleno alcanza hasta 3 m de profundidad, según las perforaciones. Presenta vegetación actualmente hacia su zona más baja. Ver Foto 2.

Foto 2. Vista del lleno antrópico localizado en la zona norte.

4.3 GEORMOFOLOGÍA

Las formas de la tierra son un producto final de la meteorización y la erosión. La meteorización depende de tres factores principales: (a) las condiciones climáticas pasadas y presentes, (b) tipo de roca y las características estructurales, y (c) el tiempo expuesto a la meteorización (Singhal & Gupta, 2010). La zonificación de las unidades geomorfológicas debe estar regida por el tipo de proceso actuante, y se dividen en dos: (1) geoformas erosivas y (2) geoformas depositacionales. El objetivo fundamental del presente capítulo se centra en identificar y caracterizar las geoformas desde los siguientes puntos de vista: morfogénesis, morfología, morfometría y morfodinámica. A continuación, se presentan las unidades geomorfológicas regionales y locales de la zona de estudio.

4.3.1 Geomorfología regional

La totalidad del área de estudio está enmarcada dentro de la macrounidad geomorfológica de valle medio Bloque Poblado-Envigado (BPE), descrita en el estudio de Microzonificación sísmica por Consorcio Microzonificación 2006 (2007), el cual dice también que las macrounidades geomorfológicas son aquellas que agrupan conjuntos de geoformas o unidades geomorfológicas que se relacionan en su génesis. En este caso estas unidades corresponden a superficies suaves en depósitos altamente, moderadamente y poco incisados (SSDAI, SSDMI y SSDPI). En la Figura 9 se presentan las unidades geomorfológicas relacionadas al Bloque Poblado- Envigado (BPE), y posteriormente se realiza su descripción.

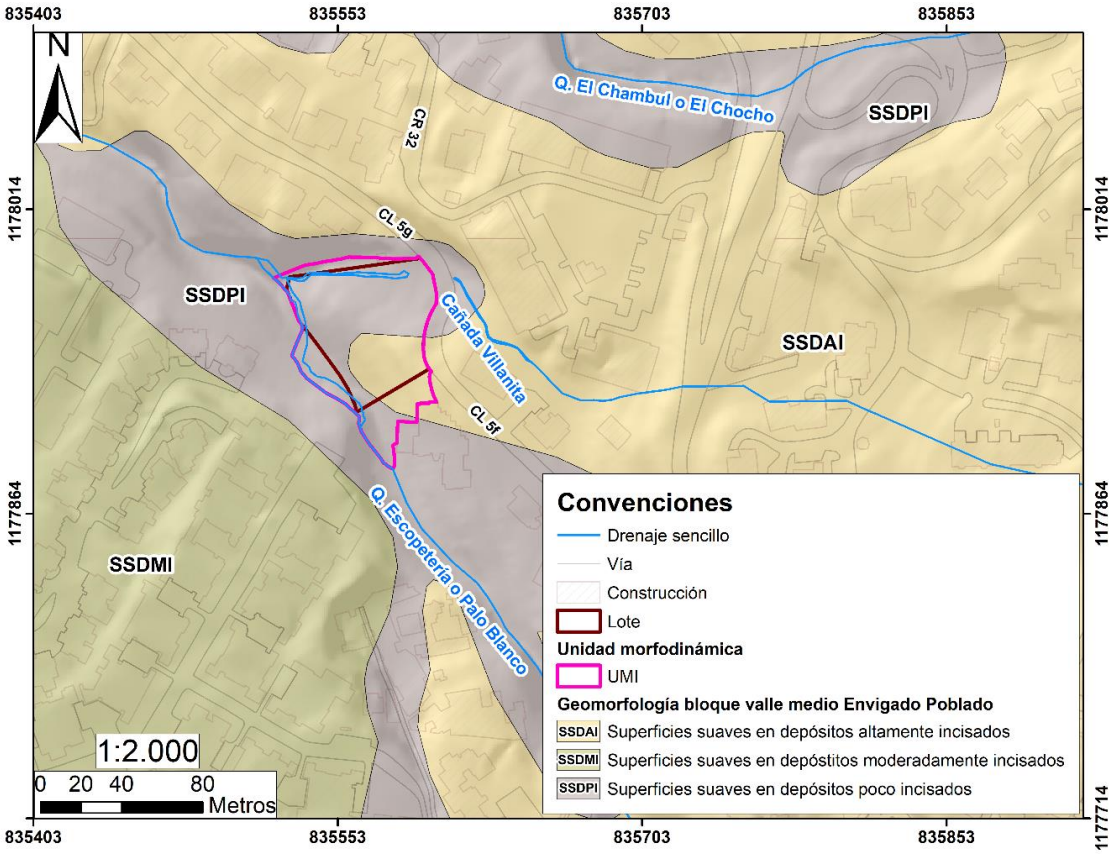

Figura 9. Mapa de unidades geomorfológicas regionales. Adaptado del Estudio de Microzonificación sísmica, 2007.

4.3.1.1 Valle medio Bloque Poblado – Envigado (MV-BPE)

Corresponde a la macrounidad geomorfológica localizada sobre la vertiente oriental del valle medio de Aburrá, sobre la cual se ubica el sector El Poblado y parte del casco urbano de Envigado. Hacia su parte norte se identifican escarpes semicirculares por la erosión provocada por quebradas como La Presidenta y La Escopetería (Consorcio Microzonificación 2006, 2007).

Hacia la parte media y baja, la vertiente se compone por depósitos de lodos y/o escombros con alto, medio y bajo grado de incisión que se han correlacionado a diferentes series de eventos (Consorcio Microzonificación 2006, 2007).

Las unidades geomorfológicas relacionadas al Bloque Poblado – Envigado que se encuentran dentro o cerca del área de estudio se describen a continuación según Consorcio Microzonificación 2006 (2007).

4.3.1.1.1 Superficies Suaves en Depósitos Altamente Incisados (SSDAI)

Geoformas de inclinación suave a moderada sobre depósitos de vertiente de flujos de lodos y/o escombros, con alto grado de incisión.

4.3.1.1.2 Superficies Suaves en Depósitos Moderadamente Incisados (SSMAI)

Unidades geomorfológicas de suave a moderada inclinación sobre depósitos de vertiente de flujos de lodos y/o escombros con moderado grado de incisión.

4.3.1.1.3 Superficies Suaves en Depósitos Poco Incisados (SSPAI)

Geoformas con inclinación suave a moderada que se presentan sobre depósitos de flujos de lodos y/o escombros con grado de incisión baja a muy baja.

4.3.2 Geomorfología local

Aquí se realiza el análisis para la definición de las unidades geomorfológicas para la UMI en estudio, a partir de las geoformas observadas en campo, el análisis de los mapas de pendientes y de los procesos morfodinámicos que se identifican.

Con los recorridos de campo y la información secundaria disponible se determinó que la UMI se encuentra localizada en la macrounidad del bloque valle medio Poblado - Envigado, descrito anteriormente, donde se encuentran las microunidades de escarpes (e), planicies (p) y superficies suaves en depósitos poco incisados (SSDPI).

Para obtener una clasificación del relieve se realizó un mapa de pendientes y posteriormente se identificaron las unidades geomorfológicas, las cuales se describen a continuación.

4.3.2.1 Morfometría

Para definir las pendientes en la zona se hizo uso de herramientas digitales de SIG, donde se construye a partir de la elevación de curvas de nivel, y la triangulación entre ellas, un modelo de elevación del terreno que busca discriminar las diversas inclinaciones de las laderas del sector, según rangos definidos por el Área metropolitana del Valle de Aburrá, en el acuerdo Metropolitano N°009 de 2012, tal como se muestra a continuación en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Rangos de pendientes, Acuerdo Metropolitano N°9 de 2012.

Rango (°)	Rango (%)	Rango geomorfológico	Descripción
0 – 5°	0-9	Planicies	Erosión superficial
5 - 15°	9-27	Vertientes suaves	Erosión superficial
15 -30°	27-58	Vertientes moderadas	Movimientos en masa y erosión superficial
30 - 45°	58-100	Vertientes empinadas	Movimientos en masa
> 45°	>100	Escarpes	Caídas de bloques y movimientos en masa

Los rangos de pendientes utilizados para el análisis morfométrico se clasificaron de acuerdo con el ángulo de inclinación natural que presente el terreno, y se observan en el mapa de pendientes de la Figura 10.

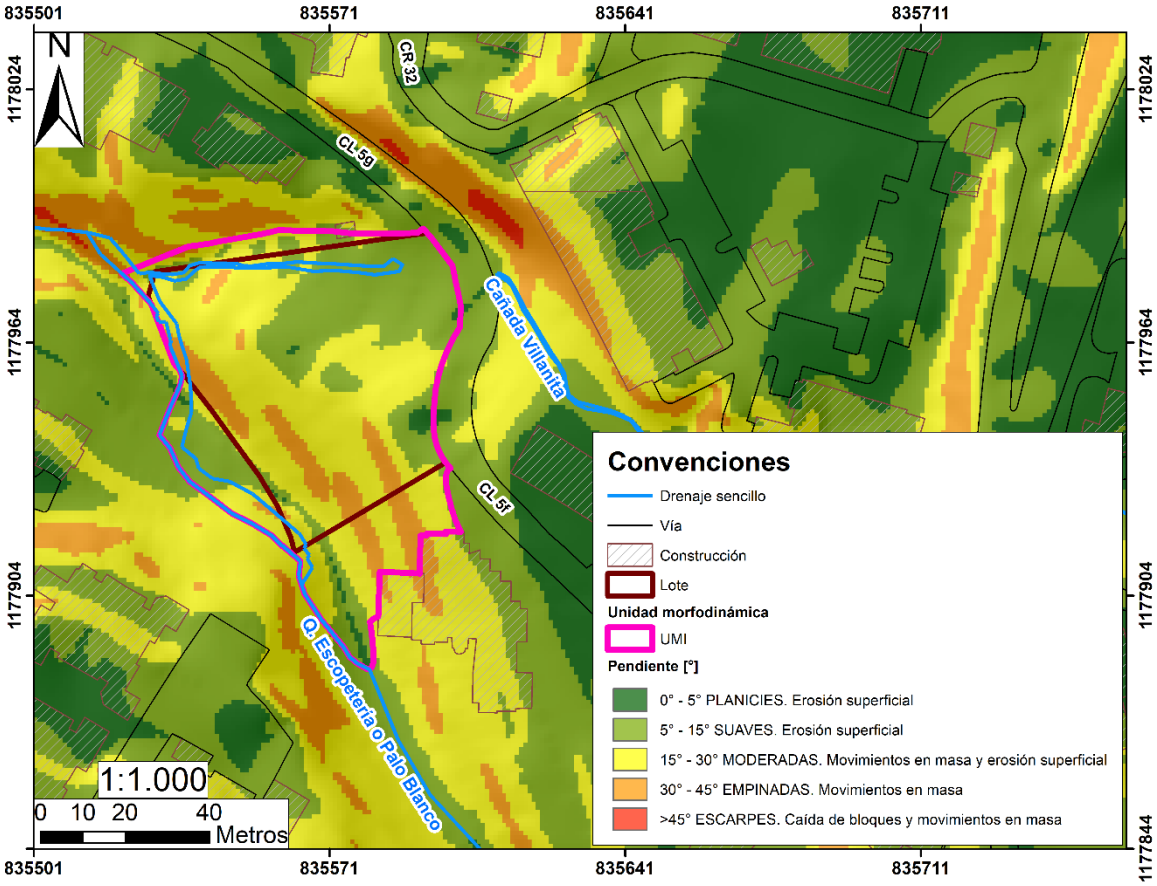

Figura 10. Mapa de pendientes.

Según el mapa de pendientes, se tiene que la mayor parte de la UMI está representada por pendientes suaves y moderadas correspondientes al 86% del área total de la UMI, y localizadas en la zona este, oeste y centro de esta unidad morfodinámica. Las planicies con 0°a 5º de inclinación (en color verde oscuro en la Figura 10) representan un área muy baja, con un 2%. Las zonas empinadas, en color naranja, se presentan principalmente hacia la zona suroeste de la UMI y hacia los costados con menor altitud respecto al nivel del mar, cercanos al cauce de la quebrada Escopetería, las cuales representan el 12% del área total de la UMI. En resumen, en el área de interés predominan las pendientes moderadas, de 15°- 30° de inclinación.

4.3.2.2 Red de drenaje

En el lote de interés se presentan los drenajes de la Cañada Villanita que discurre hacia la zona norte del lote, y la Quebrada Escopetería, que discurre por los costados sur y oeste del predio. Ambos drenajes limitan la UMI definida por los extremos anteriormente mencionados. Ver Figura 11.

A continuación, se presenta un análisis de las fuentes hídricas.

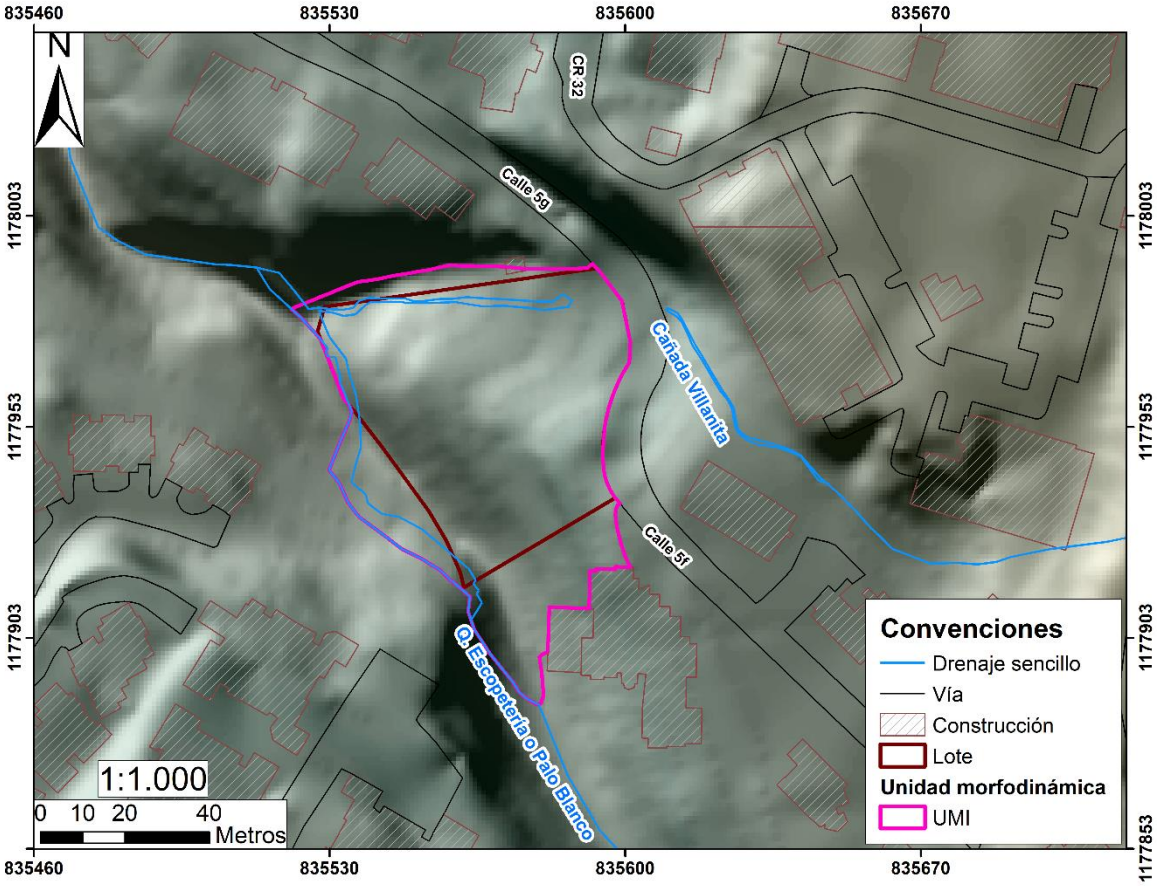

Figura 11. Vista de los drenajes existentes en el predio.

4.3.2.2.1 Cañada Villanita

Esta cañada discurre por un canal poco definido al interior del predio y es controlada sobre su margen derecha por la obra de un muro de contención con malla, que divide el lote de estudio con el adyacente. Presenta procesos de incisión vertical de muy baja magnitud. Su ancho aproximado es de 0,5 m y su profundidad de pocos centímetros (0,20 m). No se presenta un caudal constante, solo se observa en algunos tramos zonas de encharcamiento con disposición de residuos. Ver foto 4

Foto 3. Cañada Villanita, en flechas azules dirección del flujo.

4.3.2.2.2 Quebrada Escopetería

El cauce de la quebrada se encuentra bien definido, presentando morfología de saltos y pozos, hacia aguas arriba del predio, se observa una estructura de contención tipo muro. El material de arrastre lo conforman bloques de roca angulosos a subangulosos, con tamaño aproximado de 0,50 m. La quebrada es encañonada, de forma rectangular, con cobertura vegetal de árboles y rastrojo. El ancho es de 6 m aproximadamente y. el nivel de banca llena es de aproximadamente 2,5 m. El material grueso del lecho proviene de ambas márgenes donde afloran depósitos de vertiente. Ver Foto 4.

Foto 4. Quebrada La Escopetería costado oriente del proyecto

4.3.2.3 Unidades geomorfológicas

Teniendo en cuenta el análisis anterior, la zona se dividió en tres (3) unidades geomorfológicas diferentes, que se nombran teniendo en cuenta la nomenclatura sugerida para la caracterización de unidades geomorfológicas del Valle de Aburrá (AMVA, 2012), que se observan en la Figura 12.

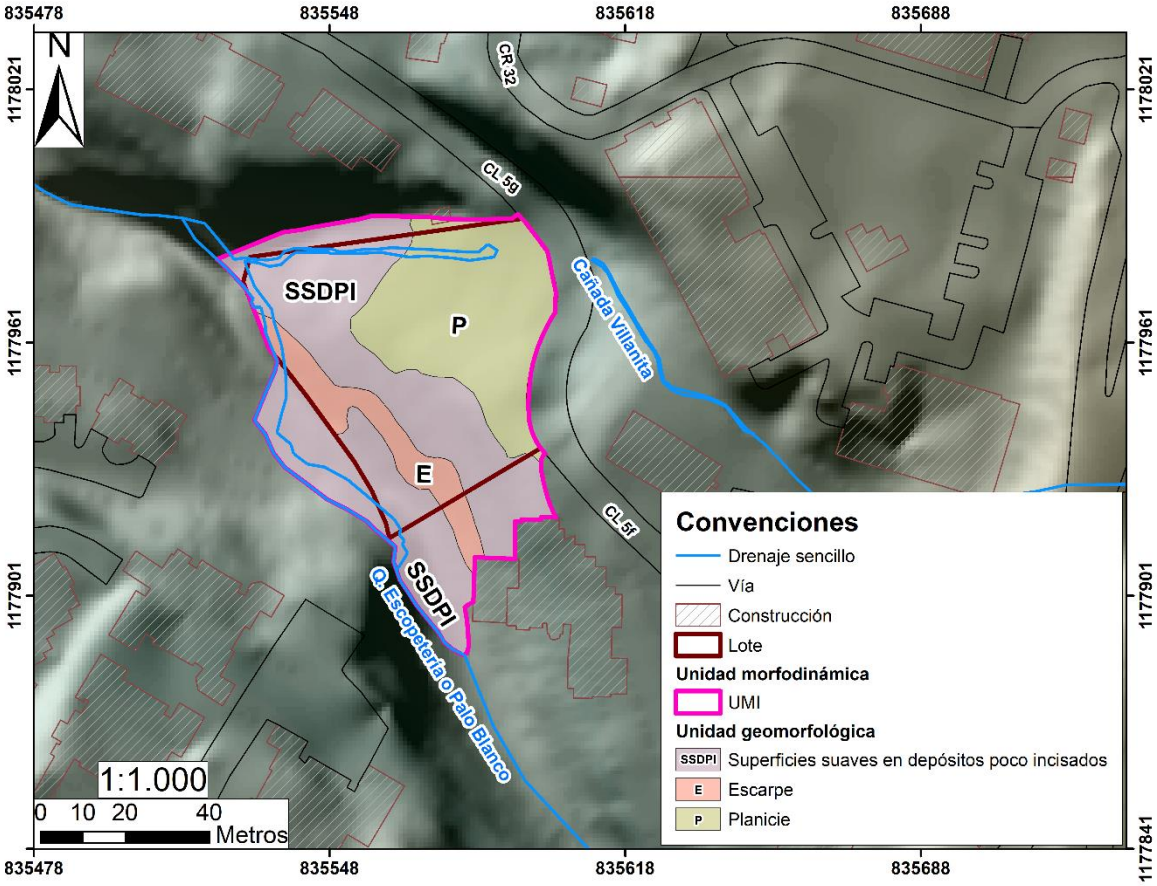

Figura 12. Mapa geomorfológico local.

4.3.2.3.1 Superficies suaves en depósitos poco incisados (SSDPI)

Corresponden a geoformas con inclinaciones moderadas y empinadas, con superficies suaves y convexas, moldeadas en depósitos de vertiente de flujos de lodos y/o escombros que están compuestos por clastos de tamaño centimétrico y angulosos con diferentes grados de meteorización, soportados por una matriz de materiales más finos de coloración marrón en algunas zonas. Esta unidad se encuentra hacia el costado norte y cauce de la quebrada La Escopetería, corresponde a un 40% del área. Presenta pendientes entre 15° y 45°. Ver Foto 5.

Foto 5. Unidad geomorfológica Superficies suaves en depósitos poco incisados (SSDPI) vista desde el cauce de la quebrada La Escopetería.

4.3.2.3.2 Planicies (P)

Se le denomina con este nombre a la unidad con pendientes más bajas del área del lote (0 – 15º), se encuentran en la parte más alta de los depósitos de vertiente presentes en el predio. Esta unidad geomorfológica está limitada por. Se ubican hacia la zona noreste del predio y son el resultado de intervención antrópica, corresponden a pendientes entre 0° y 15°, ocupan un 40% de la zona. Ver Foto 6.

Foto 6. Unidad geomorfológica planicie (p).

4.3.2.3.3 Escarpes (E)

Unidades geomorfológicas con las mayores inclinaciones de pendiente dentro del área de estudio, con valores >45°. Ubicadas hacia las zonas cercanas al curso de la quebrada Escopetería. Están presentes en depósitos de vertiente de tipo flujo de lodos y/o escombros definidos en la geología local, cubiertos por vegetación, representan un 20% del área. Ver Foto 7.

Foto 7. Unidad geomorfológica de escarpes (e).

4.3.2.4 Procesos morfodinámicos

La zona en estudio hace parte de un paisaje de superficies suaves caracterizadas por depósitos de vertiente, donde los procesos superficiales se encargan de moldear las geoformas y definir la actual estabilidad. La identificación de estos procesos se realiza con el fin de caracterizar de manera cualitativa los diferentes eventos que afectan las condiciones de estabilidad global de la UMI y el impacto que estos generan sobre el predio de interés y las intervenciones allí proyectadas.

La identificación de la actividad morfodinámica de la UMI se llevó a cabo mediante la interpretación de fotografías aéreas temporalmente espaciadas (las fotografías empleadas se observan en la Tabla 1), el análisis de la topografía actual del terreno a escala 1:250 y 1:2.000 y los recorridos de campo efectuados en los predios que conforman el área de interés.

En general se observaron cinco (5) deslizamientos de pequeña magnitud reportados desde 1959 y procesos de reptación que actualmente se encuentran estabilizados. Ver Figura 13.

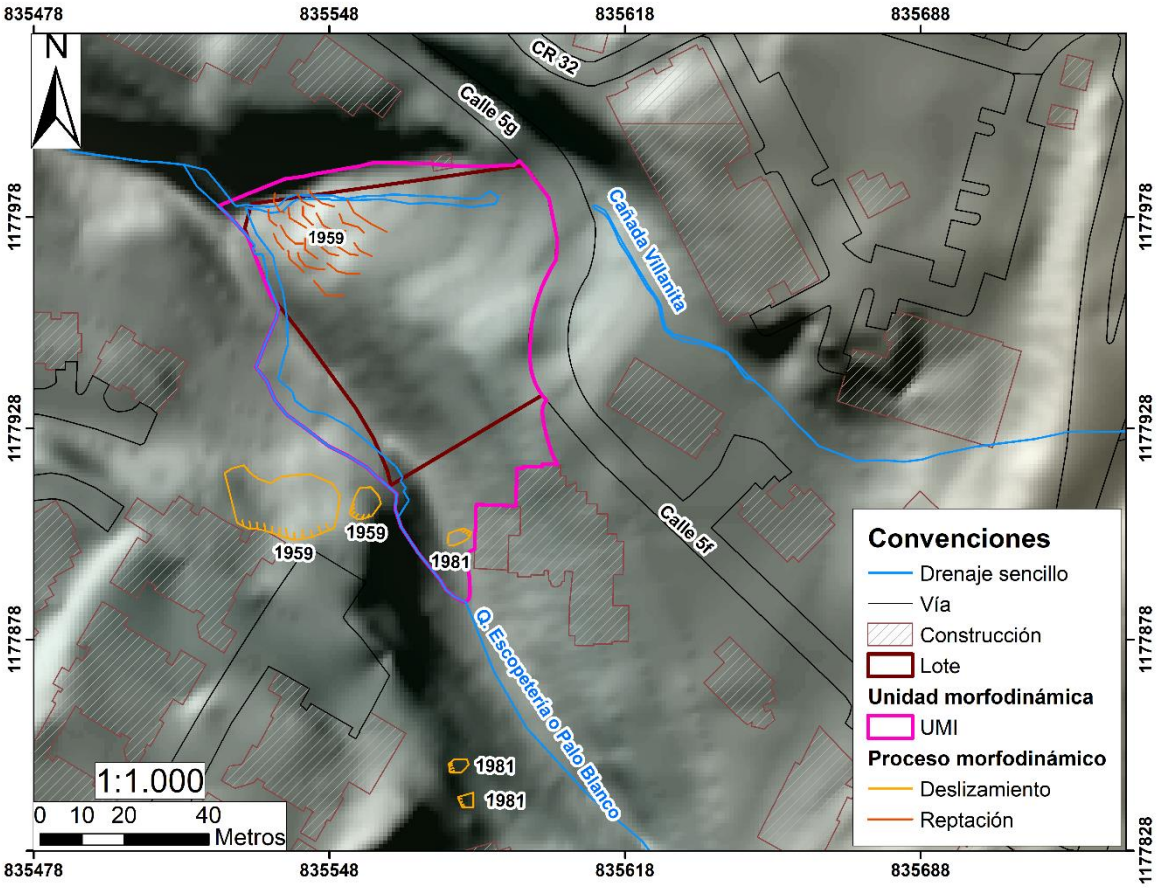

Figura 13. Mapa de procesos morfodinámicos para la zona de estudio

A continuación, se presenta una descripción de cada fenómeno.

4.3.2.4.1 Deslizamientos

Los deslizamientos son movimientos en masa, que suceden en general en topografías escarpadas, con forma de U, cóncavos en el sentido de la pendiente, que presentan una corona y un escarpe en su parte superior; grietas y algunas veces acumulación del material deslizado en la parte inferior. Se denominan activos por no presentar cobertura vegetal y por estar el material deslizado in situ, suelto y sujeto a procesos erosivos.

Cercanos al área en estudio se identificaron cinco (5) deslizamientos en total, dos de ellos en el año 1959 hacia el sur del lote, a unos 30 m de distancia. Ambos deslizamientos se presentan muy cercanos uno del otro. Las dimensiones aproximadas corresponden a 25 m de ancho y 20 de largo para el de mayor tamaño y 10 m de ancho y 15 m de largo para el de menor dimensión.

Para el año 1981 se identificaron los otros tres eventos de deslizamiento, ubicados hacia el sureste del lote, a 20 m, 65 m y 70 m de distancia, con dimensiones de 5 m de ancho por 10 m de largo para el más cercano, dimensiones muy similares para el siguiente y 5 m de ancho x 5 m de largo para el deslizamiento más distante.

En la actualidad estos procesos se encuentran estabilizados.

4.3.2.4.2 Reptación

Corresponden a movimientos en los cuales la masa se deforma de manera continua y lenta, donde su rapidez de ocurrencia tiende a ser imperceptible, excepto a largo plazo. Afecta todo tipo de materiales, como saprolitos, suelos residuales y coluviones arcillosos. Es generado por falta de consolidación en la parte superior del perfil de suelo y aumento de su humedad y algunas actividades antrópicas como la deforestación. Es reconocido por el carácter rugoso del terreno y evidencias de concentración de humedad (Montero, 2017).

El proceso de reptación se identificó para el año de 1959 al interior del predio, con un área de afectación de más de 300 m^2 aproximadamente, donde la superficie del terreno luce agrietada, exponiendo el material del suelo que anteriormente cubría la vegetación.

En la actualidad este proceso se encuentra estabilizado.

4.4 HIDROGEOLOGÍA

Para este estudio el análisis hidrogeológico está encaminado a un conocimiento de los flujos y zonas de almacenamiento de agua en el subsuelo.

De acuerdo con el diagnóstico del Plan de Manejo Ambiental del Acuífero –PMAA-del Valle de Aburrá –PMAA, del año 2016, la zona en estudio hace parte de la unidad hidrogeológica “Acuífero libre del Valle de Aburrá” conformado por los depósitos aluviales del río Aburrá-Medellín y sus afluentes, y los depósitos de vertiente, categorizados como flujos de lodo y escombros con edades Neógeno o Cuaternario. Texturalmente estos depósitos están constituidos por gravas, arenas y cantos en matriz areno arcillosa gradando a arcillosa hacia la base, con presencia de lentes de grava y arcilla. Esta unidad tiene una extensión de 238,6 km^2 (Universidad de Antioquia, 2016).

En los sondeos realizados cuya profundidad máxima alcanzada fue de 15 m, no se registraron niveles freáticos (solo en la perforación P6 se encontró un nivel aparente a los 6 m), el flujo de agua subterránea se da desde las partes topográficamente más altas (Altiplano Santa Elena) hacia las partes más bajas del valle (río Medellín). En el área no se presentan manantiales ni nacimientos de agua, los flujos son de carácter regional. Dadas las condiciones topográficas (pendientes medias altas) en el área predomina el escurrimiento superficial y que no permite el almacenamiento del agua subterránea.

4.5 CATÁLOGO DE MOVIMIENTOS EN MASA

Con el fin de establecer si en la zona de estudio ocurrieron movimientos en masa de grandes proporciones, se consultan fuentes de información pública en las que se consolida el catálogo histórico municipal de procesos de inestabilidad, las bases consultadas corresponden a: DESINVENTAR MEDEDELLÍN, DAPARD, DAPAR, SIMA En la base de datos del DESINVENTAR no se encontraron eventos registrados cerca al área en estudio, sin embargo en el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), que es una plataforma virtual realizada por el Servicio Geológico Colombiano (http://simma.sgc.gov.co/), se dispone de una base de datos de movimientos en masa ocurridos en el territorio nacional desde 1917. En esta base de datos hay dos niveles de información: catálogo histórico e inventario de movimientos en masa. El catálogo histórico contiene fecha de reporte y ocurrencia del evento, localización geográfica, clasificación del movimiento y daños, información cuya fuente son los medios de comunicación y los entes territoriales de gestión de riesgo.

De acuerdo con la búsqueda en la plataforma, en un radio aproximado de 1250 m de la zona de la UMI definida, se han presentado cuatro (4) eventos de inestabilidad donde dos de ellos corresponden a deslizamientos y los otros dos a flujos, como se observa en la Figura 14. En la Tabla 3 se presenta información detallada de cada uno de estos.

Los cuatro deslizamientos registrados en la UMI de estudio son de importancia baja, ninguno comprometió vidas o daños a infraestructura.

Tabla 3. Inventario de eventos ocurridos en la zona de estudio. Fuente: SIMMA.

Punto	ID Catalogó de Movimiento en masa	Tipo	Fecha del Evento	Importancia	No Heridos	No Desaparecidos	No personas afectadas
1	11740	Flujo	13/03/1921	Baja	0	0	0
2	11699	Flujo	09/11/1983	Baja	0	0	0
3	1863	Deslizamiento	26/09/1985	Baja	0	0	0
4	18646	Deslizamiento	03/10/2002	Baja	0	0	0

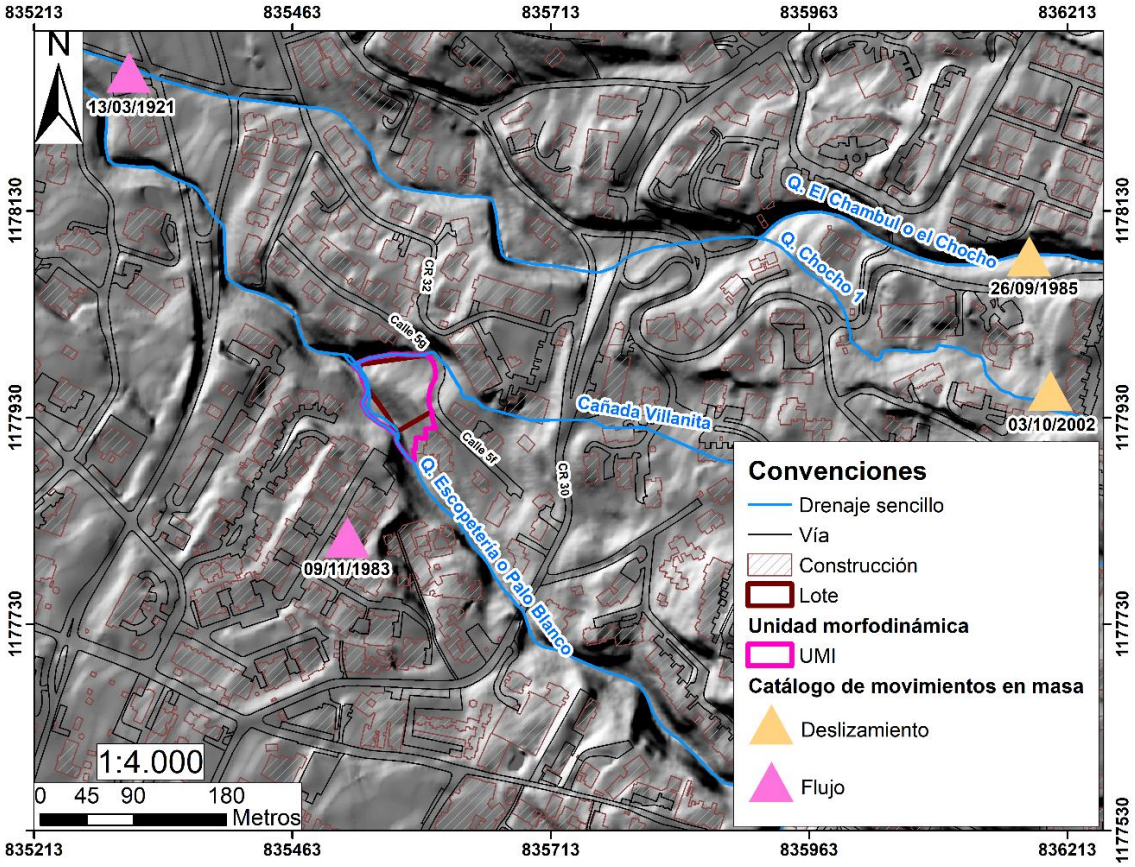

Figura 14. Movimientos en masa cerca de la zona de estudio. UMI en color fucsia y triángulos beige y violeta de eventos registrados. Fuente: SIMMA.

Como información adicional se presentan los eventos ocurridos en el barrio El Poblado reportados en el catálogo del DESINVENTAR Área metropolitana, que como se indicó anteriormente no se encuentran dentro de la zona específica de estudio. Ver Tabla 4.

Tabla 4. Eventos según el catálogo del DESINVENTAR Área Metropolitana.

ID Catalogó de Movimiento en masa	Tipo	Fecha	Lugar	Fuente	Observaciones	No muertes	No Victimas
MED-0187	Inundación	30/09/1959	El Poblado	El Colombiano	Se desconoce la causa	0	0
MED-1198	Inundación	11/10/1984	El Poblado	El Colombiano	Se desconoce la causa	0	0
MED-1700	Vendaval	01/10/1986	Calle 7a Sur; frente al Nº 46-29	El Colombiano	En el sitio mencionado anteriormente se cayó un árbol sobre la vía pública y obstaculizó el tránsito de vehículos; todo esto debido al fuerte aguacero. Nota: La publicación de esta	0	0

ID Catalogó de Movimiento en masa	Tipo	Fecha	Lugar	Fuente	Observaciones	No muertes	No Victimas
					noticia aparece en El Colombiano del 1 de octubre de 1986(DI6Date : 24/9/02)		
MED-1691	Inundación	20/10/1986	Barrios America; Belén Las Playas; El Poblado; Autop. norte	El Colombiano	Se desconoce la causa Este evento se dio en otros barrios fuera de este y en la ficha no dice a qué barrios se les atribuyen los distintos efectos.Esos barrios son: Belén Las Playas y La América(	0	0
MED-2298	Inundación	24/10/1988	Calle 10 con cra. 43A (Banco Comercial Antioqueño)	El Colombiano	Los 6 vehículos destruidos son debido a que cinco de ellos quedaron atrapados en el sótano de la entidad bancaria nombrada anteriormente y otro demolido por un eucalipto (DI6Date: 25/9/02). Fuerte aguacero	0	0
MED-2306	Deslizamiento	22/11/1988	Kilómetro 3. Carretera Medellín - Las Palmas	El Colombiano	* Que fueron el detonante de una falla geológica y por efecto del deslizamiento Nota: En total las lluvias torrenciales del 22 y 23 de nov de 1988 dejó en Medellín 205 familias; 1200 personas afectadas; 4 muertos y 2 desaparecidos. Barrios afectados Enciso; Los Angeles; Colinas de Enciso; Buenos Aires; Caicedo; Av. Oriental; La Playa y Parque Bolivar.(DI6Date : 26/9/02). Aguas subterráneas perdidas	SI	SI
MED-2423	Inundación	26/03/1989	CALLE 10 CON CRA 35	BOMBEROS MEDELLIN	(DI6Author : RS)(DI6Date : 12/02/03)	0	0
MED-2425	Inundación	26/03/1989	CALLE 10 CON CRA 41	BOMBEROS MEDELLIN	(DI6Author : RS)(DI6Date : 12/02/03)	0	0
MED-2971	Deslizamiento	18/10/1991	San Michel; Calle 11Sur con Cra 29D	El Colombiano	* Además hubo hundimiento con reptación. El terreno se hundió 2 metros por debajo del nivel original; posiblemente las aguas perdidas provienen del acueducto de la zona; que se encargaron de inestabilizar el suelo. Nota1: La noticia de	0	0

ID Catalogó de Movimiento en masa	Tipo	Fecha	Lugar	Fuente	Observaciones	No muertes	No Victimas
					donde se toma información aparece en el periódico El Colombiano del 18 de Octubre de 1991(DI6Date : 28/9/02)		
MED-6351	Inundación	10/10/2000	CR 10 Nº19S-203	SIMPAD	Desbordamiento de la quebrada La Lorencita	0	0
MED-6868	Inundación	04/11/2002	carrera 32 Nº 6 sur -93	SIMPAD	Inundación en vía pública y arrasa dos viviendas aledañas a la quebrada La Volcana. Desplome de árboles en el lecho y volcamiento de malla de cerramiento. Esto debido a las fuertes lluvias que aumentaron el caudal del río. Inundación	0	0
MED-7010	Incendio	03/03/2006			Sustancia inflamable	1	0
MED-6878a	Tormenta eléctrica	08/10/2007	calle 18 con Cr 43A	El Colombiano	Caída de un árbol sobre automóvil	0	0
MED-6902a	Explosión	03/01/2008	Cle 10 x cra 41 Puesto de venta Frisby	El Colombiano	La detonación se generó a las 6:15 a.m. Sin personas lesionadas. No generó afectaciones considerables en las viviendas vecinas. Se vio afectado el transporte en el sector. en horas de la mañana.(DI6Author : edier)(DI6Date : 2008-01-03)	0	0
MED-6952a	Avenida torrencial	26/08/2008	Q. La Presidenta; clínica oftalmológica de Medellín	El Colombiano	Intensa lluvia	0	0
MED-6969a	DERRAME	26/11/2008	Laboratorio Clinico Echavarrya	AMVA	Recipiente con ácido sulfúrico	0	0
MED-7127	Avenida torrencial	08/11/2010	Quebrada La Presidenta; Cola del Zorro; edificios Entrearros	El Colombiano	La fuerte precipitación produjo varios deslizamientos en la parte alta de El Poblado; los cuales represaron la quebrada; la que prácticamente perdió el cauce y se salió; en especial; por los cruces viales(DI6Author : edier)(DI6Date : 2010-11-09)	0	0

ID Catalogó de Movimiento en masa	Tipo	Fecha	Lugar	Fuente	Observaciones	No muertes	No Victimas
MED-7128	Deslizamiento	08/11/2010	Kilómetro 8; cerca a la Colegiatura.	El Colombiano	vía Las Palmas; afectado por un derrumbe tras las fuertes lluvias caídas en la tarde del lunes.(DI6Author : edier)(DI6Date : 2010-11-09)	0	0
2013-00013	Colapso estructural	12/10/2013	Edificio space, carrera 24d #10E 120	unidad de gestión del riesgo AMVA		1	si
2017-00027	Incendio	31/03/2017	diagonal 47A # 17sur Santa María de los Ángeles	Tele Medellín	No hubo personas lesionadas. Incendio de basuras	0	0
2017-01023	Incendio	17/10/2017	Barrio Los Naranjos. carrera 30 # 1 B Sur	El Colombiano		0	0
2017-01033	Explosión	17/11/2017	Clínica de Fracturas de la Av. Las Vegas	Tele Medellín, Minuto 30, EL Colombiano	Después de verificar las condiciones de seguridad se autoriza el retorno del personal del centro médico sin ninguna novedad más allá de algunos daños materiales	0	0
2018-00057	Avenida torrencial	15/05/2018	La Presidenta, La Zúñiga, la Aguacatala fueron las quebradas desbordadas que presentaron afectaciones, principalmente en vía pública	Tele Medellín		0	0

ID Catalogó de Movimiento en masa	Tipo	Fecha	Lugar	Fuente	Observaciones	No muertes	No Victimas
2018-00098	Incendio	14/10/2018	calle 10 con la carrera 48, muy cerca del centro comercial Monterrey, funcionaba un centro de reuniones de la iglesia cristiana Monte del rey	El Colombiano		0	0
2018-00115	Incendio	31/12/2018	Centro comercial El Tesoro, ubicado en El Poblado de Medellín.	El Colombiano	La caída de un globo de mecha incandescente provocó un incendio.	0	0

4.6 SISMOLOGIA

Para la definición de la sismología de la zona, se utilizó los parámetros de aceleración máxima para la comuna de El Poblado (14) de 0.20-0.22, determinado en el estudio de microzonificación sísmica del Municipio de Medellín del año 2007. Ver Figura 15.

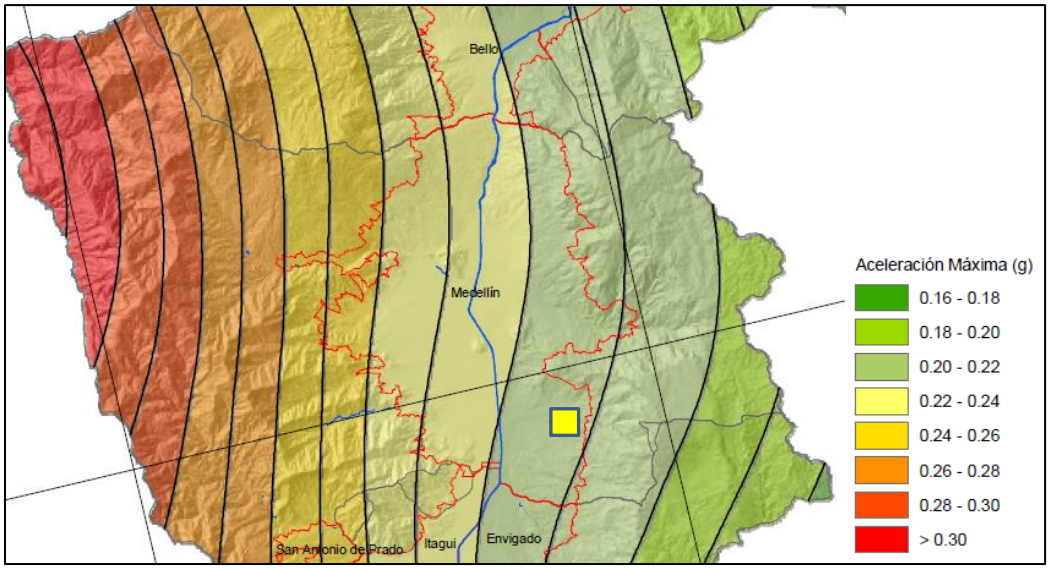

Figura 15. Aceleración máxima de la zona en estudio (cuadro en color amarillo). Tomado de (Consorcio Microzonificación 2006, 2007).

4.7 USOS DEL SUELO

El uso del suelo fue tomado del POT vigente para el municipio de Medellín, del año 2014, donde se tiene un uso para la zona de área de baja mixtura. Ver Figura 16.

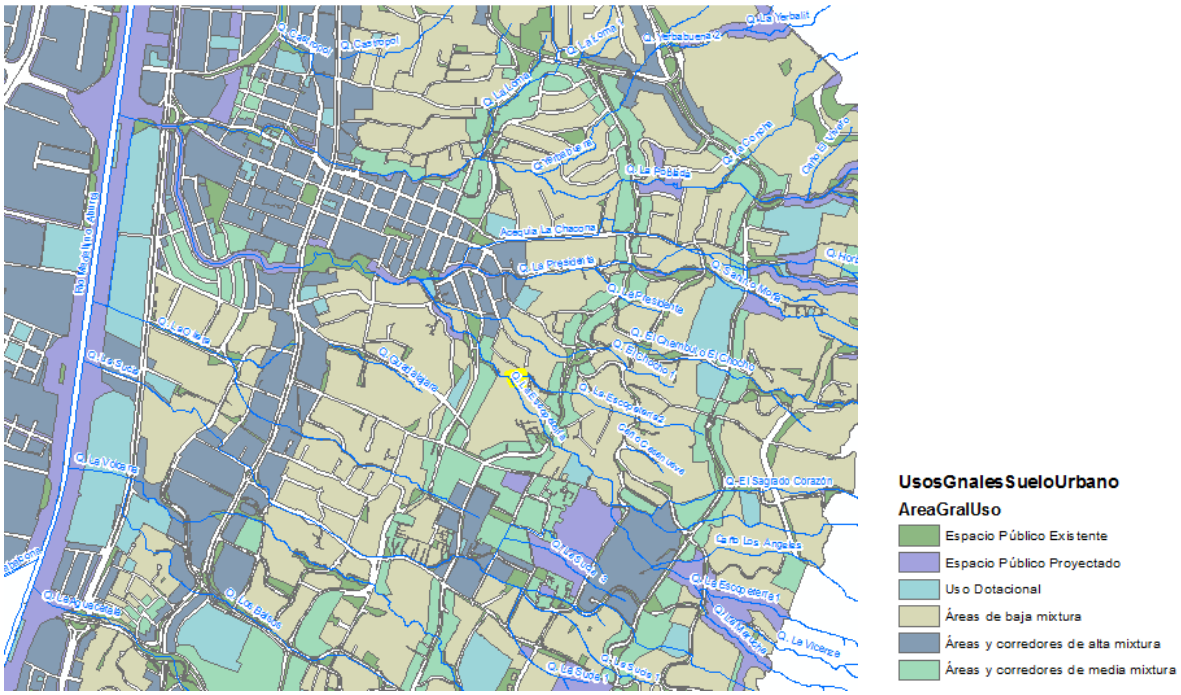

Figura 16. Usos del suelo en el área de interés (polígono color amarillo). Tomado de POT Medellín, 2014.

5. MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

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, 2016)

A continuación, se detalla el trabajo de campo del estudio geotécnico encaminado a la ejecución de sondeos exploratorios de suelo y ensayos de laboratorio.

5.1 INVESTIGACIÓN Y EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

Inicialmente, el jueves 14 de febrero de 2019 se realizó la campaña de exploración de campo, para determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Se ejecutaron sondeos exploratorios consistentes en cuatro (4) perforaciones mecánicas a percusión mediante ensayo de resistencia a la penetración estándar - SPT, este es un tipo de prueba de penetración dinámica, empleada para ensayar terrenos en los que se quiere realizar un reconocimiento geotécnico. Se alcanzó una profundidad de hasta 5.45m en donde se encontró rechazo.

Posteriormente el sábado 12 de octubre de 2019, se dio inicio a la segunda campaña de exploración, en la cual se empleó una máquina de rotopercusión, en la que se realizaron dos perforaciones de 10 y 15 m, para un total de 9 metros lineales de perforación mecánica y 16 metros lineales de perforación a rotación con broca de diamante.

Durante la ejecución de cada perforación se realizó el ensayo de Resistencia a la Penetración Estándar o SPT (del inglés Standard Penetration Test), para cada metro de avance en las perforaciones.

Las muestras que fueron recuperadas durante la ejecución de los sondeos en la etapa de exploración de campo fueron debidamente empacadas y referenciadas para posteriormente ser trasladadas al laboratorio de suelos. El muestreo se tomó metro a metro, con el fin de establecer la disposición estratigráfica de los materiales, medida de resistencia in situ, identificar las formaciones superficiales, estructura del suelo, presencia de discontinuidades, anisotropía, condiciones de humedad natural y recuperar muestras de suelo para los análisis de laboratorio respectivos.

En la Figura 7 se presenta la ubicación de la exploración mencionada, en la Tabla 5 se observan detalles de cada uno de los sondeos, en la Figura 17 se presenta las perforaciones mecánicas - ensayo S.P.T en el predio objeto de estudio y en la Figura 18 y la Figura 19 se presentan las fotografías de las perforaciones con máquina de rotopercución que se realizaron en la segunda campaña de exploración.

Tabla 5. Profundidad de sondeos y nivel freático.

ID Sondeo	Profundidad [m]	X [m]	Y [m]	Nivel Freático	Tipo de ensayo	Observaciones
P1	2	835.565	1.177.938	Sin presencia del nivel freático	SPT	Dio rechazo a los 2 m

ID Sondeo	Profundidad [m]	X [m]	Y [m]	Nivel Freático	Tipo de ensayo	Observaciones
P2	4,45	835.552	1.177.967	Sin presencia del nivel freático	SPT	Dio rechazo a los 4,45 m
P3	5,45	835.567	1.177.974	Sin presencia del nivel freático	SPT	Dio rechazo a los 5,45 m
P4	3,45	835.584	1.177.954	Sin presencia del nivel freático	SPT	Dio rechazo a los 3,45 m
P5	10	835.587	1.177.946	Sin presencia del nivel freático	Rotopercusión	3,50 m SPT y 6,50 m rotación
P6	15	835.558	1.177.960	Presencia de nivel freático aparente a los 6m	Rotopercusión	5,50 m SPT y 9,50 m rotación

Figura 17. Perforaciones realizadas en la zona de estudio (P1 a P4).

Figura 18. Perforaciones realizadas en la zona de estudio (P5).

Figura 19. Perforaciones realizadas en la zona de estudio (P6)

Con base en la exploración adelantada, se describe a continuación la estratigrafía:

5.2 ESTRATIGRAFÍA PERFIL GENERAL DE SUELO

- **PERFORACIÓN P1**

Está perforación fue realizada en el costado sur del predio, donde se alcanzó una profundidad hasta rechazo de 2 m. Se encontró un suelo de color pardo, correspondiente a una turba (Raíces con partículas de madera), de color gris oscuro, inolora y húmeda (ver Foto 8).

Foto 8. Muestra de suelo en la perforación P1

- **PERFORACIÓN P2**

Está perforación fue realizada en el costado noroccidental del predio, donde se alcanzó una profundidad de 4,45 m. El material encontrado, corresponde a un limo de color café, húmedo, inoloro, homogéneo, de cementación moderada, consistencia firme, con partículas de grava sub-angulosa de tamaño máximo 3/4"(ver Foto 9).

Foto 9. Muestra de suelo en la perforación P2.

- **PERFORACIÓN P3**

Está perforación fue realizada en el costado norte del predio, donde se alcanzó una profundidad de 5,45 m. El material encontrado corresponde a un limo de color café claro con zonas grises, húmedo,

inoloro, homogéneo, de cementación débil, consistencia blanda y con partículas de grava sub-angulosa de tamaño máximo 3/4" (ver Foto 10).

Foto 10. Muestra de suelo en la perforación P3.

- **PERFORACIÓN P4**

Está perforación fue realizada en el costado oriental del predio, donde se alcanzó una profundidad de 3,45 m. El material encontrado corresponde a un primer estrato de 1,3 m de espesor de lleno antrópico, precedido por un suelo limoso de color pardo con pintas negras, húmedo, de consistencia blanda y cementación moderada (ver Foto 11).

Foto 11. Muestra de suelo en la perforación P4.

- **PERFORACIÓN P5**

Está perforación fue realizada en el costado noroccidental del predio, donde se alcanzó una profundidad de 10 m. El material encontrado, corresponde a una capa de materia orgánica hasta los 0,45 m precedida por un depósito de flujo de lodos, con un material limo arenoso de color café con

zonas grises, plasticidad y humedad baja, con residuos de materia orgánica, raíces y residuos rocosos redondeados no mayores de 3 cm de diámetro, con una relación 90% matriz vs 10% de residuos rocosos hasta los 4 m donde se encontraron bolas de roca de color gris a cafés, sin textura definida. Se encuentra un material meteorizado heterogéneo y fracturado, con matriz limosa de color café, semi-consolidado hasta los 7m donde se encuentran bolas de roca de textura masiva, de color gris verdoso con lentes blancos, embebida en una matriz arenosa color grisáceo hasta los 10 m explorados (ver Foto 12).

Foto 12. Muestra de suelo en la perforación P5.

- **PERFORACIÓN P6**

Está perforación fue realizada en el costado oriental del predio, donde se alcanzó una profundidad de 15 m. El material encontrado corresponde a un primer estrato de 2,45 m de espesor de lleno antrópico, precedido por un depósito de flujos de lodos y escombros que comprende un estrato hasta los 5,50 m de material limo arenoso – areno limoso de color grisáceo con pintas negras y pardas suelo limoso de color pardo con pintas negras, de una consistencia firme a dura. Posteriormente a los 5,50 m se encuentran bolas de roca de color grisáceo con venas blancas y textura masiva, con presencia de matriz limo arenosa semi consolidada de color café naranja con oxido ferroso y restos de gravas no mayores de 6 cm de diámetro, hasta los 10,50 m, donde se encuentran bolas de roca fresca y fracturada, de color gris verdoso con venas blancas y textura fanerítica hasta los 15 m explorados (ver Foto 13).

Foto 13. Muestra de suelo en la perforación P6.

El perfil estratigráfico de diseño corresponde al perfil promedio predominante en la zona de estudio, que se determina a partir del cuidadoso estudio de los ensayos de laboratorio, inspección visual de

muestras, análisis de la distribución y variación con la profundidad de los resultados del ensayo SPT y rotación. En la Figura 20 se observa la estratigrafía general del suelo, en el predio de interés.

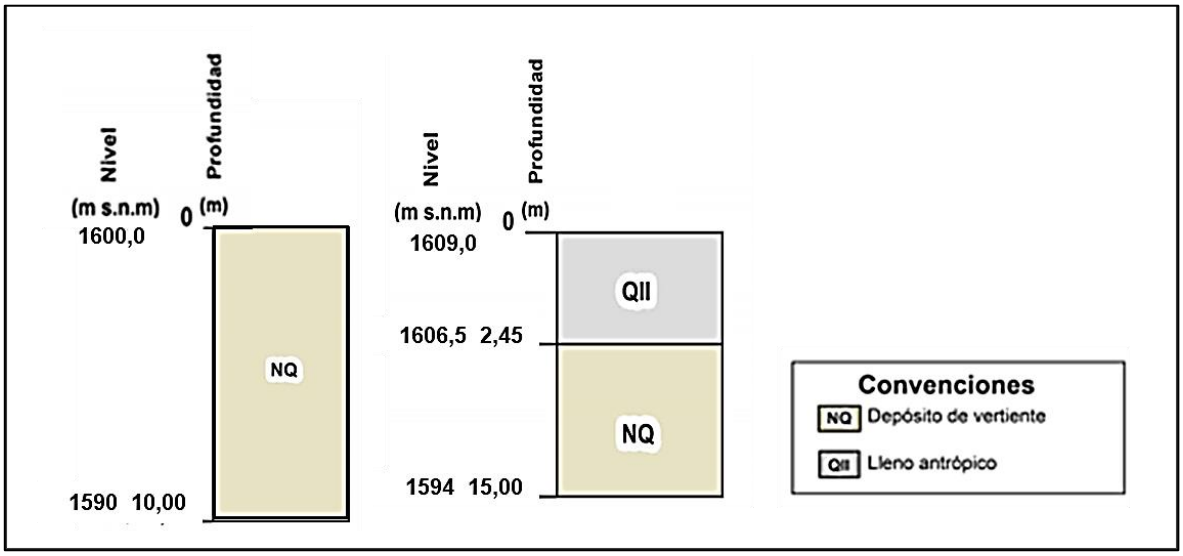

Figura 20. Estratigrafía general del predio en estudio

5.3 CONDICIONES DE HUMEDAD NATURAL

Durante la época en la que se realizó la exploración solo se encontró el nivel freático en la perforación P6 a los 6 m de profundidad y el cual no se encontró en la perforación P5 lo cual permite inferir que se trata de un nivel freático aparente.

5.4 MUESTREOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Con el fin de caracterizar física y geomecánicamente los materiales del subsuelo, se recuperaron muestras alteradas e inalteradas tipo Shelby, durante la ejecución de los sondeos exploratorios, las cuales fueron llevadas a laboratorio donde se determinaron sus propiedades de resistencia.

- Clasificación USCS.
- Granulometría por mallas con lavado sobre tamiz N° 200.
- Límites de consistencia de Atterberg y Humedad natural.
- Compresión Simple en suelo y roca.
- Corte directo (CD).

5.4.1 Ensayos de humedad y clasificación

De acuerdo con los ensayos realizados, se presentan un perfil de suelos que comprende un estrato superficial de lleno antrópico hasta los 2,45 m, con un material limoso de alta plasticidad, alta compresibilidad y en estado plástico. Posterior a este estrato se identificó un depósito de flujo de lodos y/o escombros, donde se encuentra un material limo arcilloso de alta plasticidad, altamente compresible; este material se encuentra en estado seco hasta los 3 m y en estado plástico a mayor profundidad.

En la perforación P5 y P6, se encontraron bolas de roca embebidas en una matriz limo arcillosa los primeros 6 m y a medida en que se incrementó la profundidad se encontraron las bolas de roca

embebidas en una matriz con un mayor porcentaje de arenas de textura arenosa limo arcillosa según el Sistema de Clasificación Unificado de Suelos y que se encuentran en un estado saturado. El resumen de los resultados se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Propiedades físicas de los materiales del suelo.

Muestra	Profundidad de la muestra (m)	W (%)	Límites de Atterberg			%Pasa Malla No. 200	SCUS	Descripción
			LL (%)	LP (%)	IP (%)			
P2 – M1	1.0 – 1.45	40	63	49	14	67	MH	Limo de alta plasticidad
P2 – M3	3.0 - 3.45	38	69	48	21	76.6	MH	Limo de alta plasticidad
P2 – M4	4.0 - 4.45	34	65	30	35	60.9	CH	Arcilla de alta plasticidad
P3 – M2	2.0 – 2.45	53	60	45	15	72.3	MH	Limo de alta plasticidad
P3 – M4	4.0 - 4.45	59	68	48	20	84	MH	Limo de alta plasticidad
P3 – M5	5.0 - 5.45	51	61	31	30	62.1	MH	Limo de alta plasticidad
P4 – M2	2.0 – 2.45	36	65	35	30	58	MH	Limo de alta plasticidad
P5 – M3	3.0 - 3.45	47	79	54	25	72.7	MH	Limo de alta plasticidad
P5 – M4	4.0 - 4.45	38	65	48	17	53.4	MH	Limo de alta plasticidad
P5 – M6	6.0 - 6.45	62	86	55	31	69.7	MH	Limo de alta plasticidad
P5 – M7	7.0 - 7.45	36	68	42	26	63.1	MH	Limo de alta plasticidad
P6 – M3	3.0 - 3.45	31	77	44	33	85.2	MH	Limo de alta plasticidad
P6 – M4	4.0 - 4.45	36	72	43	29	74.6	MH	Limo de alta plasticidad
P6 – M6	6.0 - 6.45	31	61	36	25	58.0	MH	Limo de alta plasticidad
P6 – M8	8.0 - 8.45	29	28	22	6	24.7	SM-SC	Arena Limo Arcillosa
P6 – M10	10.0 - 10.45	25	25	21	4	43.5	SM-SC	Arena Limo Arcillosa

5.4.1.1 Potencial de expansión

Teniendo en cuenta las recomendaciones de la NSR-2010 para la clasificación del potencial expansivo (Tabla 7) y teniendo en cuenta que el índice de plasticidad varía entre 14 y 35% para los suelos cohesivos y entre 4 y 6% para los suelos granulares, se tiene un potencial expansivo que varía de medio a muy alto para los suelos cohesivos y bajo para los suelos granulares.

Tabla 7. Clasificación de suelos expansivos (Tabla H.9.1-1 – Titulo H NSR-10).

Potencial de expansión	Expansión (%) medida en consolidómetro bajo presión vertical de 0.07 Kgf/cm2	Límite líquido LL, en (%)	Límite de contracción en (%)	Índice de plasticidad IP, en (%)	Porcentaje de partículas menores de una micra (μ)	Expansión libre EL en (%), medida en probeta
Muy alto	> 30	> 63	< 10	> 32	> 37	> 100
Alto	20 – 30	50 – 63	6 – 12	23 – 45	18 - 37	> 100
Medio	10 – 20	39 – 50	8 – 18	12 – 34	12 - 27	50 - 100
Bajo	< 10	< 39	> 13	< 20	< 17	< 50

5.4.1.2 Suelos dispersivos

Los suelos dispersivos entran de manera espontánea en solución en presencia de agua, primero como una nube de materia en suspensión, y luego como una extensión generalizada del fenómeno. Teniendo en cuenta que no se evidenció ningún tipo de comportamiento dispersivo al momento de realizar los ensayos de laboratorio que involucran aumentar el contenido de agua (límites de Atterberg) y que en la zona no se detectaron cárcavas o hundimientos se puede concluir que los suelos del proyecto no son dispersivos.

5.4.2 Ensayo de corte directo

La finalidad de los ensayos de corte es determinar la resistencia de una muestra de suelo, sometida a fatigas y/o deformaciones que simulen las que existen o existirán en terreno producto de la aplicación de una carga. El ensayo de corte directo consiste en someter una muestra cilíndrica aplanada o prismática de sección cuadrada de suelo confinada lateralmente dentro de una caja metálica, a una carga normal (Pv) para aplicarle luego una carga tangencial (Ph), que se aumenta gradualmente hasta hacer fallar el espécimen por rotura a través de un plano preestablecido (Ver Figura 21).

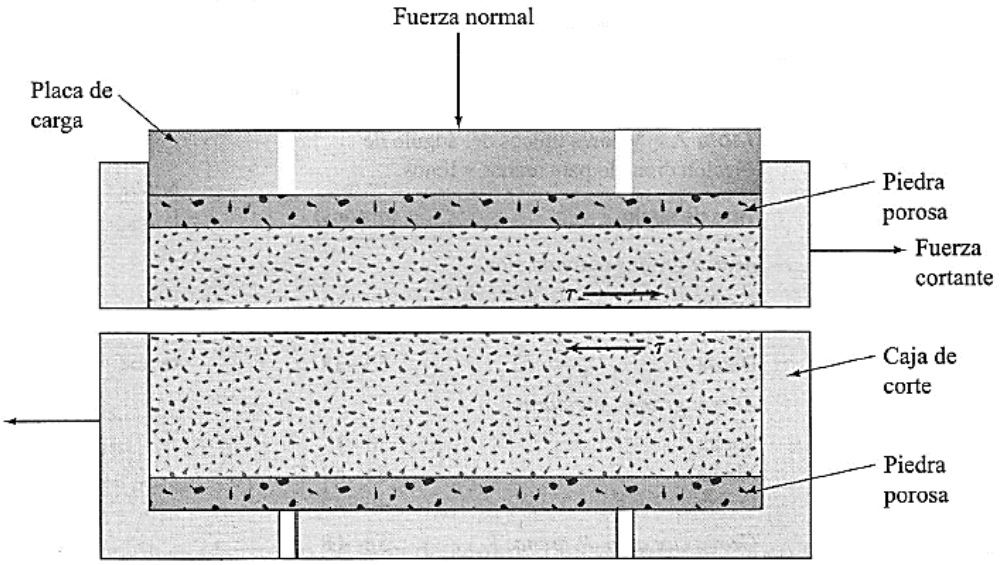

Figura 21. Esquema del aparato del corte directo. Tomado de Fundamentos de la Ingenieria Geotécnica de Braja M. Das (2001)

Los esfuerzos se calculan dividiendo las respectivas fuerzas por el área (A) de la muestra o de la caja de corte y deberían satisfacer la ecuación de Coulomb: $\tau = c + \sigma n * \tan(\varphi)$.

Según esta ecuación la resistencia al corte depende de la cohesión (c) y la fricción interna del suelo (φ). Al aplicar la fuerza horizontal, se van midiendo las deformaciones y con estos valores es posible graficar la tensión de corte (τ), en función de la deformación (ε) en el plano de esta tensión de corte. De la gráfica es posible tomar el punto máximo de tensión de corte como la resistencia al corte del suelo. Los valores de τ se llevan a un gráfico en función del esfuerzo normal (σn), obteniendo la recta intrínseca, donde τ va como ordenada y σ n como abscisa. El ángulo que forma esta recta con el eje horizontal es el ángulo φ y el intercepto con el eje τ, la cohesión c (Ver Figura 22).

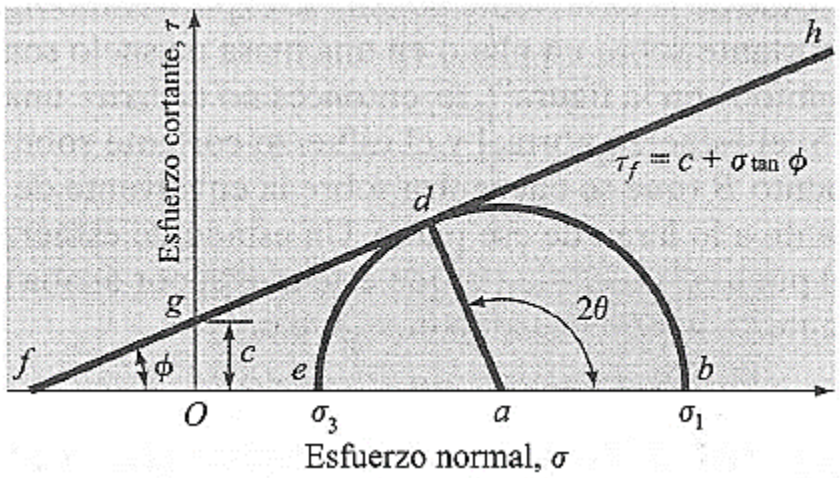

Figura 22. Envolvente de falla típica de Mohr – Coulomb. Tomado de Fundamentos de la Ingenieria Geotécnica de Braja M. Das (2001)

5.4.2.1 Ensayo consolidado drenado (CD)

La velocidad de corte es lenta, se permite el drenaje de la muestra durante todo el ensayo siendo las presiones intersticiales nulas durante la aplicación del esfuerzo cortante (μ =0), esto implica que: σ = σ ', c=c', φ = φ '.A continuación se presentan los resultados de los ensayos de corte directo consolidado drenado (CD), ejecutados sobre las muestras más representativas de los diferentes estratos detectados a lo largo del trazado, con el cual fue posible obtener directamente los parámetros del suelo de cohesión y de ángulo de fricción sobre muestras de suelo en condiciones inalteradas.

A continuación, en la **Tabla 8** se presentan los resultados de los ensayos de corte directo para los sondeos realizados.

Tabla 8. Parámetros del suelo dados por el ensayo de Corte Directo.

Estrato	Muestra	ɣ (KN/m³)	C (KN/m²)	Phi (°)
Depósito de vertiente tipo flujo de lodos y/o escombros	P3-M4	1,67	107	24
	P5-M3	1,64	42	27
	P6-M4	1,61	40	28

5.4.3 Ensayo de compresión simple

El ensayo de compresión simple consiste en someter una muestra cilíndrica de suelo o roca sin confinamiento lateral a una carga axial, con el fin de medir deformaciones y registrar la fuerza que produce la falla. Ver Figura 23.

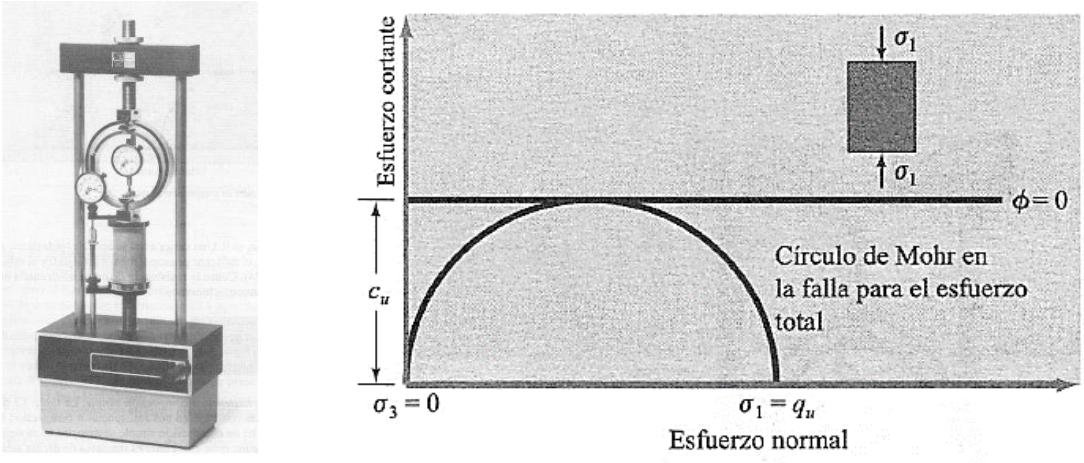

Figura 23. Esquema de funcionamiento de ensayo de compresión simple. Tomado y modificado de Fundamentos de la Ingenieria Geotécnica de Braja M. Das (2001).

Para la determinación del esfuerzo compresivo (σ) en la muestra de laboratorio se acostumbra a tomar como sección de la probeta no la inicial de área Ao, sino una corregida de magnitud Ac=Ao/1-ε, donde ε es la deformación unitaria. De esta manera si P es la carga compresiva en un momento dado, σ= P/Ac.

El valor de σ correspondiente a la carga que produce la falla de la probeta, llamada carga crítica, se le llama resistencia a la compresión simple qu en suelo y σc en roca.

A continuación, en la Tabla 9 se presentan los resultados del ensayo de compresión simple para suelo y roca, donde se evidencia que el suelo posee una resistencia a la compresión inconfinada que va de mediana a muy compacta a mayor profundidad. Mientras que el ensayo de compresión uniaxial para la roca, se obtuvieron valores que indican una resistencia media (Tabla 10)

Tabla 9. Parámetros del suelo dados por el ensayo de Compresión simple.

Muestra	ɣ (KN/m³)	qu (KN/m²)	σc (KN/m²)	Cu (KN/m²)
P2-M3	16,8	82	No aplica	41
P5-M4	16,8	101	No aplica	51
P6-M3	18,2	305	No aplica	152
P5-M9	30,1	No aplica	664	No aplica
P6-M13	24,8	No aplica	338	No aplica

Tabla 10. Correlación de valores Resistencia a la compresión simple, con la consistencia del suelo (ASTM, 1996).

Consistencia (Suelos Cohesivos)	q_u (Kg/cm²) Resistencia a la Compresión Simple	E (Kg/cm²)
Muy blanda	< 0.25	3
Blanda	0.25 a 0.50	30
Mediana	0.50 a 1.00	45 a 90
Compacta	1.00 a 2.00	90 a 200
Muy compacta	2.00 a 4.00	200
Dura	>4.00	200

5.5 PRUEBAS IN SITU

Con la finalidad de identificar en el perfil estratigráfico, los ángulos de fricción y cohesión del suelo y el nivel freático, se realizaron las perforaciones mediante el ensayo de penetración estándar – SPT. A continuación, en la Figura 24 y la Figura 25 es posible identificar tres tipos de materiales según el número de golpes en el suelo. Inicialmente la zona de lleno antrópico que va hasta los 2,45m, que comprende un material de consistencia media a firme, precedida por un material de consistencia firme a dura y material con potencial de bloques remanentes con menor grado de meteorización.

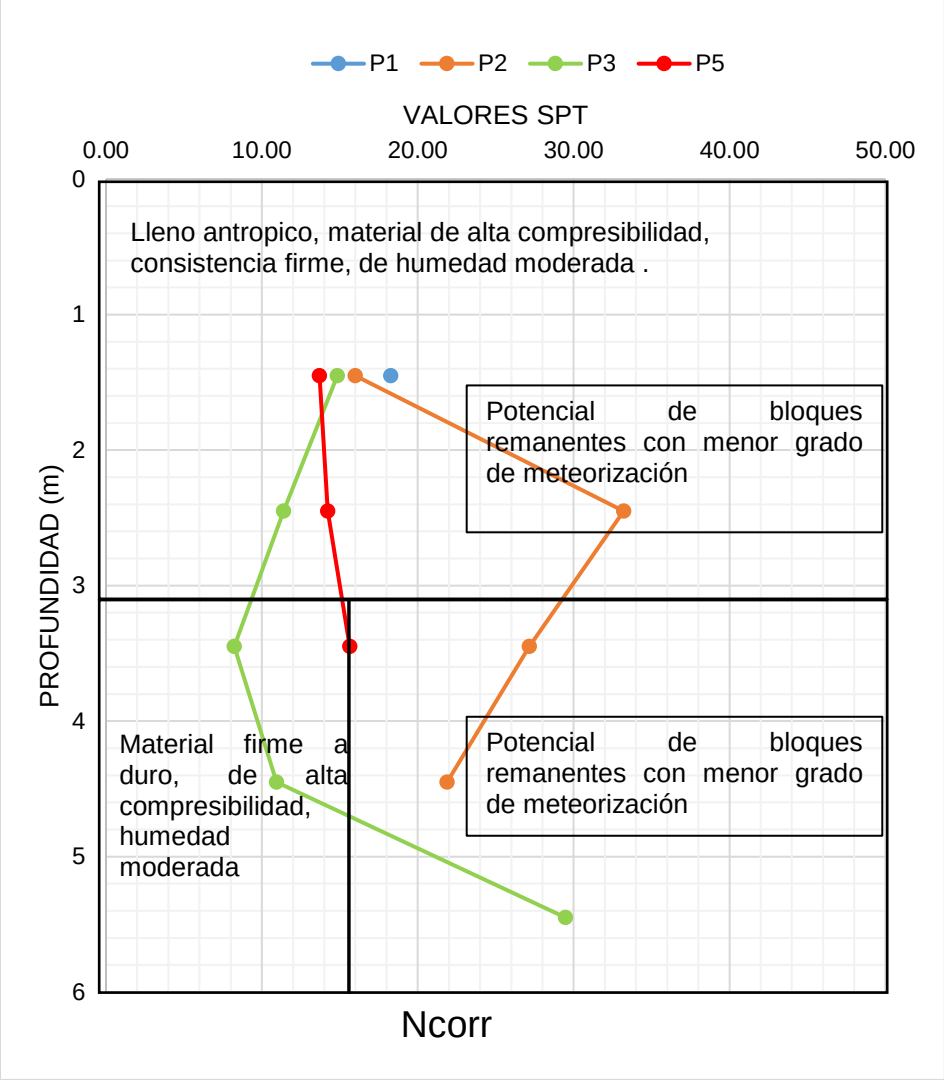

Figura 24. Resultados de SPT perforaciones P1, P2, P3 Y P5

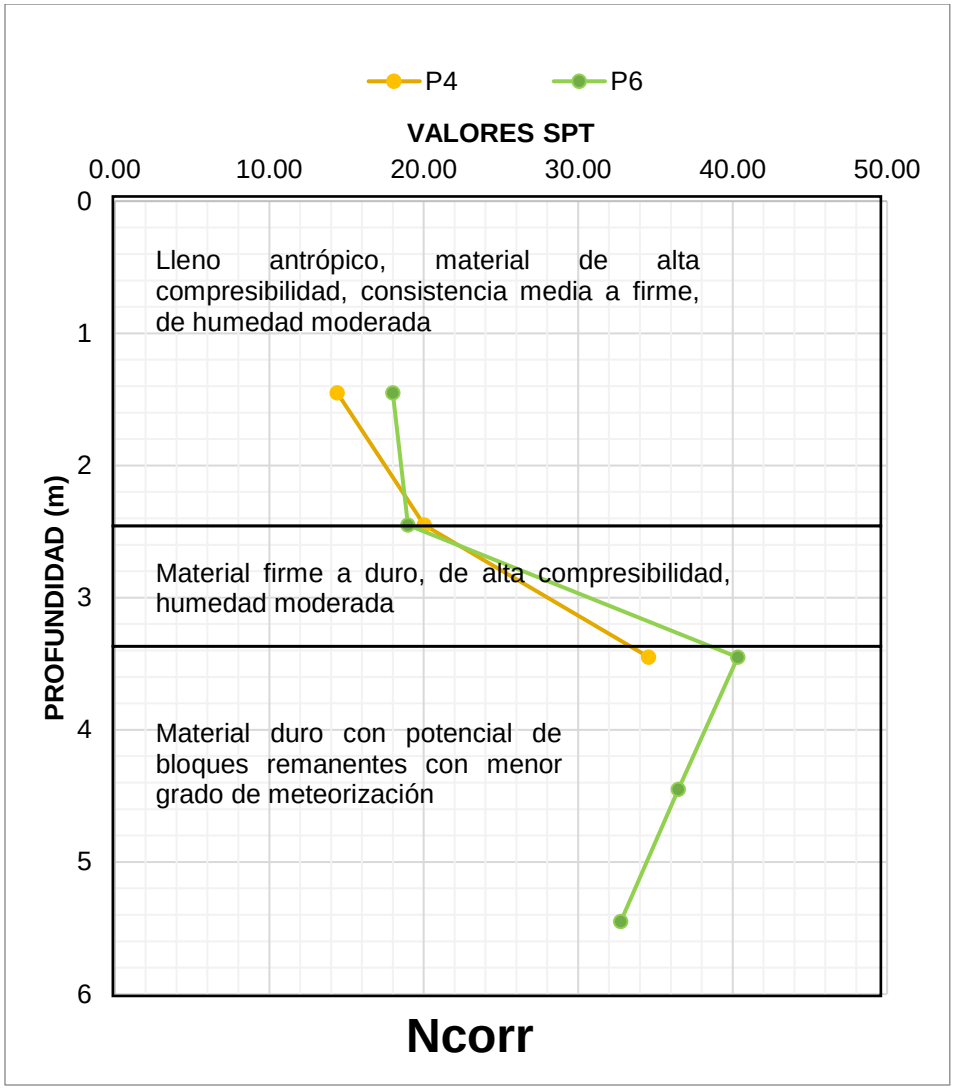

Figura 25. Resultados de SPT perforaciones P4 y P6.

De acuerdo con los resultados del ensayo SPT, los suelos presentan consistencia compacta a dura, con un módulo de elasticidad que varía entre 90 y 200 Kg/cm^2 y a una resistencia a la compresión simple q_u con valores de 1 a 4 Kg/cm^2, tal y como puede observar en la Tabla 11.

Tabla 11. Correlación de valores SPT con los parámetros de resistencia (ASTM, 1996).

Consistencia (Suelos Cohesivos)	N (S.P.T)	q_u (Kg/cm^2) Resistencia a la Compresión Simple	E (Kg/cm^2)
Muy blanda	< 2	< 0.25	3
Blanda	2 a 4	0.25 a 0.50	30
Mediana	4 a 8	0.50 a 1.00	45 a 90
Compacta	8 a 15	1.00 a 2.00	90 a 200
Muy compacta	15 a 30	2.00 a 4.00	200
Dura	>30	>4.00	200

De acuerdo con el análisis realizado para el cálculo de los parámetros efectivos de resistencia del suelo, en el que se empleó el artículo "Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT" de las X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana – SCI- SCG – 1999 de Álvaro J. González G, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 12, de los cuales se hace énfasis en que estos son los parámetros drenados, los cuales se pueden emplear en el análisis de estabilidad de taludes. Las memorias de cálculo se presentan en el Anexo – Caracterización Geotécnica.

Tabla 12. Parámetros de resistencia efectiva obtenidos según los resultados del ensayo SPT.

Material	Peso unitario ɣ (KN/m3)	Angulo de fricción (°)	Cohesión (Kpa)
Lleno antrópico	12	33	1.2
Depósito de flujo de lodos y/o escombros	17	33	No aplica

5.6 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

En general los estudios de estabilidad geotécnica se definen en términos de un coeficiente o factor de seguridad, que corresponde a la relación de las fuerzas resistentes sobre las fuerzas movilizantes; estas fuerzas dependen de factores que pueden ser externos, que influyen en el incremento de las fuerzas cortantes, o internos que producen una disminución a la resistencia al corte de los materiales del talud. Es necesario definir las características físicas y de los parámetros geomecánicos del suelo, como el ángulo de fricción, la cohesión y su interacción con los factores del entorno tales como la geología, la geomorfología, la topografía, el clima, la hidrología, el efecto antrópico entre otros más, para determinar el comportamiento del talud.

La aplicación del método para el análisis de estabilidad de un talud, se determinan a partir de los datos disponibles, las características geológicas y geomecánicas del material, de los alcances y objetivos de estudio. Existen métodos determinísticos (método de equilibrio límite y método tenso-deformacional) y métodos probabilísticos (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

El modelo geológico -geotécnico se define como aquel que involucra aspectos geológicos (variación en profundidad de los diferentes depósitos) y geotécnicos (caracterización geomecánicas de los diferentes depósitos). Las anteriores variables son necesarias para la obtención de perfiles geotécnicos que serán utilizados posteriormente en los análisis de estabilidad.

Para este estudio, el análisis de estabilidad se realizó empleando el programa SLIDE v5.0 de Rocscience, este software permite el análisis de la estabilidad del talud, a partir de la definición de áreas de deslizamiento circulares o no circulares, mediante el método de equilibrio límite; este método permite la integración de los datos de la geometría y las propiedades físicas y mecánicas del material, para definir una superficie potencial de falla y un factor de seguridad, empleando los datos de campo y los resultados de laboratorio.

5.6.1 Caracterización del talud de estudio

5.6.1.1 Geomateriales y propiedades geomecánicas

Partiendo de los resultados de las campañas de exploración de campo y del análisis de los ensayos directos e indirectos, se definieron los geomateriales y sus propiedades geomecánicas, para los cuales se tomaron los valores inferiores obtenidos de cada parámetro. En la Tabla 13 se presentan dichos valores.

Tabla 13. Propiedades geomecánicas asignadas para el modelo.

Material	ɣ (KN/m3)	Cohesión (kPa)	φ(°)
Lleno antrópico	12	1.2	33
Depósito de flujo de lodos y/o escombros	16	40	24

5.6.1.2 Topografía

La topografía de la zona de estudio comprende un relieve de zonas planas hacia la zona norte del lote y depósitos poco incisados en hacia el sur. Las cotas comprenden los 1.612 y los 1.590 m s.n.m. En la Figura 26 se presenta la topografía de la zona de estudio.

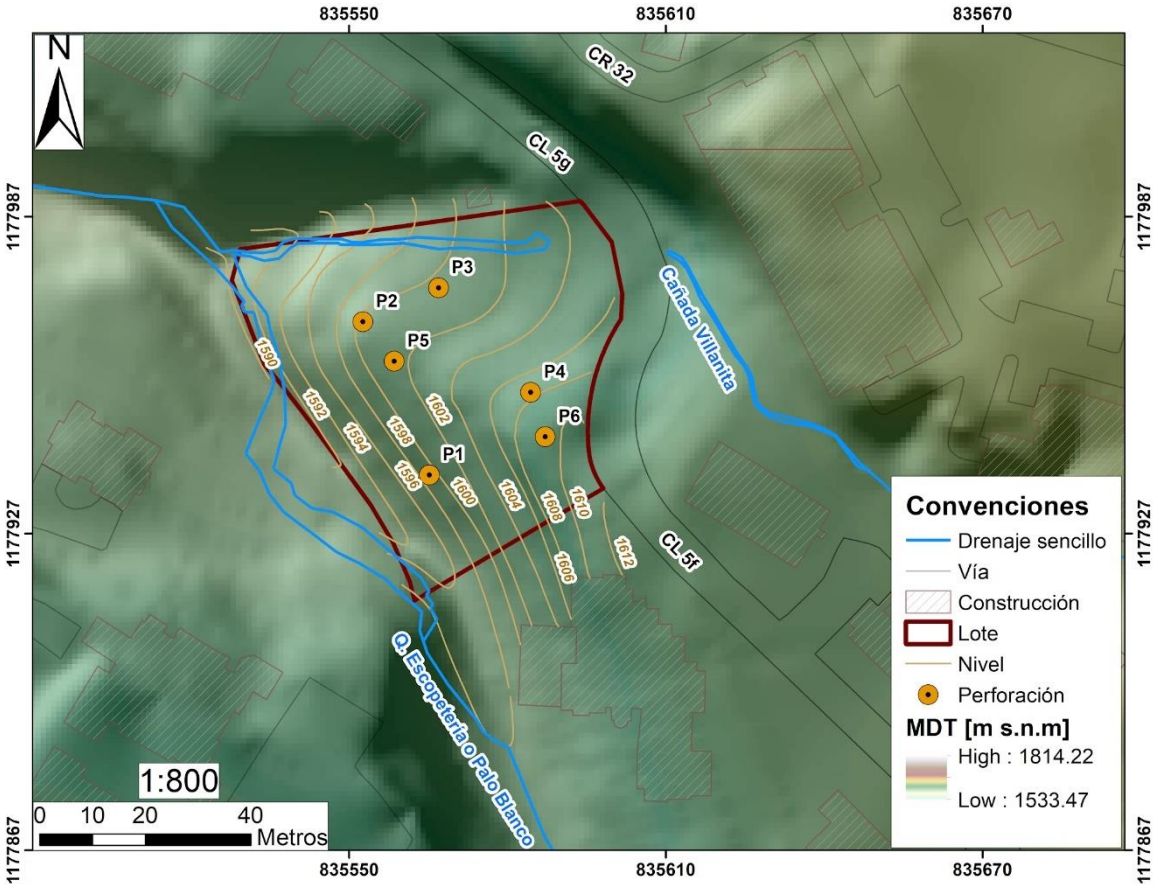

Figura 26. Topografía de la zona de estudio

5.6.1.3 Secciones Analizadas

Para el análisis se modelaron tres secciones transversales del talud, escogidas de acuerdo con la geometría representativa de la zona de estudio. En la Figura 27 se muestra la ubicación de las secciones o perfiles analizados dentro de la zona de estudio.

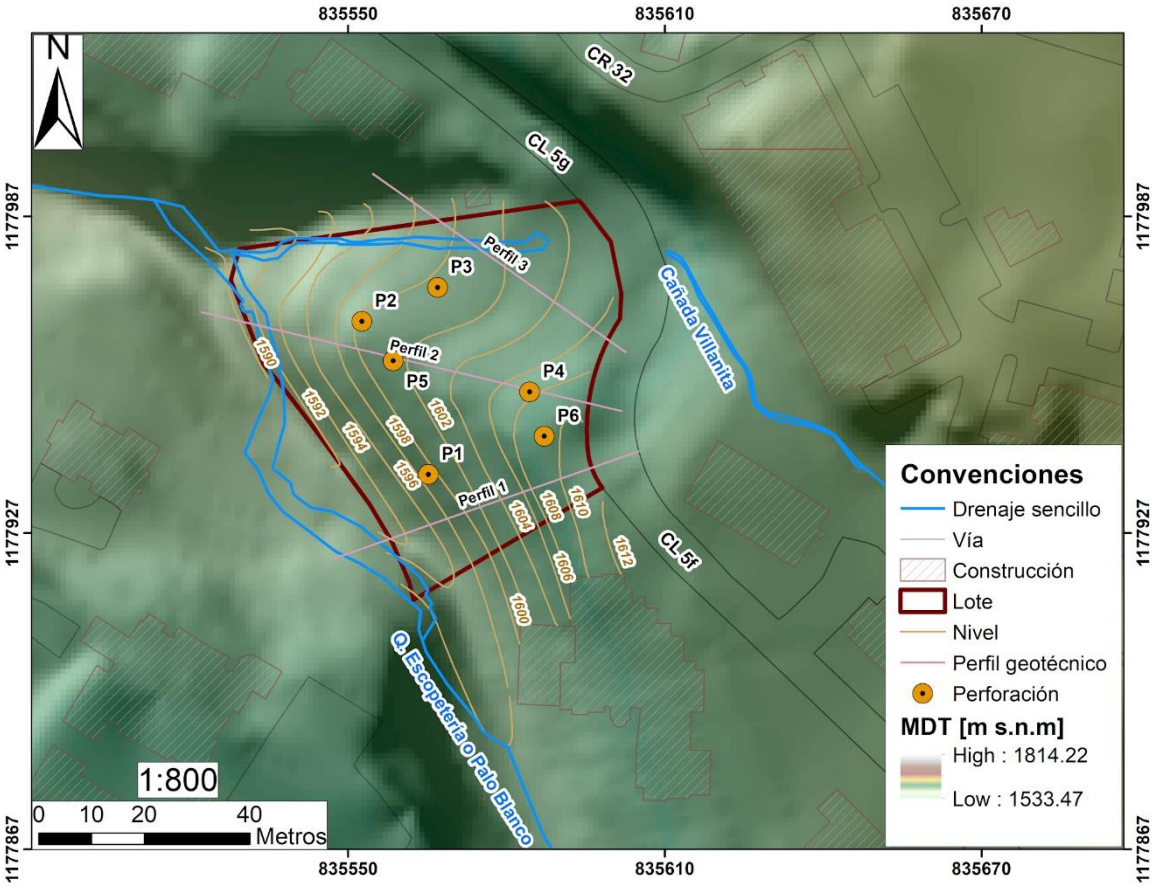

Figura 27. Ubicación de las secciones analizadas en la zona de estudio

A continuación, en la Figura 28, Figura 29 y Figura 30 se presentan las geometrías para las secciones evaluadas en el software Slide.

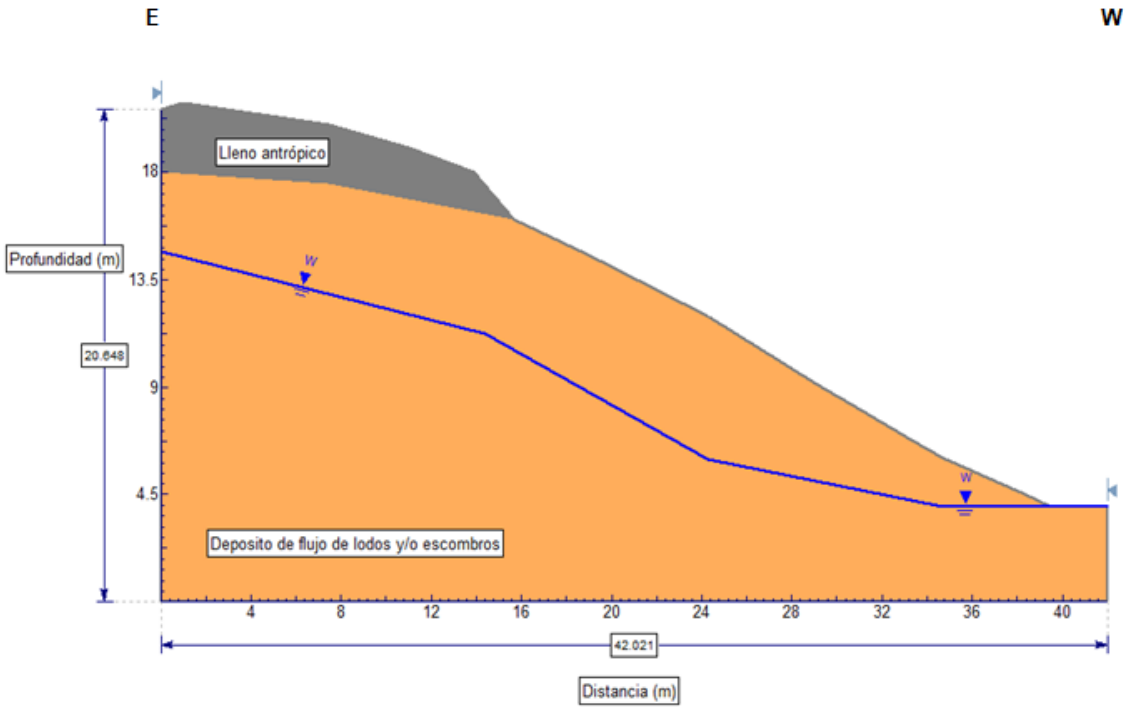

Figura 28. Geometría del perfil 1 (Slide)

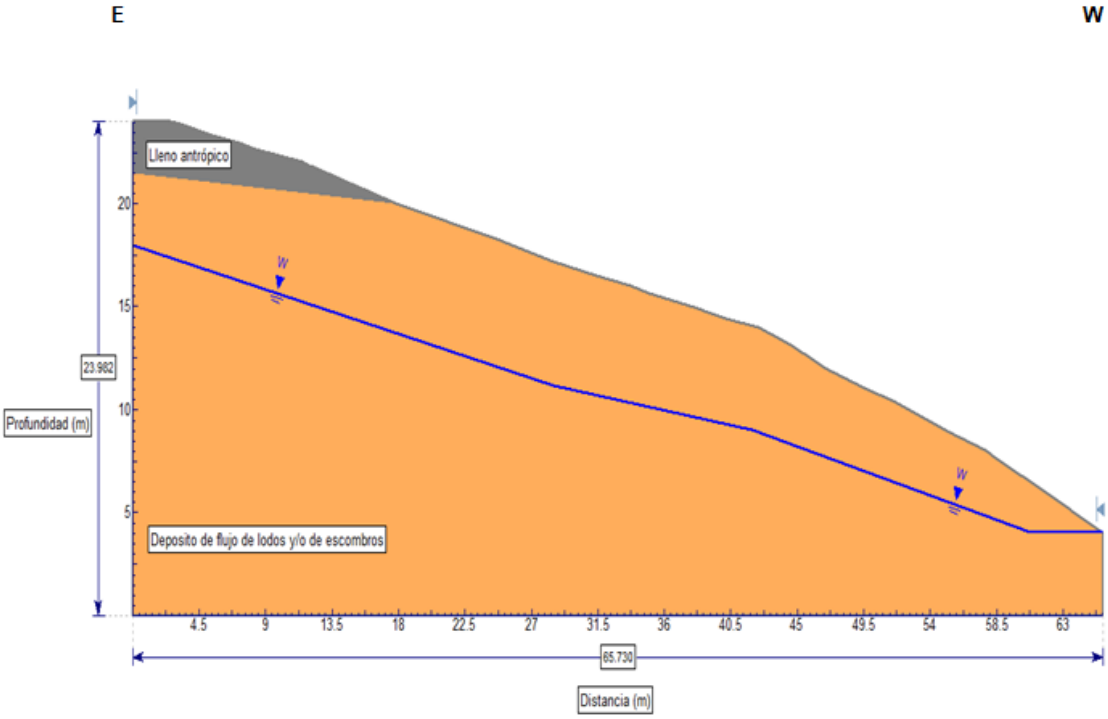

Figura 29. Geometría del perfil 2 (Slide)

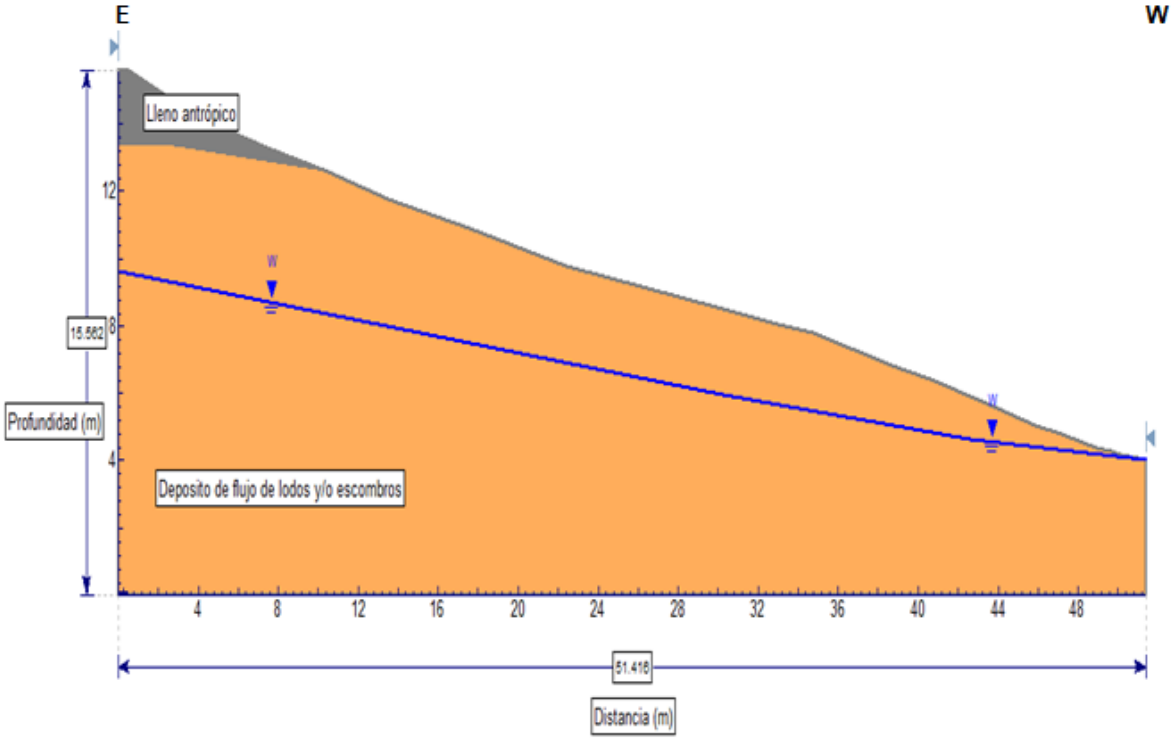

Figura 30. Geometría del perfil 3 (Slide)

5.6.2 Análisis de escenarios

Teniendo en cuenta que se planea realizar un Ecoparque en la zona de estudio y cuyo diseño arquitectónico se presenta en la Figura 31 y la Figura 32, el análisis de estabilidad se realiza para condiciones sin intervención y condiciones con intervención, teniendo en cuenta la necesidad de obras geotécnicas a implementar, para cada una de las condiciones planteadas en el decreto 1626 de 2015.

Figura 31. Obras planteadas entregadas por el contratista.

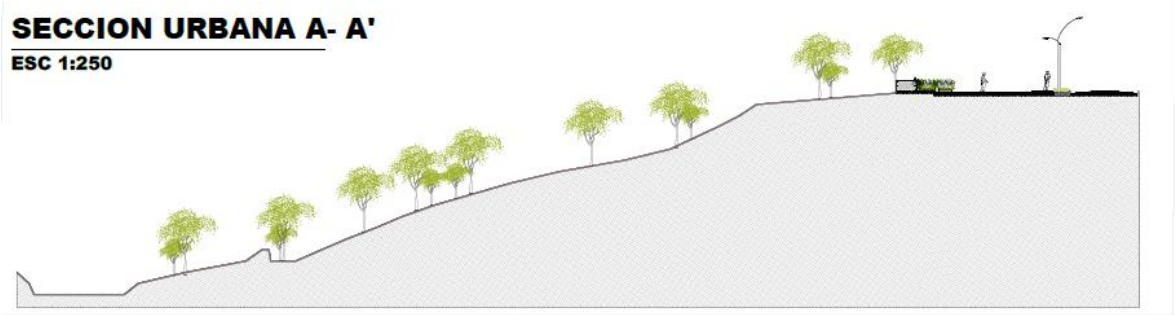

Figura 32. Sección transversal de obras planteadas entregadas por el contratista.

5.6.2.1 Condiciones actuales

En la Figura 33 y Figura 35 se presenta el análisis de estabilidad de las tres secciones bajo las condiciones actuales y para las cuales se evalúa para una condición estática, en la cual se considera que el talud solo estará sometido a la acción de las fuerzas debidas a su peso propio, cargas aplicadas y a las condiciones de infiltración.

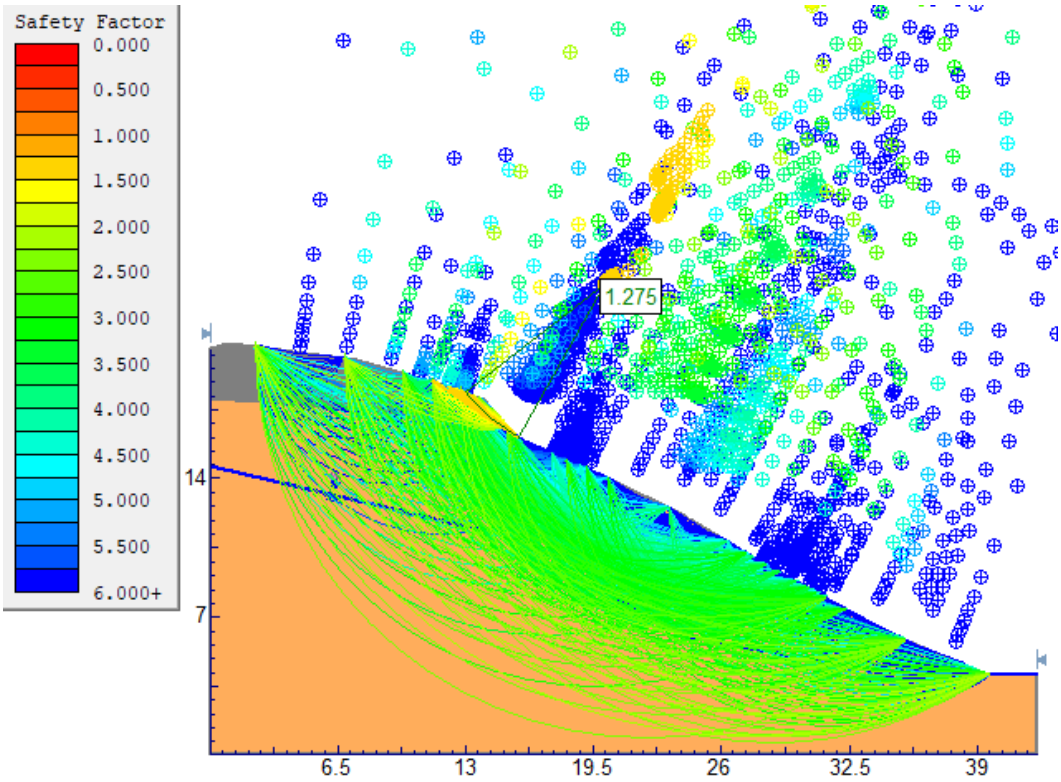

Figura 33. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones actuales para el Perfil 1 (Método Bishop).

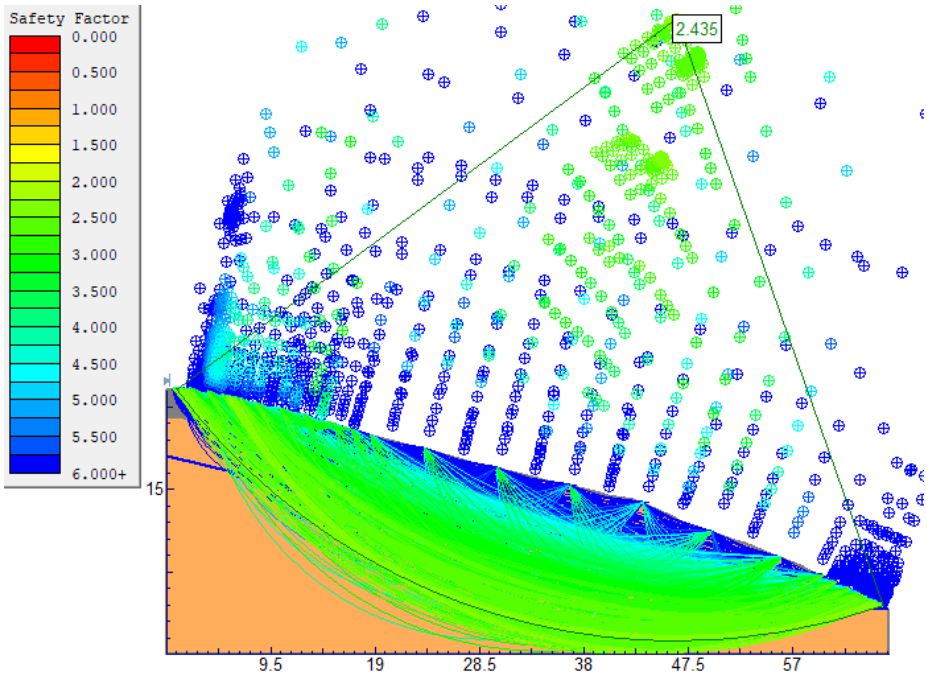

Figura 34. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones actuales Perfil 2 (Método Bishop).

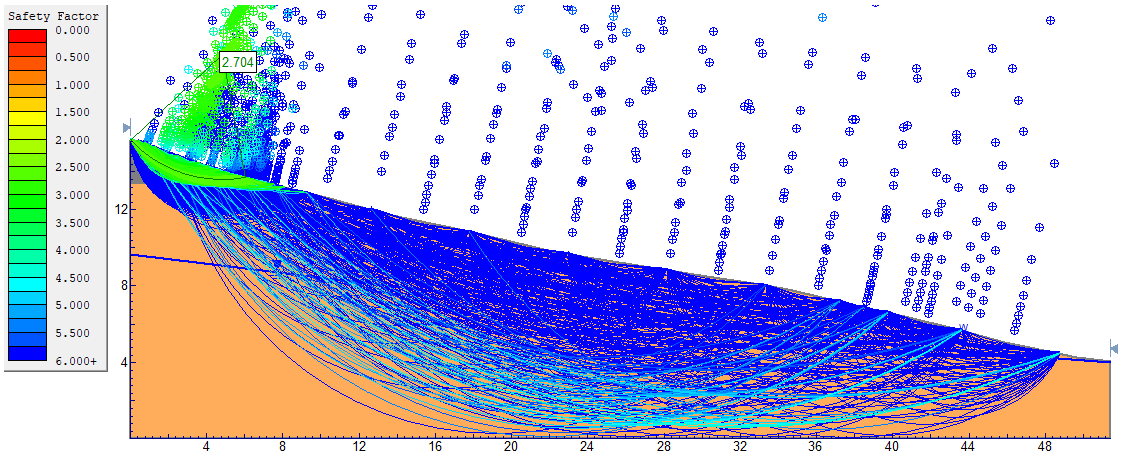

Figura 35. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones actuales para Perfil 3 (Método Bishop).

5.6.2.2 Condiciones normales y extremas de lluvia

Teniendo en cuenta los resultados de la exploración geotécnica donde se encontró un nivel freático aparente a los 6 m, se presenta en la Figura 36, **Figura 37** y **Figura 38** el análisis considerando un incremento de nivel freático a 3 m y adicionalmente la intervención del predio (**Condiciones proyectadas**), con la construcción del Ecoparque, en el cual se planea la explanación del terreno para poder instalar el equipamiento que corresponde a deck de madera, losas de concreto y gimnasio al aire libre.

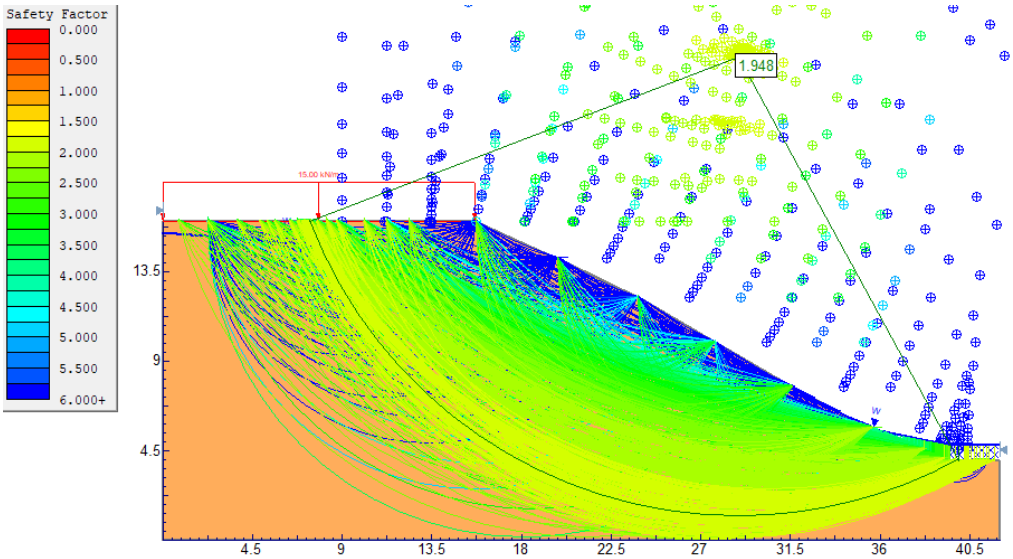

Figura 36. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones Normales y Extremas de Lluvia – Perfil 1 (Método Bishop) – Condiciones proyectadas.

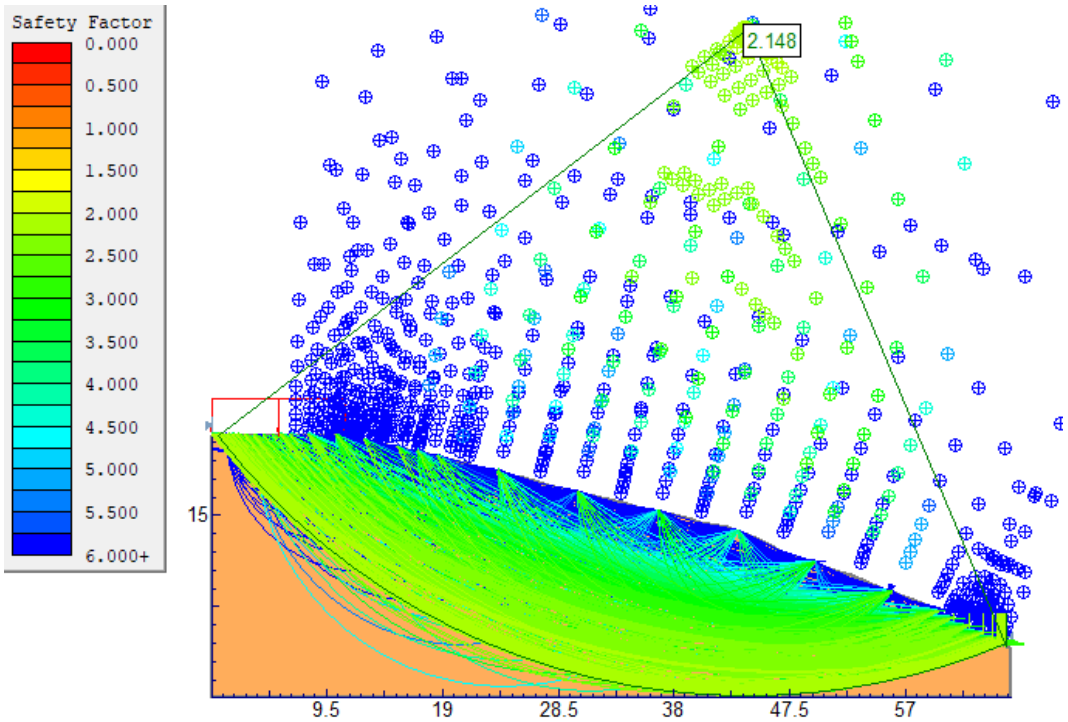

Figura 37. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones Normales y Extremas de Lluvia – Perfil 2 (Método Bishop) – Condiciones proyectadas.

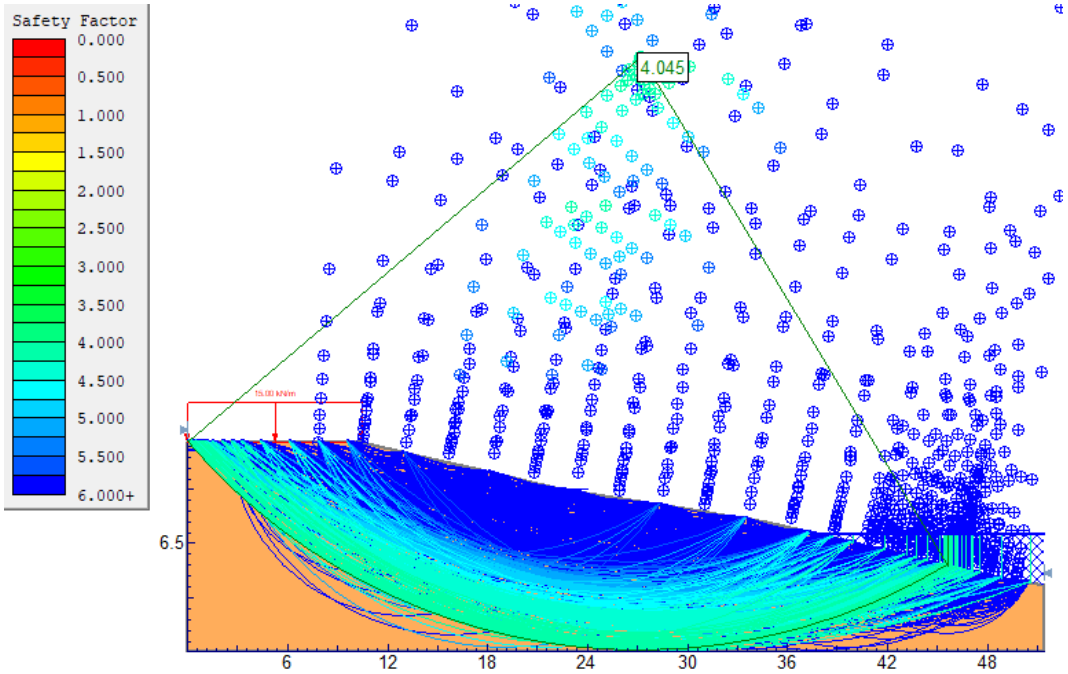

Figura 38. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones Normales y Extremas de Lluvia – Perfil 3 (Método Bishop) – Condiciones proyectadas.

5.6.2.3 Condiciones con sismo

Las condiciones seudo-estáticas o condiciones de sismo, consideran que además del peso propio, cargas adicionales y nivel freático, se debe tener en cuenta un coeficiente sísmico.

Teniendo en cuenta el Estudio de Microzonificación Sísmica del valle de aburra tal y como se puede evidenciar en la Figura 15, la aceleración máxima va de 0.20 a 0.22g por lo que se toma el mayor valor.

De acuerdo con lo establecido en la NSR-10, la Aceleración Máxima del Terreno corresponde a la siguiente ecuación Aa*Fa*I, donde:

Aa: Coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva

Fa: Coeficiente de ampliación del suelo para la zona de períodos cortos del espectro.

I: Coeficiente de importancia.

Según los resultados obtenidos en la exploración del subsuelo se definen los aspectos sísmicos a ser considerados para el análisis de los efectos locales. En este sentido, el tipo de perfil de suelo para el sitio se ha establecido con el criterio basado en el número medio de golpes del ensayo de penetración estándar obtenido directamente de ensayos insitu, según las características de los 30 m superiores del perfil de suelo. En la Tabla 14 se presentan los parámetros de diseño considerados.

Tabla 14. Parámetros de diseño considerados.

Parámetro considerado	**Caracterización del Parámetro**			
Zona de Amenaza Sísmica	Intermedia	Movimientos Sísmicos de Diseño	Aceleración horizontal pico efectiva para diseño (**Aa**)	0.15
			Velocidad Horizontal Pico Efectiva para Diseño (**Av**)	0.20
Análisis de Efectos Locales	Tipo de Perfil de Suelo	D	Velocidad media de la Onda de Cortante (**Vs**) expresada en m/s	$360m/s > \nabla s > 180m/s$
			Coeficiente **Fa** para la zona de periodos cortos del espectro	1.5
			Coeficiente **Fv** para la zona de periodos intermedios	2.0
	Grupo de Uso	I	Coeficiente de Importancia	1

Finalmente, para el análisis seudoestático del talud, se implementó el máximo coeficiente de aceleración horizontal pico efectiva Aa y se aplicó la ecuación propuesta por Hynes-Griffin (1984), para determinar el coeficiente sísmico de diseño.

$$\frac{K_{ST}}{a_{máx}} = 0{,}50$$

Dónde:

KST: Coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestático de taludes.

amáx: Aceleración máxima del terreno, Aa*Fa*I

Para el valor de la Aceleración Máxima dado en el estudio de Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá, el Coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestático de taludes corresponde a un

KST de 0.11 g; por otro lado, la aceleración vertical considerada corresponde al 50% de la horizontal, es decir 0.06g.

Para el valor de Aceleración Máxima calculado según la NSR-10, Am=0.15*1.5*1=0.225, el coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestático de taludes corresponde a un KST de 0.11 g; por otro lado, la aceleración vertical considerada corresponde al 50% de la horizontal, es decir 0.06g.

Partiendo de los anteriores resultados el Coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestático de taludes corresponde a un KST de 0.11 g y la aceleración vertical de 0.06g.

A continuación, en la Figura 39, Figura 40 y Figura 41 se observan las superficies potenciales de falla, del análisis de las condiciones seudo-estáticas.

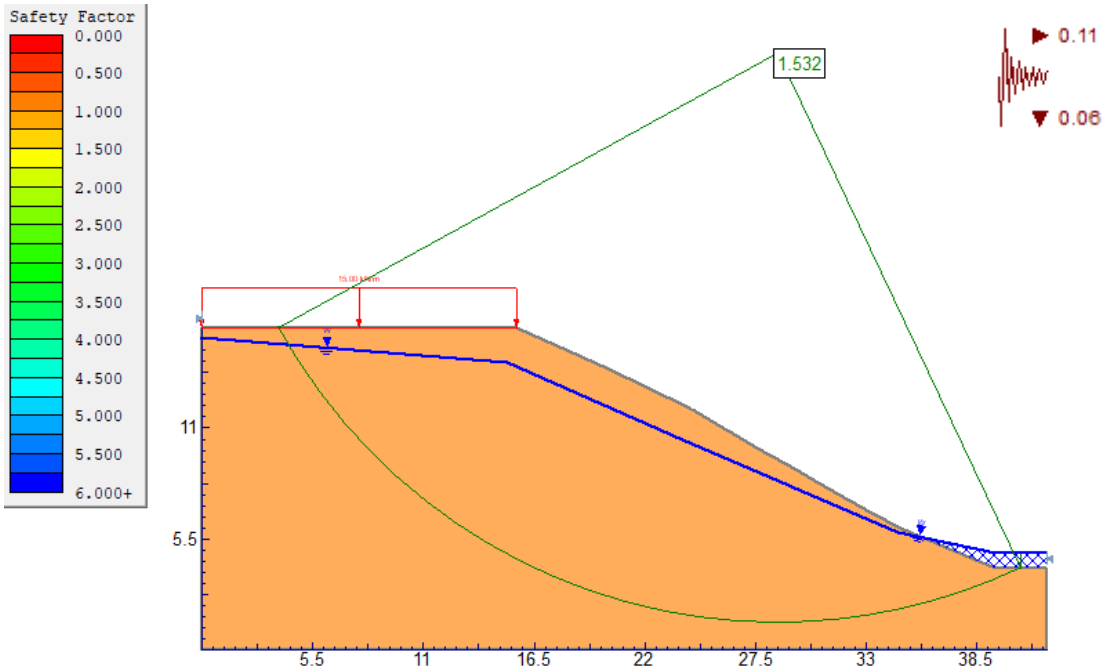

Figura 39. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones seudo-estáticas Perfil 1 (Método Bishop) – Condiciones proyectadas.

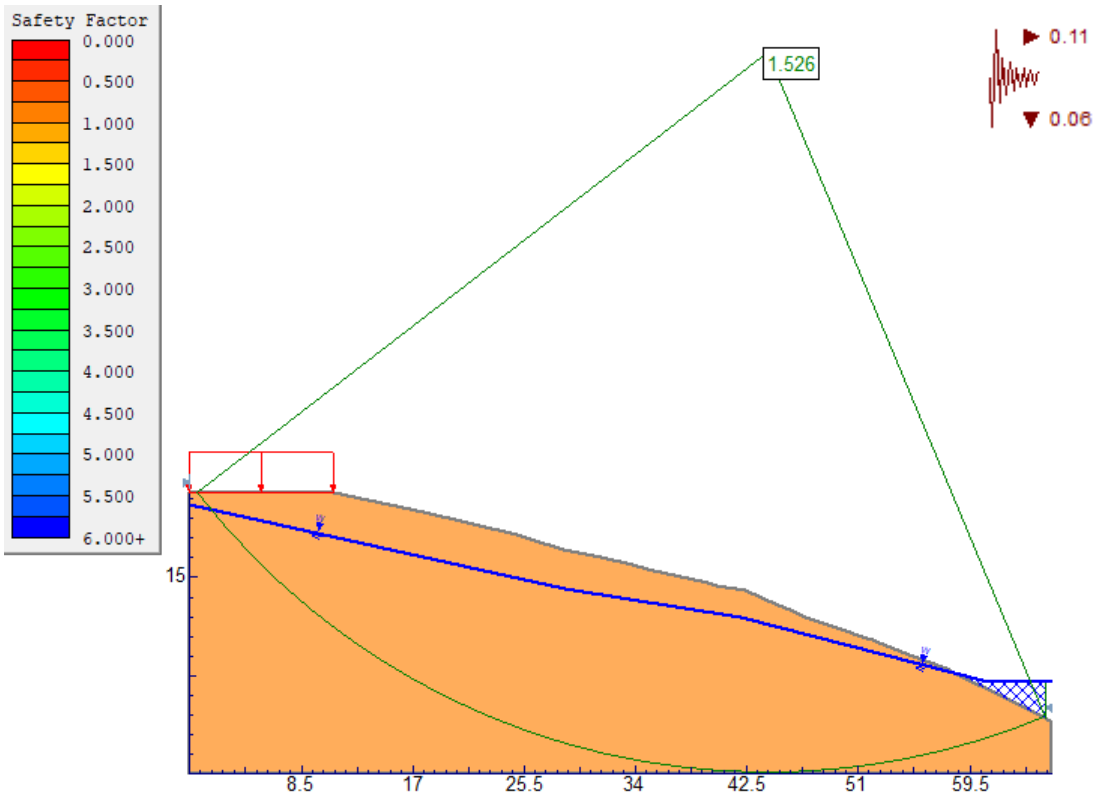

Figura 40. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones seudo-estáticas Perfil 2 (Método Bishop) – Condiciones proyectadas.

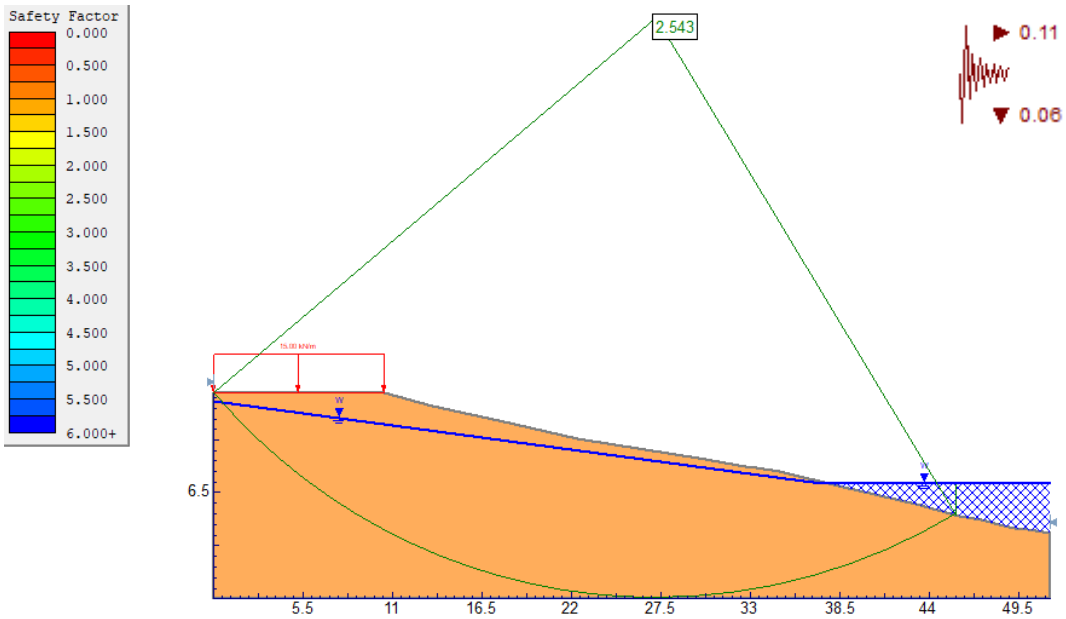

Figura 41. Superficie potencial de falla – Análisis de condiciones seudo-estáticas Perfil 3 (Método Bishop) – Condiciones proyectadas.

Para cada sección se evaluaron los factores de seguridad de acuerdo con los métodos de equilibrio límite de Dovelas propuesto por Morgenstern-prince (1965) y Spencer (1967) y por los métodos aproximados propuestos por Janbu (1968), Ordinario (1936) y Obispo (1955).

Del análisis de estabilidad para las tres secciones representativas de la zona de estudio mediante el método de equilibrio límite, se encontró que estos presentan un factor de seguridad superior a 1.2, para lo cual se clasifica el predio como una zona de categoría media por movimientos en masa en las zonas de mayor pendiente y baja en las zonas planas.

5.7 CATEGORÍAS GEOTÉCNICAS

De acuerdo con el Decreto 1626 de 2015 la categorización geotécnica para el proyecto se realiza según la Tabla 15, para la cual se obtuvo una categoría geotécnica del proyecto MEDIA.

Tabla 15. Categoría geotécnica según nivel de amenaza.

Nivel de amenaza	Baja	Media	Alta	Categoría del proyecto
Condiciones del terreno	Conocidas. No existen suelos compresibles, sueltos o blandos. No hay llenos sueltos. Pendientes nulas o muy bajas.	Determinables a partir de recopilación en campo de datos (descripción del suelo mediante observaciones directas e indirectas) y ensayos de clasificación y resistencias convencionales.	Excepcionalmente difíciles o inusuales. Exploración detallada directa e indirecta de campo (avanzada). Son necesarios ensayos especiales para la caracterización del comportamiento mecánico (resistencia y deformabilidad) e hidráulico del terreno.	**Media**
Hidrogeología	No existen excavaciones debajo del NF. Cuando se encuentren las hay la experiencia indica que no habrá problema.	Son necesarias medidas convencionales de drenaje, para evitar daños a las estructuras.	Presiones de agua excesivas, condiciones excepcionales del suelo, múltiples capas o estratos con permeabilidad variable.	**Baja**
Sismicidad regional	Amenaza sísmica inexistente o bajo	Amenaza sísmica moderada. Emplear la normatividad vigente locales y/o nacionales cuando existan.	Amenaza sísmica alta.	**Media**
Influencia del medio ambiente	No existen fenómenos ambientales: subsidencia regional, amenaza hidrológica,	Existen fenómenos ambientales que pueden ser considerados usando procedimientos de análisis ya establecidos.	Existen problemas ambientales para los cuales los procedimientos convencionales no son suficientes. Se requieren	**Baja**

Nivel de amenaza	Baja	Media	Alta	Categoría del proyecto
	suelos con amplificación de la respuesta sísmica		procedimientos de análisis avanzados.	

5.8 PROBABILIDAD DE FALLA

De acuerdo con los resultados de la modelación de estabilidad, la amenaza a una escala cuantitativa según el Decreto 1626 de 2015, donde se clasifica la amenaza según el Factor de Seguridad (FS), el predio presenta una categoría que va de media en las zonas de mayor pendiente a baja en las zonas planas (Tabla 16).

Tabla 16. Probabilidad de Falla según Decreto 1626 de 2016.

Categoría	Factor de Seguridad	Probabilidad de Ruptura
Amenaza Alta	FS ≤ 1.2	PR ≥0.05/año
Amenaza Media	1.2 < FS ≤ 1.5	PR0.0002/año – 0.05/año
Amenaza Baja	FS > 1.5	PR < 0.0002/año

6. ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA

Los procesos de inestabilidad de laderas son producto de las condiciones geológicas, hidrológicas y geomorfológicas del sitio. La modificación de esas condiciones por procesos geodinámicos, actividades humanas, vegetación y usos del suelo, actúa como condición de deterioro que conlleva a la reducción de las propiedades mecánicas de los materiales y por consiguiente a desencadenar diferentes procesos de remoción en masa. (Consorcio INGETEC - IGR, 2007)

Dentro de los factores que intervienen en los fenómenos de remoción en masa se encuentran factores intrínsecos del material y factores detonantes los cuales son externos. Algunas de las características intrínsecas que llevan a la ocurrencia de movimientos de masa son la litología, el grado de meteorización, las estructuras geológicas, las aguas subterráneas, entre otras. Dentro de los factores detonantes actúan una serie compleja de procesos entre los que se encuentran procesos geomorfológicos, físicos y antrópicos. Dentro de los procesos geomorfológicos y físicos se pueden enumerar como unos de los más importantes los sismos, la erosión y las lluvias. (Consorcio INGETEC - IGR, 2007)

A continuación en la Tabla 17 se describe la amenaza por movimiento de masa de los municipios que conforman el Valle de Aburrá de acuerdo con la recopilación de estudios técnicos realizados por el AMVA (2002) para la “Microzonificación Sísmica de los municipios del Valle de Aburrá” y la “Definición de Zonas de Riesgo por Movimientos en Masa e Inundaciones del Valle de Aburrá”, así como los Planes de Ordenamiento Territorial (POT o PBOT) de cada uno de los municipios.

Tabla 17. Zonificación de amenaza tomado de (Consorcio INGETEC - IGR, 2007).

ZONA DE AMENAZA	ZONA DE AMENAZA
MUY BAJA – BAJA	Corresponden a áreas relativamente estables o aptas urbanísticamente, que presentan condiciones topográficas, geomorfológicas y geológicas que favorece la estabilidad de los terrenos. Estas zonas no están sometidas a fenómenos de remoción en masa.
MEDIA –MEDIA ALTA	Corresponde a los terrenos caracterizados como de estabilidad regular, debido a que son áreas que por sus condiciones topográficas, geomorfológicas y geológicas son susceptibles a sufrir procesos de remoción en masa o erosión de poca o moderada magnitud.
ALTA – MUY ALTA	Corresponde a zonas inestables, caracterizadas por la presencia de fenómenos de remoción en masa y erosión inactivos y activos de magnitud apreciable, por sus condiciones topográficas, geomorfológicas o geológicas se clasifican con alta susceptibilidad a movimientos en masa

Los estudios básicos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo para eventos de movimiento en masa, avenidas torrenciales o inundación están definidos según las propiedades morfológicas y geológicas del terreno. Es necesario una comprensión primaria de los agentes y fenómenos que afectan la zona de estudio con el fin de elaborar un análisis estimativo que permita zonificar el predio de interés y tomar las medidas respectivas para contrarrestarlo, mitigarlo o evadirlo.

De esta manera se han desarrollado herramientas para acercarse a una relación cuantitativa del riesgo, que si bien no son definitivas permiten un acercamiento al modelo actual y probable. Mediante los sistemas de información geográfica (SIG) y cálculos ponderados de variables se estableció un análisis de amenaza, cuyo resultado final establece una zonificación con fines de control y evaluación a la hora de proyectar el urbanismo que se plantea. Se superponen los mapas de pendientes, geología, geomorfología, procesos morfodinámicos con los resultados de la modelación geotécnica, los usos del suelo, la capacidad de infiltración del suelo y lluvia. Obteniéndose así el mapa mostrado en la Figura 43.

En la zonificación de la amenaza se consideran todos los aspectos descritos anteriormente en lo referente a:

- Aspectos del terreno: Cartografía disponible del IGAC en escala 1:2.000 y levantada para el predio en escala 1:12500, además del modelo de elevación digital.
- Pendientes a partir del modelo de elevación digital.
- Geología local descrita anteriormente, en la que predomina un depósito de vertiente maduro.
- Geomorfología local donde se delimitaron las unidades geomorfológicas y morfométricas del predio.
- Procesos morfodinámicos tanto antiguos como recientes que dan cuenta de la actividad morfodinámica del área.
- Suelos presentes con la caracterización de los materiales encontrados en los sondeos realizados.
- Coberturas vegetales y uso del suelo a escala 1:100.000 del IDEAM, 2014 y POT de Medellín, donde se tiene que el predio se ubica en suelo urbano denominado áreas de baja mixtura, áreas predominantemente residenciales.
- Consulta del catálogo de movimientos en masa del SGC que contiene el inventario de eventos ocurridos en la zona durante el tiempo.
- Modelo geotécnico: Del cual se obtienen parámetros del suelo y análisis de factor de seguridad
- Sismología: Para la definición de la sismología de la zona, se utilizó los parámetros de aceleración máxima para la zona de 0.45 g para un periodo de retorno de 475 años, determinada en el estudio de Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá, 2007

6.1 ZONAS GEOTECNICAMENTE HOMOGENEAS

De acuerdo al modelo geotécnico se tiene que, con base en los parámetros más creíbles, se realizaron análisis de estabilidad, donde se encuentran factores de seguridad superiores a 1.5 para pendientes inferiores a 30°, lo cual se denominó como Zona Homogénea I (Zona I) y para pendientes del terreno altas mayores a 30°, factores de seguridad superiores a 1.2, lo cual se denominó con Zona Homogénea II (Zona II). En estos análisis se establecieron condiciones de aguas subterráneas a 3 m de profundidad, asumiendo este valor como las condiciones más desfavorables, y aun así el F.S es mayor a los 1.2.

En la Figura 42 se presenta la zonificación de zonas geotécnicamente homogéneas de acuerdo con el análisis de estabilidad y los resultados de la exploración del subsuelo.

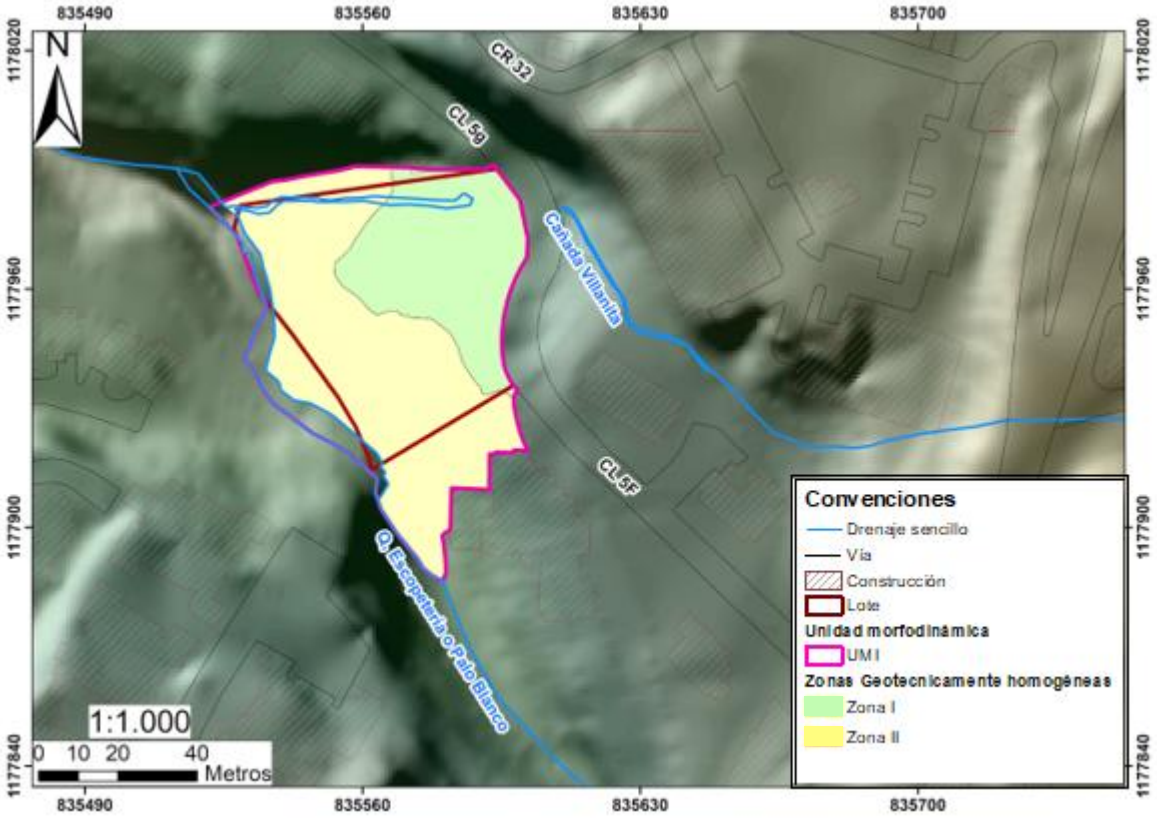

Figura 42. Mapa de amenazas por fenómenos de remoción en masa e inundación del predio de interés.

6.2 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA

Para la zonificación de amenaza por fenómenos de remoción en masa se utiliza el factor de seguridad -F.S-, estableciendo un rango acorde al Decreto N°1626 de 2015, catalogando el FS≤1.2 como amenaza alta por remoción en masa, 1.2 < F.S ≤1.5 como media y F.S > 1.5 como Baja. De acuerdo con lo anterior, en la Figura 43 se observan la zonificación de amenaza por fenómenos de remoción en masa para el proyecto de estudio.

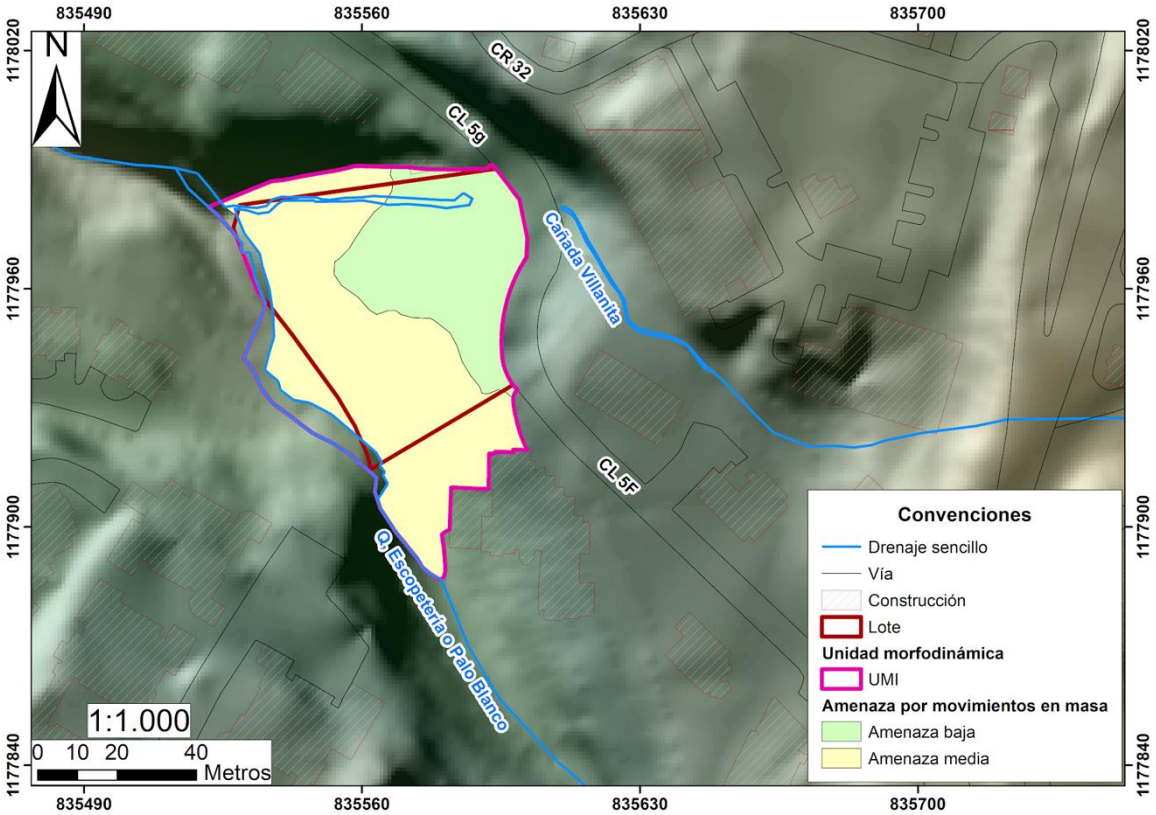

Figura 43. Mapa de amenazas por fenómenos de remoción en masa e inundación del predio de interés.

Según la Figura 43, hay zonas de amenaza media y baja por movimientos en masa. A continuación, se describe cada una de ellas.

Zonas de amenaza media: Estas zonas se encuentran ubicadas en la parte central del predio, cercanas al cauce de la quebrada La Escopetería y abarcan el costado nororiental y sur de la zona de estudio. Comprenden pendientes que van del 5 al 45%, denominadas como superficies suaves a empinadas. El material predominante de esta zona corresponde a depósitos de flujos de lodos y/o escombros consolidados, de textura predominantemente limosa de alta plasticidad, con bloques de roca de gran tamaño a partir de los 4 m de profundidad.

Zonas de amenaza baja: Estas zonas se encuentran ubicadas hacia la parte más norte, donde actualmente se presenta un parqueadero estacional de vehículos, entre las cotas 1604 a 1608 m.s.n.m. Presenta pendientes de 0 al 5%, denominadas como planicies. Esta zona presenta una capa superficial de lleno antrópico que alcanza los 2.5 y 3m de espesor, con un material predominantemente limoso.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En general el lote en estudio presenta estabilidad, no se aprecia la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos e inactivos de grandes dimensiones, tales como socavación de márgenes y movimientos en masa que afecten la estabilidad global del predio de interés.

Teniendo en cuenta el entorno geotécnico del proyecto y las condiciones geotécnicas particulares del lote, se recomienda que las excavaciones de las cimentaciones sean consideradas como un estudio complementario, en caso de requerirse para alguna adaptación del espacio público.

El lote en estudio presenta condiciones geológicas homogéneas, conformado principalmente por depósitos de vertiente maduros y un lleno antrópico puntual. Desde el punto de vista geomorfológico, se presentan pendientes suaves a medias y no se observan procesos morfodinámicos activos que comprometan la estabilidad actual.

Con respecto a la zonificación de amenaza por fenómenos de remoción en masa el área en estudio se ubica en su mayoría en zonas de amenaza baja.

Se requiere en todas las fases de la intervención urbanística un manejo especial de las aguas de escorrentía presentes en el lote, además de protección, estabilización contra procesos de erosión de orillas, dado la presencia de planos de drenaje con expresión geomorfológica de vaguadas en la parte frontal del lote, para evitar problemas geotécnicos

Aunque el nivel freático detectado fue aparente a los 6 m, se debe tener presente la presencia de este para las obras a implementar en el predio, que de acuerdo con el diseño arquitectónico suministrado no tendrán ninguna intervención puesto que las obras son superficiales.

De acuerdo con las características del suelo, el terreno se debe mantener seco evitando el paso del agua y la percolación de esta, mediante la construcción de drenajes para aguas de escorrentía, tales como cunetas perimetrales, zanjas, rondas de coronación y descoles donde se haga la correcta disposición de las aguas y se evite la erosión del terreno. Para el planteamiento de esta recomendación se realizó el análisis de las direcciones de flujo (Figura 44), con el fin de identificar la dirección preferencial de la escorrentía en el predio y de esta manera trazar el lineamiento de las obras hidráulicas a recomendar (Figura 46).

Para garantizar la estabilidad de los taludes de corte a largo plazo, es indispensable implementar obras de drenaje que permitan captar las aguas provenientes de los niveles superiores y encauzarlas correctamente.

En la Figura 45 se ilustra un tipo de cuneta que se puede implementar y en la se presenta el trazado de obras de drenaje recomendada.

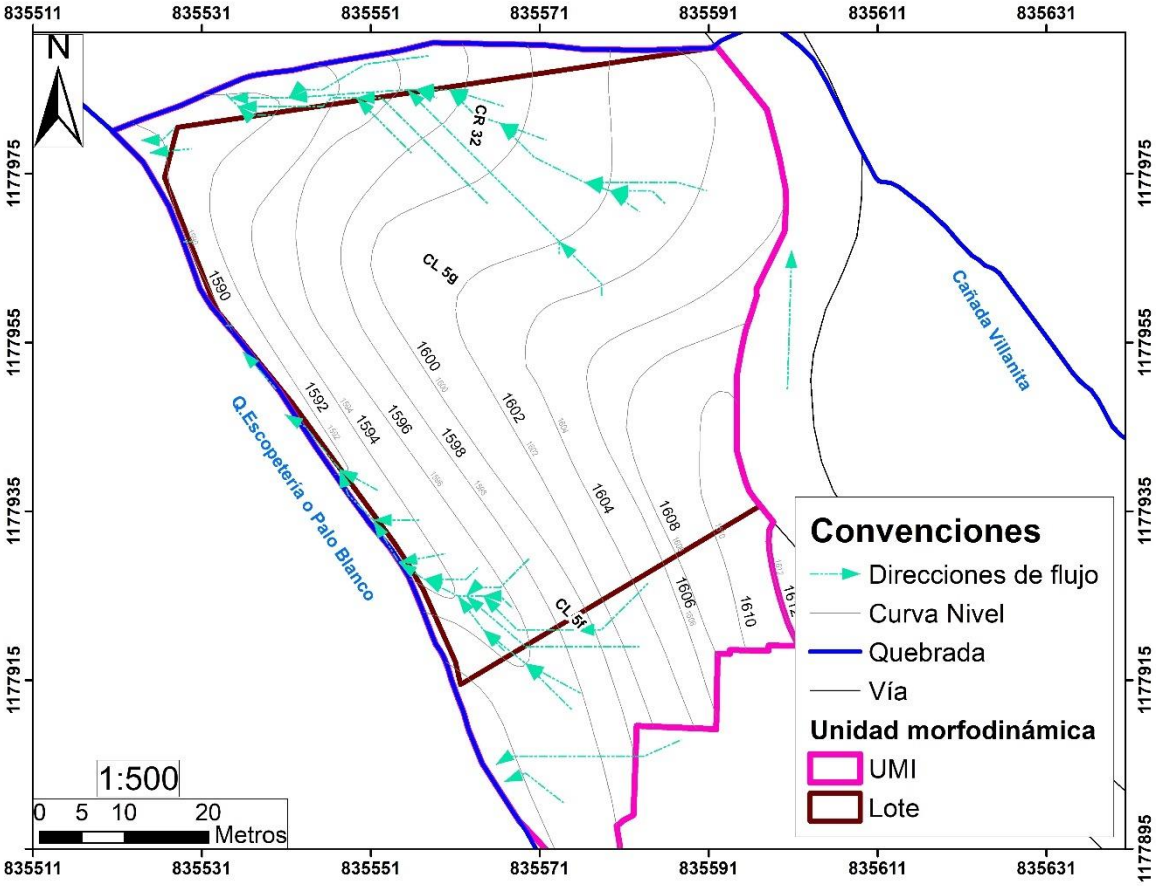

Figura 44. Mapa de dirección preferencial de flujo.

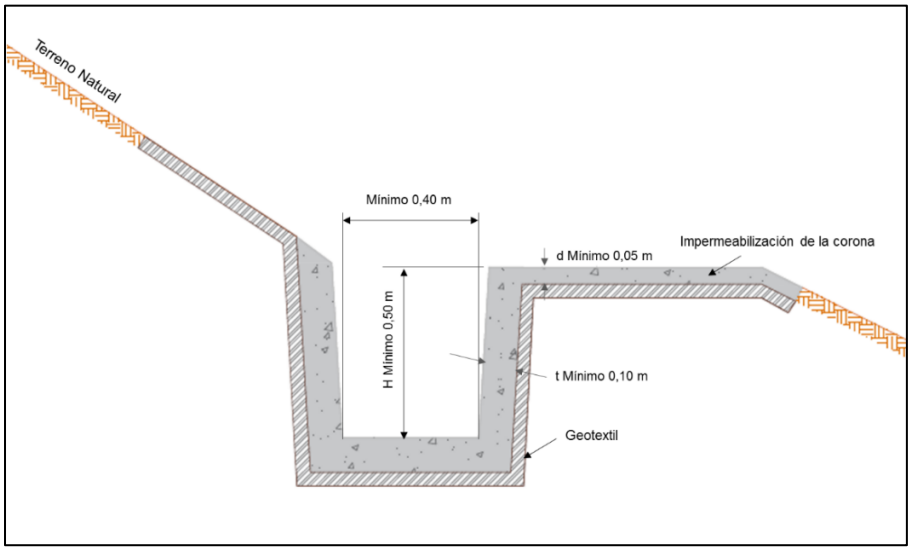

Figura 45. Esquema de detalle de ronda de coronación para control de aguas de escorrentía en el talud, Modificado de Suárez (2009)

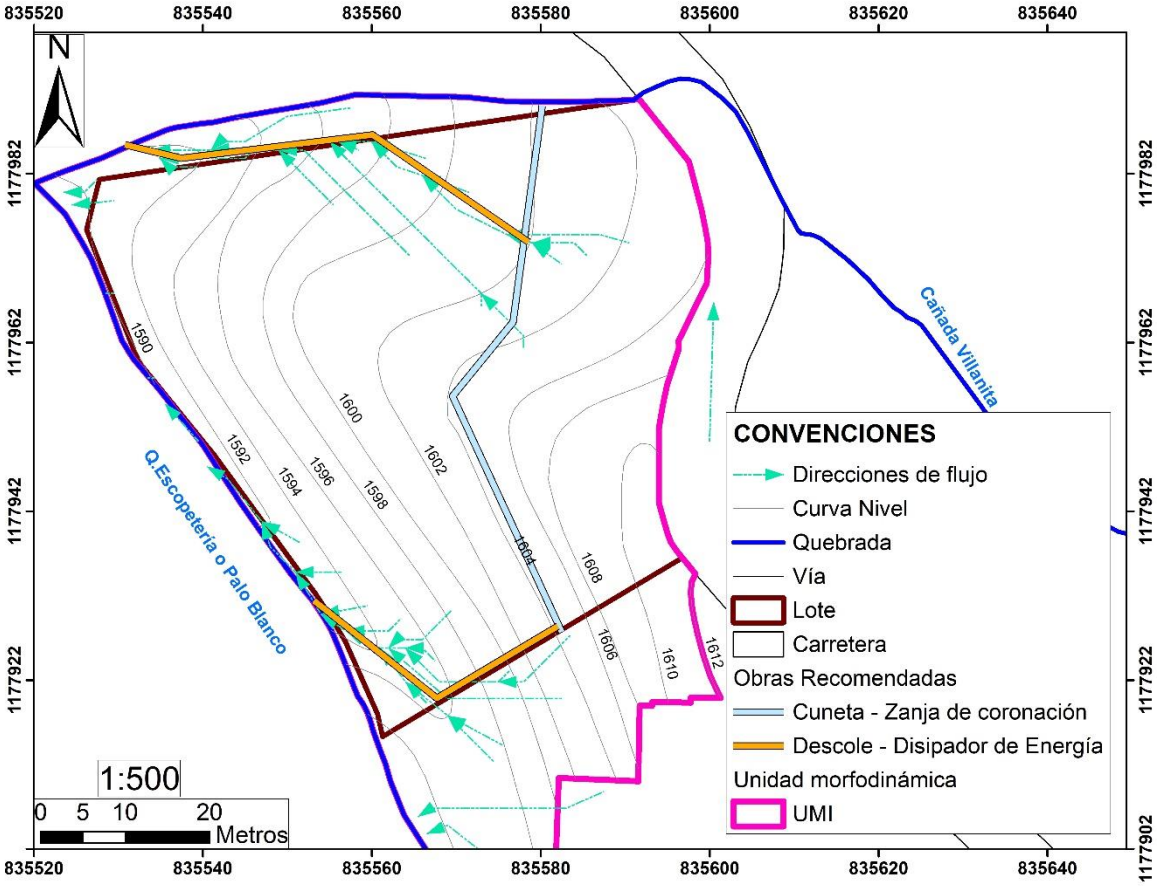

Figura 46. Obras de mitigación recomendadas

Se sugiere que la periferia de las construcciones tipo deck y demás, incluya las obras de drenaje del caso, de manera que se dé una adecuada captación de la escorrentía y una conducción apropiada hasta la red de aguas lluvias. Los detalles de manejo de drenaje, bombeo y descarga, tanto durante la construcción como en la fase operativa del proyecto, deben definirse por parte de un Especialista Hidráulico.

Teniendo en cuenta las características expansivas del suelo, es importante que este siempre mantenga cobertura vegetal y además de eso las intervenciones proyectadas estén separadas de los árboles ornamentales y la irrigación de plantas y jardines, ya que estas pueden afectar el equilibrio dinámica del suelo, generando contracciones y repercusiones negativas en la infraestructura.

Muros en contacto con el suelo en más de 1.0 m de altura, deben diseñarse como estructuras de contención, para tal efecto debe considerarse una densidad de líquido equivalente de 7,80 kN/m3, dicho valor no considera empujes hidrostáticos, razón por la cual debe preverse el drenaje al respaldo con los respectivos sistemas de filtro, los cuales se acogerán a las recomendaciones de un especialista hidráulico. Esto aplica para contenciones entre 1.0 y 3.0 m de altura; contenciones mayores implican un análisis geotécnico particular. Se resalta que, según los planos arquitectónicos suministrados, la intervención en el predio corresponde únicamente a una explanación.

Todos los taludes temporales deben ser protegidos con mortero y malla y los taludes permanentes deben ser revegetalizados por completo con pastos de raíz profunda del tipo kikuyo, vetiver o similar.

Deben disponerse obras de drenaje superficial tales como zanjas de coronación y cunetas; cuyo dimensionamiento y disposición están a cargo de un especialista hidráulico.

La génesis de los materiales detectados en el lote advierte una alta probabilidad de que se detecten fragmentos rocosos durante las excavaciones. En estos casos, se programará la desintegración de los mismos con cuñas hidráulicas, manuales o químicos expansivos.

Desde el punto de vista del modelo geotécnico el lote presenta una estabilidad global, caracterizada por una estratigrafía de depósitos de vertiente. Después de realizar los análisis estabilidad tanto en condiciones estáticas como seudoestáticas, se tienen factores de seguridad mayores a 1.2, lo que indica que, desde el punto de vista geotécnico, zonas presenta amenaza baja por movimientos en masa.

8. REFERENCIAS

Alcaldia de Medellín. (2014). *Acuerdo 048 Plan de Ordenamiento Territorial.* Medellín.

Bishop , A. W. (1955). The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. Geotechnique. Vol 5, No. 1.

Consorcio INGETEC - IGR. (2007). *Diseño Del Sistema Metropolitano Para La Prevención, Atención Y Recuperación de Desastres del Valle de Aburrá.* Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Consorcio Microzonificación 2006. (2007). *Mirozonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, Envigado, La Estrella y Caldas.* Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Fellenius, W. (1936). Calculation of the Stability of Earth Dams. Trans. 2nd. Congress on Large Dams, International Commission on Large Dams of the World Power Conference, Vol. 4, pp. 445-462.

Gonzalez de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica.* Madrid, España: Prentice Hall.

Gonzalez, A. (1999). Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT.

Hynes-Griffin, M., & Franklin, A. (1984). Rationalizing the seismic coefficient method.

Janbu, N. (1968). Slope Stability Computations. Soil Mech, and Found. Engrg. Rep., The Technical University of Norway, Trondheim, Norway.

M.Das, B. (2001). Fundamentos de la Ingeniería Geotecnica.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Reglamento Colombiano de la norma sismo resistente NSR-10.

Montero, J. (2017). *Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia.* Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. Géotechnique, 15(1): 79–93.

Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.* Bogotá.

Singhal, B., & Gupta, R. (2010). *Applied hydrogeology of fractured rocks. 2nd ed. Dordrecht .* New York: Springer.

Spencer, E. (1967). A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Interslice Forces. Geotechnique, Vol. 17, No. 1, pp. 11-26.

Suárez Díaz, J. (2009). Deslizamientos: Volumen 2 - Técnicas de Remediación. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.

Universidad de Antioquia. (2016). *Diagnóstico: Plan de manejo ambiental del Acuífero del Valle de Aburrá.* Medellín: AMVA.

9. ANEXOS (DIGITAL)

9.1 ANEXO 1 – FOTOGRAFÍAS AÉREAS.

9.2 ANEXO 2 – RESULTADOS LABORATORIO DE SUELOS

10. ANEXO 3 MATRICULAS PROFESIONALES

REPUBLICA DE COLOMBIA
CONSEJO PROFESIONAL NACIONAL DE INGENIERIA
COPNIA
MATRICULA PROFESIONAL No.
05223234930ANT
INGENIERO GEOLOGO
DE FECHA 20/09/2012
MARCOS JULIAN
OSORIO ARENAS
C.C. 1128390968
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
PRESIDENTE DEL CONSEJO