
Estudio de Detalle por movimientos en masa Parque Complex 2



GEOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL SAS

Agosto de 2020

REPORTE DE ELABORACIÓN Y REVISIÓN DE INFORME					
Elaboración y Revisión	No. de Revisión	0	1	2	
	Elaboración	Nombre	Marco Fidel Gamboa		
		Cargo	Ingeniero Geólogo Esp. Sistemas de Información Geográfica MP. 0522380842 ANT		
		Firma			
		Nombre	William G. Suarez		
		Cargo	Especialista en Mecánica de suelos y Cimentaciones MP. 05202130821 ANT		
		Firma			
		Nombre	Oscar R. Guerrero		
		Cargo	Ing. Civil – Diseños Estructurales MP. 05022 06700		
		Firma			
		Nombre	Sandra Milena López C.		
		Cargo	Ingeniera Geóloga MP. 05223124487 ANT		
		Firma			
		Nombre	Sebastián Navarro S.		
		Cargo	Ingeniero Civil MP.05202304945 ANT		
		Firma			
		Nombre	Héctor C. Pérez C.		
		Cargo	Geólogo MP. D-6302		
		Firma			
	Fecha	24 de agosto de 2020			

Contenido

1.	Introducción.....	8
1.1.	Objetivo	8
1.2.	Objetivos específicos	8
1.3.	Localización	9
1.4.	Clasificación y Usos del Suelo	9
2.	Metodología	12
2.1.	Geología y Geomorfología.....	12
2.2.	Geotécnia y estabilidad de taludes	17
3.	Aspectos geológicos.....	25
3.1.	Geología regional	25
3.2.	Tectónica regional.....	27
3.3.	Geomorfología regional	28
3.4.	Delimitación de la Unidad Morfodinámica Independiente (UMI).....	29
3.5.	Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI).....	32
3.6.	Morfometría.....	37
3.7.	Geomorfología Local.....	42
3.8.	Procesos morfodinámicos	51
4.	Análisis geotécnicos	57
4.1.	Exploración de campo y análisis de laboratorio	57
4.2.	Análisis de laboratorio	60
4.3.	Definición del perfil de suelo	76
4.4.	Análisis de estabilidad	78
5.	Zonificación de amenazas por movimientos en masa	94
5.1.	Amenaza por estabilidad.....	94
5.2.	Análisis de la propagación o distancia de viaje	96
5.3.	Amenaza total.....	97
6.	Aptitud geológica.....	99
7.	Recomendaciones.....	101
7.1.	Análisis de estabilidad en condiciones proyectadas.....	101
7.2.	Consideraciones geotécnicas para el diseño de obras de estabilización	114
7.3.	Otras recomendaciones	115
8.	Conclusiones generales	118
9.	Limitaciones.....	120

10. Bibliografía	121
------------------------	-----

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Localización del lote de interés.....	9
Ilustración 2. Red hídrica y retiros POT vigente (Acuerdo 48 de 2014).....	10
Ilustración 3. Amenaza por movimientos en masa POT vigente (Acuerdo 48 de 2014)....	10
Ilustración 4. Usos generales del suelo POT vigente (Acuerdo 48 de 2014)	11
Ilustración 5. Fotografía aérea del año 1981, en rojo el área de interés	14
Ilustración 6. Fotografía aérea del año 1994, en rojo el área de interés	15
Ilustración 7. Fotografía aérea del año 2004, en rojo el área de interés	16
Ilustración 8. Fotografía aérea del año 2019, en rojo el área de interés	16
Ilustración 9. Representación de los términos utilizados para calcular la profundidad del nivel freático asociada a un periodo de retorno de 20 años.	22
Ilustración 10. Curva IDF de la estación Ayurá	23
Ilustración 11. Mapa geológico regional (AMVA, 2007).....	25
Ilustración 12. Mapa geomorfológico regional (AMVA, 2007)	29
Ilustración 13. Área de estudio y UMI's definidas.....	30
Ilustración 14. Perfil geológico generalizado de la UMI 1.....	31
Ilustración 15. Perfil geológico generalizado de la UMI 2.....	31
Ilustración 16. Perfil geológico generalizado de la UMI 3.....	32
Ilustración 17. Mapa de Unidades Geológicas para Ingeniería	33
Ilustración 18. Mapa de pendientes del predio de planificación.....	39
Ilustración 19. Modelo de sombras del área de interés.....	42
Ilustración 20. Mapa geomorfológico local	43
Ilustración 21. Mapa de procesos morfodinámicos y otras observaciones	56
Ilustración 22. Localización de las perforaciones en el área de estudio.....	58
Ilustración 23. Variación cohesión del lleno antrópico	67
Ilustración 24. Variación ángulo de fricción del lleno antrópico	67
Ilustración 25. Variación cohesión del depósito deslizamiento	68
Ilustración 26. Variación ángulo de fricción del depósito deslizamiento	69
Ilustración 27. Variación cohesión del flujo 1.....	70
Ilustración 28. Variación ángulo de fricción del flujo 1	70
Ilustración 29. Variación cohesión del flujo 2.....	71
Ilustración 30. Variación ángulo de fricción del flujo 2	71
Ilustración 31. Variación cohesión del flujo 3.....	72
Ilustración 32. Variación ángulo de fricción del flujo 3	73
Ilustración 33. Variación cohesión del flujo 4.....	73
Ilustración 34. Variación ángulo de fricción del flujo 4	74
Ilustración 35. Tabla 11.3 "Mecánica de suelos" Lambe y Whitman	75
Ilustración 36. Localización perfiles analizados	80
Ilustración 37. Modelo geotécnico perfil 1	81

Ilustración 38. Análisis de estabilidad Perfil 1 – caso estático condiciones actuales	82
Ilustración 39. Análisis de estabilidad Perfil 1 – caso pseudoestático condiciones actuales	82
Ilustración 40. Análisis de estabilidad Perfil 1 – caso estático condiciones actuales aumento nivel freático	83
Ilustración 41. Modelo geotécnico perfil 2	83
Ilustración 42. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso estático condiciones actuales	84
Ilustración 43. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso pseudoestático condiciones actuales	84
Ilustración 44. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso estático condiciones actuales aumento nivel freático	85
Ilustración 45. Modelo geotécnico perfil 3	86
Ilustración 46. Análisis de estabilidad Perfil 3 – caso estático condiciones actuales	86
Ilustración 47. Análisis de estabilidad Perfil 3 – caso pseudoestático condiciones actuales	87
Ilustración 48. Análisis de estabilidad Perfil 3 – caso estático condiciones actuales aumento nivel freático	87
Ilustración 49. Modelo geotécnico perfil 4	88
Ilustración 50. Análisis de estabilidad Perfil 4 – caso estático condiciones actuales	89
Ilustración 51. Análisis de estabilidad Perfil 4 – caso pseudoestático condiciones actuales	89
Ilustración 52. Análisis de estabilidad Perfil 4 – caso estático condiciones actuales aumento nivel freático	90
Ilustración 53. Modelo geotécnico perfil 5	90
Ilustración 54. Análisis de estabilidad Perfil 5 – caso estático condiciones actuales	91
Ilustración 55. Análisis de estabilidad Perfil 5 – caso pseudoestático condiciones actuales	91
Ilustración 56. Análisis de estabilidad Perfil 5 – caso estático condiciones actuales aumento nivel freático	92
Ilustración 57. Modelo geotécnico perfil 6	92
Ilustración 58. Análisis de estabilidad Perfil 6 – caso estático condiciones actuales	93
Ilustración 59. Análisis de estabilidad Perfil 6 – caso pseudoestático condiciones actuales	93
Ilustración 60. Análisis de estabilidad Perfil 6 – caso estático condiciones actuales aumento nivel freático	94
Ilustración 61. Mapa de amenaza por movimientos en masa a partir del análisis de estabilidad	96
Ilustración 62. Mapa del análisis de la propagación o distancia de viaje	97
Ilustración 63. Mapa de amenaza por movimientos en masa total	98
Ilustración 64. Mapa de aptitud geológica	99
Ilustración 65. Modelo geotécnico perfil 1 – condiciones proyectadas	101
Ilustración 66. Análisis de estabilidad Perfil 1 – caso estático condiciones proyectadas ..	102
Ilustración 67. Análisis de estabilidad Perfil 1 – caso pseudoestático condiciones proyectadas	102
Ilustración 68. Análisis de estabilidad Perfil 1 – caso estático condiciones proyectadas aumento nivel freático	103
Ilustración 69. Modelo geotécnico perfil 2 - condiciones proyectadas.....	104
Ilustración 70. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso estático condiciones proyectadas ..	104

Ilustración 71. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso pseudoestático condiciones proyectadas	105
Ilustración 72. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso estático condiciones proyectadas aumento nivel freático	105
Ilustración 73. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso estático condiciones proyectadas pilas Obra Treinta&Cinco	106
Ilustración 74. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso estático condiciones proyectadas pilas Obra Treinta&Cinco alargadas	107
Ilustración 75. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso pseudoestático condiciones proyectadas pilas Obra Treinta&Cinco alargadas	107
Ilustración 76. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso estático condiciones proyectadas aumento nivel freático pilas Obra Treinta&Cinco alargadas	108
Ilustración 77. Modelo geotécnico perfil 3 - condiciones proyectadas	109
Ilustración 78. Análisis de estabilidad Perfil 3 – caso estático condiciones proyectadas ..	109
Ilustración 79. Análisis de estabilidad Perfil 3 – caso pseudoestático condiciones proyectadas	110
Ilustración 80. Análisis de estabilidad Perfil 3 – caso estático condiciones proyectadas aumento nivel freático	110
Ilustración 81. Modelo geotécnico perfil 5 - condiciones proyectadas	111
Ilustración 82. Análisis de estabilidad Perfil 5 – caso estático condiciones proyectadas ..	112
Ilustración 83. Análisis de estabilidad Perfil 5 – caso pseudoestático condiciones proyectadas	112
Ilustración 84. Análisis de estabilidad Perfil 5 – caso estático condiciones proyectadas aumento nivel freático	113
Ilustración 85. Mapa de amenaza por movimientos en masa en condiciones proyectadas	114
Ilustración 86. Localización de obras proyectadas	115
Ilustración 87. Esquemas de cunetas rondas de coronación recomendadas	115
Ilustración 88. Detalle del inclinómetro	117
Ilustración 89. Propuesta cartográfica para ajuste de amenaza en bordes del lote Complex 2	119

Lista de Tablas

Tabla 1. Cobertura de fotografías aéreas del área de estudio	14
Tabla 2. de Curva para los diferentes tipos de cobertura	20
Tabla 3. Distribución de los rangos de pendientes en el predio de interés	38
Tabla 4. Rangos de longitud de la ladera para la definición de los componentes geomorfológicos	42
Tabla 5. Característica de los topes para su definición	43
Tabla 6. Profundidad de los sondeos exploratorios	58

Tabla 7. Resumen de ensayos de laboratorio	61
Tabla 8. Resultados ensayos de laboratorio – propiedades índice	63
Tabla 9. Resultados ensayos de laboratorio – propiedades geomecánicas	64
Tabla 10. Correlaciones analizadas para la definición de parámetros geomecánicos	66
Tabla 11. Parámetros geomecánicos del material orgánico.....	68
Tabla 12. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del depósito deslizamiento .	69
Tabla 13. Parámetros geomecánicos del depósito deslizamiento.....	69
Tabla 14. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del flujo 1	70
Tabla 15. Parámetros geomecánicos del flujo 1	71
Tabla 16. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del flujo 2	72
Tabla 17. Parámetros geomecánicos del flujo 2.....	72
Tabla 18. Parámetros geomecánicos del flujo 3.....	73
Tabla 19. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del flujo 4	74
Tabla 20. Parámetros geomecánicos del flujo 4.....	74
Tabla 21. Parámetros geomecánicos del depósito aluviotorrencial	75
Tabla 22. Profundidad del Nivel Freático	75
Tabla 23. Clasificación de los perfiles de suelo.	77
Tabla 24. Factores de seguridad mínimos para evaluación y diseño de taludes.....	79
Tabla 25. Valores de KST/a_{max} Mínimos para análisis Seudoestático de Taludes.....	79
Tabla 26. Resultados análisis estabilidad condiciones actuales.....	95
Tabla 27. Resultados análisis estabilidad condiciones proyectadas	113

1. Introducción

El Plan de Ordenamiento Territorial del año 2014 del municipio de Medellín (Acuerdo 48 de 2014), indica que el lote CBML 14110040005, presenta una zona definida como amenaza alta por movimientos en masa, rodeada por una franja angosta de amenaza media, sin embargo, dada la escala de análisis con la que se definen estas zonas para el POT el presente estudio busca definir con mayor precisión las características y propiedades geotécnicas del lote y la zonificación de la amenaza, a partir de un estudio de mayor detalle siguiendo los lineamientos establecidos en el Acuerdo Metropolitano N°009 y en el Decreto 1626 de 2015 cuyo fin es incorporar correcciones y precisiones de la cartografía oficial del Plan de Ordenamiento Territorial – POT y la incorporación cartográfica de los resultados de los estudios de detalle.

En este informe se consignan los resultados obtenidos de los estudios de detalle por movimientos en masa para el predio en mención. Igualmente, se incluye las recomendaciones para el manejo del área de interés, de manera que disminuya la posibilidad de afectaciones por el tipo de evento estudiado; también se presenta como anexos a este informe los registros de perforaciones y la cartografía temática compatible con el software ArcGis.

1.1. Objetivo

Elaborar la zonificación de la amenaza por movimientos en masa en el área de interés, siguiendo los lineamientos establecidos por el Decreto municipal 1626 de 2015 y el documento "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, producido y aprobado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

1.2. Objetivos específicos

- Realizar la caracterización geológico – geomorfológica del área de interés y la caracterización geotécnica de los materiales identificados en el sitio.
- Evaluar las condiciones de estabilidad del polígono de estudio y elaborar la zonificación por movimientos en masa a escala 1:2000.
- Zonificar el territorio en función de la aptitud para el uso del suelo y presentar las recomendaciones para el aprovechamiento del mismo.

1.3. Localización

El polígono denominado Parque Complex 2 se localiza en el suroriente de la ciudad de Medellín, en el barrio Los Balsos No 1, en una franja entre la margen derecha de la quebrada La Aguacatala y la Calle 12 sur o Loma de Los Balsos antes de la Transversal 25; como sitios de referencia en cercanías del área de interés se encuentra el Complex Los Balsos y los edificios Mompox, Almonte y Sevilla. Este lote está dentro del polígono de tratamiento Z5_CN5_17 del POT de Medellín, denominado "Consolidación Nivel 5" (Ilustración 1).

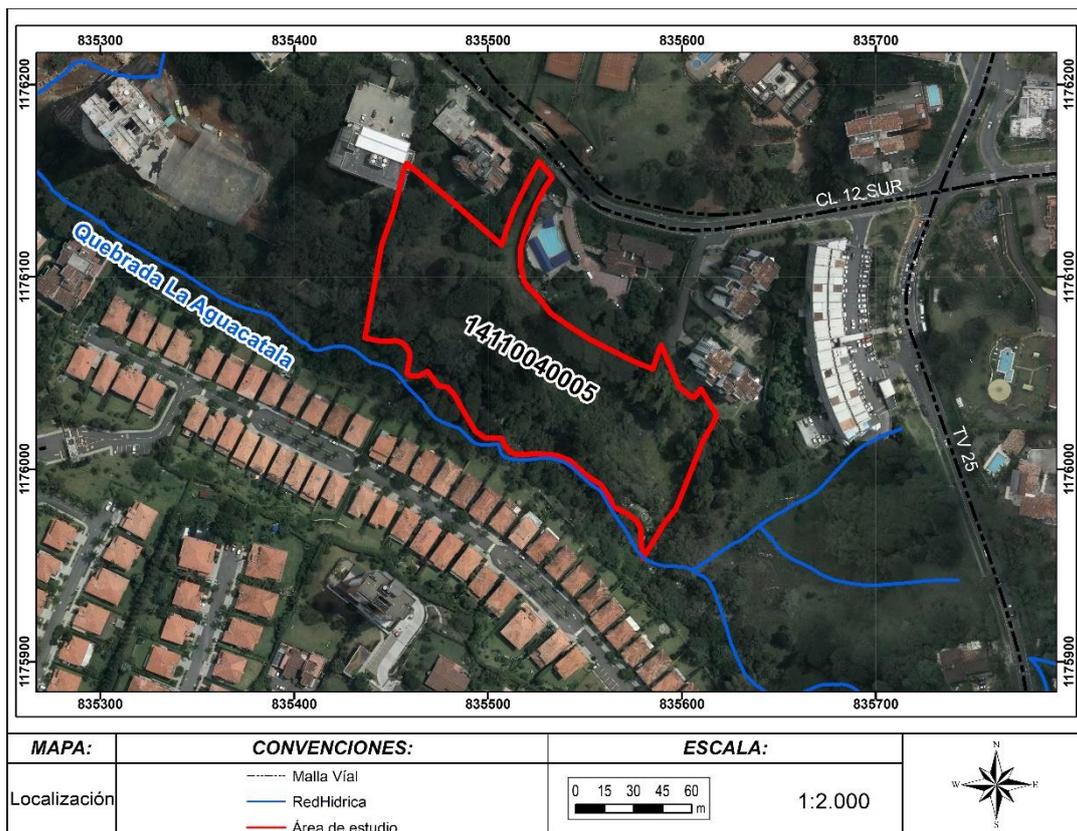


Ilustración 1. Localización del lote de interés

1.4. Clasificación y Usos del Suelo

De acuerdo con el Acuerdo 48 de 2014, el área de interés está clasificada como suelo urbano, y dentro de él se identifican categorías del suelo de protección correspondientes a la Estructura Ecológica Principal y áreas de amenaza por movimientos en masa.

En este lote, las áreas de la Estructura Ecológica Principal incluyen las áreas de interés estratégico tales como la red de conectividad ecológica y el sistema hidrográfico (ríos y quebradas con sus retiros), este último corresponde a un retiro de 30 metros asociado a la quebrada La Aguacatala (Ilustración 2).

Adicionalmente, se presentan restricciones desde la amenaza por movimientos en masa, donde la categoría alta predomina en el lote; y se identifica un grado de amenaza media por inundaciones restringido a la quebrada La Aguacatala (Ilustración 3).

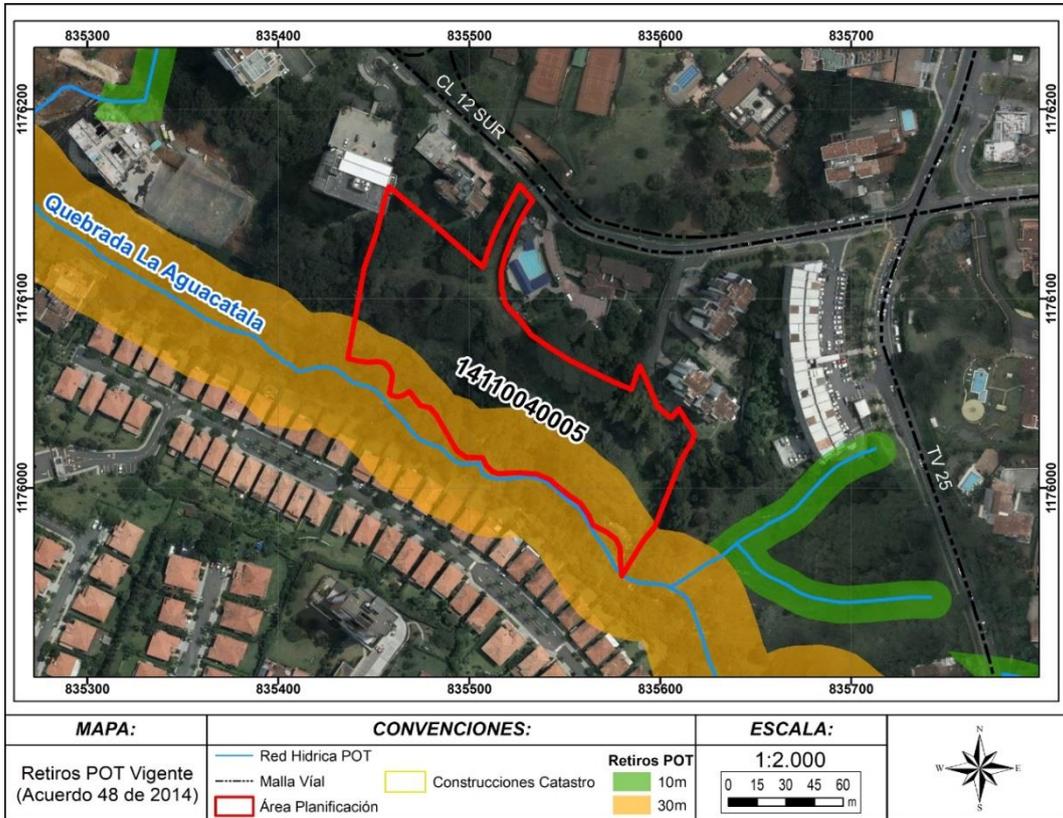


Ilustración 2. Red hídrica y retiros POT vigente (Acuerdo 48 de 2014)

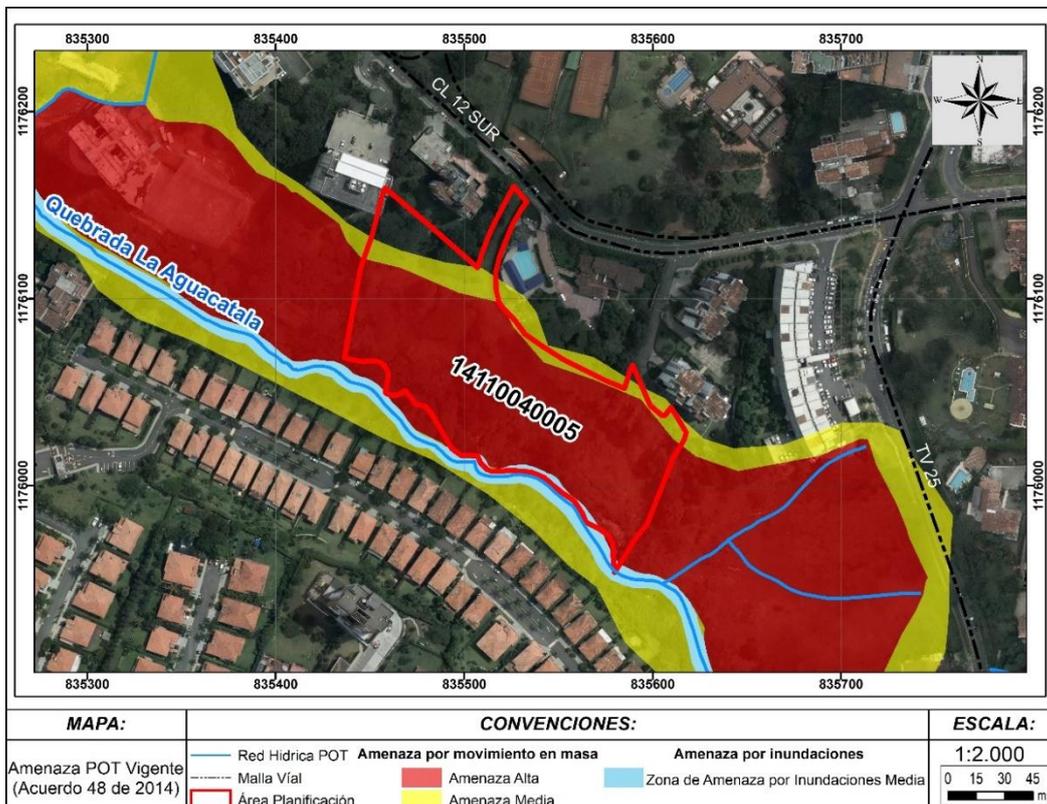


Ilustración 3. Amenaza por movimientos en masa POT vigente (Acuerdo 48 de 2014)

En el Acuerdo 48 de 2014 se define que el uso general del suelo en el polígono de interés corresponde a Espacios públicos proyectados, uso que se extiende hacia el suroriente de este sector. Otros usos generales que están definidos en cercanías al polígono son áreas y corredores de media mixtura, áreas predominantemente residenciales (áreas de baja mixtura) y espacio público existente (Ilustración 4).

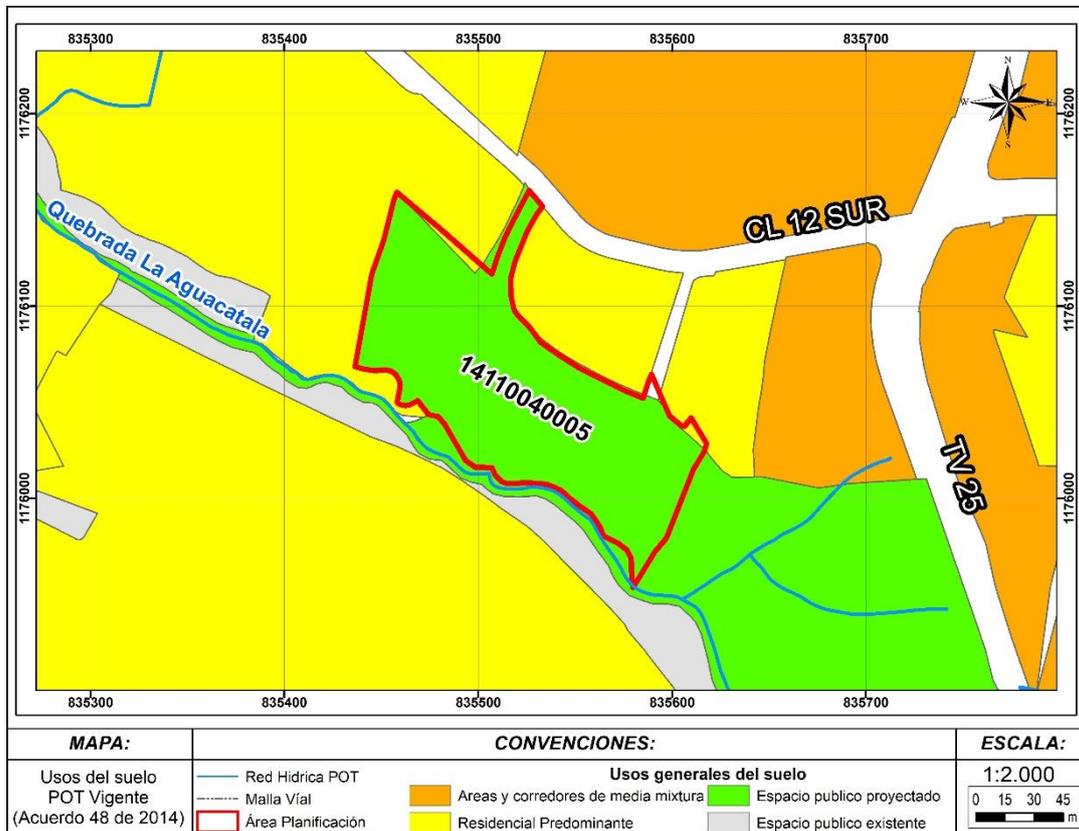


Ilustración 4. Usos generales del suelo POT vigente (Acuerdo 48 de 2014)

2. Metodología

El estudio incluye la definición y caracterización de los materiales que componen el subsuelo, la evaluación de los perfiles estratigráficos, el análisis de estabilidad de la zona y demás factores importantes en la caracterización geológica – geotécnica que enmarca el polígono del lote de interés. Con base en la caracterización de las unidades geológicas de la superficie, la geomorfología, los resultados del programa de exploración y las propiedades geotécnicas de los materiales que componen el subsuelo, se definen los modelos de análisis para evaluar la estabilidad de las laderas del sector.

La información anterior permitirá zonificar el terreno para determinar la aptitud de uso del suelo considerando entre otros aspectos la amenaza por movimientos en masa, las condiciones de pendiente y las características morfométricas, que en conjunto permiten identificar las restricciones desde el punto de vista geológico – geotécnico para el desarrollo del lote de interés.

2.1. Geología y Geomorfología

La metodología utilizada para el desarrollo del presente estudio incluyó las siguientes actividades:

2.1.1. Recopilación de información secundaria

Previo al inicio de las labores de campo se recopiló información existente sobre estudios realizados anteriormente en la zona y en los sectores aledaños, de igual manera fueron obtenidas bases cartográficas e imágenes de satélite del área en estudio, a escalas diferentes y temporalmente espaciadas. Lo anterior se realiza con el fin de obtener conocimiento relacionado con las condiciones físicas del territorio, en aspectos como geología, geomorfología, intervención y uso del suelo. Esta información se obtuvo del municipio de Medellín y Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

2.1.2. Análisis de imágenes satelitales y cartografía

Por medio de este análisis, se obtiene información general relacionada con litología, formaciones superficiales, geomorfología, procesos morfodinámicos actuales y antiguos, e hidrología, lo que permite obtener una zonificación temática preliminar a la visita de campo.

Desde el componente geotécnico este análisis se realizó con el fin de obtener información sobre aspectos generales del terreno, útil durante la planificación de las actividades de campo; reconocimiento del sitio y ejecución de la campaña exploratoria.

2.1.3. Trabajo de campo

Las labores de campo se realizaron en el mes de mayo y junio del año 2020. Esta etapa se centra en el levantamiento de información primaria mediante recorridos por la zona que permitieron identificar características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas relevantes del polígono en estudio, así como la exploración directa por medio de la ejecución de perforaciones en toda el área.

2.1.4. Sistematización y procesamiento de la información

De acuerdo con la información obtenida en la revisión bibliográfica, el análisis de cartografía y los datos de campo, se elaboró el presente documento que caracteriza desde el punto de vista geológico - geotécnico los materiales que componen el área donde se desarrolla el estudio de detalle.

A continuación, se presenta la base bibliográfica y se describe el aporte y la utilidad de cada una de las fuentes de información secundaria, referencia para el presente estudio.

Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Medellín. Este plan es de gran importancia y se destaca por ser el marco jurídico que regula las acciones emprendidas dentro de la jurisdicción del municipio, específicamente aquellas relacionadas con el uso y clasificación del suelo.

Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá. Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2007. Este informe presenta como insumo principal la caracterización geológica escala 1:10.0000 de las formaciones geológicas que afloran en el Valle de Aburrá y se realiza una descripción de las principales estructuras tectónicas que lo afectan.

Estudio geotécnico para cimentaciones proyecto "Obra Treinta & Cinco". Este documento contiene los resultados del análisis realizado por GEOTÉCNICA en el año 2018, para determinar las condiciones geotécnicas del diseño de cimentaciones y análisis de estabilidad de excavaciones abiertas del proyecto "Obra Treinta & Cinco", localizado en el costado norte del área de estudio.

Fotografías Aéreas. Se revisaron fotografías aéreas de diferentes décadas para evaluar la recurrencia de procesos morfodinámicos en el sector. Las siguientes fotografías se encuentran disponibles en el Centro de Información del Departamento Administrativo de Planeación del municipio de Medellín (Tabla 1).

Tabla 1. Cobertura de fotografías aéreas del área de estudio

Año	Vuelo - Faja	Número Fotos
1981	R827/13	263 - 264 - 265
1994	F28_65/1	76 -77-78
2004	F4S	843 - 844

En la siguiente Ilustración se presenta la fotografía del año 1981, en la cual se aprecia que en general hay una baja densidad de viviendas en toda el área; sin embargo, en el sector se identifican intervenciones urbanísticas para la época donde se localiza el Proyecto Obra Treinta & Cinco, el Edificio Sevilla y Almonte. Además, en dicha fotografía no se identifican procesos morfodinámicos en el lote de estudio ni en sus alrededores.

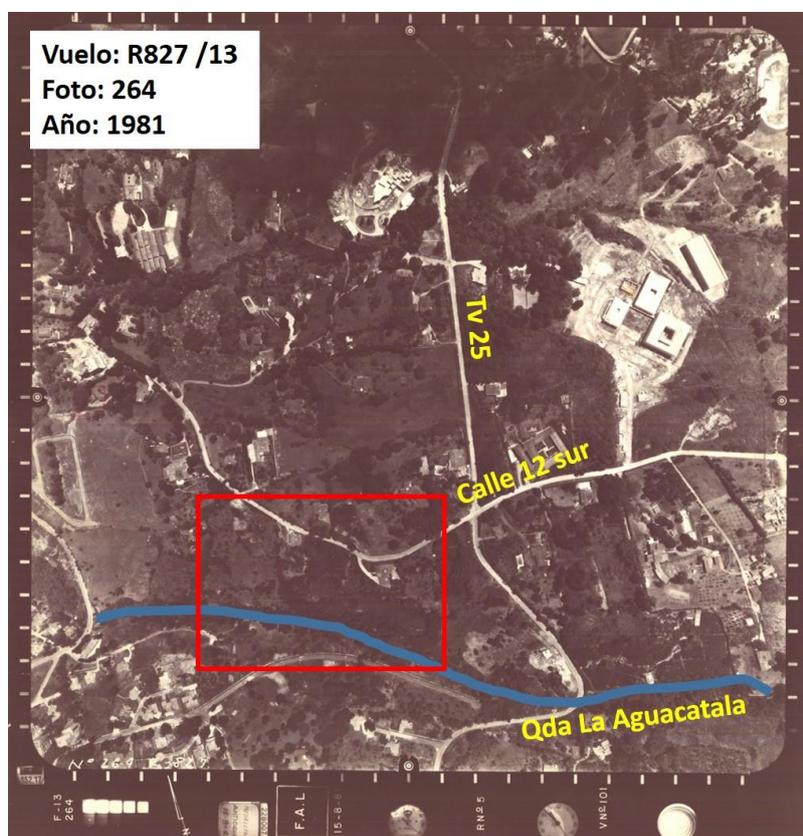


Ilustración 5. Fotografía aérea del año 1981, en rojo el área de interés

En el año 1994 (Ilustración 6) la densidad de construcciones se incrementa, especialmente sobre la Calle 12 Sur y al oriente de la Transversal 25; también está la urbanización sobre la margen izquierda de la quebrada La Aguacatala después de cruzar la Transversal 25. Con respecto al área de interés, no se evidencia la presencia de alguna intervención y tampoco se identifican procesos morfodinámicos.

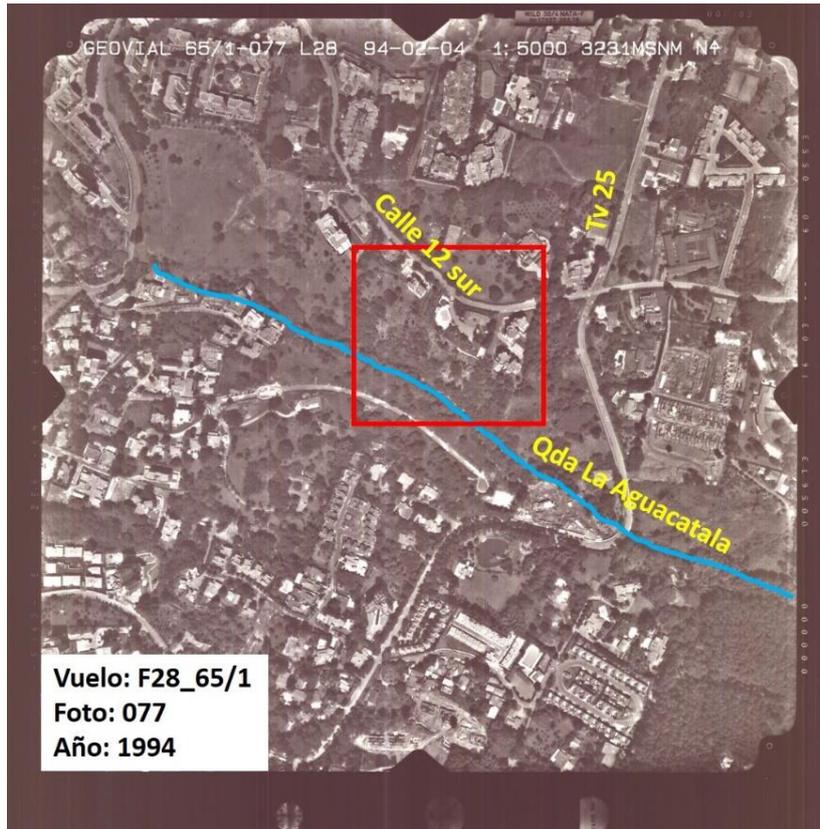


Ilustración 6. Fotografía aérea del año 1994, en rojo el área de interés

Para el año 2004 (Ilustración 7) la intensidad de construcciones se incrementa en toda la zona aledaña al área de interés y se identifica una infraestructura hacia el sur esta. En el año 2019 la configuración de la urbanización es muy similar a la de la década de 2000 (Ilustración 8). No se pueden apreciar procesos morfodinámicos posiblemente relacionado por la escala de los insumos, la densidad de vegetación y las intervenciones antrópicas.

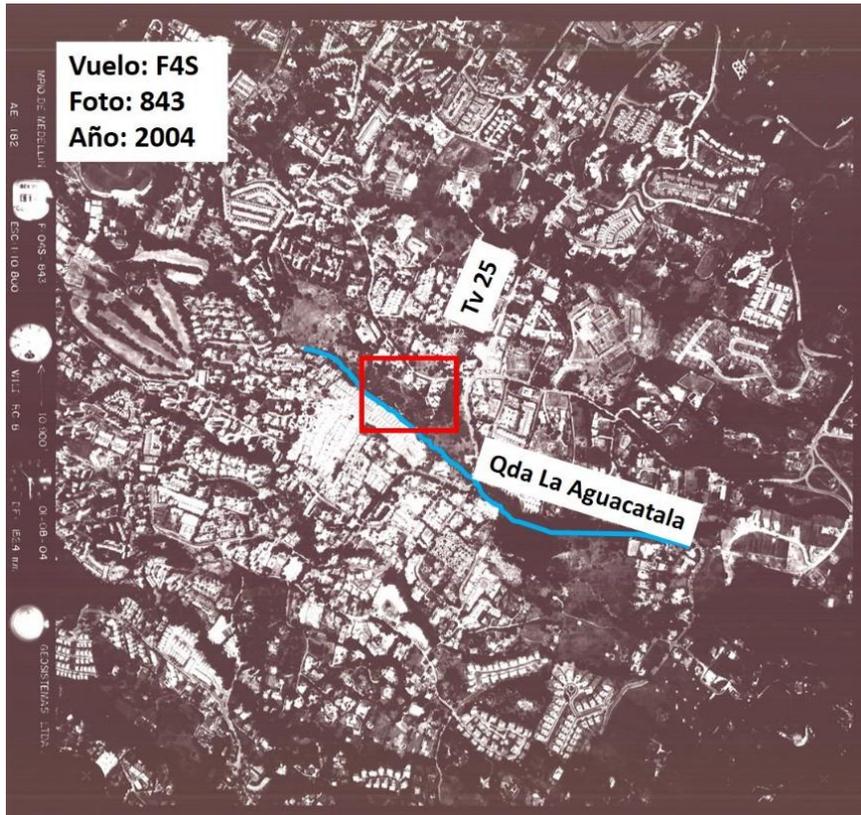


Ilustración 7. Fotografía aérea del año 2004, en rojo el área de interés

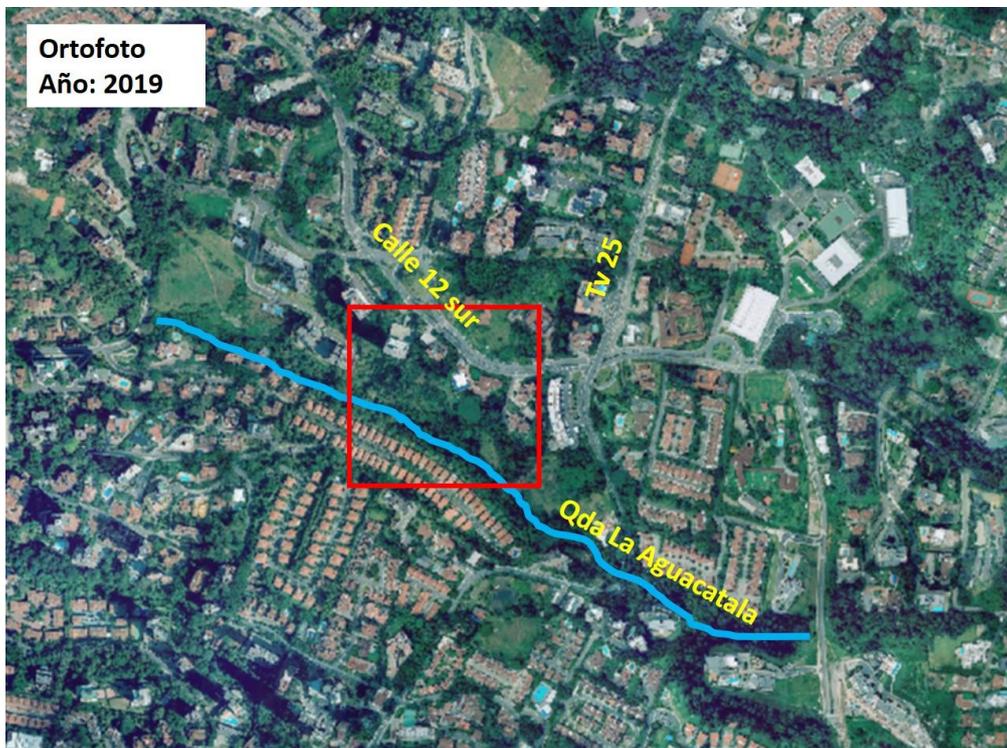


Ilustración 8. Fotografía aérea del año 2019, en rojo el área de interés

2.2. Geotécnia y estabilidad de taludes

2.2.1. Visita de reconocimiento

En primera instancia se realiza una visita inicial de reconocimiento a la zona objeto de investigación, en donde se inspeccionan las condiciones físicas, geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de los terrenos a evaluar, para caracterizarlos integralmente con miras a describir las diferentes problemáticas encontradas, determinando causas de los diferentes procesos encontrados y evaluando cualitativamente las posibles medidas de mitigación, las cuales serán confrontadas y ajustadas finalmente con análisis cuantitativos.

2.2.2. Diagnóstico geológico – geotécnico en la zona

En visitas de reconocimiento se identificó de manera preliminar el entorno geológico y geotécnico, para posteriormente definir el programa de exploración. De igual manera se realizó una identificación preliminar de posibles problemáticas que afecten el sector a analizar.

Se realiza una inspección detallada de la zona por parte del geólogo, observando afloramientos y escarpes donde se visualizan las formaciones superficiales, que se complementará con la definición de los perfiles estratigráficos locales, inferidos a partir de los sondeos exploratorios, lo que permitirá definir la distribución espacial de las diferentes formaciones geológicas que componen el subsuelo en el sector analizado.

2.2.3. Exploración de campo y toma de muestras

Exploración directa: El programa de exploración del subsuelo para conocer las condiciones geotécnicas se realizó de acuerdo con la extensión del sector, a la información existente y a las problemáticas detectadas, las cuales alcanzaron profundidades que permitían generar el modelo geológico – geotécnico para la evaluación de la estabilidad y determinación de la amenaza por movimientos en masa.

En los sondeos exploratorios se ejecutó el ensayo de penetración estándar y se recuperaron muestras remoldeadas tomadas con muestreador estándar "Split Spoon" y adicionalmente se obtuvieron muestras inalteradas con tubo de pared delgada "Shelby". Los materiales encontrados fueron debidamente caracterizados para elaborar columnas estratigráficas utilizadas posteriormente para correlacionar la distribución espacial de los materiales.

2.2.4. Resultados y análisis de laboratorio

Las muestras recuperadas en campo fueron clasificadas visualmente en el momento de ejecución de los sondeos para posteriormente ser enviadas al laboratorio, donde el geólogo responsable del proyecto, las revisó, evaluó, caracterizó y correlacionó con respecto a la información recuperada en campo, con la finalidad de definir las muestras representativas de cada unidad estratigráfica, a las cuales se les practicaron los ensayos de identificación de sus propiedades de estado (humedad natural – límites de consistencia – índice de plasticidad), y parámetros de resistencia (corte directo).

A las muestras alteradas se les realizaron ensayos de límites de plasticidad, granulometría y humedad natural, con el fin de obtener su clasificación con base en el sistema USCS.

2.2.5. Estratigrafía y definición de parámetros geomecánicos

Estratigrafía: Concluida la etapa de exploración del subsuelo, la revisión y agrupación de muestras y los ensayos de laboratorio, se ajustaron y complementaron los perfiles representativos de la estructura del terreno por medio de la definición de columnas estratigráficas en cada sondeo y su posterior correlación de acuerdo a las observaciones en campo y el criterio de los profesionales involucrados.

Parámetros Geomecánicos: La definición de estos parámetros se hizo a partir de la información recolectada de los sondeos exploratorios, del análisis de las muestras extraídas en cada uno de ellos y de las pruebas en campo y laboratorio como la prueba SPT adelantada in-situ y los ensayos de caracterización como granulometrías, límites de Atterberg, humedad natural y corte directo, de acuerdo con los estratos identificados. Al analizar esta información en conjunto es posible conocer las propiedades del suelo de manera aproximada.

Con la información anterior y con los resultados de los ensayos de laboratorio se procede a la definición de los parámetros para cada estrato, ajustándose además con los resultados de la modelación de la problemática que se presenta en campo y que se haya evidenciado durante los recorridos del equipo técnico. En cada uno de los casos se obtiene un valor promedio, mínimo y máximo de cohesión y ángulo de fricción para cada correlación utilizada, obteniendo a partir de su análisis los parámetros geomecánicos característicos para cada material.

2.2.6. Análisis de la amenaza

Definición de los modelos geológico- geotécnicos: Con base en la determinación de la estratigrafía para cada perfil seleccionado por parte del geólogo, se plasmaron las condiciones geomecánicas de los diferentes estratos que componen el sector, incluyendo

en el mismo, los parámetros anteriormente definidos, al igual que las condiciones de nivel freático.

Evaluación de la estabilidad: Para el análisis de estabilidad se utilizó el software Slide v 6.0 basado en la teoría del equilibrio límite, el cual calcula por diferentes métodos (Morgenstern and Price, Spencer, Janbu, Bishop, etc) los factores de seguridad más críticos para diferentes superficies de falla en el talud.

Para efectos de determinar las características topográficas de los taludes a evaluar, se levantaron secciones topográficas, sobre las cuales se plasmaron las condiciones estratigráficas y geomecánicas de los diferentes estratos que componen cada uno de los sectores. La estratigrafía se obtuvo a partir de los sondeos, los afloramientos y los resultados de laboratorio, y los parámetros utilizados para el análisis de estabilidad se determinaron de acuerdo con las consideraciones expuestas en el numeral de parámetros geomecánicos.

Análisis de la amenaza por estabilidad: Para el correcto desarrollo de la zonificación de amenaza por movimientos en masa se tuvo como principal criterio los parámetros establecidos en el decreto 1626 de 2015, basados en la información de detalle obtenida de la inspección de campo y la exploración del subsuelo para posteriormente calcular los factores de seguridad al deslizamiento de cada perfil. Estos modelos requirieron de información específica sobre estratificación, estructura, propiedades de resistencia de los materiales, ángulo de fricción interno, y modelos de simulación de niveles freáticos.

El valor límite para el factor de seguridad en el caso estático se tomó de acuerdo a lo planteado en el decreto municipal 1626 de 2015, en el cual se define que para valores inferiores a 1.2 el nivel de amenaza es alto, valores entre 1.2 y 1.5 se clasifican con nivel de amenaza media y factores de seguridad >1.5 se definen con nivel de amenaza bajo. Para los casos pseudoestático y saturado se parte de la probabilidad de falla, donde valores de $PF > 0.05/\text{año}$, indican un nivel de amenaza alto, valores de PF entre $0.0002/\text{año}$ y $0.05/\text{año}$ indican un nivel de amenaza medio y valores de $PF < 0.0002/\text{año}$ indican un nivel de amenaza bajo.

Los factores detonantes considerados para los análisis de amenaza son la lluvia y el sismo:

✓ Lluvia

Teniendo en cuenta las recomendaciones de la guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, elaborada por el Servicio Geológico Colombiano, en razón de que en los deslizamientos la posición del nivel freático es generalmente un condicionante de la inestabilidad, resulta clave calcular la profundidad de la tabla de agua, asociada a un cierto periodo de retorno, para el cual se considera que ocurrirá la falla. La experiencia sugiere utilizar un periodo de retorno de 20 años.

Para estimar la variación de la posición del nivel freático, asociado al periodo de retorno recomendado (20 años), esta misma guía presenta una metodología que busca estimar esta posición, a continuación, se presentan los pasos sugeridos para esto:

- Identificar un valor promedio de número de curva (CN) de la unidad geotécnica por analizar, donde se muestran los valores para diferentes grupos hidrológicos de suelo y usos de estos para condiciones de humedad antecedente normal (AMC II), a partir de la tabla siguiente (Tabla 2).

Tabla 2. de Curva para los diferentes tipos de cobertura.

Descripción de usos del suelo	Grupo Hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Zona de parqueo pavimentada, Techada.	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentos con bordillos y alcantarillas	98	98	98	98
Afirmado	76	85	89	91
Suelo compactado	72	82	87	89
Cultivos (Cosecha agrícola) del suelo:				
Sin tratamientos de conservación (Sin terrazas)	72	81	88	91
Con tratamientos de conservación (Terrazas, Contornos)	62	71	78	81
Pastos o gama de suelos				
Pobre (< 50% cobertura de suelo por pastos muy continuos)	68	79	86	89
Buena (50-75% Cobertura del suelo por pastos poco continuos)	39	61	74	80
Prado (pasto, sin pastar y corto para follaje)	30	58	71	78
Rastrojo (bueno, >75% cobertura de suelo)	30	48	65	73
Bosques y selvas				
Pobre (árboles pequeños – rastrojo destruido después de quema o rozada)	45	66	77	83
Regular (rozado, pero sin quema, algunos rastrojos)	36	60	73	79
Bueno (sin rozado, cobertura de suelo rastrojo)	30	55	70	77
Espacios abiertos (pastos, parques, canchas de golf, cementerios, etc.)				
Regular (cobertura de pastos 50-75% del área)	49	69	79	84
Bueno (cobertura de pastos >75% del área)	39	61	74	80
Zonas comerciales y de negocios (85% impermeable)	89	92	94	95
Zonas industriales (72% impermeable)	81	88	91	93
Áreas residenciales:				
Lotes de 505 m ² , cerca de 65% impermeable	77	85	90	92
Lotes de 1011 m ² , cerca de 38% impermeable	61	75	83	87
Lotes de 2023 m ² , cerca de 25% impermeable	54	70	80	85
Lotes de 4046 m ² , cerca de 20% impermeable	51	68	79	84

Teniendo en cuenta la siguiente clasificación hidrológica de los suelos:

Grupo A: Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.

Grupo B: Suelos poco profundos depositados por el viento, suelos francoarenosos.

Grupo C: Suelos francoarcillosos, francoarenosos poco profundos, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con alto contenido de arcillas.

Grupo D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

- Calcular la retención potencial máxima S como:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Donde:

S está en milímetros y CN corresponde al número de curva previamente seleccionado como representativo de la zona para la condición de humedad antecedente II. Se considera suficiente en este caso utilizar el número de curva para la condición II de humedad antecedente para todo el registro de precipitación. Como se recordará, el método del Soil Conservation Service considera números de curva para tres condiciones de humedad antecedente (I, II y III), que para las estaciones climáticas en las cuales hay crecimiento de vegetación se determinan según la precipitación acumulada de los cinco días previos al del análisis: inferior a 35 mm, entre 35 y 53 mm, o superior a 35 mm, respectivamente.

- Calcular, a partir de los registros de precipitación diaria (P), la precipitación infiltrada en 24 horas (P_i), a partir de la ecuación del método lluvia-escorrentía del SCS.
- Acumular los valores diarios de precipitación infiltrada para cada año calendario del registro y así obtener el valor de precipitación infiltrada total anual.
- Calcular la precipitación infiltrada media multianual (\bar{x}), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación (CV).
- Anadir, para el análisis de amenaza, alrededor de la profundidad del nivel freático medio la variabilidad de la lluvia infiltrada en función de la desviación estándar, expresada en términos del coeficiente de variación por la media de la profundidad del nivel freático.
- En razón de que para el análisis básico de la amenaza a escala 1:5000 se requiere asumir:
- la profundidad del nivel freático correspondiente a una lluvia con periodo de retorno de 20 años y teniendo en cuenta que aquí no se exige realizar modelación hidrogeológica alguna, deberá tomarse dicho valor de precipitación a partir de las curvas IDF. Para un periodo de retorno de 20 años y una duración de 24 horas;

calcular la precipitación infiltrable correspondiente, asumiendo una condición antecedente de humedad (II), deducir esa altura de precipitación a la profundidad del nivel freático supuesta como media y restar 1,65 veces la desviación estándar (σ) del análisis de acumulados anuales de precipitación infiltrable. Este análisis se hace suponiendo una variación a largo plazo del nivel freático que sigue una distribución normal con un periodo de retorno de 20 años, así que la profundidad del nivel freático para dicho periodo se puede estimar con una ecuación y en la siguiente ilustración:

$$Pf_{20} = (\bar{P}_f - 1,65 CV \bar{P}_f) - (I_{i20} * 24)$$

Donde

Pf_{20} corresponde a la profundidad del nivel freático asociado a una lluvia de 20 años de periodo de retorno, en milímetros.

\bar{P}_f corresponde a la profundidad media del nivel freático, en milímetros.

$CV \bar{P}_f$ corresponde a la desviación estándar asignada a la variación del nivel freático, expresada en términos del coeficiente de variación de los acumulados anuales de precipitación infiltrada, en milímetros.

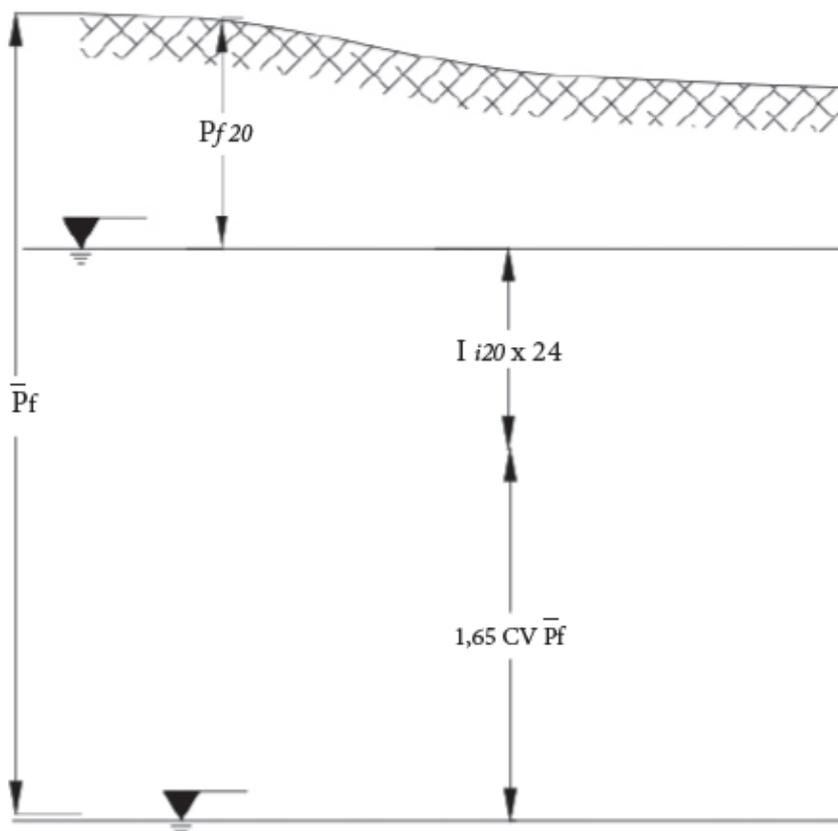


Ilustración 9. Representación de los términos utilizados para calcular la profundidad del nivel freático asociada a un periodo de retorno de 20 años.

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

I_{i20} : corresponde a la intensidad de la lluvia infiltrada diaria para un periodo de retorno de 20 años, de acuerdo con las curvas IDF estimadas para la localidad, también en milímetros por hora, siendo 24 el número de horas al día para calcular la precipitación correspondiente acumulada a diario.

Para este análisis se utiliza la IDF de la estación la Ayurá de EPM, obteniendo los siguientes parámetros:

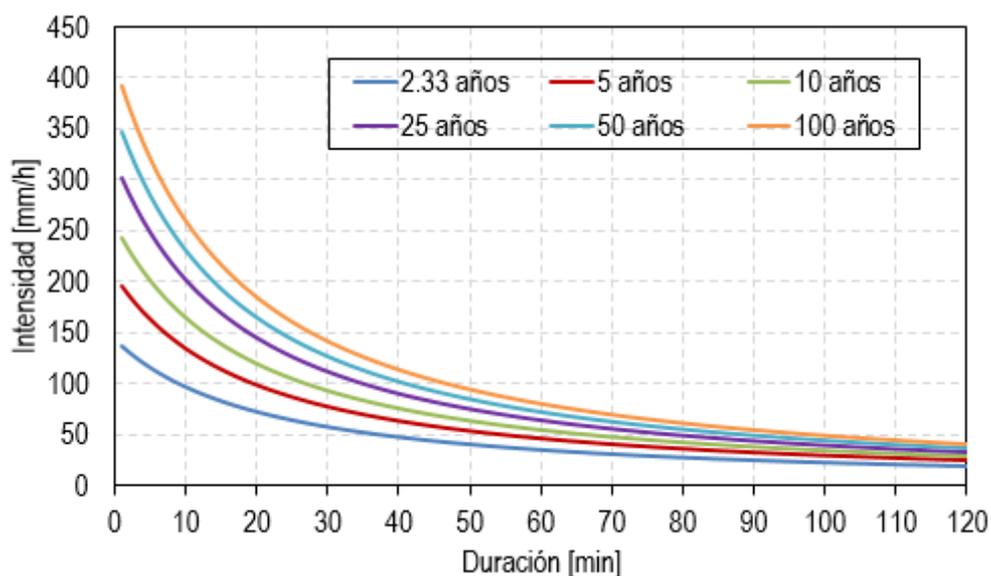


Ilustración 10. Curva IDF de la estación Ayurá

Para P_f , de acuerdo con la guía, en ausencia de información más precisa, se puede considerar igual a la profundidad medida en la exploración geotécnica de campo. En aquellos casos en que se encuentre a gran profundidad y no se logre medir, se asumirá de manera conservadora a la profundidad explorada.

CV P_f : tomando los datos de la estación Ayurá, se obtiene un valor de 0.18.

I_{i20} : tomando la IDF de la estación Ayurá, se obtiene un valor de 1.89 mm/h.

✓ Sismo

Dado que se utilizan los datos de aceleración presentados en la NRS10, de acuerdo con esta el sismo de diseño tiene un periodo de retorno de 475 años.

2.2.7. Distancia de viaje o propagación – *runout* -

La propagación o distancia de viaje (*runout*) representa el área afectada por la masa de un deslizamiento, considerando que no solo es importante conocer y entender el lugar donde se desprende un movimiento en masa si no contemplar las posibles zonas afectadas por el desplazamiento y depositación de esos materiales.

Para este análisis se utiliza el modelo numérico FLOW-R desarrollado por Horton et al. (2013) para evaluar flujos de escombros, pero ha sido relevante en el entendimiento de otros procesos como caída de rocas, inundaciones y avalanchas de nieve, y además ha sido ampliamente usado para estimar la trayectoria de una masa desplazada.

Este algoritmo se basa en el comportamiento de la energía de las partículas, que define si la parte de un flujo puede alcanzar potencialmente la próxima celda del DEM. De esta manera, se controla la distancia máxima por el flujo y reduce la divergencia o expansión lateral (cuando una celda del borde de la propagación no puede ser alcanzada por falta de energía). En este algoritmo también se incluye la dirección de flujo pues una celda que no puede ser alcanzada por falta de energía tiene una probabilidad de cero (Horton et al., 2013; Jaboyedoff et al., 2012).

El resultado del modelo es el área total que potencialmente puede ser alcanzada por un flujo con una susceptibilidad asociada; para este informe, se asume que el área afectada tiene el mismo grado de amenaza que el área adyacente desde donde se desprende el material.

3. Aspectos geológicos

3.1. Geología regional

Regionalmente el área del proyecto está caracterizada por la presencia de cuerpos metamórficos y depósitos recientes. El basamento rocoso del sector está constituido por la Metabasita del Picacho y la Anfibolita de Medellín. Sobre estas rocas se han depositado materiales recientes de edad cuaternaria de diferentes características, denominados depósitos de flujos de lodos y/o escombros.

A continuación, se describen las unidades litológicas que enmarcan el contexto regional del área de interés, y en la siguiente Ilustración se presenta su distribución espacial y la relación con las estructuras regionales de acuerdo con la propuesta de AMVA (2007).

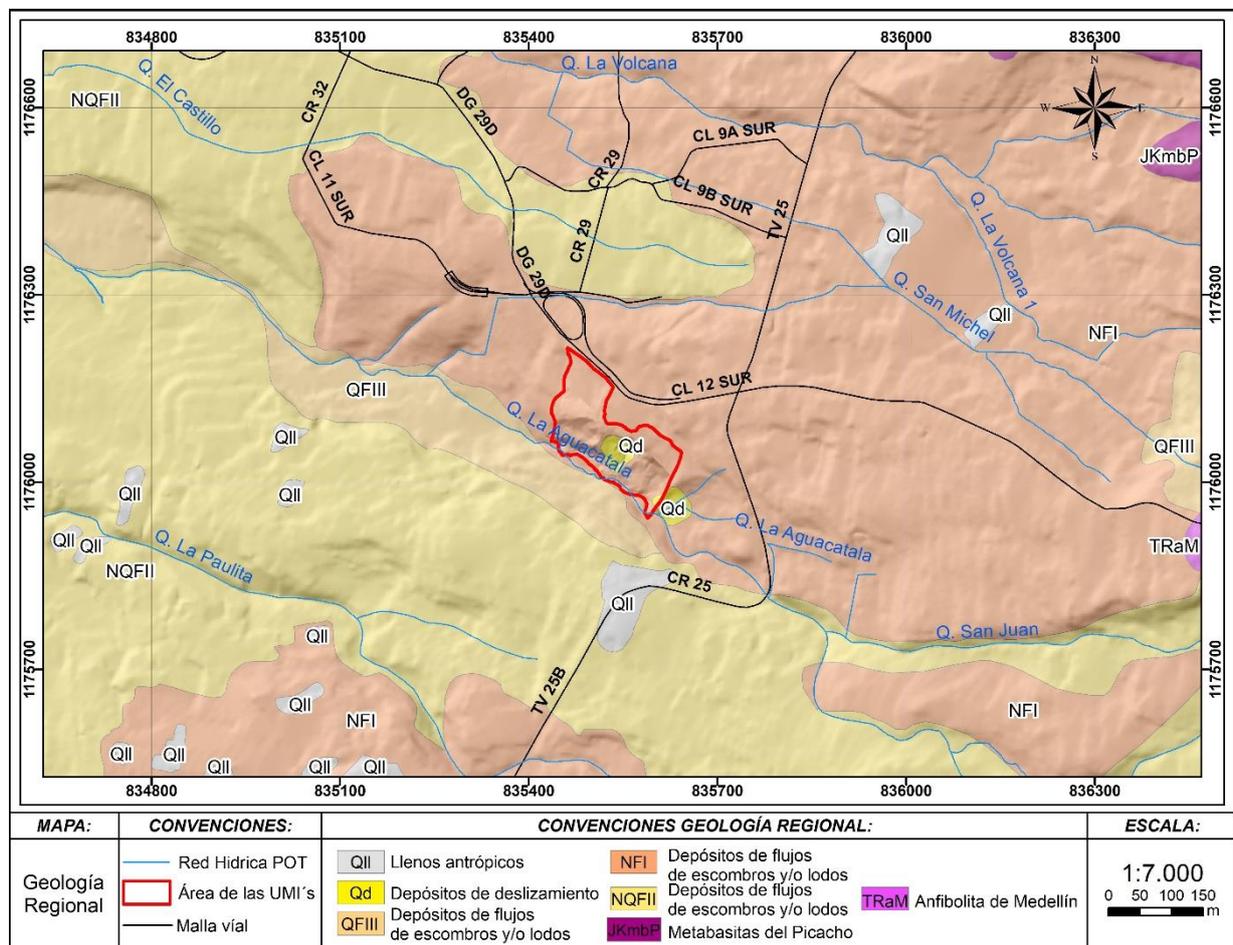


Ilustración 11. Mapa geológico regional (AMVA, 2007)

Metagabro del Picacho (JKmbP). Este conjunto de rocas ha sufrido un metamorfismo dinámico y están afectadas por alteración hidrotermal. Estas rocas tienen un protolito ígneo, y se caracterizan por un bandeamiento composicional definido por capas centimétricas a decimétricas, unas ricas en minerales ferromagnesianos y otras ricas en minerales félsicos; también se puede presentar un bandeamiento estructural, con

alternancia de bandas de grano grueso a muy grueso con bandas de grano fino. Los minerales principales son clinopiroxeno y plagioclasa; los minerales secundarios son anfíboles, plagioclasa y en menor cantidad cuarzo, epidota y opacos (Correa et al., 2005). Se localiza en el extremo nororiental de la zona de interés como un cuerpo que se extiende al norte sobre la ladera.

De acuerdo con AMVA (2007) en el municipio de Medellín, aparecen como cantos y bloques en los depósitos de vertiente y en algunos depósitos aluviotorrenciales, también en forma de ventanas erosivas. El perfil de meteorización está caracterizado por un saprolito altamente meteorizado y en muy pocas ocasiones se encuentra la roca en estado fresco. A continuación, se describen las principales características para el municipio de Medellín:

Horizonte VI: Suelo residual con aproximadamente 1 m de espesor.

Horizonte V: Suelo altamente meteorizado, con aproximadamente 3 m de espesor; color gris claro a blanco, textura limosa, consistencia muy baja, de baja plasticidad, cementación débil.

Horizonte IV: Suelo altamente meteorizado, con un espesor de dos metros, color gris claro con variaciones a ocre claro, exhibe una consistencia baja, baja plasticidad y una cementación moderada, se observa la textura de la roca.

Horizonte III: Roca moderadamente meteorizada, de color crema, con textura limosa, de consistencia firme, con baja plasticidad y cementación moderada.

El AMVA (2007) no reporta descripción en el municipio de Medellín sobre los Horizontes II y I, donde la roca se encuentra parcialmente meteorizada.

Anfibolita de Medellín (TRaM). Cuerpo anfibolítico de color gris oscuro y puede variar a gris – blanco, de grano medio a fino con estructuras euhedrales, compuesta principalmente por hornblenda y feldespatos, donde la hornblenda presenta mayor abundancia en comparación con el feldespato. Estos minerales tienen una orientación originados por un metamorfismo regional. Muestra alteraciones superficiales de epidota y huellas de disolución. Desarrolla suelos residuales con espesores que alcanzan los 20 m, caracterizados por un material limoso, de color amarillento a amarillo rojizo, cubiertos por depósitos de vertiente, adicionalmente este suelo gradualmente cambia a un saprolito limoarenoso de color gris verdoso con láminas blancas, el cual presenta una estructura heredada de la roca parental (AMVA, 2007). Esta unidad se localiza como una pequeña ventana al oriente del polígono de interés.

El perfil de meteorización de la Anfibolita de Medellín descrito por AMVA (2007) para el municipio de Medellín, se presenta a continuación:

Horizonte VI: corresponde a un suelo residual de 40 cm de espesor, color gris claro a blanco, sin plasticidad y débilmente cementado.

Horizonte V: Roca extremadamente meteorizada con un espesor promedio de 1.50 m, de color blanco moteado de negro, deleznable, sin plasticidad, débilmente cementado.

Horizonte IV: Roca altamente meteorizada, de color gris moteado a blanco, disgregable, sin plasticidad.

El AMVA (2007) no reporta descripción en el municipio de Medellín los Horizontes de roca parcialmente meteorizados (I, II y III).

Depósitos de vertiente. Se diferencian los depósitos regionales que cubren gran parte de las laderas de la ciudad de Medellín de los depósitos de deslizamientos recientes y puntuales que se conservan sobre el terreno.

- Flujos de escombros y/o lodos (NFI-FIII-NQFII): corresponden a depósitos de edad cuaternaria conformados por depósitos de vertiente de varias generaciones, tipo flujos de lodo y escombros compuestos por bloques de roca en diferentes estados de meteorización, con tamaños heterométricos, de formas angulares a subangulares, embebidos en una matriz de limos y arcillas de tonalidad café amarillenta. Estos depósitos están asociados a antiguos deslizamientos ocurridos en las partes medias y altas de las laderas, producto de movimientos en masa que se desplazaron hacia las zonas bajas y se depositaron en las zonas de menor pendiente (AMVA, 2007).

Este conjunto de depósitos se encuentra distribuido en toda la zona aledaña al área de interés, y cubren gran parte de la ladera suroccidental de la ciudad.

- Depósito de deslizamiento (Qd): corresponden a depósitos de edad cuaternaria conformados asociados a antiguos deslizamientos ocurridos en las partes medias y altas de las laderas, los cuales se desplazaron hacia las zonas bajas y se depositaron en las zonas de menor pendiente (AMVA, 2007).

Llenos Antrópicos. Son depósitos producto de la actividad urbanística y constructiva que presenta una región en crecimiento, generando la acumulación de escombros, materiales de rezaga, materia orgánica y basuras. Los llenos antrópicos están dispersos por toda el área de estudio, además que tienen diferentes tamaños y formas.

3.2. Tectónica regional

El Valle de Aburrá está enmarcado en un complejo ambiente tectónico, cuya expresión en superficie está dada por fallas y lineamientos, que tienen diferentes direcciones y las cuales controlan el curso de los drenajes, favorecen los cambios abruptos en las pendientes, además que están asociadas con rocas altamente fracturadas y zonas de

movimientos en masa. El área de interés no presenta una marcada influencia estructural a nivel regional.

3.3. Geomorfología regional

De acuerdo con la Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá, realizada en el año 2007, la zona evaluada se localiza dentro de la unidad de paisaje denominada Valle Medio. En cada uno de los valles se reconocieron las macrounidades geomorfológicas denominadas como Bloques, los cuales muestran condiciones morfológicas aproximadamente homogéneas y que se distinguen, en forma clara, de los adyacentes.

La zona evaluada se localiza en el denominado *Bloque Poblado Envigado*, limitada al sur por la quebrada Ayurá, al oeste por un pequeño escarpe erosivo asociada al frente de los depósitos generados al interior de la unidad y al norte por la divisoria de aguas con la cuenca de la quebrada Santa Elena. Está caracterizada por laderas irregulares, de forma cóncava, que desciende desde los 2650 hasta los 1550 msnm. Se identifican extensas superficies suaves en depósito de vertiente con diferentes alturas y grados de incisión, ubicadas en la parte inferior de las vertientes (AMVA, 2007).

En este contexto y siguiendo la jerarquización geomorfológica, el AMVA (2007) define las siguientes unidades geomorfológicas en el área de interés (Ilustración 12):

Lomos (L). Son filos alargados y estrechos con orientación hacia el eje fluvial principal. Se encuentran ubicados hacia el Nororiente del área de interés.

Superficie suave por depositación moderadamente incisadas (SSDMI). son geoformas continuas de inclinación suave a moderadas y moldeadas sobre depósitos de vertiente de tipo de flujos de lodos y escombros, presentando un grado de incisión moderado. Sobre esta geoforma se encuentra localizado el polígono de estudio.

Superficies suaves en depósitos altamente incisados (SSDAI). Corresponde a la geoforma localizada hacia el Norte del área de estudio. Este tipo de geoformas se caracterizan por ser continuas de inclinación suave a moderada y modeladas sobre depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros, presentando un grado de incisión alto. Este tipo de geoforma se localiza hacia el Norte del área de estudio.

Superficies suaves en depósitos poco incisados (SSDPI). Son geoformas continuas de inclinación suave a moderada y modeladas sobre depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros, presentando un grado de incisión bajo. Se localiza como una pequeña ventana hacia el Noroccidente del polígono de interés.

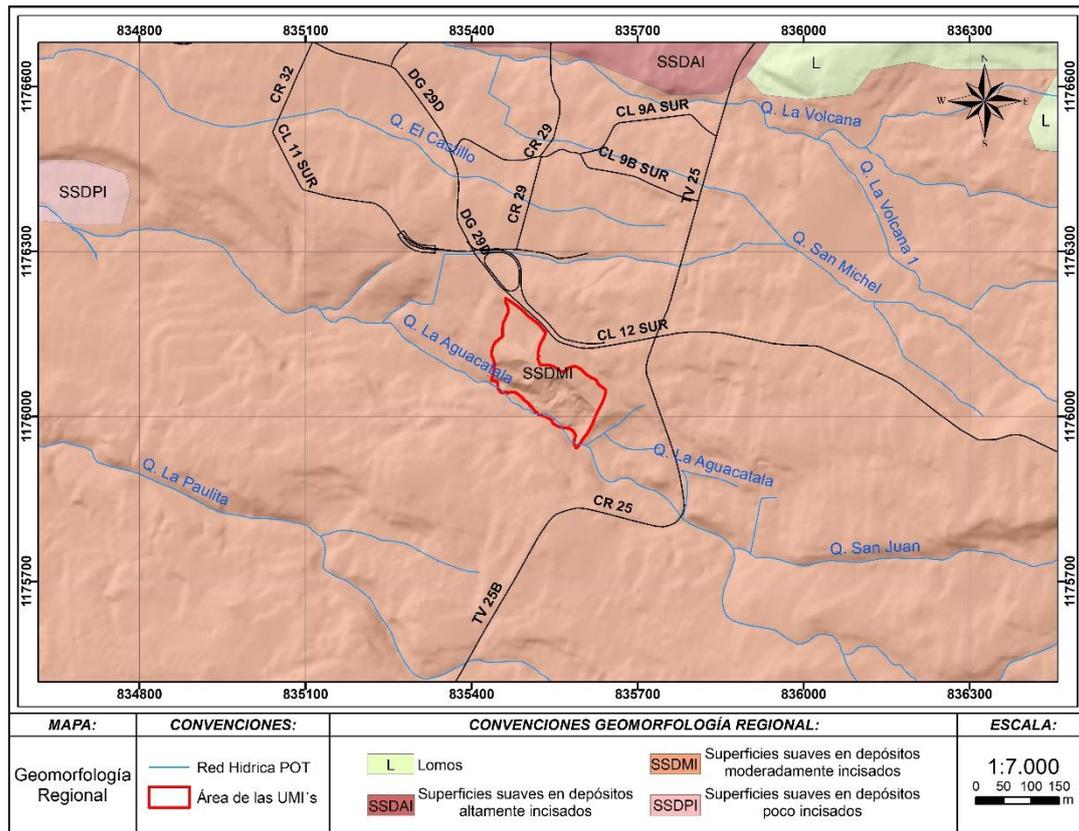


Ilustración 12. Mapa geomorfológico regional (AMVA, 2007)

3.4. Delimitación de la Unidad Morfodinámica Independiente (UMI)

Teniendo en cuenta que la unidad morfodinámica se define como aquella porción de terreno cuya estabilidad no depende del comportamiento de las zonas vecinas y complementariamente el caso inverso, es decir que presenta un comportamiento independiente de las unidades adyacentes. La delimitación de estas unidades morfodinámicas se fundamenta en la combinación de aspectos geomorfológicos e hidráulicos (Acuerdo Metropolitano 09 de 2012) como son las divisorias de aguas, drenajes o expresiones geomorfológicas. La unidad o unidades morfodinámicas pueden por lo general ocupar áreas de terreno mayor que el polígono de estudio, por lo cual será necesario evaluar las condiciones geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de toda la unidad para determinar las afectaciones por fuera del polígono estudiado cuya influencia repercute negativamente en la estabilidad del mismo (Acuerdo Metropolitano 09 de 2012).

Para el caso del área de estudio, se definieron tres unidades morfodinámicas independientes como se presentan en la siguiente Ilustración, definidas a partir de criterios geomorfológicos y con base en algunas de las intervenciones antrópicas que actúan como barrera, dado que geológicamente es una zona homogénea; cada unidad definida no se va a ver afectada si ocurre un deslizamiento en otra unidad o si ocurre un deslizamiento al interior de éstas no va a afectar a sus vecinas.

Vale la pena aclarar que esta delimitación abarca en su totalidad el lote de interés y se amplían los límites del área estudio, por lo que a partir de este momento se denomina como área de estudio al área que incluye el lote y las UMIS. A continuación, se describen los límites y los rasgos que permitieron definirlas.

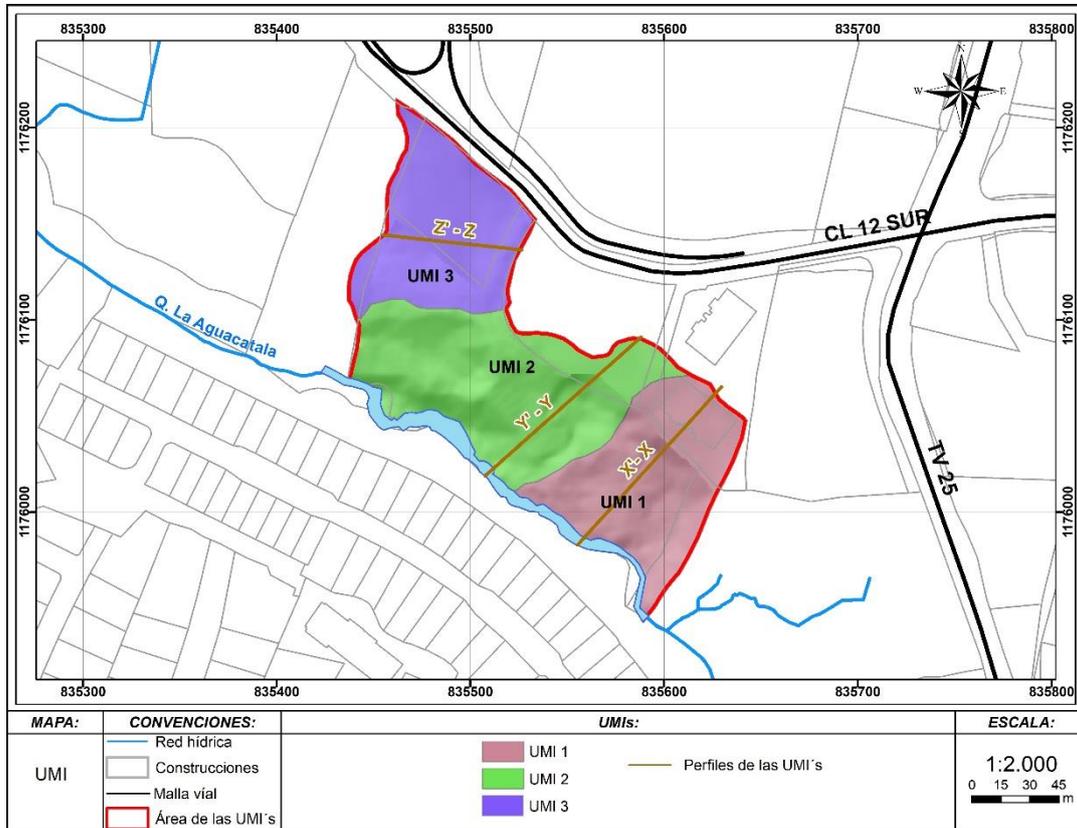


Ilustración 13. Área de estudio y UMI's definidas

Unidad Morfodinámica Independiente - UMI 1. Se localiza en la porción suroriental del área de estudio y el límite está definido al oriente y occidente por dos topes casi paralelos entre sí con dirección nororiente – suroccidente que llegan hasta la quebrada La Aguacatala; al suroccidente la UMI está limitada por el cauce de la quebrada La Aguacatala y al nororiente por una torre de la urbanización Almonte donde se identifica un cambio en la pendiente que tiene la ladera en el sector. Se considera que cualquier proceso que pueda ocurrir dentro de este perímetro no afectará las áreas vecinas; el perfil geológico característico se presenta en la siguiente Ilustración y su localización en planta está en la Ilustración 17.

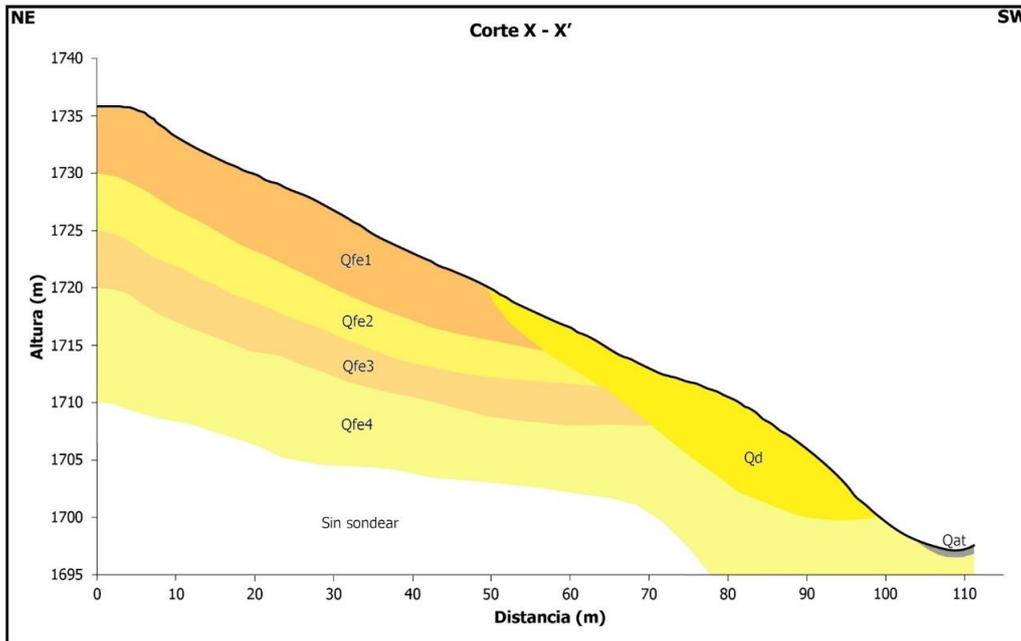


Ilustración 14. Perfil geológico generalizado de la UMI 1

Unidad Morfodinámica Independiente - UMI 2. Representa el sector central del área de estudio, está en contacto con la UMI 1 por el tope o alto topográfico de dirección NW – SE, se extiende por el cauce de la quebrada Aguacatala hasta un nuevo alto topográfico al occidente que también marca el límite del lote de interés hasta la parte alta de la ladera escarpada cuyo aspecto general tiene tendencia al suroccidente, para terminar en lote vecino por la zona verde contigua al actual parqueadero y donde se desarrollará parte del proyecto Obra Treinta & Cinco. Se considera que cualquier proceso que pueda ocurrir dentro de este perímetro no afectará las áreas vecinas; el perfil geológico característico se presenta en la siguiente Ilustración y su localización en planta está en la Ilustración 17.

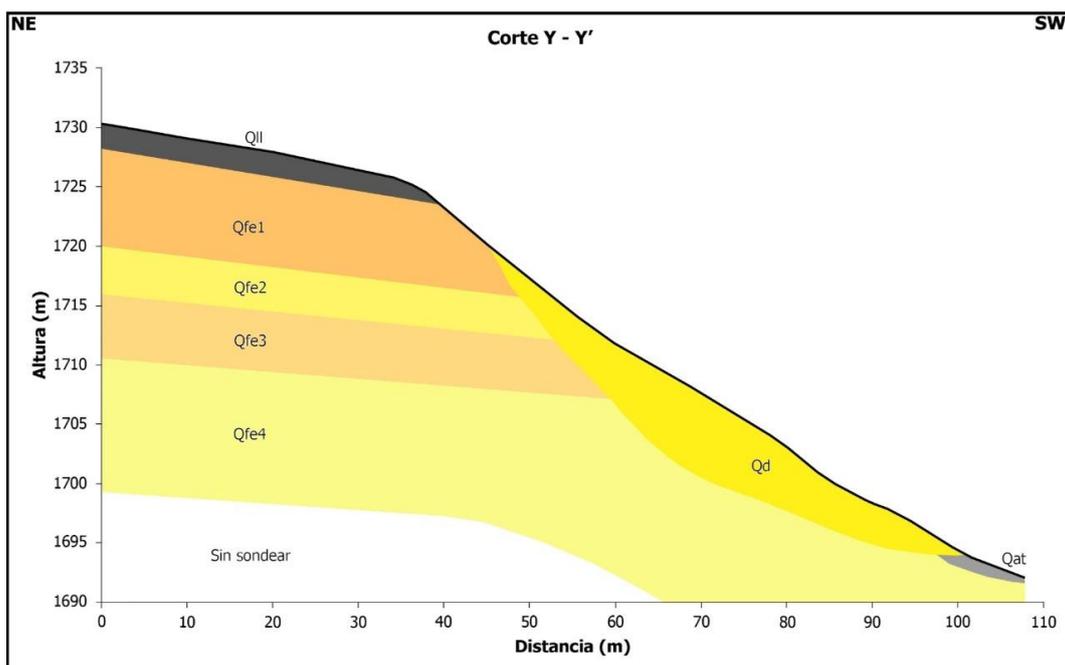


Ilustración 15. Perfil geológico generalizado de la UMI 2

Unidad Morfodinámica Independiente - UMI 3. Se localiza en la parte noroccidental del área de estudio; el límite oriental está marcado por el muro divisorio entre el lote de interés y del proyecto Obra Treinta & Cinco, está en contacto con la UMI 2 por la parte alta de la ladera con aspecto al suroccidente, y continua al norte por un cambio en la pendiente hasta llegar a la Calle 12 sur por donde se extiende hasta encontrar nuevamente el muro divisorio. Se considera que cualquier proceso que pueda ocurrir dentro de este perímetro no afectará las áreas vecinas; el perfil geológico característico se presenta en la siguiente Ilustración y su localización en planta está en la Ilustración 17.

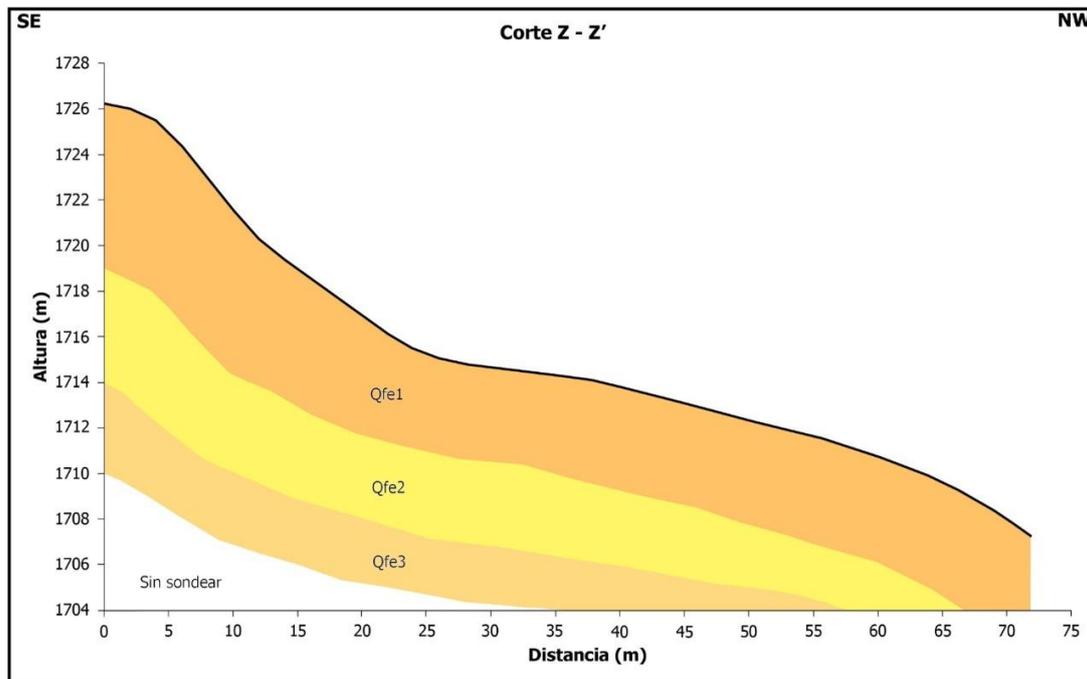


Ilustración 16. Perfil geológico generalizado de la UMI 3

3.5. Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI)

En el área de estudio se identifican a partir de los recorridos de campo y los sondeos exploratorios cuatro eventos de flujos de lodos y escombros, que varían en composición, textura y color. En la siguiente Ilustración se presenta su distribución y se localizan los cortes asociados a los perfiles geológicos presentados en el capítulo anterior.

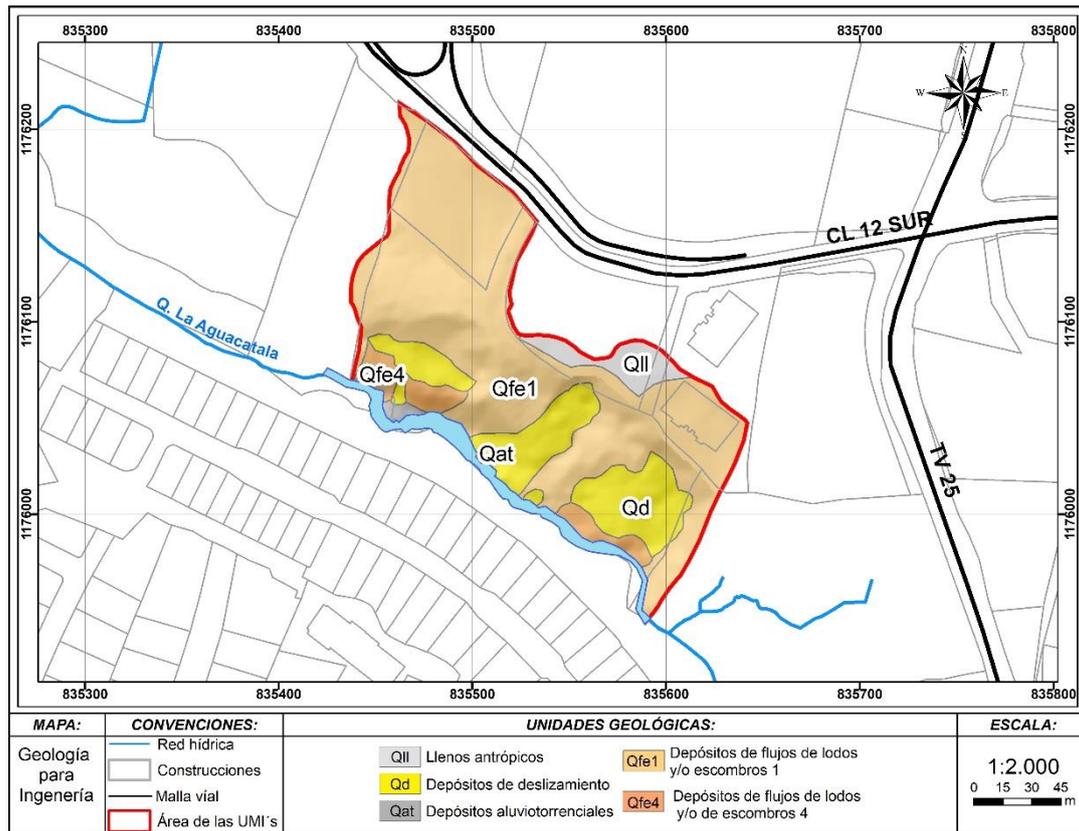
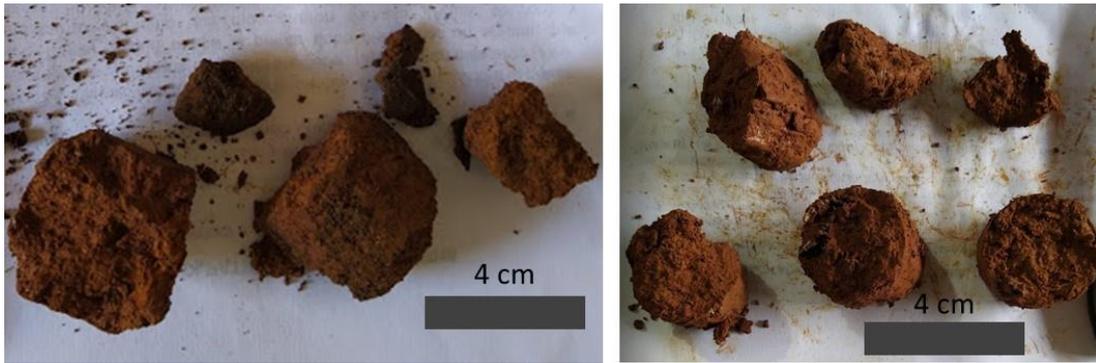


Ilustración 17. Mapa de Unidades Geológicas para Ingeniería

Se denomina como flujo 1 el evento más superficial y que cubre la mayor parte del área de estudio, y se sigue el orden consecutivo a medida que se profundiza. En los afloramientos disponibles en la margen derecha de la quebrada La Aguacatala y en caminos internos dentro del área de estudio se aprecia el flujo de lodos y/o escombros 4 y 1, respectivamente. Adicionalmente, en dichos afloramientos es frecuente encontrar el horizonte orgánico, el cual es caracterizado por su coloración negra, presencia de raíces y pocos clastos. Siguiendo las observaciones de campo, los flujos de lodos y/o escombros se interpretan como una sucesión de estos, cuya descripción se presenta a continuación.

Flujos de lodos y/o escombros 1: Se caracteriza por ser un depósito con coloración naranja a amarillenta y por su matriz de textura arcillo-limosa. La relación matriz/bloque es 90/10; los bloques se distinguen por sus tamaños milimétricos a centimétricos, por su alta meteorización no se identifica la composición y tiene forma subangular; el espesor varía entre 2 y 11 metros, el cual es definido a partir de las observaciones de campo (Fotografía 1) y los sondeos directos S2, P4, P6 y P8.



Fotografía 1. Flujo de lodos y/o escombros 1 en las perforaciones 4 y 8

Flujos de lodos y/o escombros 2: Material heterogéneo caracterizado por su color pardo rojizo con presencia de pintas blancas y negras, y por su matriz arcillosa plástica que presenta fuerte oxidación. La relación matriz/bloques varía entre 70/30 y 80/20; los fragmentos de roca presentan una forma subangular y angular, son de tamaño centimétricos y cuya composición no es posible identificar debido a su meteorización, sin embargo, se conserva la textura de la roca original. Tiene un espesor entre 3 y 5 m, definido a partir de los sondeos exploratorios S2, P4, P6 y P8 (Fotografía 2).



Fotografía 2. Flujo de lodos y/o escombros 2 en las perforaciones 4 y 8

Flujos de lodos y/o escombros 3: Depósito compuesto por una matriz de color amarillenta – rojiza, de carácter plástica y de textura que varía de arcillosa a limo-arcillosa. La relación de matriz/bloque es 80/20; los fragmentos de roca son de tamaños centimétricos, formas subangulares y pertenecen a rocas de origen metamórfico, que por su grado de meteorización (IC y IB) no es posible identificar el contenido mineralógico, sin embargo, en la perforación 8 se evidenciaron clastos de anfibolita. Tiene un espesor entre 1 y 5 m, el cual es definido en los sondeos exploratorios S2, P4, P6 y P8 (Fotografía 3).



Fotografía 3. Flujo de lodos y/o escombros 3 en las perforaciones 4 y 8

Flujo de lodos y/o escombros 4: Este depósito se caracteriza por presentar una matriz de coloración gris verdosa de textura arcillosa y de oxidación muy leve a moderada. Además, por la presencia de fragmentos de roca subangulares de rocas metamórficas como anfibolita (principalmente) y esquistos, cuyos tamaños son centimétricos y métricos. La relación de bloques/matriz varía entre 60/40 y 70/30. El espesor de este depósito varía entre 1.5 y 12 metros, este es definido a partir de los afloramientos identificados sobre la quebrada La Aguacatala y los sondeos directos S2, P1, P2, P4, P5 y P7. El grado de consolidación de este depósito varía, llegando a ser compacto pero fácilmente rompible en las muestras más profundas de P2 y P5, es decir, se presenta ligeramente consolidado (Fotografía 4).

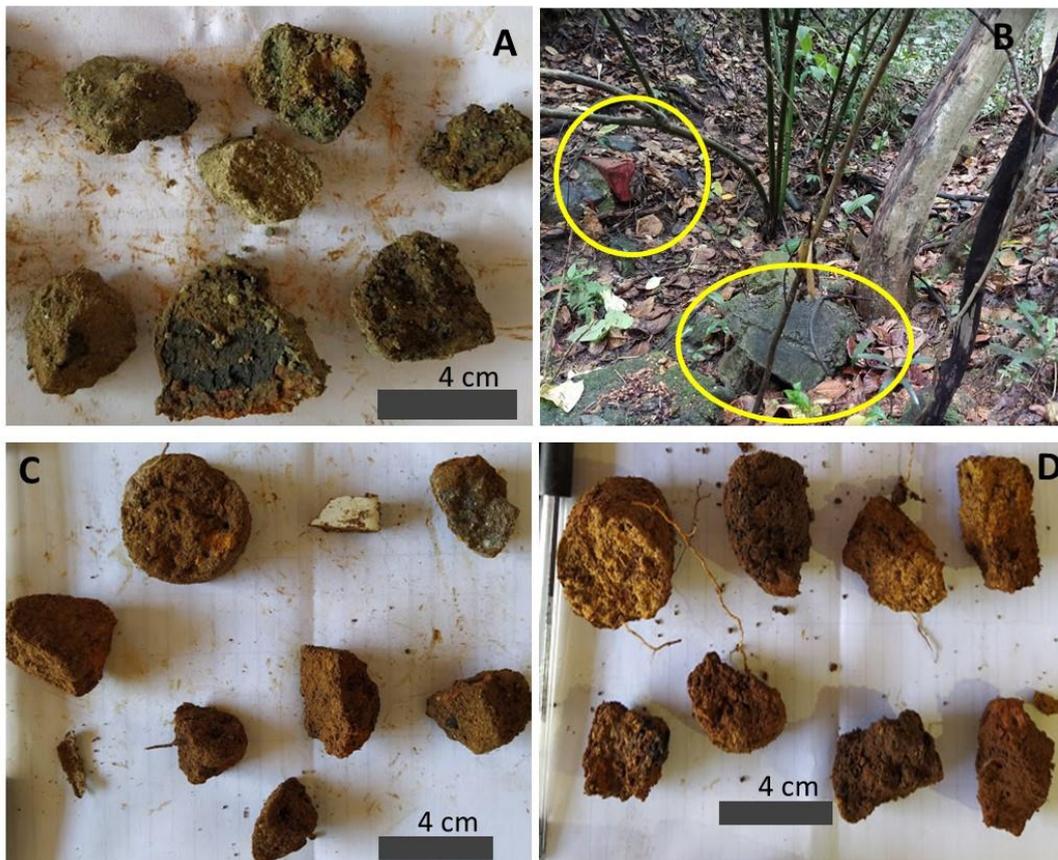


Fotografía 4. Flujo de lodos y/o escombros 4 en afloramiento de la quebrada y perforaciones

Depósito de deslizamiento: corresponden a la acumulación de materiales producto de movimientos de masa recientes ocurridos en los terrenos inclinados, generados por una

combinación de factores como la gravedad, el agua y la intervención humana, entre otras. Estos depósitos se identifican a media ladera en occidente, centro y oriente de la zona de planificación, y sobre la margen derecha de la quebrada La Aguacatala. Se caracteriza por ser material heterogéneo cuyos espesores varían entre 2 y 6 m de espesor. En general se caracterizan por ser matriz soportada (La relación matriz/bloques varía entre 70/30, 80/20 y 90/10); de color que varía de naranja a café y cuya matriz presenta oxidación y es de textura arcillosa a arcillo-limosa; los fragmentos de roca presentan tamaños milimétricos a centimétricos, son de forma subangular y la composición de estos no es posible identificarse debido al alto grado de meteorización.

También se presentan raíces, baldosín, plástico y madera. El depósito de deslizamiento localizado en el centro se aprecian grandes bloques de concreto que se desprendieron del muro localizado en la parte alta y estos materiales llegan hasta la quebrada La Aguacatala (Fotografía 5).



Fotografía 5. Depósito de deslizamiento: A) Registro perforación P5; B) Restos de materiales en depósito del sector central; C) Registro perforación P1; D) Registro perforación P7

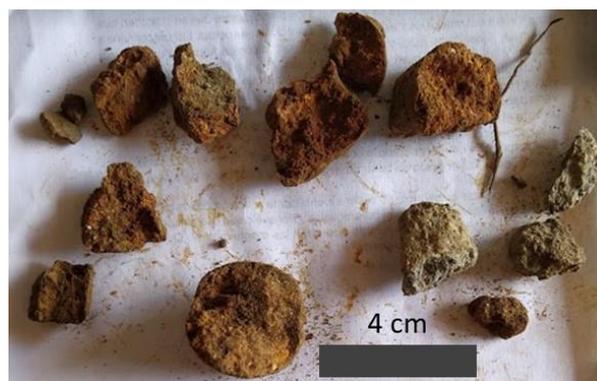
Depósitos aluviotorenciales: corresponden a materiales heterogéneos que descienden por el cauce siguiendo un comportamiento turbulento, hasta que alcanzan zonas con pendientes bajas suficientes para acumularse, estos son generados por algunas corrientes hídricas durante eventos de avenidas torrenciales, las cuales por la alta energía del agua permiten arrastrar materiales de granulometría heterogéneas que incluyen desde bloques

hasta materiales arenosos y finos. En el área de estudio, estos depósitos se identifican en el cauce y orillas de la quebrada La Aguacatala. Se caracteriza ser un depósito bloque soportado, caótico, con fragmentos de roca que presentan formas subangulares a suredondadas de tamaños hasta métricos y de composición variada (esquistos, anfibolita, dunita), la matriz es limo-arenosa, de color café. El máximo espesor observado en los recorridos alcanza 2.5 m sin embargo es posible que sea mayor (Fotografía 6).



Fotografía 6. Depósito aluviotorrencial quebrada La Aguacatala

Llenos antrópicos: representan la acumulación de materiales producto de la conformación topográfica del terreno para la instalación de infraestructura, tales como el sector centro de la zona de estudio. De acuerdo con las observaciones de los sondeos exploratorios S2 y P4, el espesor varía entre 1 y 2 m; y se caracteriza por presentar un color gris rojizo, textura arcillosa y por estar conformado por materiales angulares y heterogéneos entre los cuales hay bloques de roca y de cemento (Fotografía 7).



Fotografía 7. Lleno antrópico en la perforación 4

3.6. Morfometría

El mapa de pendientes representa la distribución del grado de inclinación del terreno, definido entre la superficie del terreno y la horizontal. La pendiente, como componente del relieve, se expresa en porcentaje o grados y para su análisis se utiliza los rangos preestablecidos para la planificación.

Es importante resaltar que cada material superficial tiene un comportamiento geomecánico característico, que está fuertemente relacionado con la pendiente donde se localiza, esto permite evaluar de manera integral la susceptibilidad a movimientos en masa. Adicionalmente, el desarrollo urbanístico y el uso del suelo están restringidos por esta variable.

Para el área de interés, el mapa de pendientes (Ilustración 18) se obtuvo a partir del levantamiento topográfico realizado en abril – mayo de 2020 y la cartografía disponible del POT. En la Tabla 3 se presenta la distribución, metros cuadrados y porcentajes de área que involucra cada rango de pendientes definido. De acuerdo con lo anterior, en las Unidades Morfodinámicas Independientes (UMI) sobre las cuales se encuentra ubicado el predio de planificación predominan las pendientes muy inclinadas (27.94%), seguido de las pendientes abruptas (23.74%) e inclinadas (19.73%). El 28.59% restante corresponde a pendientes muy abruptas con un 16.05%, escarpadas con un 10.30% y muy suaves a suaves con aproximadamente 2%. Lo anterior responde a la configuración que se aprecia en el terreno.

Tabla 3. Distribución de los rangos de pendientes en el predio de interés

Rango de Pendientes	Área (m²)	Área (%)
0 - 3 %: Muy Suave	30,54	0,13
3 - 10 %: Suave	499,80	2,12
10 - 25 %: Inclinada	4656,31	19,73
25 - 40 %: Muy inclinada	6593,66	27,94
40 - 60 %: Abrupta	5602,18	23,74
60 - 100 %: Muy abrupta	3788,75	16,05
> 100 %: Escarpada	2430,18	10,30

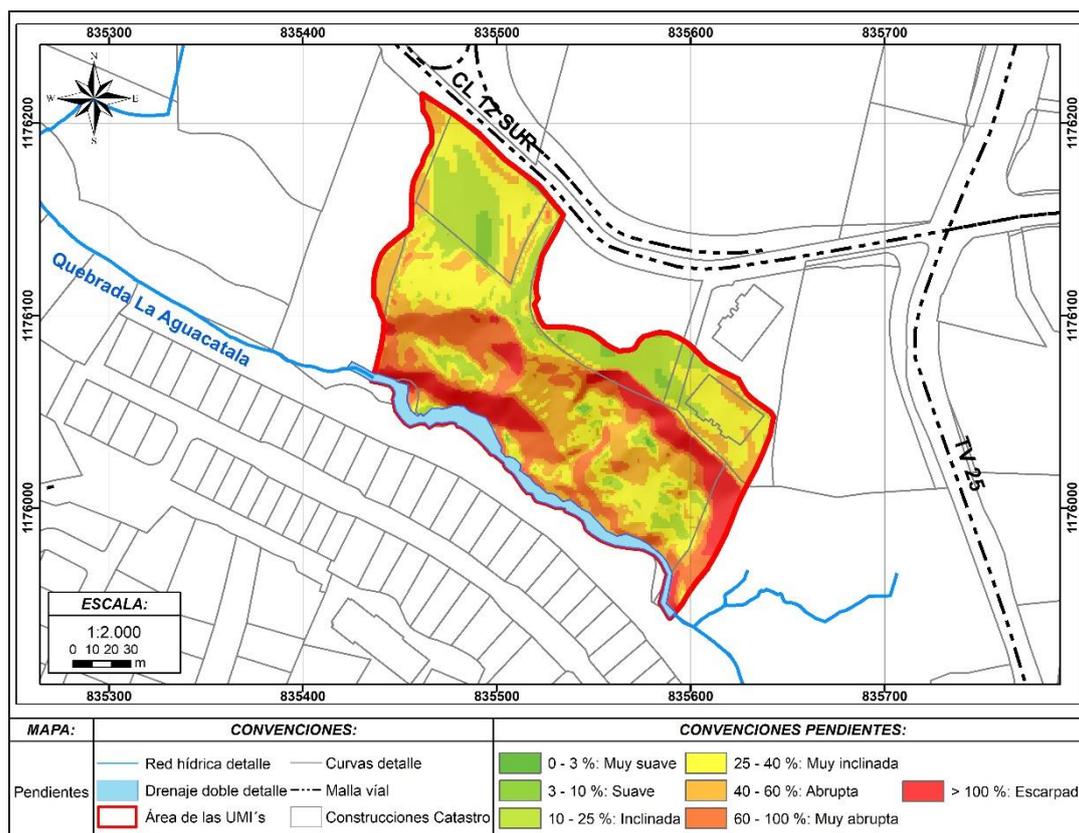


Ilustración 18. Mapa de pendientes del predio de planificación

Rango de pendientes 0 – 10% (Muy suave - Suave): Este conjunto de pendientes representa el 2.25 % del área de interés y está distribuido hacia el límite sur y norte de esta; corresponde al cauce de la quebrada La Aguacatala, a pequeños descansos en las laderas correspondientes a los depósitos de deslizamiento y a zonas sobre la cual se ha desarrollado el lleno antrópico (Fotografía 8).



Fotografía 8. Pendientes muy suaves a suaves en el norte del área de estudio

Rango de pendientes 10 – 25% (Inclinada): Este rango de pendientes está relacionado con el descrito anteriormente, se encuentra distribuido al sur, centro y norte del área de interés; se asocia al igual que los rangos anteriores, al cauce de la quebrada La Aguacatala y a los descansos en las laderas correspondientes a los depósitos de

deslizamiento, e incluye el sector sobre el cual está ubicada la servidumbre de acceso al polígono de estudio desde la Loma de los Balsos, y la ladera en depósito recta que se encuentra hacia el Noroccidente. Estas pendientes abarcan el 19.73 % del área de estudio (Fotografía 9).



Fotografía 9. Pendientes inclinadas en el oriente sobre depósito de deslizamiento

Rango de pendientes 25 – 40% (Muy Inclinada): Representa el rango de mayor distribución en el área de estudio ya que este ocupa el 27.94%, y se distribuye también hacia el sur, centro y norte del polígono de estudio. En este rango de pendientes se identifica también sobre la quebrada La Aguacatala y su mayor representación se encuentra sobre las laderas donde los depósitos de deslizamientos se han ido acumulando, la ladera en depósito mencionada en el rango anterior y en la explanación sobre la cual se encuentra ubicado el Edificio Almonte (Fotografía 10).



Fotografía 10. Pendientes muy inclinadas al occidente en límites con edificio Mompox

Rango de pendientes 40 – 60% (Abrupta): corresponde al 23.74% y su distribución se encuentra asociada con el rango de pendientes anterior. Se localiza a lo largo de todas las laderas de diferentes aspectos que definen la zona de estudio (Fotografía 11).



Fotografía 11. Pendientes abruptas en el centro del polígono

Rango de pendientes 60 – >100% (Muy Abrupta - Escarpada): Corresponden al 26.35% del total del área de estudio y su distribución se da a lo largo de las laderas que bordean el cauce de la quebrada La Aguacatala y a laderas que corresponden a los escarpes de deslizamientos (Fotografía 12).



Fotografía 12. Pendiente muy abrupta (izquierda – escarpe deslizamiento) y escarpada (derecha – margen de la quebrada La Aguacatala)

3.7. Geomorfología Local

El polígono de interés y las zonas aledañas a este presenta características geomorfológicas asociadas a los procesos exógenos y los materiales que han moldeado el relieve. Se presenta el análisis de la geomorfología local a partir del modelo de sombras (Ilustración 19) y mapa de pendientes (Ilustración 20), generados con la información levantada por la topografía realizada y el empalme de esta con la cartografía del POT, además de las imágenes satelitales disponibles en Google Earth.

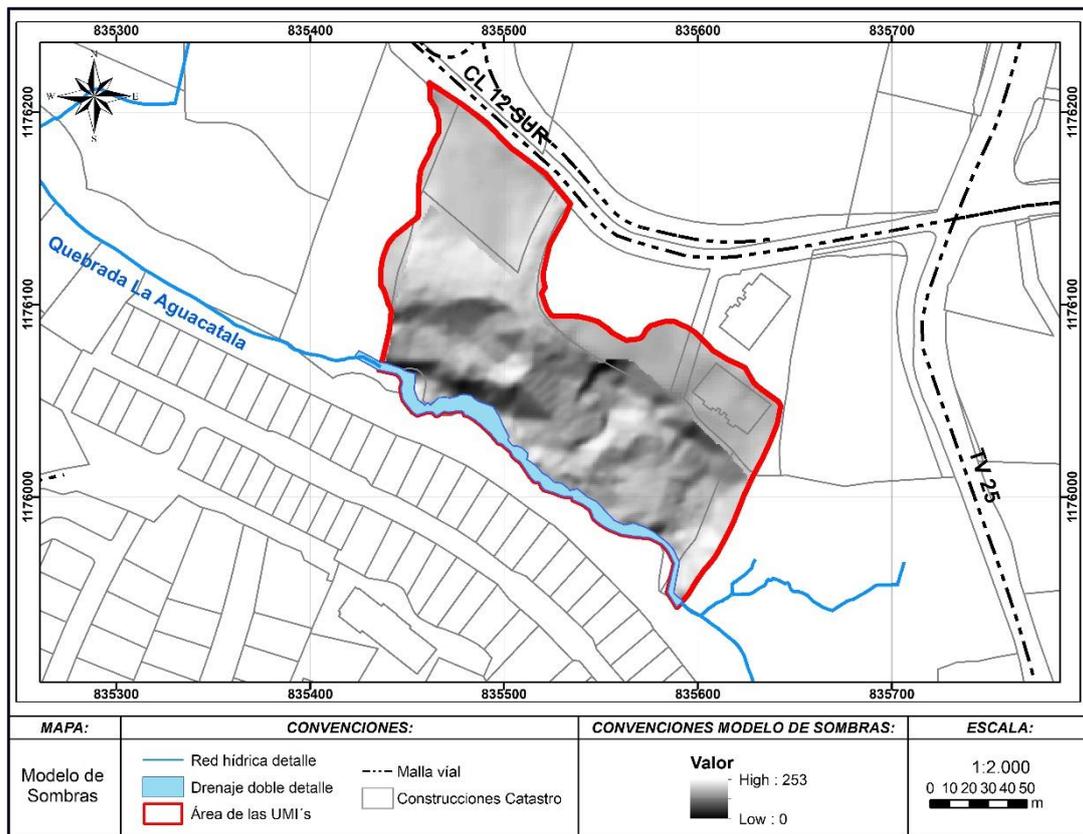


Ilustración 19. Modelo de sombras del área de interés

Teniendo en cuenta la escala del trabajo y a partir de las unidades geomorfológicas definidas por AMVA (2007), se han diferenciado las subunidades geomorfológicas de acuerdo con las características particulares que exhibe cada una.

Para la definición de las pendientes se siguieron los parámetros establecidos en la Tabla 2. Para la definición de la longitud de la ladera y características de los topes se siguieron los parámetros que se presentan en las Tabla 4 y Tabla 5.

Tabla 4. Rangos de longitud de la ladera para la definición de los componentes geomorfológicos

Descripción	Rango (m)
Muy corta	0 – 20
Corta	20 – 40

Descripción	Rango (m)
Moderada	40 – 70
Larga	70 – 100
Muy larga	>100

Tabla 5. Característica de los topes para su definición

Topes	
Longitud del eje	Forma del eje
Cortos < 100 m	Agudo
Moderados 100 m – 200 m	Redondeado
Largos > 200 m	Plano

El rasgo geomorfológico principal en el área de interés, son las superficies suaves en depósitos moderadamente incisadas, característica regional del suroccidente de la ciudad, también se encuentra la pequeña llanura torrencial asociada a la dinámica de la quebrada La Aguacatala. En esta unidad geomorfológica se diferencian diferentes tipos de laderas y lomos, desarrollados sobre depósito de flujos de lodos y/o escombros y deslizamientos. A continuación, se describen las subunidades identificadas en la zona de estudio (Ilustración 20).

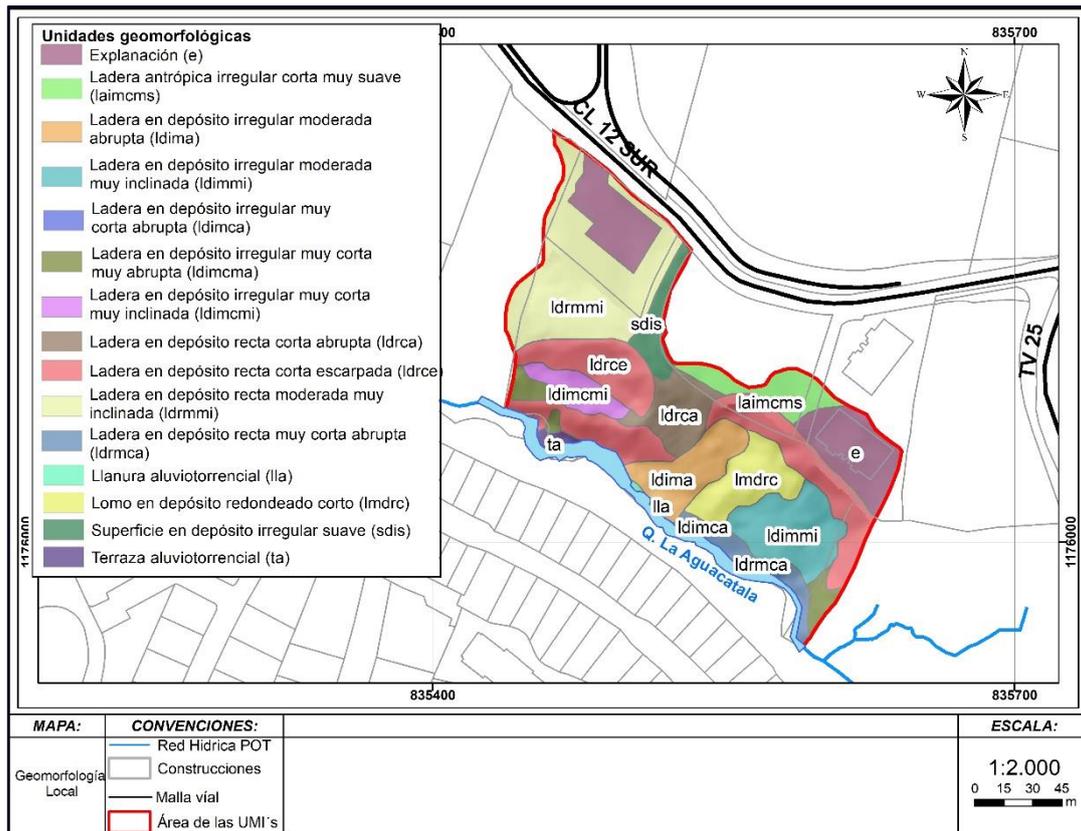


Ilustración 20. Mapa geomorfológico local

Explanación (VM-BPE-ssdmi-e): esta subunidad está asociada por las intervenciones antrópicas para el desarrollo de edificaciones residenciales, tales como Mompox y Almonte, localizadas al noroccidente y nororiente, respectivamente, del área de estudio.

En general son superficies de pendientes muy suaves a suaves, sin una forma característica (Fotografía 13).



Fotografía 13. Explanación en el edificio Mompox

Ladera antrópica irregular corta muy suave (VM-BPE-ssdmi-laicms): esta subunidad está asociada, al igual que la subunidad anterior, a las intervenciones antrópicas para el desarrollo de edificaciones residenciales, corresponde al lleno antrópico que se localiza al norte del polígono de interés, el cual se caracteriza por presentar pendientes suaves a inclinadas y no poseer una forma característica (Fotografía 14). Al límite sur de esta subunidad se evidencia un proceso morfodinámico activo.



Fotografía 14. Ladera antrópica en el lote de Obra Treinta & Cinco

Ladera en depósito irregular moderada abrupta (VM-BPE-ssdmi-ldima): esta subunidad se encuentra localizada en el centro del área de interés, se caracteriza por tener una longitud menor a 70 m, escalonamientos y pendientes inclinadas a abruptas. Corresponde al depósito de un deslizamiento cuya fuente está en la parte alta de la ladera y llega hasta la quebrada La Aguacatala; en la parte media de la ladera se identifican

surcos asociados a la escorrentía superficial y en el límite con la quebrada se presentan deslizamientos superficiales (Fotografía 15).



Fotografía 15. Ladera en depósito asociada a deslizamiento en el sector central

Ladera en depósito irregular muy corta abrupta (VM-BPE-ssdmi-ldimca): esta subunidad se localiza sobre la margen derecha de la quebrada La Aguacatala. Se caracteriza por tener una longitud aproximada de 8 m y pendientes abruptas a muy abruptas. Al igual que la subunidad anterior, corresponde a un depósito de deslizamiento evidenciado en campo.

Ladera en depósito irregular muy corta muy abrupta (VM-BPE-ssdmi-ldimcma): esta subunidad se encuentra localizada hacia el suroccidente y suroriente del área de interés. Se distingue por tener una longitud aproximada de 18 m y pendientes que varían desde 60 – 100 % (muy abruptas). Sobre esta unidad no se presentan procesos morfodinámicos, sin embargo, una de estas laderas, localizada sobre la margen derecha de la quebrada está desarrollada sobre el depósito de un deslizamiento.

Ladera en depósito irregular muy corta muy inclinada (VM-BPE-ssdmi-ldimcmi): esta subunidad se encuentra localizada en el costado occidental del predio y es delimitada al norte por una ladera recta corta y escarpada correspondiente al escarpe de antiguos deslizamientos. Se caracteriza por ser una ladera que no supera los 20 m de longitud, de forma ondulada y con pendientes inclinadas a abruptas. Esta unidad corresponde al depósito de deslizamiento (Fotografía 16).

Ladera en depósito irregular muy corta muy inclinada



Fotografía 16. Ladera en depósito asociada a deslizamientos antiguo

Ladera en depósito irregular moderada muy inclinada (VM-BPE-ssdmi-ldimmi):

esta subunidad se encuentra localizada en el costado oriental del predio y es delimitada al nororiente por una ladera recta corta y escarpada correspondiente a un escarpe de deslizamiento. Se caracteriza por presentar una longitud aproximada de 60 m, de superficie ondula y con pendientes que varían de inclinadas a abruptas. Esta subunidad corresponde a un depósito de deslizamiento (Fotografía 17).

Ladera en depósito irregular moderada muy inclinada



Fotografía 17. Ladera en depósito asociado a deslizamiento al oriente del área de interés

Ladera en depósito recta corta abrupta (VM-BPE-ssdmi-ldrca):

Se localiza hacia el centro del área de interés, desde el muro divisorio con el lote donde se desarrollará Obra Treinta & Cinco con dirección a la quebrada. Esta subunidad se caracteriza por presentar una longitud aproximada de 30 m, por tener una tendencia general recta y las pendientes varían de abruptas a muy abruptas, desarrollada sobre el flujo 1 identificado. No se tiene evidencia de procesos morfodinámicos en esta unidad (Fotografía 18).

Ladera en depósito recta corta abrupta



Fotografía 18. Ladera en depósito desarrollada sobre el flujo 1

Ladera en depósito recta corta escarpada (VM-BPE-ssdmi-ldrce): Esta subunidad se encuentra localizada en 3 zonas del área de interés: hacia el costado occidental, nororiental y en la margen derecha de la quebrada La Aguacatala antes de salir del área de interés. Esta subunidad se caracteriza por presentar una longitud entre 20 y 40 m, por ser recta y por presentar rangos de pendientes que varían de muy abruptas a escarpadas. Las primeras 2 zonas mencionadas corresponden a escarpes de deslizamientos, por otra parte, la tercera zona pertenece a una ladera que bordea la quebrada La Aguacatala y cuyo origen está posiblemente asociado al proceso de incisión de la quebrada. Esta subunidad se desarrolla sobre la unidad geológica depósito de flujo de lodos y/o escombros 1 y en algunos tramos también en el depósito de flujo de lodos y/o escombros 4. Es importante resaltar que sobre esta subunidad se tiene la evidencia de importantes coronas de deslizamientos, unas activas y otras antiguas, además de desgarrres superficiales; la longitud de estas coronas varían desde 7 hasta 75 metros (Fotografía 19).

Ladera en depósito recta corta escarpada



Fotografía 19. Ladera asociada a la escarpe del deslizamiento del sector central

Ladera en depósito recta muy corta abrupta (VM-BPE-ssdmi-ldrmca): Esta subunidad se encuentra localizada bordeando la margen derecha de la quebrada La Aguacatala al inicio de su recorrido por el predio de interés. Se caracteriza por presentar una longitud aproximada de 12 m, su forma predominante es recta y presenta rangos de pendientes que varían de abruptas a muy abruptas. Al igual que la subunidad anterior, se desarrolla sobre los depósitos de flujo de lodos y/o escombros 1 y 4. En esta subunidad se tiene la presencia de cicatrices de movimientos en masa tipo desgarre superficial activos y un deslizamiento rotacional del cual se conserva la masa desplazada sobre la ladera. (Fotografía 20).



Fotografía 20. Ladera en depósito sobre la margen derecha de la quebrada La Aguacatala

Ladera en depósito recta moderada muy inclinada (VM-BPE-ssdmi-ldrmmi): Corresponde a una ladera localizada hacia el noroccidente del área de estudio que se caracteriza por presentar una longitud aproximada de 60 m, por su forma recta, presenta rangos de pendientes que varían de inclinadas a abruptas y está desarrollada sobre la unidad geológica depósito de flujo de lodos y/o escombros 1. En esta subunidad no se tiene la evidencia de procesos morfodinámicos (Fotografía 21).

Ladera en depósito recta moderada muy inclinada



Fotografía 21. Ladera en depósito en el sector occidental del área de interés

Lomo en depósito redondeado corto (VM-BPE-ssdmi-lmdrc): está subunidad se encuentra localizada hacia el centro del área de estudio y es limitado en los costados occidental y oriental por laderas desarrolladas por depósitos de deslizamientos, hacia el norte por una ladera que pertenece al escarpe de un deslizamiento y hacia al sur por una ladera muy corta de pendiente muy abrupta. Se caracteriza por corresponder a un tope redondeado, angosto e inclinado, del cual se desprenden unas laderas con pendientes abruptas a muy abruptas, de forma irregular. No se tiene evidencia de procesos morfodinámicos en esta subunidad (Fotografía 22).

Lomo en depósito redondeado corto



Fotografía 22. Lomo en depósito que divide dos depósitos de deslizamientos

Superficie en depósito irregular suave (VM-BPE-ssdmi-sdis): está subunidad se localiza en el costado norte del área, en el acceso al lote desde la Loma de Los Balsos, y se caracteriza por las pendientes suaves a inclinadas con ligeras ondulaciones, sin evidencia de movimientos en masa (Fotografía 23).

Superficie en depósito irregular suave



Fotografía 23. Superficie irregular suave por la entrada al lote por la Loma de los Balsos

Terraza aluviotorrencial (VM-BPE-ssdmi-ta): está subunidad se encuentra localizada en la margen derecha de la quebrada La Aguacatala hacia el costado suroccidental del predio. Corresponde a una superficie de pendientes inclinadas a muy inclinadas en la mesa y pendientes abruptas en el escarpe que limita con la quebrada; es producto de la acumulación de materiales heterogéneos asociado a la dinámica fluvial; también se aprecia la acumulación de materiales sobre la mesa, por la influencia de un depósito de deslizamiento localizado hacia el norte de esta subunidad (Fotografía 24).

Terraza aluviotorrencial



Fotografía 24. Terraza aluviotorrencial sobre la margen derecha de la quebrada La Aguacatala

Llanura Aluviotorrencial (VM-BPE-ssdmi-lla): está subunidad se encuentra localizada en las márgenes de la quebrada La Aguacatala en todo el recorrido por el predio de interés. Se caracteriza por corresponder a una superficie irregular estrecha, con pendientes muy suaves a muy inclinadas, que ha sido producto de la acumulación de materiales heterogéneos y en la cual divaga el cauce activo de la quebrada La Aguacatala (Fotografía 25).



Fotografía 25. Llanura aluviotorrencial de la quebrada La Aguacatala

3.8. Procesos morfodinámicos

El análisis de las fotografías aéreas, sensores remotos y recorridos de campo permiten identificar varios tipos de movimientos en masa en el área de estudio. Por lo general estos procesos son generados por las condiciones naturales del sector tales como materiales y la topografía, cuyas relaciones condicionan en gran medida la estabilidad de las laderas.

El Departamento Administrativo de Planeación (DAP) de la Alcaldía de Medellín reporta en su base de datos tres cicatrices de movimientos en masa que afectan el área de estudio, las cuales fueron objeto de identificación detallada en las actividades de campo y se presentan las siguientes conclusiones:

- Las cicatrices reportadas por el DAP se encuentran desplazadas de su posición original y corresponden a los movimientos en masa también identificados en la fase de interpretación y campo de este proyecto.
- Los movimientos en masa identificados se pueden clasificar en antiguos y recientes:
 - Los movimientos en masa antiguos corresponden a un par de cicatrices localizadas al occidente del área, que tienen una corona suavizada y redondeada lo que permite inferir que han estado expuestas por un tiempo prolongado a la erosión que permite el modelado de la superficie; además se aprecia una vegetación abundante sobre el escarpe y no se identifican rasgos de actividad reciente como son árboles inclinados o grietas y desniveles en la parte alta de la corona; asociado a estas cicatrices se conserva el material desplazado en la parte baja, y corresponde a una zona de pendiente inclinada y superficie ondulada.
 - Se considera como movimientos en masa recientes todos aquellos que tienen alguna o varias de las siguientes características en su área de afectación: árboles inclinados, aristas e irregularidades en la corona, áreas desprovistas de vegetación,

pérdida evidente de suelos, raíces de vegetación descubiertas, depósito asociado y empozamiento de aguas.

Dentro de estos procesos recientes se subclasifican en procesos latentes y activos. De acuerdo con el PMA (2007), un movimiento en masa latente se define como "movimiento en masa inactivo pero las causas o factores contribuyentes aún permanecen".

Los movimientos en masa latentes se clasifican como deslizamientos rotacionales localizados en la parte alta de ladera, cuya corona está en el límite con el predio de Obra Treinta & Cinco y la urbanización Almonte. Para el primero, se tiene reporte que este proceso ocurrió en 1995; los recorridos de campo indican que la masa desplazada llega hasta la quebrada La Aguacatala y a lo largo de la ladera se conservan restos de lozas de concreto y acero que corresponden al muro que se desprendió de la parte alta; el área afectada es de 1560 m² aproximadamente. En la actualidad se identifica una corona con 33 m de longitud y se observa gran cantidad de vegetación sobre el escarpe, no es claro a simple vista si el movimiento es activo, sin embargo sobre la masa desplazada se observan algunos árboles inclinados, además que esta masa tiene un proceso de incisión incipiente por la acción de las aguas de escorrentía que se encuentran con una tubería que descarga directamente a media ladera; también se identifica a la pata de del deslizamiento desgarres superficiales (Fotografía 26).



Fotografía 26. Evidencias del deslizamiento ocurrido en el sector central del área: muro colapsado en la parte alta (A y B); restos del muro en la quebrada (C) y desgarres superficiales en la pata del deslizamiento (D)

El otro deslizamiento rotacional latente tiene su depósito asociado, es una superficie suavizada e irregular, cuya área aproximada es de 1900 m² y sobre el

costado oriental hay una acumulación de agua importante que se canaliza en forma de vaguada hasta la quebrada, estas aguas son acumuladas por la escorrentía que drena desde la parte alta del talud. Sobre el escarpe, cuya longitud estimada es de 655 m, se aprecian áreas desprovistas de vegetación y pérdida de suelo (Fotografía 27).



Fotografía 27. Escarpe de deslizamiento (izq.) y agua acumulada en la superficie (der.)

Otros deslizamientos recientes, son de menor tamaño, entre los que se encuentran deslizamientos rotacionales que conservan el depósito y desgarres superficiales que son la gran mayoría, localizados principalmente sobre la margen derecha de la quebrada La Aguacatala. Este grupo de procesos se consideran activos y por lo general tienen áreas desprovistas de vegetación (Fotografía 28).



Fotografía 28. Deslizamiento superficial sobre la margen derecha de la quebrada

- Procesos erosivos: son sitios puntuales donde se presentan surcos asociados a la escorrentía de aguas por la presencia de tuberías deterioradas que entregan sobre la superficie (Fotografía 29).



Fotografía 29. Tuberías en mal estado con descarga directa sobre la superficie que genera surco sobre la ladera

- Otras situaciones de importancia observadas son:
 - En el escarpe del deslizamiento rotacional en límite con Obra Treinta & Cinco se observa un árbol de gran porte que debe ser evaluada la viabilidad de permanecer en sitio o talarlo, esta determinación debe ser tomada por un profesional especializado (Fotografía 30).



Fotografía 30. Árbol en el escarpe del deslizamiento central

- Se identifica una red de manholes en la parte media de la ladera cuya inspección visual no arroja evidencia de flujo de aguas permanente; en el extremo occidental se encuentran cuatro manholes activos conectados entre sí, con aguas lluvias y residuales que entregan en la quebrada La Aguacatala. También se identifica una tubería con un avanzado estado de deterioro y vertimiento de aguas sobre la superficie, lo que acelera los procesos erosivos, sin embargo no fue posible determinar la fuente del suministro (Fotografía 31).



Fotografía 31. Tubería con descarga directa sobre la superficie en la masa del deslizamiento central

- El muro divisorio entre el lote de estudio y el área de proyecto Treinta & Cinco presenta flexiones como fue reportado por Geotécnica (2018) y en la parte alta se observan asentamientos del terreno (Fotografía 32).



Fotografía 32. Asentamientos en la parte alta del muro en el proyecto Obra Treinta & Cinco

En la siguiente Ilustración se presenta la localización de los procesos morfodinámicos descritos y la localización de las otras observaciones realizadas.

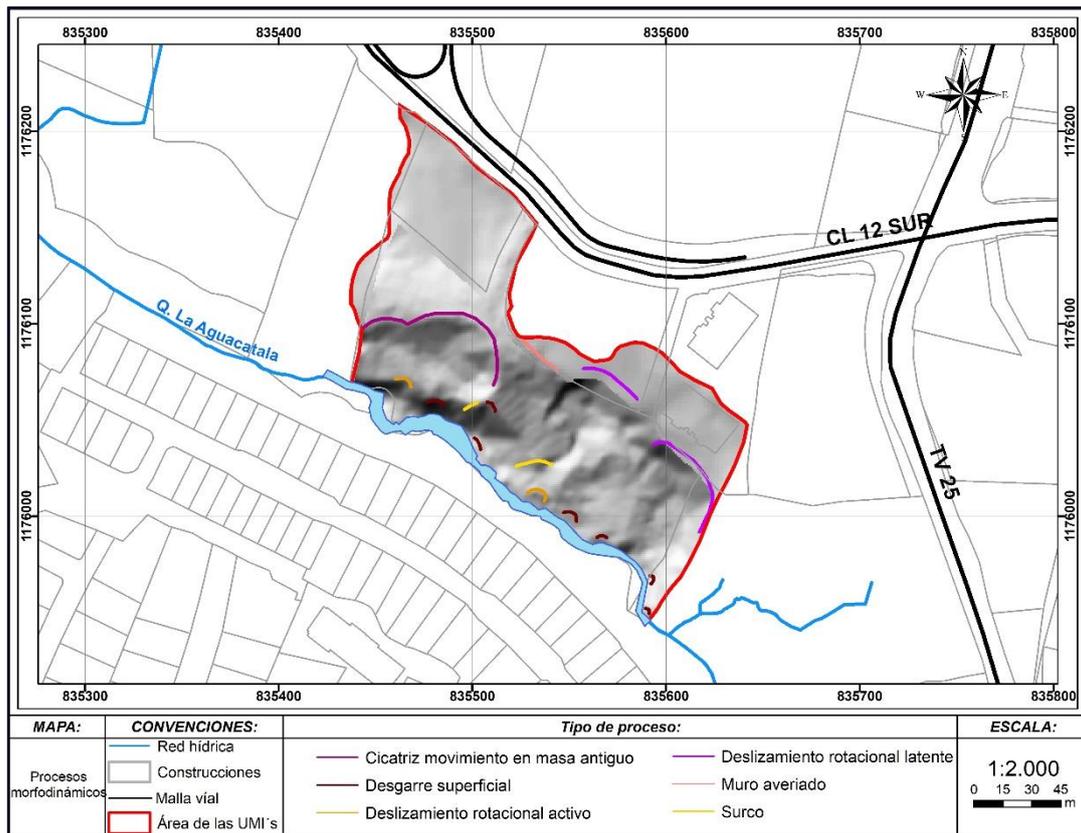


Ilustración 21. Mapa de procesos morfológicos y otras observaciones

4. Análisis geotécnicos

4.1. Exploración de campo y análisis de laboratorio

4.1.1. Inspección del entorno

Con el fin de caracterizar de manera integral la zona de estudio, se programaron como medida inicial visitas a campo por parte del equipo técnico, conformado por Ingenieros civiles, geólogos, geotecnistas y especialistas en el componente ambiental, quienes a partir de los recorridos de campo definen las condiciones físicas, geológicas, geomorfológicas y geotécnicas principales de los terrenos a evaluar, permitiendo una mejor planificación de las actividades mismas del presente estudio.

4.1.2. Sondeos

Para conocer los materiales que componen el suelo se realizó un programa de exploración compuesto por siete (7) sondeos ejecutados a percusión para el avance en suelo y rotación con broca de diamante para el avance en roca, denominados en este trabajo P1, P2, P4, P5, P6, P7 y P8, alcanzando profundidades entre 10.5 m y 20.0 m.

El programa y desarrollo de exploración consistió en la ejecución de perforaciones distribuidas estratégicamente sobre el terreno, caracterizadas por pequeños diámetros entre 65 y 100 mm, de los cuales es posible la recuperación de testigos de los diferentes substratos del suelo que posteriormente son descritos y analizados en el laboratorio, construyendo a partir de estos un perfil de suelo de la zona.

En cada uno de los sondeos exploratorios se llevó a cabo el ensayo de penetración estándar (SPT) a intervalos de 1.0 m en los materiales de suelo, donde esto fue posible. Esta prueba permite determinar características físicas y mecánicas de los suelos a través de la obtención de muestras remoldeadas. El ensayo de penetración estándar evalúa de manera indirecta la compacidad o consistencia de los suelos en profundidad y consiste, según la norma ASTM D – D1586, en dejar caer un martillo de 63,5 Kg. de peso sobre una barra de perforación desde una altura de 76,2 cm. En este ensayo se obtiene el número de golpes necesarios para introducir el muestreador estándar "Split Spoon" 30 cm en el suelo, dato que es definido como N (Número de golpes). De acuerdo a las características del subsuelo, y el detalle requerido en la caracterización del mismo, este ensayo se efectúa de manera continua o discontinua, generalmente cada metro de profundidad. A partir del número de golpes y del tipo de suelo, mediante el uso de correlaciones internacionalmente conocidas, es posible estimar las propiedades y parámetros geomecánicos del suelo.

Las perforaciones ejecutadas, se localizaron estratégicamente en diferentes sitios con el fin de obtener la mayor información posible del subsuelo. En siguiente ilustración se

presenta la ubicación de las perforaciones ejecutadas y la tabla siguiente lista la profundidad alcanzada en cada sitio.



Ilustración 22. Localización de las perforaciones en el área de estudio

A continuación, se presenta la profundidad máxima alcanzada en los sondeos exploratorios.

Tabla 6. Profundidad de los sondeos exploratorios

SONDEO	PROFUNDIDAD (m)
P1	15.3
P2	15.0
P4	20.0
P5	16.0
P6	15.5
P7	14.5
P8	10.5

A continuación, se muestran fotografías de la localización en terreno de las perforaciones ejecutadas en la zona de estudio, las cuales se distribuyeron estratégicamente, para analizar las laderas de interés geotécnico y caracterizar los materiales presentes en toda la zona de estudio.



Fotografía 33. Registro fotográfico de las perforaciones 1, 2 y 4



Fotografía 34. Registro fotográfico de las perforaciones 5, 6, 7 y 8

Como se mencionó anteriormente, en los sondeos exploratorios se recuperaron muestras remoldeadas tomadas con muestreador estándar "Split Spoon" y adicionalmente se obtuvieron muestras inalteradas con tubo de pared delgada "Shelby". Los materiales encontrados fueron debidamente caracterizados para elaborar los perfiles de suelos.

De cada ensayo de SPT realizado se recupera una muestra de 45 cm de longitud, que permite además de medir la resistencia a la penetración de la cuchara normal de muestreo (Split Spoon), deducir conceptos relativos a las propiedades cualitativas del material, su génesis y clasificación estratigráfica. Las muestras representativas de cada paquete estratigráfico son enviadas al laboratorio de suelo.



Fotografía 35. Muestreador estándar o cuchara partida (Split Spoon) para el ensayo SPT.

Las muestras recuperadas con la cuchara normal de muestreo (Split Spoon), se denominan muestras alteradas, y son almacenadas en bolsas plásticas; cuando durante la ejecución de la perforación, el muestreador estándar es cambiado por un muestreador tipo tubo de pared delgada (Shelby) es posible recuperar muestras inalteradas usadas en ensayos que permiten la determinación directa de parámetros de resistencia de los materiales. En la Fotografía 36 Se presenta un ejemplo del muestreador de pared delgada (shelby) utilizado para la toma de muestras inalteradas.



Fotografía 36. Muestreador de pared delgada

4.2. Análisis de laboratorio

Las muestras recuperadas en campo fueron clasificadas visualmente en el momento de ejecución de los sondeos para posteriormente ser enviadas al laboratorio, donde el personal especialista del proyecto, las revisó, evaluó, caracterizó y correlacionó con respecto a la información recuperada en campo, con la finalidad de definir las muestras representativas de cada unidad estratigráfica a las cuales se les practicaron los ensayos de identificación de sus propiedades de estado (humedad natural – límites de consistencia – índice de plasticidad) y parámetros de resistencia (corte directo CD).

El análisis de laboratorio está encaminado a determinar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, y a partir de estos obtener un diagnóstico del posible comportamiento del suelo.

Una vez finalizada la etapa de exploración junto con la posterior revisión de las muestras, estas se envían al laboratorio para la realización de diversos ensayos que permitan determinar las características físicas, hidráulicas y mecánicas de los materiales encontrados en la zona; entre los ensayos realizados se encuentran: humedad natural, límites de Atterberg, granulometría por lavado sobre malla 200 y granulometría por hidrómetro, permeabilidad, corte directo y consolidación. En la siguiente tabla se presenta el tipo y cantidad de ensayos de laboratorio ejecutados.

Tabla 7. Resumen de ensayos de laboratorio

TIPO DE ENSAYO	CANTIDAD
Limite Líquido	38
Limite Plástico	38
Humedad Natural	38
Granulometría	38
Corte directo CD	12

En el Anexo 1 Registro de sondeos exploratorios, se presenta la estratigrafía y los resultados de laboratorio (Anexo 2) de cada uno de los sondeos.

A partir de los resultados obtenidos, se realiza un análisis detallado de los resultados de cada ensayo, tratando de determinar los rangos en los que se encuentran los parámetros físicos y mecánicos de cada formación encontrada y como representan estos valores el comportamiento esperado de estos materiales.

4.2.1. Estratigrafía y propiedades geomecánicas de los suelos

LLENO ANTRÓPICO (QII)

Identificado de manera superficial en el sondeo P4, con un espesor de 1 m aproximadamente; material limo arenoso en tonalidades grises y rojizas, contiene fragmentos de roca y bloques de cemento.

A continuación, se presentan las propiedades índices obtenidas para los materiales pertenecientes a este estrato.

Clasificación USCS: MH.

Humedad natural: 34.8%

Limite Líquido: 65.7%

Índice Plástico: 30.0%

MATERIA ORGÁNICA

Identificado en el sondeo P4 subyaciendo al lleno antrópico y con un espesor aproximado de 1 m; material limo arenoso en tonalidades negras, contiene raíces.

DEPÓSITO DE DESLIZAMIENTO (Qd)

Identificado de forma superficial en los sondeos P1, P2, P5 y P7, con espesores entre 2 m y 6 m aproximadamente. Material limo arcilloso en tonalidades café, naranja, pardas, naranja, ocre y blancas, contiene raíces, baldosín, plástico, madera, troncos y fragmentos de roca subangulares de tamaños milimétricos y centimétricos, en una relación matriz/bloque variable entre 70%/30% y 90%/10%.

A continuación, se presentan las propiedades índices obtenidas para los materiales pertenecientes a este estrato.

Clasificación USCS: MH, SC.

Humedad natural: 33.3% - 61.3%

Límite Líquido: 37.5% - 68.6%

Índice Plástico: 13.8% - 33.2%

FLUJO 1 (Qf1)

Identificado en los sondeos P4, P6 y P8, ya sea desde la superficie o subyaciendo a la capa orgánica, con espesores entre 6 m y 7 m aproximadamente. Material limo arcilloso en tonalidades naranja, amarillas y blancas, contiene raicillas y fragmentos de roca subangulares de tamaños milimétricos y centimétricos, en una relación matriz/bloque aproximada de 90%/10%.

A continuación, se presentan las propiedades índices obtenidas para los materiales pertenecientes a este estrato.

Clasificación USCS: MH, CH.

Humedad natural: 32.3% - 55.3%

Límite Líquido: 66.3% - 71.0%

Índice Plástico: 33.1% - 40.4%

FLUJO 2 (Qf2)

Identificado en los sondeos P4, P6 y P8, subyaciendo al flujo 1 y con espesores entre 3 m y 5 m aproximadamente. Material limo arcilloso en tonalidades pardo, rojizo, negras y blancas, presenta materia orgánica y fragmentos de roca subangulares y angulares de tamaños centimétricos, en una relación matriz/bloque entre 70%/30% y 80%/20%.

A continuación, se presentan las propiedades índices obtenidas para los materiales pertenecientes a este estrato.

Clasificación USCS: MH.

Humedad natural: 52.8% - 94.6%

Límite Líquido: 64.6% - 76.8%

Índice Plástico: 28.5% - 36.2%

FLUJO 3 (Qf3)

Identificado en los sondeos P4, P6 y P8 subyaciendo al flujo 2 y extendiéndose en el mayor de los casos hasta la profundidad explorada. Material limo arcilloso en tonalidades amarillas y rojizas, contiene fragmentos de roca subangulares de tamaños centimétricos, en una relación matriz/bloque aproximada de 80%/20%, los cuales corresponden a rocas metamórficas en diferentes grados de meteorización.

A continuación, se presentan las propiedades índices obtenidas para los materiales pertenecientes a este estrato.

Clasificación USCS: MH, CH, SC-SM.

Humedad natural: 35.1% - 51.0%

Límite Líquido: 46.7% - 68.5%

Índice Plástico: 19.5% - 36.0%

FLUJO 4 (Qf4)

Identificado en los sondeos P1, P2, P4, P5 y P7, ya sea subyaciendo al depósito de deslizamiento o al flujo 3 y extendiéndose hasta la profundidad explorada. Material limo arcilloso en tonalidades grisáceas, verdosas y amarillentas, presenta fragmentos de roca subangulares de tamaños centimétricos, en una relación matriz/bloque entre 60%/40% y 70%/30%, donde predominan anfibolitas y esquistos.

A continuación, se presentan las propiedades índices obtenidas para los materiales pertenecientes a este estrato.

Clasificación USCS: MH, ML, GM, SM, SC, GC, SC-SM.

Humedad natural: 16.2% - 55.5%

Límite Líquido: 35.9% - 70.6%

Índice Plástico: 11.5% - 36.1%

En las siguientes tablas se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio realizados.

Tabla 8. Resultados ensayos de laboratorio – propiedades índice

Perforación	Profundidad m	Wn %	LL %	LP %	IP %	IF %	Consistencia	Pasa #200%	USCS	Estrato
P1-M3	2.00 a 2.45	33.3	56.0	31.4	24.5	7.7	Firme	52.4	MH	Qd
P1-M4	3.00 a 3.45	16.6	37.5	24.6	12.9	-61.6	Semisólida	43.0	GC	Qf4
P1-M7	6.00 a 6.45	34.6	59.1	32.8	26.4	6.9	Firme	69.0	MH	Qf4
P1-M11	10.00 a 10.45	25.4	57.9	30.6	27.3	-18.9	Semisólida	63.6	MH	Qf4
P1-M16	15.00 a 15.30	22.4	43.8	23.4	20.4	-4.9	Semisólida	42.4	SC	Qf4
P2-M2	1.00 a 1.45	44.6	66.2	35.5	30.7	29.8	Medio blanda	84.4	MH	Qd
P2-M4	3.00 a 3.45	55.2	68.5	35.3	33.2	60.0	Blanda	89.8	MH	Qd
P2-M5	4.00 a 4.45	61.3	63.4	34.5	28.9	92.7	Muy blanda	71.7	MH	Qd
P2-M7	6.00 a 6.45	55.2	65.8	36.6	29.2	63.8	Blanda	77.3	MH	Qf4

Perforación	Profundidad m	Wn %	LL %	LP %	IP %	IF %	Consistencia	Pasa #200%	USCS	Estrato
P2-M9	8.00 a 8.45	35.4	57.5	32.4	25.1	11.8	Firme	58.8	MH	Qf4
P4-M1	0.00 a 0.45	34.8	65.7	35.7	30.0	-3.1	Semisólida	73.6	MH	QII
P4-M4	3.00 a 3.45	32.4	68.4	35.2	33.1	-8.7	Semisólida	82.5	MH	Qf1
P4-M7	6.00 a 6.45	41.2	71.0	30.5	40.4	26.4	Medio blanda	91.9	CH	Qf1
P4-M10	9.00 a 9.45	64.6	67.3	35.7	31.6	91.6	Muy blanda	72.5	MH	Qf2
P4-M12	11.00 a 11.45	74.6	65.1	36.5	28.5	133.3	Líquida	83.1	MH	Qf2
P4-M13	12.00 a 12.45	52.8	64.6	33.4	31.1	62.1	Blanda	70.9	MH	Qf2
P4-M15	14.00 a 14.45	43.7	61.3	32.5	28.8	38.8	Medio blanda	67.0	MH	Qf3
P4-M20	19.00 a 19.45	21.4	44.3	27.5	16.8	-36.6	Semisólida	53.4	ML	Qf4
P5-M2	1.00 a 1.45	41.0	61.5	31.7	29.9	31.3	Medio blanda	76.7	MH	Qd
P5-M3	2.00 a 2.45	43.4	37.5	23.8	13.8	142.8	Líquida	47.0	SC	Qd
P5-M7	6.00 a 6.45	31.2	58.9	33.3	25.5	-8.5	Semisólida	70.0	MH	Qf4
P5-M11	9.50 a 10.00	33.7	58.3	32.1	26.2	6.1	Firme	70.4	MH	Qf4
P6-M3	2.00 a 2.45	37.6	66.3	32.4	33.9	15.5	Firme	80.9	CH	Qf1
P6-M5	4.00 a 4.45	40.1	67.9	34.3	33.5	17.3	Firme	89.7	MH	Qf1
P6-M10	9.00 a 9.45	61.6	69.6	34.5	35.1	77.1	Muy blanda	80.4	MH	Qf2
P6-M11	10.00 a 10.45	94.6	76.8	40.5	36.2	149.3	Líquida	87.0	MH	Qf2
P6-M14	13.00 a 13.45	51.0	67.1	34.3	32.8	50.8	Blanda	89.5	MH	Qf3
P6-M16	15.00 a 15.45	47.8	68.5	32.6	36.0	42.5	Medio blanda	82.0	CH	Qf3
P7-M2	1.00 a 1.45	41.4	68.6	36.7	31.9	14.8	Firme	81.6	MH	Qd
P7-M3	2.00 a 2.45	55.1	65.8	33.4	32.4	67.0	Blanda	71.1	MH	Qf4
P7-M7	6.00 a 6.45	38.3	70.6	34.5	36.1	10.4	Firme	86.3	MH	Qf4
P7-M10	9.00 a 9.45	31.7	43.8	26.5	17.3	30.2	Medio blanda	47.8	SC-SM	Qf4
P7-M12	11.00 a 11.45	29.7	38.4	25.5	12.9	32.8	Medio blanda	46.3	GM	Qf4
P7-M15	14.00 a 14.45	42.1	35.9	24.4	11.5	154.8	Líquida	46.9	SM	Qf4
P8-M3	2.00 a 2.45	34.8	67.3	31.5	35.8	9.2	Firme	82.9	CH	Qf1
P8-M5	4.00 A 4.45	55.3	67.2	33.8	33.5	64.3	Blanda	88.5	MH	Qf1
P8-M8	7.00 a 7.45	64.6	66.7	35.3	31.4	93.3	Muy blanda	75.6	MH	Qf2
P8-M11	10.00 a 10.45	35.1	46.7	27.2	19.5	40.6	Medio blanda	49.7	SC-SM	Qf3

Tabla 9. Resultados ensayos de laboratorio – propiedades geomecánicas

Perforación	Profundidad m	Wn %	Peso unitario húmedo kN/m3	Peso unitario seco kN/m3	c kPa	ϕ °	Estrato
P1-M4	3.00 a 3.45	16.2	19.5	16.8	59.6	31.3	Qf4
P2-M4	3.00 a 3.45	55.6	15.5	9.9	29.0	40.2	Qd
P2-M7	6.00 a 6.45	31.1	17.2	13.1	26.3	38.3	Qf4
P4-M4	3.00 a 3.45	32.3	17.1	13.0	67.8	40.4	Qf1
P4-M10	9.00 a 9.45	65.6	15.4	9.3	12.5	40.6	Qf2
P5-M3	2.00 a 2.45	43.1	16.4	11.4	11.6	35.8	Qd
P6-M5	4.00 a 4.45	40.4	18.1	12.9	51.1	41.7	Qf1

Perforación	Profundidad m	Wn %	Peso unitario húmedo kN/m3	Peso unitario seco kN/m3	c kPa	φ °	Estrato
P6-M10	9.00 a 9.45	61.5	15.6	9.6	23.1	37.0	Qf2
P7-M3	2.00 a 2.45	55.5	15.3	9.8	17.0	32.3	Qf4
P7-M7	6.00 a 6.45	38.0	17.1	12.4	16.2	29.4	Qf4
P7-M10	9.00 a 9.45	31.9	16.1	12.2	27.2	35.5	Qf4
P8-M3	2.00 a 2.45	33.9	17.5	13.1	69.9	28.8	Qf1

4.2.2. Parámetros geomecánicos

Debido a la naturaleza heterogénea de los suelos, se encuentra un limitante a nivel práctico para definir con exactitud los parámetros de resistencia de cada material evaluado, por lo que aproximaciones, supuestos y correlaciones, junto con las pruebas directas son necesarias para caracterizar mecánicamente cada formación encontrada.

La definición de estos parámetros se hace a partir entonces de la información recolectada de los sondeos exploratorios, del análisis de las muestras extraídas en cada uno de ellos y de las pruebas en campo y laboratorio como la prueba SPT adelantada in-situ y los ensayos de caracterización como granulometrías, límites de Atterberg, humedad natural y corte directo que se realizaron en laboratorio, de acuerdo a los estratos identificados. Al analizar esta información en conjunto es posible conocer las propiedades del suelo de manera aproximada.

En la literatura especializada existen diversas correlaciones entre el valor de N, obtenido del ensayo SPT, y los parámetros de cohesión y ángulo de fricción, obteniendo valores para éstos, los cuales son usados para el cálculo de la capacidad portante de los materiales. Los valores obtenidos a través de las correlaciones son analizados y ajustados por el personal técnico de acuerdo a su experiencia y conocimientos sobre la zona de objeto de estudio y los materiales que la conforman.

Inicialmente se evalúa el valor de golpes obtenidos del ensayo SPT para el cual Bowles propone una relación para obtener un valor de N corregido que posteriormente permite una mejor aproximación a los valores de resistencia obtenidos a través de las correlaciones disponibles. Dicha ecuación tiene en cuenta correcciones por confinamiento, energía del martillo, longitud de las barras de perforación, por el tomamuestras y finalmente por el diámetro de la perforación.

La ecuación propuesta por Bowles (1988) para el valor de N corregido se la define de la siguiente manera:

$$N_s = N * C_n * \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * \eta_4$$

Donde:

N : N de Campo

C_n : Corrección por confinamiento.

η_1 : Corrección por energía del martillo.

η_2 : Corrección por longitud de barras de perforación

η_3 : Corrección por tomamuestras.

η_4 : Corrección por diámetro de la perforación

Con el valor de N corregido, las correlaciones utilizadas y los resultados de laboratorio obtenidos para cada estrato, se ajusta el parámetro de cohesión y fricción que se definirá para cada material siendo congruente con las observaciones realizadas en campo.

Para cada estrato se hizo un análisis de los parámetros obtenidos, despreciando aquellos valores que no resultaban representativos con base en la experiencia del equipo técnico que adelanta el presente estudio. Las correlaciones usadas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 10. Correlaciones analizadas para la definición de parámetros geomecánicos

CORRELACIONES USADAS PARA DETERMINAR PARÁMETROS DE RESISTENCIA A PARTIR DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT)	
Kulhaw y Mayne (1990)	$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{N_{60}}{12.2 + 20.3 \left(\frac{\sigma_v}{Pa} \right)} \right)^{0.34}$
Wolff (1989)	$\phi = 27.1 + 0.3 \cdot N_{corr} - 0.00054 N_{corr}^2$
Hatanaka y Uchida (1996)	$\phi = \sqrt{20 \cdot N_{corr} + 20}$ $\phi = \sqrt{20 \cdot N_{corr} + 17}$
Parra y Ramos (2006)	$\phi = 5.35 \ln(N) + 14.44$ $C_u = 0.22 * \ln(N) - 0.4$
Müller (1970)	$\phi = 24 + 5.77 \ln(0.1667 N_{SPT})$
Peck	$\phi = 28.5 + 0.25 N_{45}$
Peck, Hanson y Thornburn	$\phi = 26.25 * \left(2 - e^{-\left(\frac{N_{45}}{62} \right)} \right)$
Kishida	$\phi = 15 + \sqrt{(20 * N_{45})}$
Schmertmann	$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{N_{60}}{43.3} \right)^{0.34}$
Japan National Railway	$\phi = 27 + 0.1875 * N_{45}$
Japan Road Bureau	$\phi = 15 + (9.375 * N_{45})^{0.5}$
Stroud (1974)	$C_u = K \cdot N [kN/m^2]$ $K \begin{cases} 3.5 kN/m^2 \\ 6.5 kN/m^2 \end{cases}$
Hara y otros (1971)	$C_u = 29 \cdot N^{0.72} [kN/m^2]$
Mesri (1989)	$C_u = 0.22 * \sigma_v$

Para cada uno de los sondeos ejecutados se corrigió el valor de N de campo a partir de la ecuación propuesta por Bowles, (1988) y hallando los parámetros de cohesión y fricción según los golpes, delimitando dentro de cada sondeo los estratos litológicos que se identificaron en el mismo. Posteriormente se hizo un análisis para cada estrato, agrupando los parámetros de cohesión y fricción obtenidos de cada sondeo para el estrato correspondiente, considerando además los resultados obtenidos en los ensayos de

laboratorio.

Con la información anterior se procedió a la definición de los parámetros para cada estrato, ajustándose además con los resultados de la modelación de la problemática que se presenta en campo y que se evidenció durante los recorridos del equipo técnico. En cada uno de los casos se obtuvo un valor promedio, mínimo y máximo de cohesión y fricción para cada correlación utilizada, obteniendo a partir de su análisis los parámetros geomecánicos característicos para cada material, así:

LLENO ANTRÓPICO

Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 29° y 34° (ignorando la propuesta de Kulhaway) y entre 0.8 kPa y 27.0 kPa para la cohesión (ignorando las propuestas de Hara y Stroud).

Las siguientes imágenes ilustran las variaciones de los parámetros de cohesión y fricción obtenidos por cada una de las correlaciones disponibles en la literatura para los materiales pertenecientes al lleno antrópico.

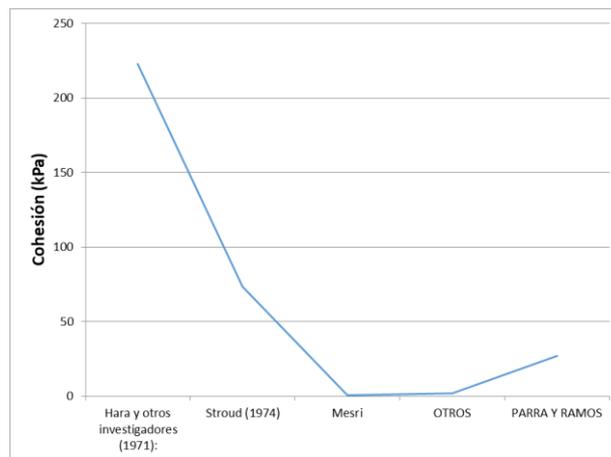


Ilustración 23. Variación cohesión del lleno antrópico

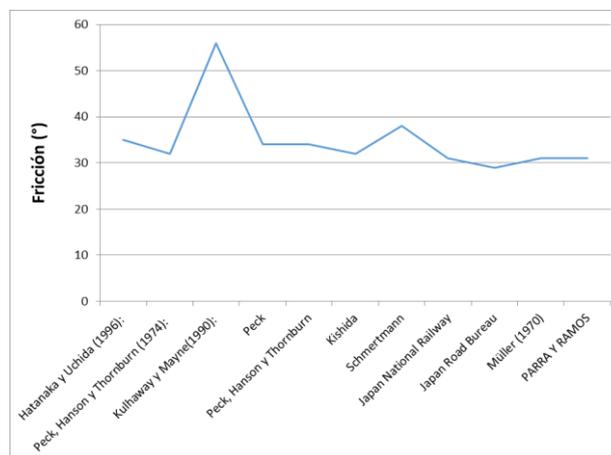


Ilustración 24. Variación ángulo de fricción del lleno antrópico

Se tomó como parámetro de ángulo de fricción el promedio de los valores obtenidos con cada correlación, descartando las propuestas de Kulhaway, Schmertmann y Hatanaka; en el caso de la cohesión el promedio de los valores promedio obtenidos con cada correlación, descartando las propuestas de Hara, Mesri y Stroud.

Tabla 11. Parámetros geomecánicos del material orgánico

	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	32	14.5
Desviación	2	12.5
Mínimo	29	2.0
Máximo	34	27.0

DEPÓSITO DESLIZAMIENTO

Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 19° y 38° (ignorando las propuestas de Hatanaka, Kulhaway y Schmertmann) y entre 0.8 kPa y 36.5 kPa para la cohesión (ignorando las propuestas de Hara y Stroud).

Las siguientes imágenes ilustran las variaciones de los parámetros de cohesión y fricción obtenidos por cada una de las correlaciones disponibles en la literatura para los materiales pertenecientes al depósito deslizamiento.

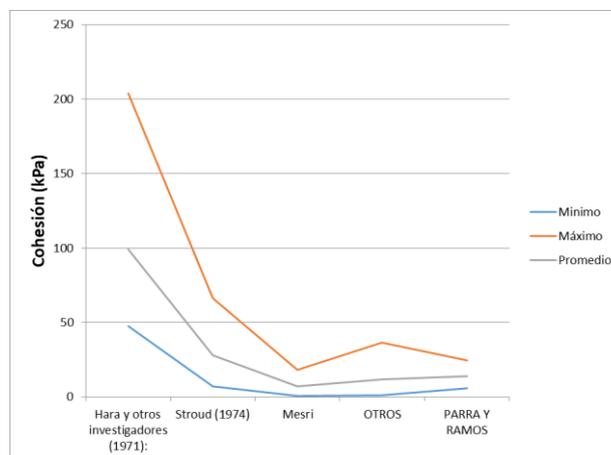


Ilustración 25. Variación cohesión del depósito deslizamiento

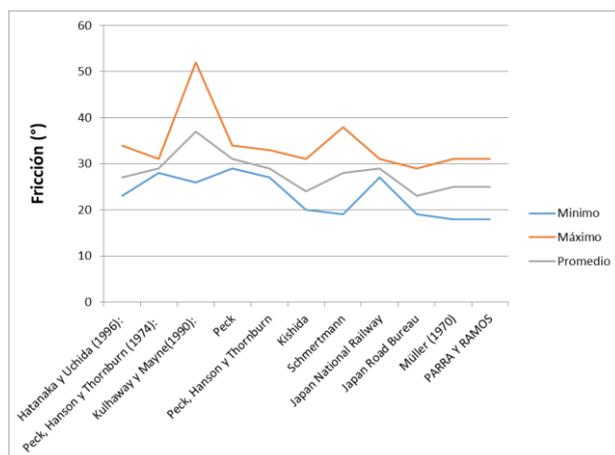


Ilustración 26. Variación ángulo de fricción del depósito deslizamiento

Los resultados de ensayos de caracterización geomecánica realizados sobre muestras de este material arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 12. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del depósito deslizamiento

Ensayo	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Corte CD	40.2	29.0
Corte CD	35.8	11.6

Se tomó como parámetro de ángulo de fricción el promedio de los valores promedio obtenidos con cada correlación, descartando la propuesta de Kulhawy; en el caso de la cohesión el promedio de los valores promedio obtenidos con cada correlación, descartando la propuesta de Hara. A su vez se descartaron los valores obtenidos con los ensayos de corte que no se consideraron representativos para el material.

Tabla 13. Parámetros geomecánicos del depósito deslizamiento

	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	28	16.9
Desviación	3	8.4
Mínimo	23	7.0
Máximo	36	29.0

FLUJO 1

Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 23° y 39° (ignorando las propuestas de Hatanaka y Schmertmann) y entre 0.9 kPa y 66.5 kPa para la cohesión (ignorando las propuestas de Hara y Stroud).

Las siguientes imágenes ilustran las variaciones de los parámetros de cohesión y fricción obtenidos por cada una de las correlaciones disponibles en la literatura para los materiales pertenecientes al flujo 1.

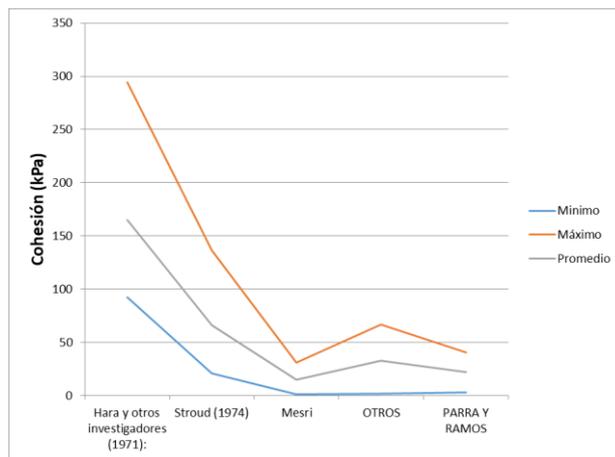


Ilustración 27. Variación cohesión del flujo 1

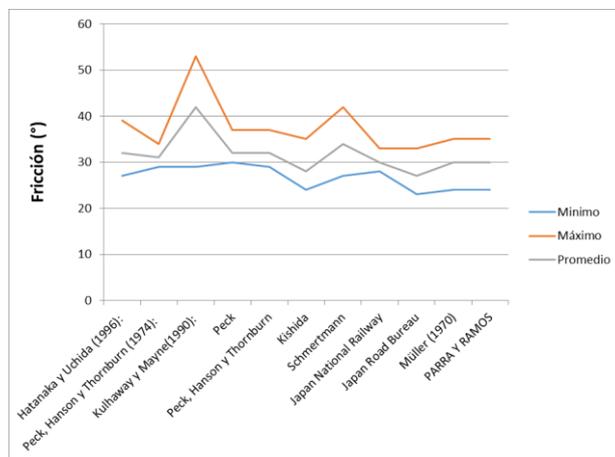


Ilustración 28. Variación ángulo de fricción del flujo 1

Los resultados de ensayos de caracterización geomecánica realizados sobre muestras de este material arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 14. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del flujo 1

Ensayo	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Corte CD	40.4	67.8
Corte CD	41.2	51.1
Corte CD	28.8	69.9

Se tomó como parámetro de ángulo de fricción el promedio de los valores promedio obtenidos con cada correlación, descartando las propuestas de Kulhaway y Schmertmann; en el caso de la cohesión el promedio de los valores promedio obtenidos con cada correlación, descartando las propuestas de Hara y Stroud. A su vez se descartaron los valores obtenidos con los ensayos de corte que no se consideraron representativos para el material.

Tabla 15. Parámetros geomecánicos del flujo 1

	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	30	37.8
Desviación	2	19.3
Mínimo	27	15.0
Máximo	32	67.8

FLUJO 2

Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 22° y 38° (ignorando la propuesta de Kulhaway) y entre 2.8 kPa y 45.1 kPa para la cohesión (ignorando las propuestas de Hara, Stroud y Otros).

Las siguientes imágenes ilustran las variaciones de los parámetros de cohesión y fricción obtenidos por cada una de las correlaciones disponibles en la literatura para los materiales pertenecientes al flujo 2.

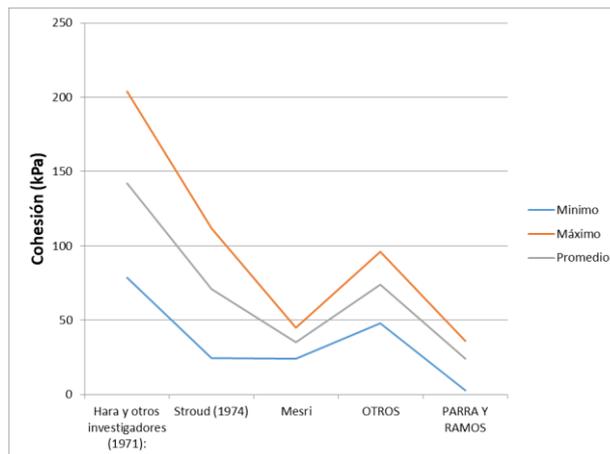


Ilustración 29. Variación cohesión del flujo 2

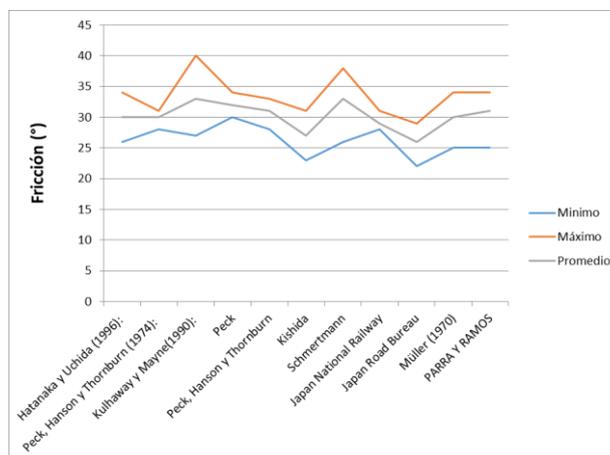


Ilustración 30. Variación ángulo de fricción del flujo 2

Los resultados de ensayos de caracterización geomecánica realizados sobre muestras de este material arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 16. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del flujo 2

Ensayo	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Corte CD	40.6	12.5
Corte CD	37.0	23.1

Se tomó como parámetro de ángulo de fricción el promedio de los valores promedio obtenidos con cada correlación, descartando las propuestas de Kishida, Japan Road Bureau y Japan National Roadway; en el caso de la cohesión el promedio de los valores promedio obtenidos con cada correlación, descartando las propuestas de Hara, Stroud y Otros. A su vez se descartaron los valores obtenidos con los ensayos de corte que no se consideraron representativos para el material.

Tabla 17. Parámetros geomecánicos del flujo 2

	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	32	23.6
Desviación	2	8.0
Mínimo	30	12.5
Máximo	37	35.0

FLUJO 3

Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 25° y 39° y entre 25.9 kPa y 63.6 kPa para la cohesión (ignorando las propuestas de Hara, Stroud y Otros).

Las siguientes imágenes ilustran las variaciones de los parámetros de cohesión y fricción obtenidos por cada una de las correlaciones disponibles en la literatura para los materiales pertenecientes al flujo 3.

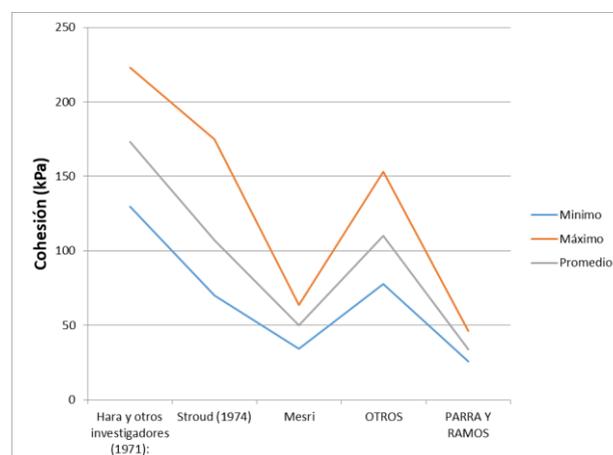


Ilustración 31. Variación cohesión del flujo 3

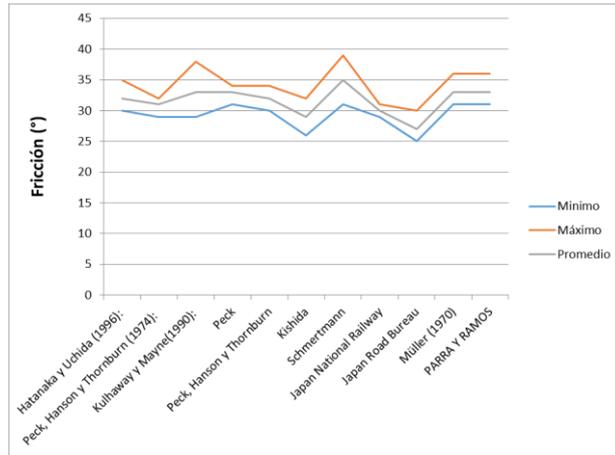


Ilustración 32. Variación ángulo de fricción del flujo 3

Se tomó como parámetro de ángulo de fricción el promedio de los valores promedio obtenidos con cada correlación; en el caso de la cohesión el promedio de los valores promedio obtenidos con cada correlación, descartando las propuestas de Hara, Stroud y Otros.

Tabla 18. Parámetros geomecánicos del flujo 3

	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	32	42.0
Desviación	2	8.0
Mínimo	27	34.0
Máximo	35	50.0

FLUJO 4

Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 25° y 39° (ignorando las propuestas de Hatanaka, Kulhaway y Schmertmann) y entre 7.8 kPa y 67.3 kPa para la cohesión (ignorando las propuestas de Hara, Stroud y Otros).

Las siguientes imágenes ilustran las variaciones de los parámetros de cohesión y fricción obtenidos por cada una de las correlaciones disponibles en la literatura para los materiales pertenecientes al flujo 4.

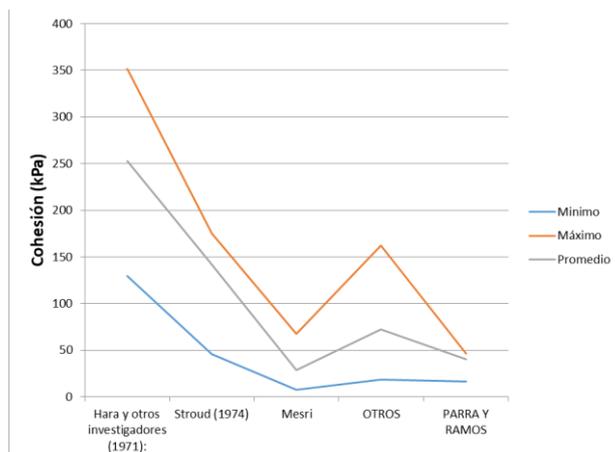


Ilustración 33. Variación cohesión del flujo 4

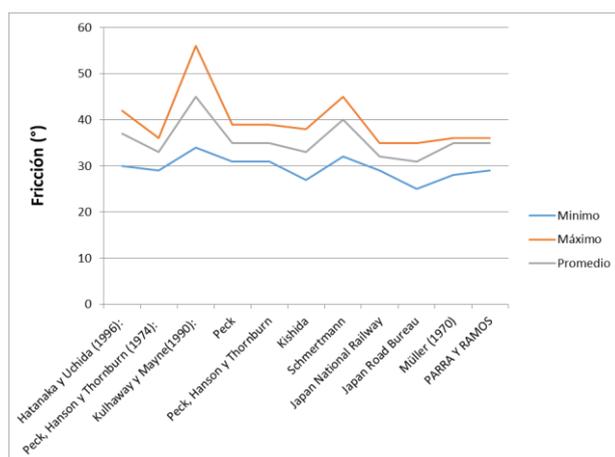


Ilustración 34. Variación ángulo de fricción del flujo 4

Los resultados de ensayos de caracterización geomecánica realizados sobre muestras de este material arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 19. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del flujo 4

Ensayo	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Corte CD	31.3	59.6
Corte CD	38.3	26.3
Corte CD	32.3	17.0
Corte CD	29.4	16.2
Corte CD	35.5	27.2

Se tomó como parámetro de ángulo de fricción el promedio de los valores promedio obtenidos con cada correlación, descartando las propuestas de Hatanaka, Kulhaway y Schmertmann; en el caso de la cohesión el promedio de los valores promedio obtenidos con la propuesta de Parra.

Tabla 20. Parámetros geomecánicos del flujo 4

	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	34	30.8
Desviación	2	13.9
Mínimo	29	16.2
Máximo	38	59.6

DEPÓSITO ALUVIOTORRENCIAL

Debido a que no fue posible caracterizar geomecánicamente este material, se seleccionaron en base a su clasificación sus parámetros geomecánicos, basados en la tabla 11.3 del libro "Mecánica de Suelos" de los autores Lambe y Whitman.

Tabla 11.3 Resumen de datos sobre ángulos de fricción para su utilización en anteproyectos

Clasificación	Angulo de talud natural		Ángulos de fricción					
	i (°)	Talud (vert. a hor.)	Para la resistencia residual		Para la resistencia máxima			
			ϕ_{cv} (°)	$\frac{tg}{\phi_{cv}}$	Compacidad media		Compacta	
					ϕ (°)	$tg \phi$	ϕ (°)	$tg \phi$
Limo (no plástico)	26	1: 2	26	0.488	28	0.532	30	0.577
	a		a		a		a	
Arena uniforme fina a media	30	1: 1.75	30	0.577	32	0.625	34	0.675
	26	1: 2	26	0.488	30	0.577	32	0.675
Arena bien graduada	30	1: 1.75	30	0.577	34	0.675	36	0.726
	30	1: 1.75	30	0.577	34	0.675	38	0.839
Arena y grava	34	1: 1.50	34	0.675	40	0.839	46	1.030
	32	1: 1.60	32	0.625	36	0.726	40	0.900
	a		a		a		a	
	36	1: 1.40	36	0.726	42	0.900	48	1.110

Ilustración 35. Tabla 11.3 "Mecánica de suelos" Lambe y Whitman

Así, teniendo en cuenta que este material se compone por mezclas de limo y arena y no se encuentra en un estado altamente compacto se seleccionaron para este los siguientes parámetros:

Tabla 21. Parámetros geomecánicos del depósito aluviotorrencial

Fricción (°)	Cohesión (kPa)
28	5.0

4.2.3. Nivel freático

A continuación, se muestran los registros de nivel freático encontrados en cada uno de los diferentes sondeos realizados el mes de mayo del 2020. Es posible que estas condiciones difieran con el paso del tiempo por efecto de las variaciones climáticas.

Tabla 22. Profundidad del Nivel Freático

Sondeo	Nivel Freático (m)
P1	No se encontró
P2	6.9
P4	No se encontró
P5	3.0
P6	No se encontró
P7	No se encontró
P8	No se encontró

4.3. Definición del perfil de suelo

En la NSR 10 se definen los parámetros que se utilizan para definir el tipo de perfil de suelo con base en los 30 m superiores del mismo y considerando ensayos realizados en muestras tomadas al menos cada 0.45 m de espesor del suelo.

El número medio de golpes del ensayo de penetración estándar en cualquier perfil de suelo, indistintamente que esté integrado por suelos no cohesivos o cohesivos, se obtiene por medio de:

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \bar{N}_i}$$

N_i = número de golpes por pie obtenidos en el ensayo de penetración estándar, realizado in situ de acuerdo con la norma ASTM D 1586, haciendo corrección por energía N60, correspondiente al estrato i . El valor de N_i a emplear para obtener el valor medio, no debe exceder 100.

d_i = espesor del estrato i , localizado dentro de los 30 m superiores del perfil.

En el Anexo 3 se presentan las tablas con el resultado de la operación para cada perforación. Los valores posteriores a la profundidad máxima sondeada se asumen de manera conservadora con un valor igual al último metro explorado; en los casos donde el valor de N sea superior a 50 golpes por pie, se dio rotación o se dio rechazo, se tomó un valor de N de 50 como definitivo. Luego de obtener el valor de N_{prom} para cada sondeo, se hace un promedio de todos dando como resultado un valor igual a 21, correspondiente a un perfil de suelo tipo D.

Para efectos de la aplicación de la Norma Sismo Resistente NSR-10 en el diseño estructural, se deben tener en cuenta los siguientes parámetros, algunos dependientes de la localización del municipio:

1. Zona de amenaza sísmica:	Intermedia
2. Coeficiente de Aceleración Pico Efectiva A_a :	0.15
3. Coeficiente de Velocidad pico Efectiva (A_v):	0.20
4. Coeficiente de amplificación (F_a):	1.50
5. Coeficiente de amplificación (F_v):	2.00
6. Perfil del suelo:	D

Teniendo en cuenta el tipo de suelo encontrado en el sector y según lo dispuesto en la norma sismoresistente colombiana (NSR-10) sobre la cual se basan los estudios y diseños

para la ejecución de proyectos civiles, se determinó que el área está conformada por un perfil de suelo tipo D. Las características para la clasificación de dicho perfil se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23. Clasificación de los perfiles de suelo.1

Tipo de Perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > V_s \geq 760 \text{ m/s}$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanca, que cumplan con cualquiera de los 2 criterios	$N \geq 50$ o $S_u \geq 100$ Kpa
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
	perfiles de suelos rígidos que cumplan con cualquiera de las condiciones	$50 > N \geq 15$ o $100 > S_u \geq 50$ Kpa
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda cortante, o	$180 \text{ m/s} > V_s$
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3m de arcillas blandas	$IP > 20$ $W \geq 40\%$ $50 \text{ Kpa} > S_u$
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotécnico de acuerdo con el procedimiento A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases:	
	F1 - Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: Suelo licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.	
	F2 - Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H> 3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas)	
	F3 -Arcillas de muy alta plasticidad(H> 7,5 m con Índice de Plasticidad IP>75)	
F4 - Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H>36 m.)		

4.4. Análisis de estabilidad

Realizada la evaluación interdisciplinaria del territorio, con miras a identificar y delimitar la amenaza por movimientos en masa y las zonas homogéneas de aptitud de uso del suelo, se plantea la necesidad de involucrar análisis cuantitativos, en este caso relacionados con los factores de seguridad de la ladera, puesto que las caracterizaciones geológicas y geomorfológicas incluyen evaluaciones cualitativas que pueden llevar a imprecisiones.

Para el análisis de estabilidad se utilizó el software Slide v 6.0 basado en la teoría del equilibrio límite, el cual calcula por diferentes métodos (escogiendo la metodología de Morgenstern-Price) los factores de seguridad más críticos para diferentes superficies de falla en el talud. Para este caso se consideró de acuerdo con observaciones de campo, tipo de material y condiciones topográficas, que la falla más probable corresponde a fallas circulares. Adicionalmente el análisis consideró una evaluación probabilística por el método Monte-Carlo con un número de muestra de 1000.

Para efectos de determinar las características topográficas de los taludes a evaluar, se levantaron secciones topográficas, sobre las cuales se plasmaron las condiciones estratigráficas y geomecánicas de los diferentes estratos que componen cada uno de los sectores. La estratigrafía se obtuvo a partir de los sondeos, los afloramientos y los parámetros utilizados para el análisis de estabilidad se determinaron de acuerdo con las consideraciones expuestas en el numeral de parámetros geomecánicos.

Para evaluar la estabilidad de la zona se consideran tres situaciones, inicialmente se analiza el modelo para el caso estático, se evalúa el comportamiento del terreno bajo solicitaciones sísmicas y el caso saturado con aumento del nivel freático, obteniendo para los tres casos los factores de seguridad de cada superficie de falla, verificando el cumplimiento de los valores mínimos recomendados cuando se tienen riesgos altos de vidas humanas y económicas.

El valor límite para el factor de seguridad en el caso estático y pseudoestático fue seleccionado a partir de las recomendaciones de la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10, Título H., las cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 24. Factores de seguridad mínimos para evaluación y diseño de taludes

Factores de seguridad Básicos Mínimos Directos				
Condición	F _{SBM}		F _{SBUM}	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga viva Normal	1,50	1,25	1,80	1,40
Carga Muerta + Carga viva Máxima	1,25	1,10	1,40	1,15
Carga Muerta + Carga viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1,10	1,00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes - Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1,50	1,25	1,80	1,40
Taludes - Condición Seudo-Estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1,05	1,00 (*)	No se permite	No se permite

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

Para el análisis seudoestático se utilizarán las recomendaciones establecidas en la NSR-10 numeral H.5.2.5 Sismo de diseño, en donde se especifica que el coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestáticos de taludes (KST) deberá estimarse en función de la aceleración máxima del terreno (a_{max}) y ésta a su vez se calcula en función de la aceleración pico efectiva (a_a), del factor de amplificación F_a y del coeficiente de importancia (I) como:

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

Para el caso del municipio de Medellín donde se ubica el lote de estudio se estableció un valor de a_a 0.15 y se determinó un F_a de 1.5. Considerando el tipo de edificaciones (grupo I) el coeficiente de importancia es 1.0. Si se reemplazan estos valores en la ecuación anterior se tiene que: $a_{max} = 0.225g$.

El coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestático de taludes KST tiene valor inferior o igual al de a_{max} y se admiten los siguientes valores mínimos de KST/ a_{max} , dependiendo del tipo de material térreo (reforzado o no) y del tipo de análisis.

Tabla 25. Valores de KST/ a_{max} Mínimos para análisis Seudoestático de Taludes

Tabla H.5.2-1
Valores de K_{ST}/a_{max} Mínimos para Análisis Seudoestático de Taludes

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

Para este caso se tiene una relación $KST/a_{max} = 0.80$, entonces El coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestático sería $(KST) = 0.18$.

Así, se usará como componente de aceleración horizontal el valor de KST previamente

determinado y como valor del componente vertical dos tercios del valor usado para el componente horizontal, aplicándose tanto en dirección positiva como negativa, buscando determinar cuál de estas presenta la condición de estabilidad más desfavorable.

Se aceptaron factores de seguridad en el caso estático iguales o mayores a 1.5 y en el caso seudoestático iguales o mayores a 1.05, de acuerdo a lo exigido en la norma.

Utilizando la información de los sondeos y resultados de laboratorio, se construyó un modelo geotécnico para cada perfil analizado. En la siguiente ilustración se muestra la localización de los seis (6) perfiles analizados.

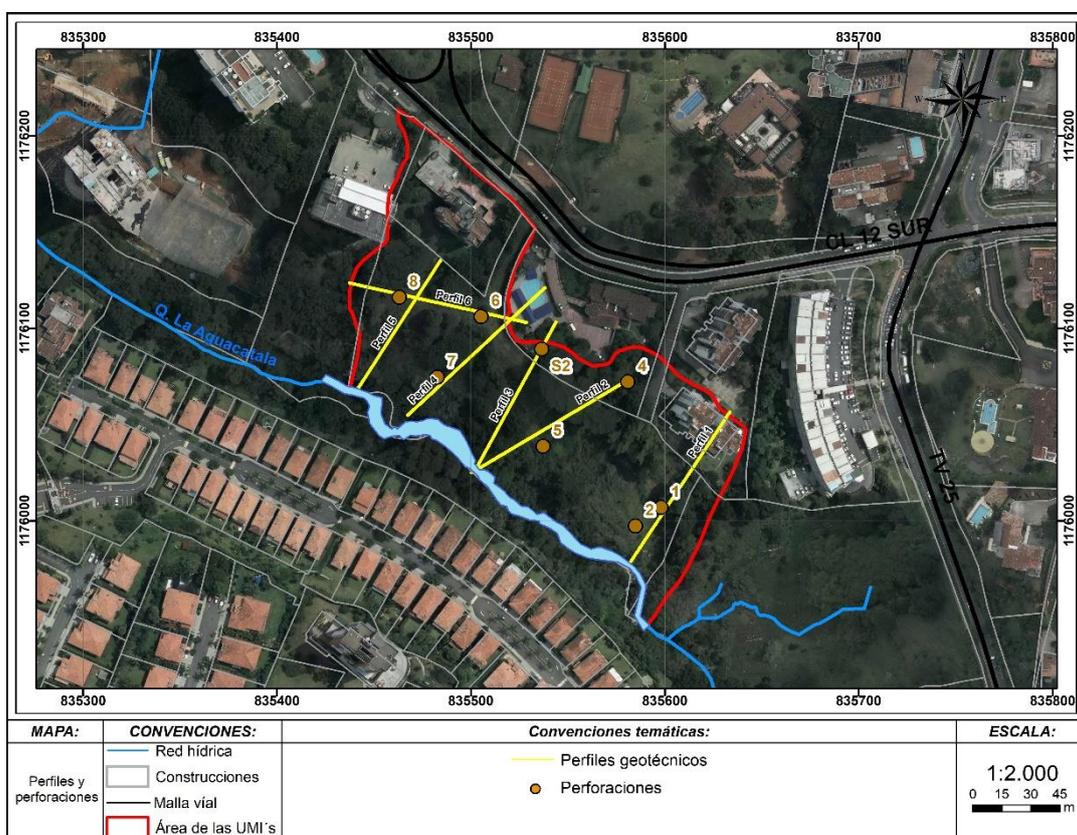


Ilustración 36. Localización perfiles analizados

Con base en las características y propiedades geotécnicas y topográficas del terreno se construyeron los modelos geotécnicos para cada perfil analizado tanto para las condiciones actuales. A continuación, se presenta las consideraciones y resultados de dichos análisis.

4.4.1. Análisis de estabilidad en condiciones actuales - Susceptibilidad

El análisis de la estabilidad en condiciones actuales se relaciona con un análisis de susceptibilidad para la escala detallada de este estudio. La susceptibilidad indica las características propias del terreno y que se tienen bajo las condiciones actuales, y

representa que posibilidad existe, de acuerdo con las propiedades de todas las variables analizadas, de tener la ocurrencia de un movimiento en masa.

Construido el perfil estratigráfico del terreno, esbozado a partir de la información proporcionada por los sondeos exploratorios, las características topográficas del terreno y las propiedades geomecánicas definidas para cada uno de los estratos, se evalúa la estabilidad para las condiciones actuales, tanto en el caso estático como en el pseudoestático, este último simulando el efecto que produciría sobre el terreno la ocurrencia de un evento sísmico. El material sin sondear se modeló usando los parámetros de máximos del flujo 4.

PERFIL 1

Sigue el lineamiento del eje perfil 1, mostrado en la Ilustración 36, en este se modelaron las pilas de fundación que representan la estructura existente en la parte alta del perfil.

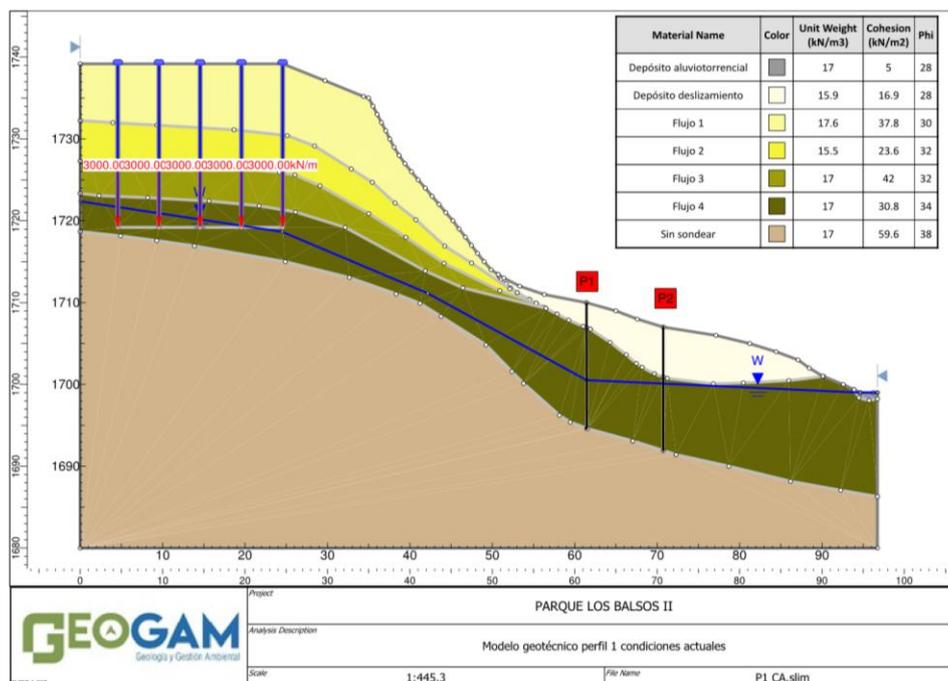


Ilustración 37. Modelo geotécnico perfil 1

Para las condiciones actuales en el Perfil 1, se obtiene el caso estático una condición que no satisface el factor de seguridad mínimo, con un valor determinístico de 1.250, medio de 1.285 y con una probabilidad de falla de 0.5% (Ilustración 38); en el caso pseudoestático se encontró similarmente una condición que no satisface el valor mínimo recomendado, con un factor de seguridad determinístico de 0.968, un factor medio es de 1.009 y una probabilidad de falla de 48.0% (Ilustración 39).

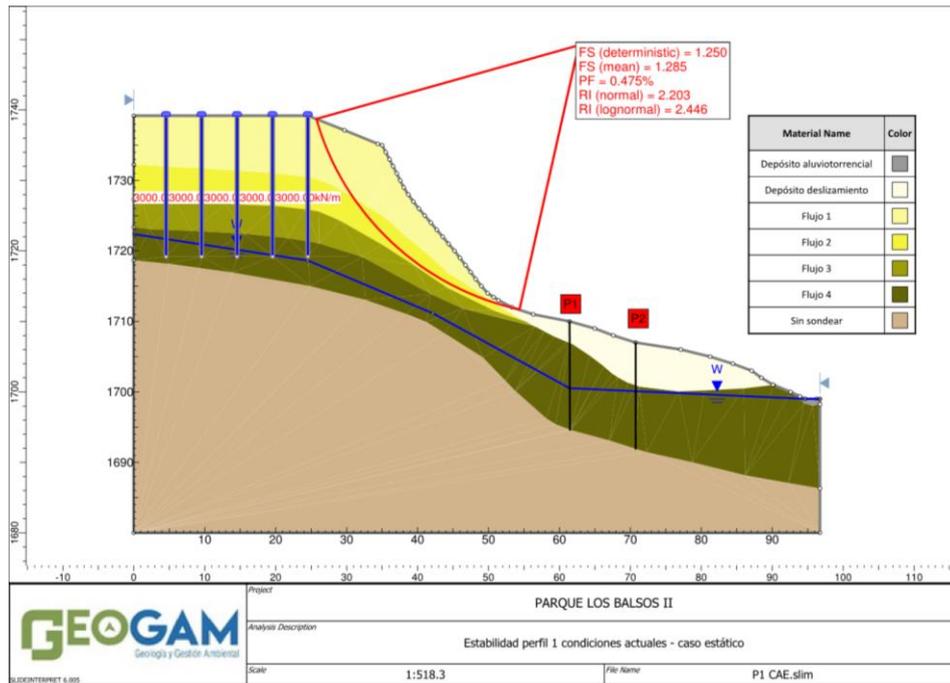


Ilustración 38. Análisis de estabilidad Perfil 1 – caso estático condiciones actuales

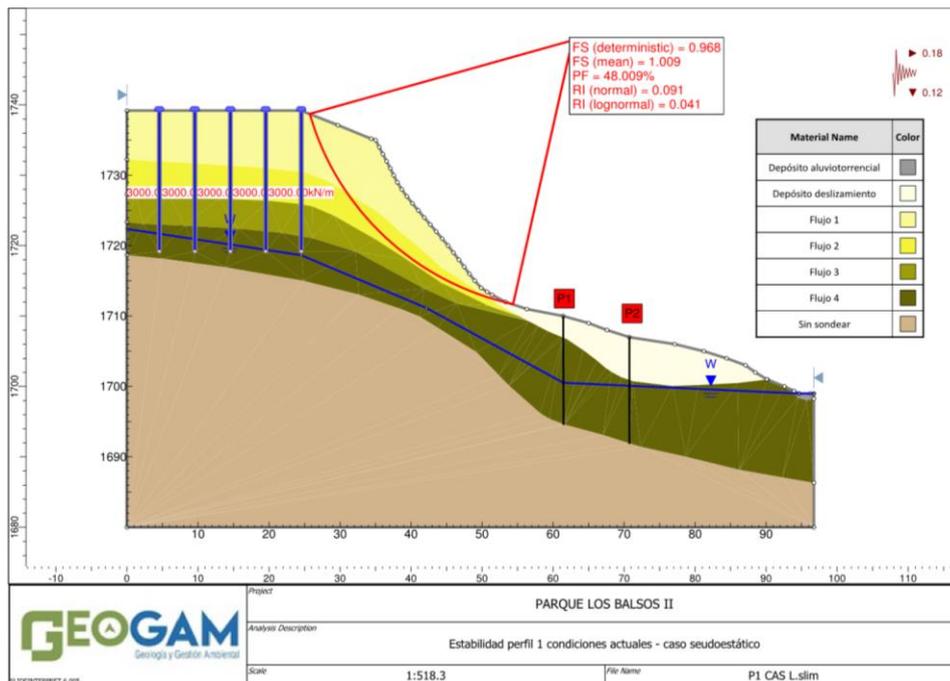


Ilustración 39. Análisis de estabilidad Perfil 1 – caso pseudoestático condiciones actuales

Adicionalmente se evalúa un caso donde se presente un aumento en el nivel freático, con el fin de considerar una condición más desfavorable en cuanto a estabilidad, obteniendo factores de seguridad inferiores al caso estático, con un factor de seguridad determinístico de 1.200, un factor de seguridad medio de 1.221 y una probabilidad de falla de 3.8% (Ilustración 40).

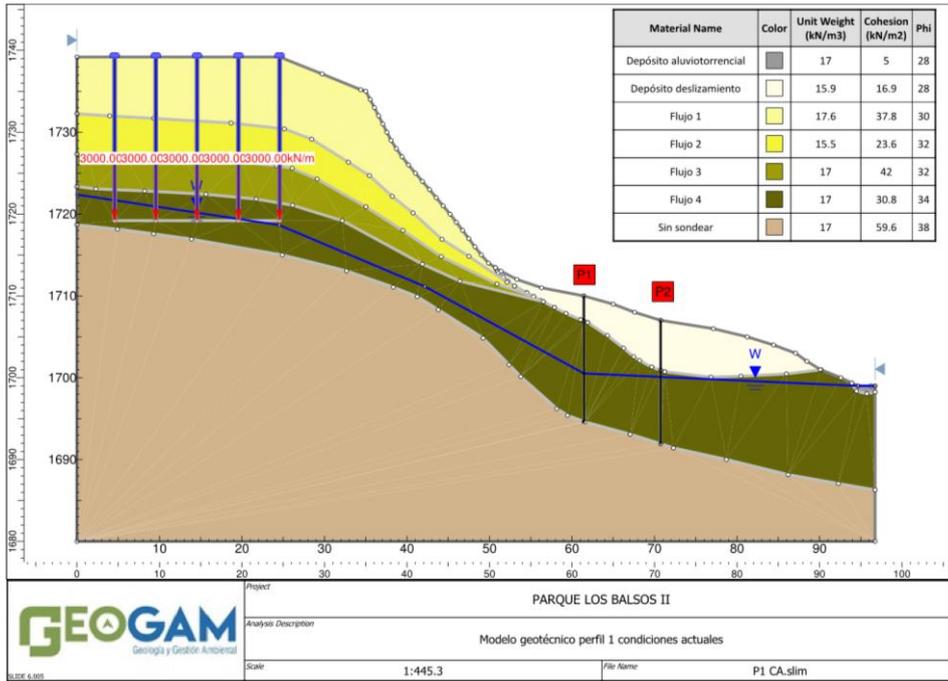


Ilustración 40. Análisis de estabilidad Perfil 1 – caso estático condiciones actuales aumento nivel freático

PERFIL 2

Sigue el lineamiento del eje perfil 2, mostrado en la Ilustración 36, en este se modeló una carga distribuida en la parte alta con el fin de simular las estructuras existentes.

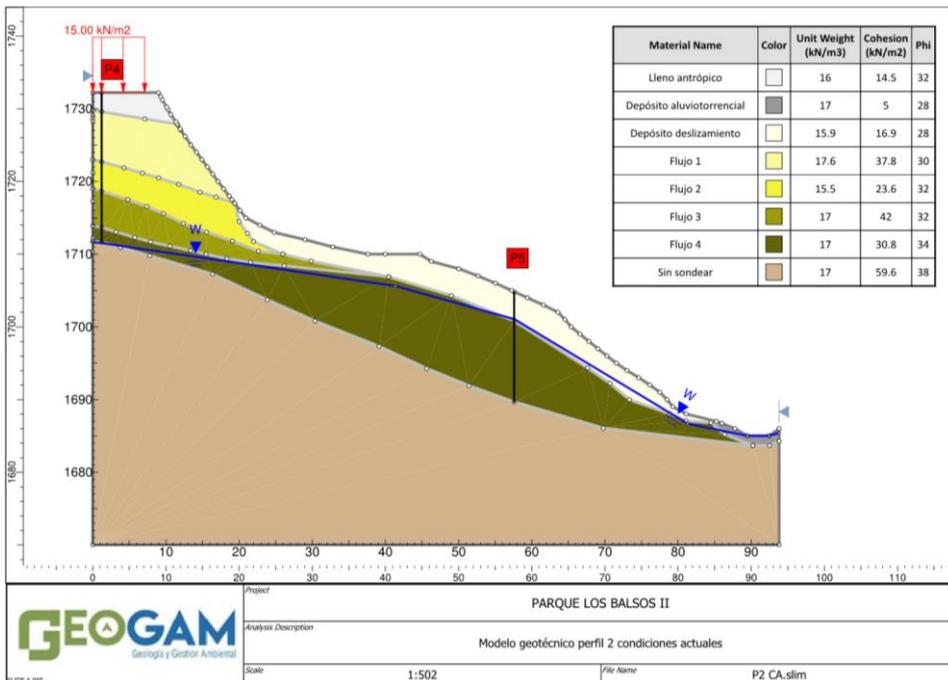


Ilustración 41. Modelo geotécnico perfil 2

Para las condiciones actuales en el Perfil 2, se obtiene el caso estático una condición que no cumple el valor recomendado con un factor de seguridad determinístico de 1.328 y un factor de seguridad medio de 1.414, con una probabilidad de falla de 0.0% (Ilustración

42), así como otro potencial grupo de superficies de falla, ubicadas en el talud de la zona inferior, con un factor de seguridad mínimo de 1.398; en el caso pseudoestático se encontró similarmente una condición que no satisface el mínimo recomendado con un factor de seguridad determinístico de 1.030, un factor medio de 1.082 y una probabilidad de falla de 33.4% (Ilustración 43).

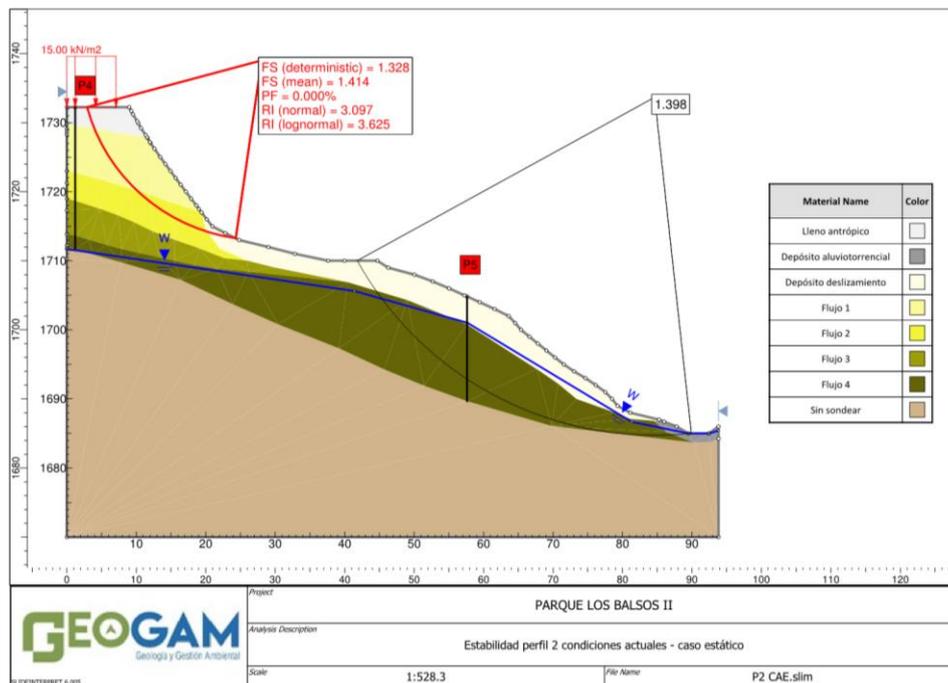


Ilustración 42. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso estático condiciones actuales

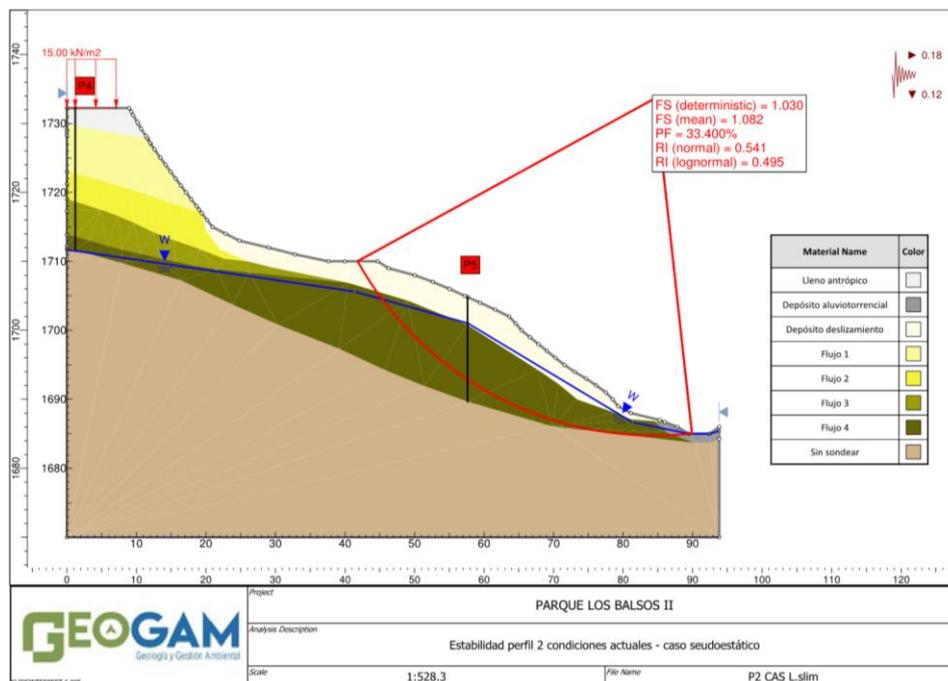


Ilustración 43. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso pseudoestático condiciones actuales

Adicionalmente se evalúa un caso donde se presente un aumento en el nivel freático, con el fin de considerar una condición más desfavorable en cuanto a estabilidad, obteniendo

factores de seguridad inferiores al caso estático, con un factor de seguridad determinístico de 1.223, un factor de seguridad medio de 1.289, y una probabilidad de falla de 8.6% (Ilustración 44), así mismo, se obtiene en el talud de la zona superior un factor de seguridad mínimo de 1.310.

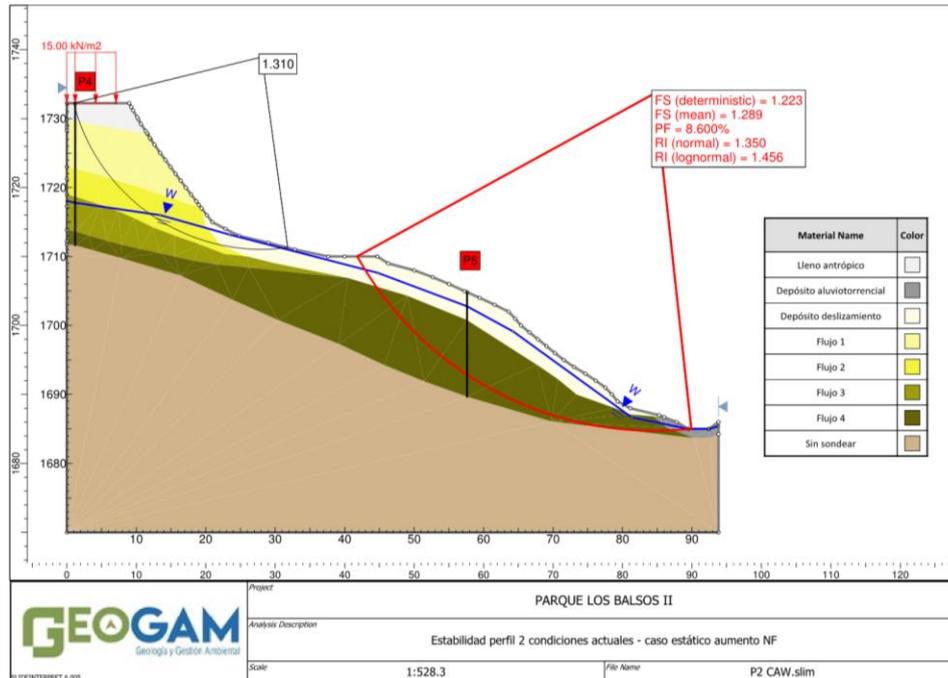


Ilustración 44. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso estático condiciones actuales aumento nivel freático

PERFIL 3

Sigue el lineamiento del eje perfil 3, mostrado en la Ilustración 36, en este se modelaron una estructura de contención y una carga distribuida en la parte alta con el fin de simular las estructuras existentes.

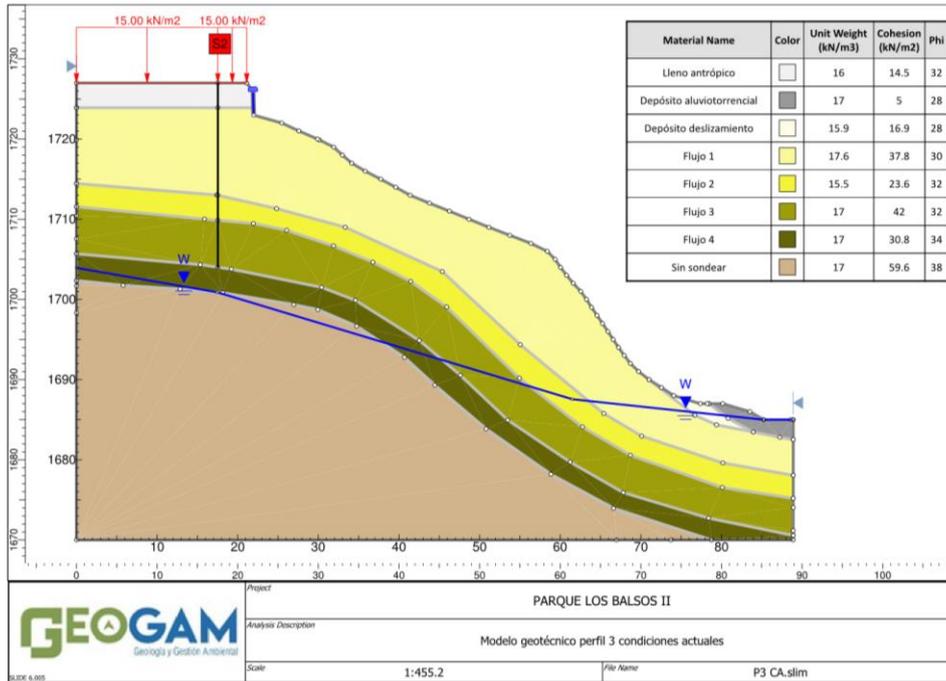


Ilustración 45. Modelo geotécnico perfil 3

Para las condiciones actuales en el Perfil 3, se obtiene el caso estático una condición que cumple el valor límite recomendado, con un factor de seguridad determinístico de 1.504 y un factor de seguridad medio de 1.587, además de una probabilidad de falla de 0.0% (Ilustración 46); en el caso seudoestático se encontró similarmente una condición que satisface el mínimo recomendado con un factor de seguridad determinístico de 1.089, un factor medio de 1.152 y una probabilidad de falla de 7.2% (Ilustración 47).

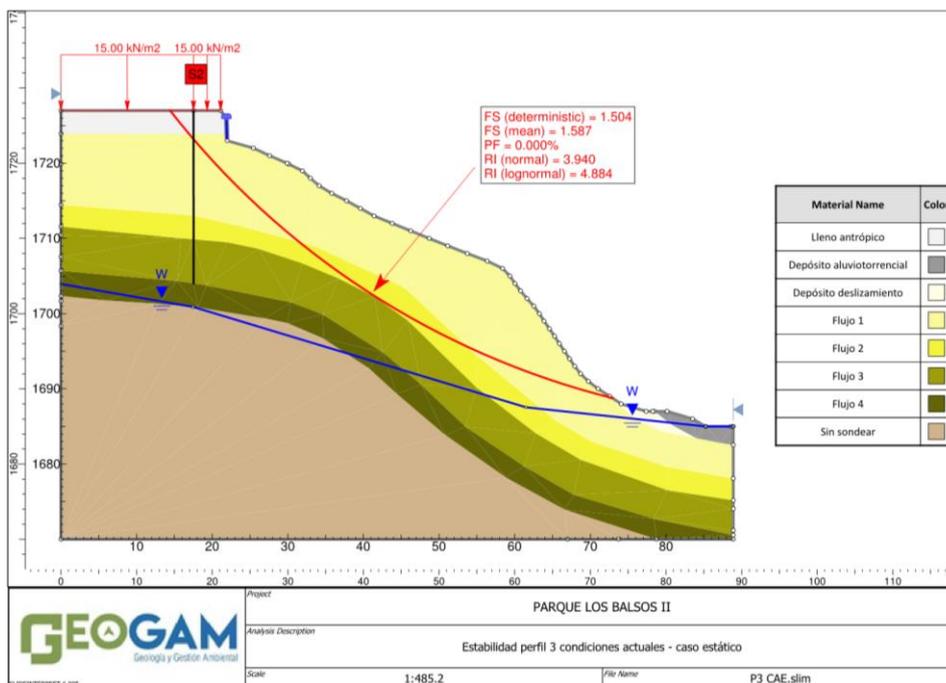


Ilustración 46. Análisis de estabilidad Perfil 3 – caso estático condiciones actuales

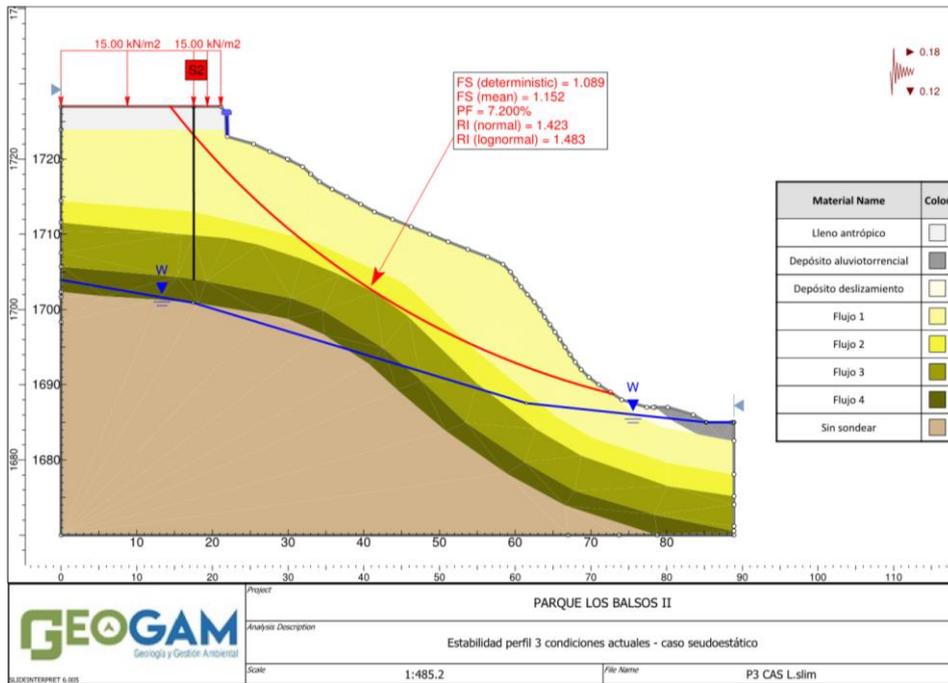


Ilustración 47. Análisis de estabilidad Perfil 3 – caso pseudoestático condiciones actuales

Adicionalmente se evalúa un caso donde se presente un aumento en el nivel freático, con el fin de considerar una condición más desfavorable en cuanto a estabilidad, obteniendo factores de seguridad inferiores al caso estático, con un factor de seguridad determinístico de 1.286, un factor de seguridad medio de 1.348 y una probabilidad de falla de 0.0% (Ilustración 48).

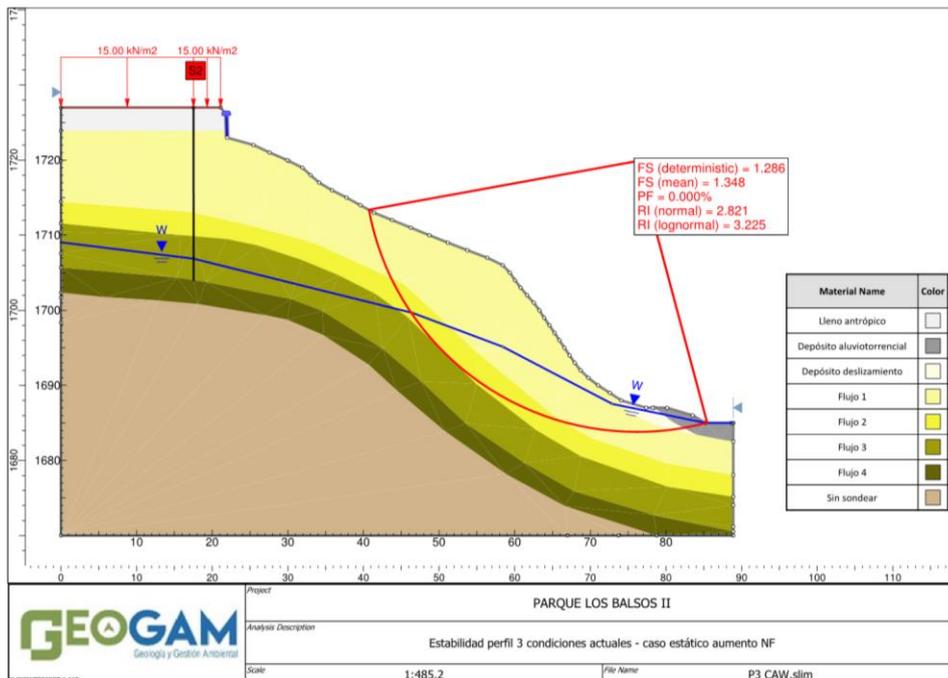


Ilustración 48. Análisis de estabilidad Perfil 3 – caso estático condiciones actuales aumento nivel freático

PERFIL 4

Sigue el lineamiento del eje perfil 4, mostrado en la Ilustración 36, en este se modeló una carga distribuida en la parte alta con el fin de simular las estructuras existentes.

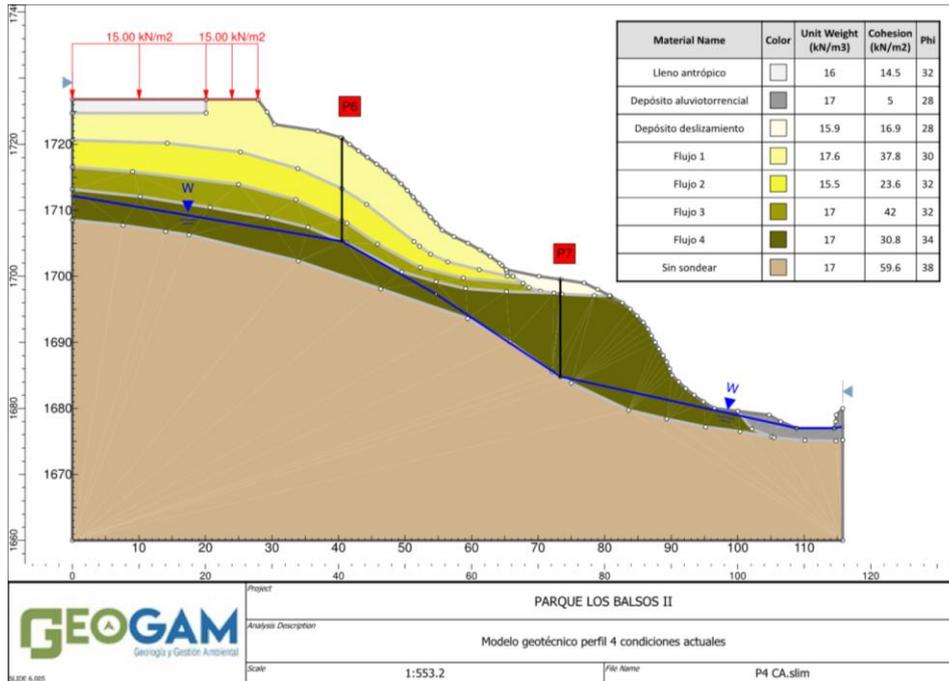


Ilustración 49. Modelo geotécnico perfil 4

Para las condiciones actuales en el Perfil 4, se obtiene el caso estático una condición que cumple el valor límite recomendado, con un factor de seguridad determinístico de 1.590 y un factor de seguridad medio de 1.667, además de una probabilidad de falla de 0.0% (Ilustración 50); en el caso seudoestático se encontró similarmente una condición que satisface el mínimo recomendado con un factor de seguridad determinístico de 1.147, un factor medio de 1.187 y una probabilidad de falla de 1.7% (Ilustración 51).

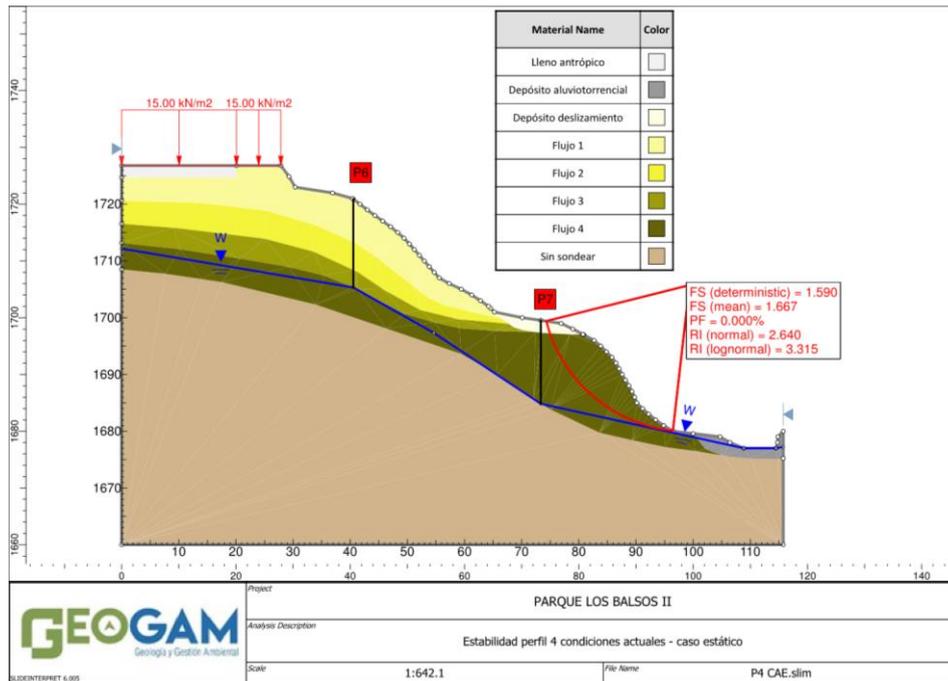


Ilustración 50. Análisis de estabilidad Perfil 4 – caso estático condiciones actuales

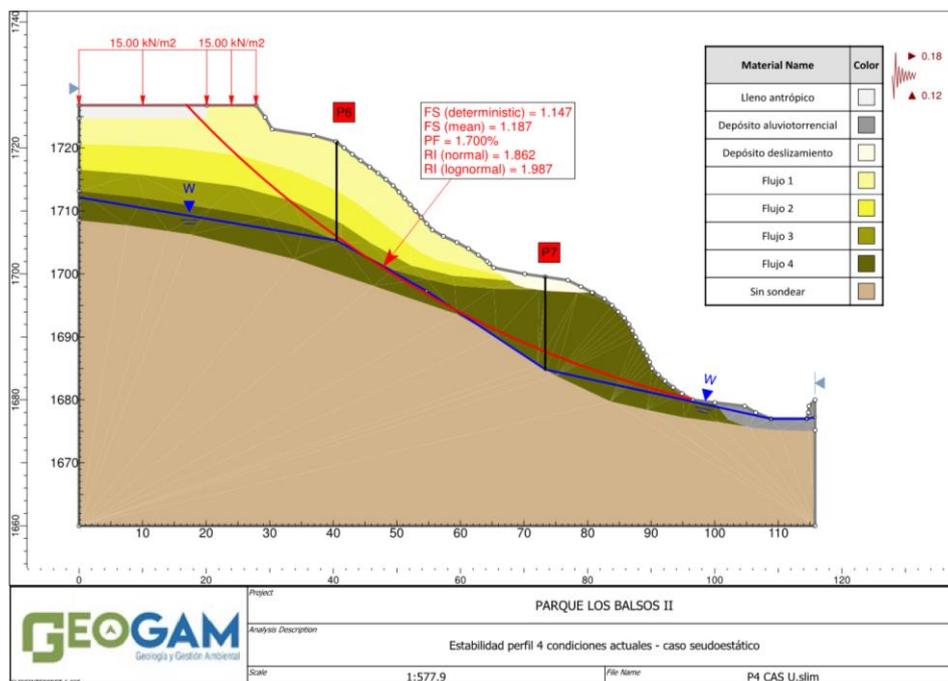


Ilustración 51. Análisis de estabilidad Perfil 4 – caso pseudoestático condiciones actuales

Adicionalmente se evalúa un caso donde se presente un aumento en el nivel freático, con el fin de considerar una condición más desfavorable en cuanto a estabilidad, obteniendo factores de seguridad inferiores al caso estático, con un factor de seguridad determinístico de 1.394, un factor de seguridad medio es de 1.442 y una probabilidad de falla de 0.0% (Ilustración 52).

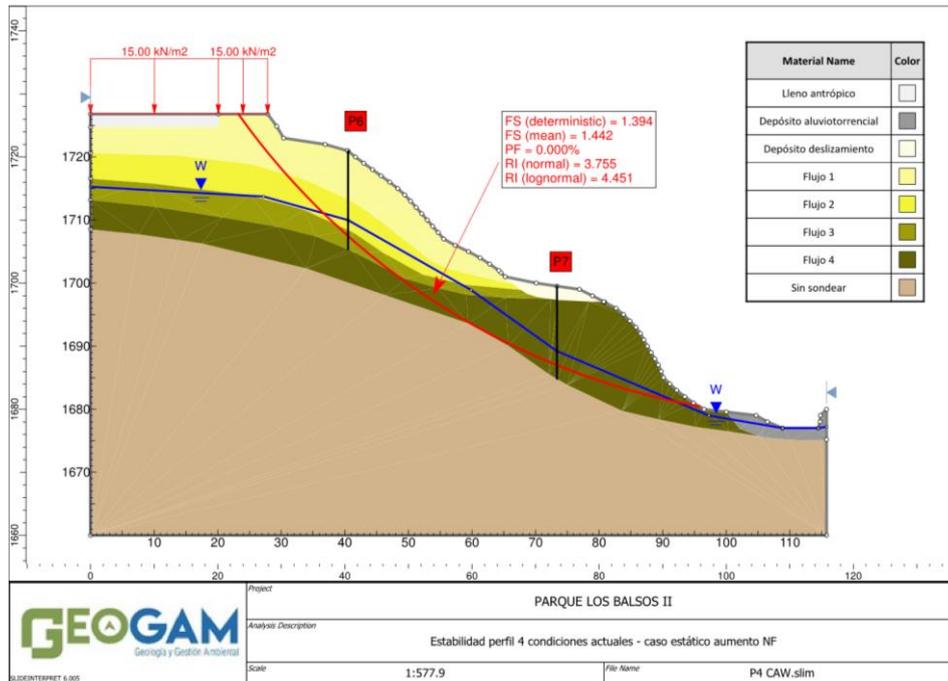


Ilustración 52. Análisis de estabilidad Perfil 4 – caso estático condiciones actuales aumento nivel freático

PERFIL 5

Sigue el lineamiento del eje perfil 5, mostrado en la Ilustración 36.

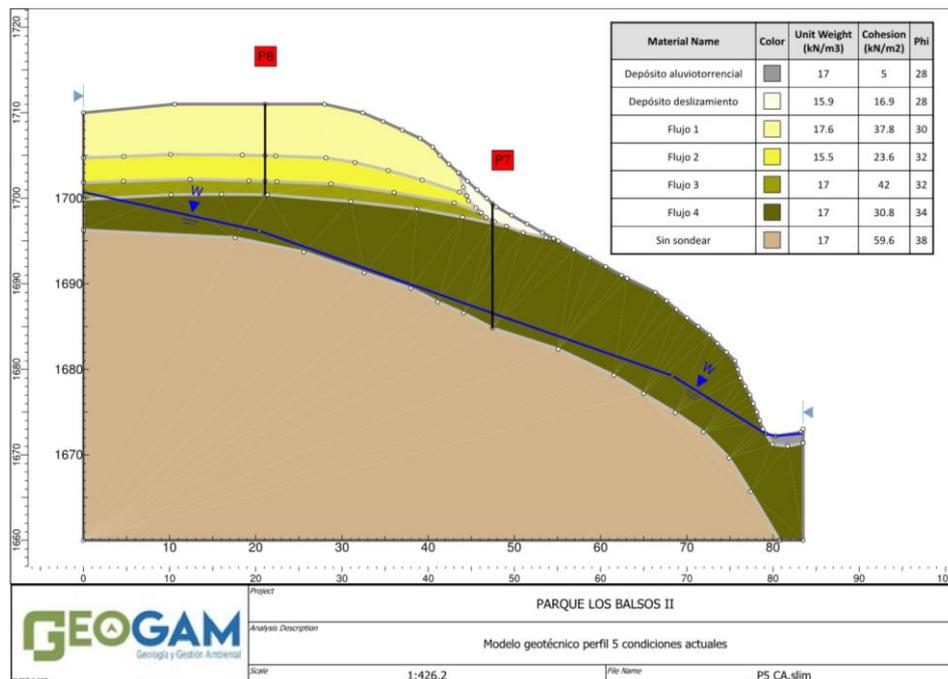


Ilustración 53. Modelo geotécnico perfil 5

Para las condiciones actuales en el Perfil 5, se obtiene el caso estático una condición de que no satisface el valor recomendado, con un factor de seguridad determinístico de 1.431, un factor de seguridad medio de 1.434 y una probabilidad de falla de 0.0% (Ilustración 54); en el caso seudoestático se encontró una condición que satisface el

mínimo recomendado, con un factor de seguridad determinístico de 1.054, mientras que el factor medio es de 1.095 y la probabilidad de falla es de 19.8% (Ilustración 55).

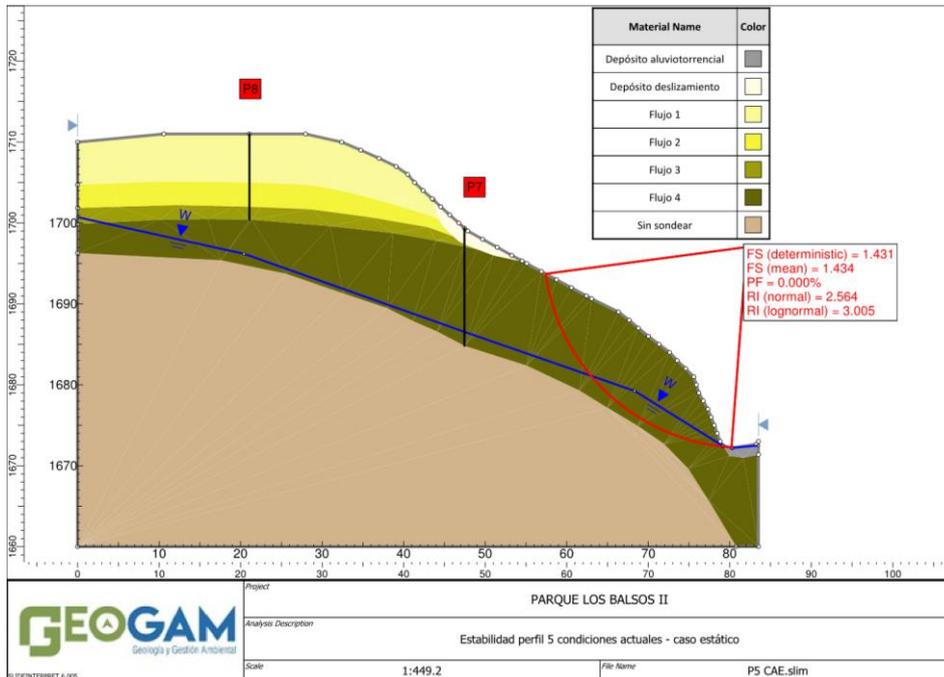


Ilustración 54. Análisis de estabilidad Perfil 5 – caso estático condiciones actuales

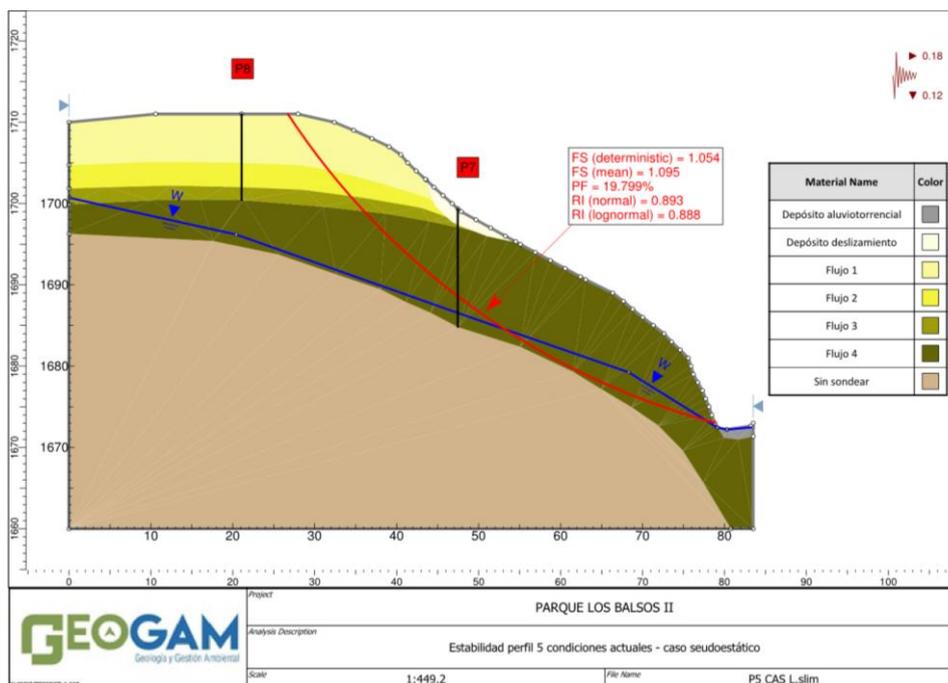


Ilustración 55. Análisis de estabilidad Perfil 5 – caso pseudoestático condiciones actuales

Adicionalmente se evalúa un caso donde se presente un aumento en el nivel freático, con el fin de considerar una condición más desfavorable en cuanto a estabilidad, obteniendo factores de seguridad inferiores al caso estático, con un factor de seguridad determinístico de 1.203, un factor de seguridad medio de 1.124, con una probabilidad de falla de 19.2% (Ilustración 56).

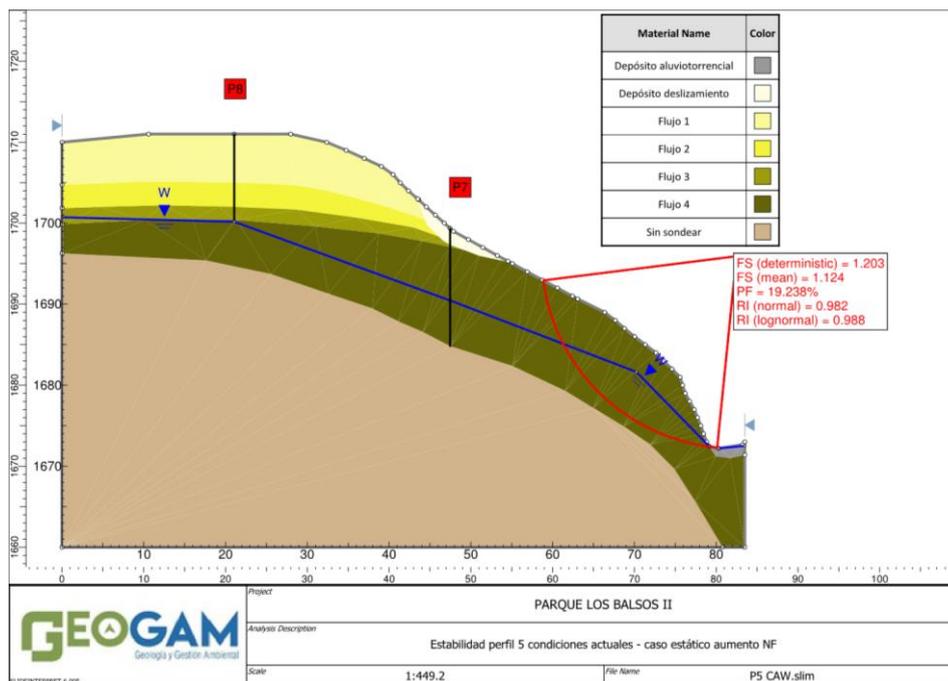


Ilustración 56. Análisis de estabilidad Perfil 5 – caso estático condiciones actuales aumento nivel freático

PERFIL 6

Sigue el lineamiento del eje perfil 6, mostrado en la Ilustración 36, en este se modeló una carga distribuida en la parte alta con el fin de simular las estructuras existentes.

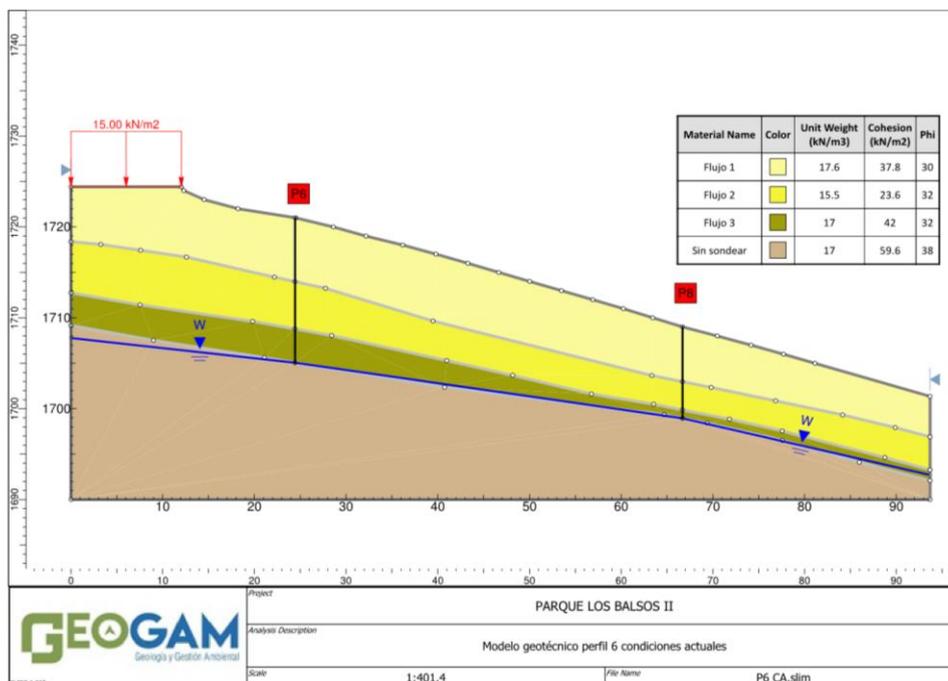


Ilustración 57. Modelo geotécnico perfil 6

Para las condiciones actuales en el Perfil 6, se obtiene el caso estático una condición de

estabilidad con un factor de seguridad determinístico de 3.347 y un factor de seguridad medio de 3.455, con una probabilidad de falla de 0.00% (Ilustración 58); en el caso seudoestático se encontró similarmente una condición que satisface el mínimo recomendado con un factor de seguridad determinístico de 1.925, mientras que el factor medio es de 1.994, con una probabilidad de falla de 0.00% (Ilustración 59).

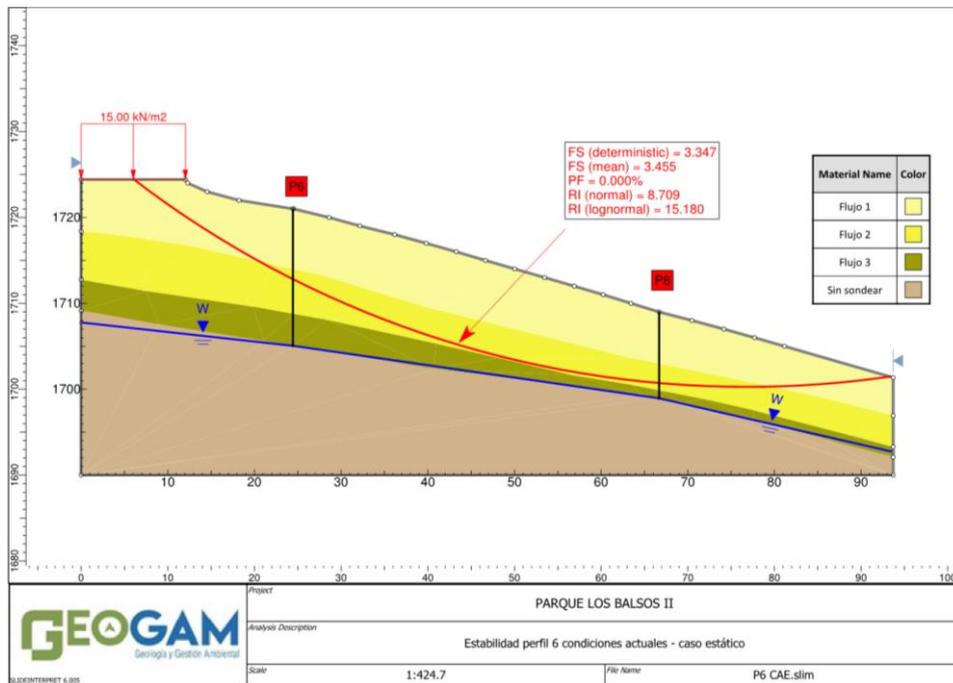


Ilustración 58. Análisis de estabilidad Perfil 6 – caso estático condiciones actuales

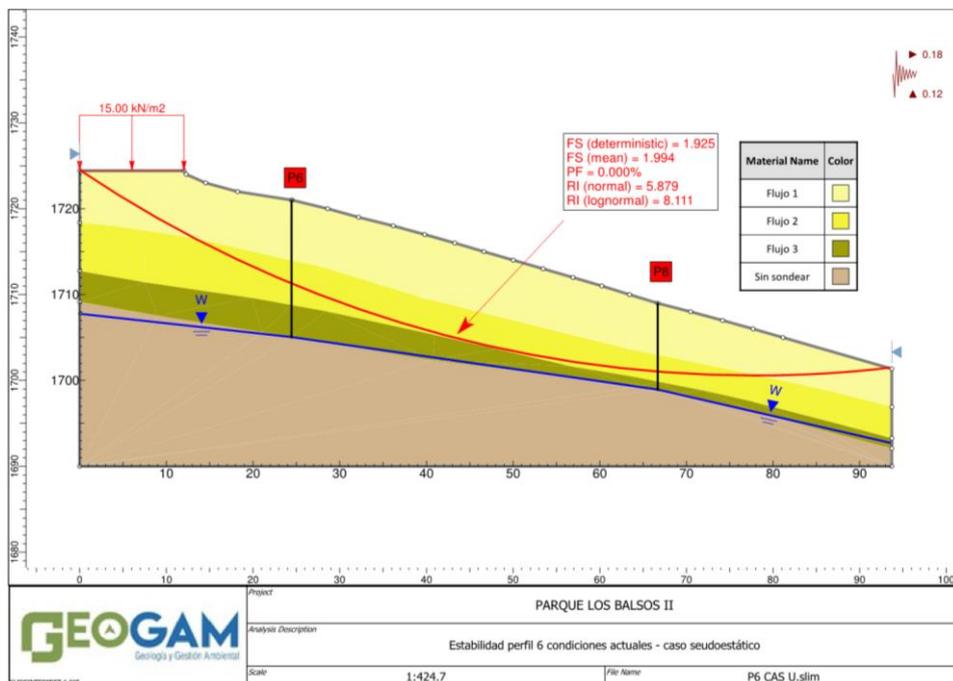


Ilustración 59. Análisis de estabilidad Perfil 6 – caso seudoestático condiciones actuales

Adicionalmente se evalúa un caso donde se presente un aumento en el nivel freático, con el fin de considerar una condición más desfavorable en cuanto a estabilidad, obteniendo

factores de seguridad similares al caso estático, con un factor de seguridad determinístico de 3.235 y un factor de seguridad medio de 3.345, con una probabilidad de falla de 0.0% (Ilustración 60).

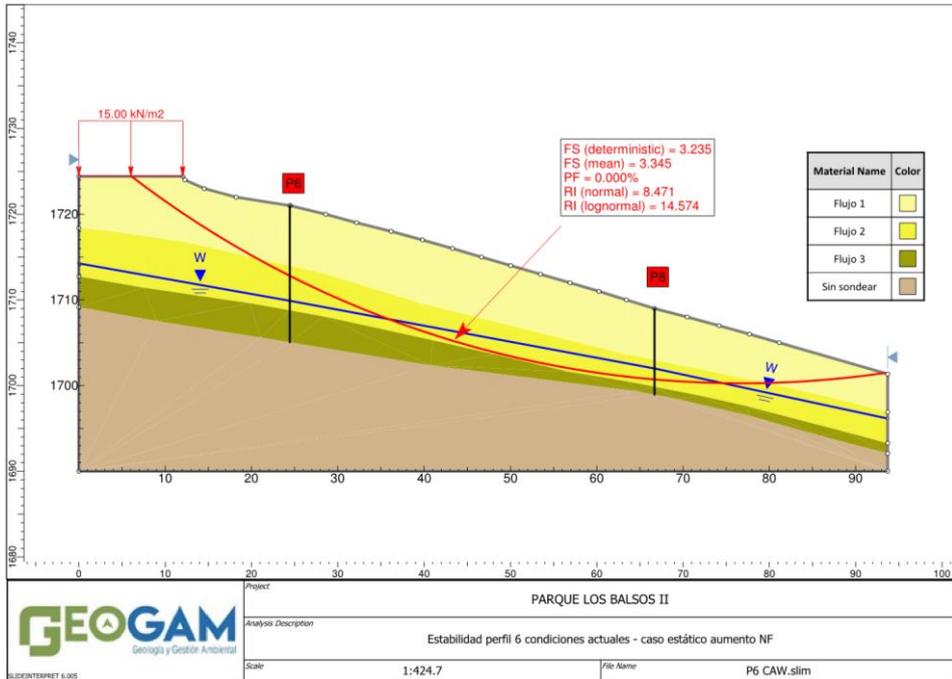


Ilustración 60. Análisis de estabilidad Perfil 6 – caso estático condiciones actuales aumento nivel freático

5. Zonificación de amenazas por movimientos en masa

La amenaza por movimientos en masa es la probabilidad de que se presente este tipo de eventos, con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales (DAP, DAGRD, EAFIT, 2019).

El análisis de amenaza por movimientos en masa está constituido por dos partes, el análisis de estabilidad que se realiza por medio del método determinístico, que es un análisis cuantitativo en el cual se obtiene la probabilidad de falla de cada ladera en condiciones saturadas y pseudostática, y el análisis de la distancia de viaje, propagación o runout, que indica hasta dónde puede llegar la masa de un posible movimiento en masa.

5.1. Amenaza por estabilidad

Para el análisis de la estabilidad se requiere la elaboración de modelos para evaluar las condiciones de los taludes con base en la información de detalle obtenida a partir de los datos de campo y la información de la exploración del subsuelo, con estos datos se calcula el factor de seguridad en condiciones actuales para obtener la susceptibilidad; el análisis

de estos perfiles de estabilidad para el caso seudostático y con aumento del nivel freático permiten obtener la amenaza cuyo resultado es la suma de los valores obtenidos en cada caso en términos de la probabilidad de falla. Estos modelos requieren información relacionada con la estratigrafía del sector, estructura, propiedades de la resistencia de los materiales, ángulo de fricción interno y modelos de simulación de niveles freáticos.

En la siguiente tabla se presenta el consolidado de los factores de seguridad obtenidos en el Capítulo 4.4.1 y en los rangos definidos por el Decreto 1626 de 2015. De estos se toma la condición estática o actual para la zonificación de la amenaza en el área de estudio.

Tabla 26. Resultados análisis estabilidad condiciones actuales

Condiciones actuales						
SECCIÓN	Estático		Seudoestático		Aumento N. F.	
	F.S.	Susceptibilidad	PF/año	Amenaza	PF/año	Amenaza
Perfil 1	1,250	Media	0,00101	Media	0,00189	Media
Perfil 2	1,398	Media	0,00070	Media	0,00430	Media
Perfil 3	1,504	Baja	0,00015	Baja	0,00000	Baja
Perfil 4	1,590	Baja	0,00004	Baja	0,00000	Baja
Perfil 5	1,436	Media	0,00042	Media	0,00962	Media
Perfil 6	3,347	Baja	0,00000	Baja	0,00000	Baja

Amenaza Media: Corresponde a una franja continua y paralela a la quebrada La Aguacatala sobre su margen derecha, cuya amplitud varía y puede alcanzar hasta el límite con los lotes vecinos donde se encuentra el proyecto Obra Treinta & Cinco y la urbanización Almonte.

En este sector hay diferentes subunidades geomorfológicas, donde prevalecen las laderas se caracterizan por unas laderas irregulares de pendientes muy abruptas a escarpadas desarrolladas sobre flujos de lodos y/o escombros y depósitos de deslizamientos. Se identifica la corona de movimientos en masa rotacionales en la parte alta de la ladera. Los análisis de estabilidad arrojan probabilidades de falla de 0.003/año, 0.005/año y 0.010/año para los perfiles 1, 2 y 5 respectivamente, lo que indica una amenaza media por movimientos en masa (Ilustración 61).

Amenaza baja: corresponde a la parte alta del área de estudio donde se encuentra la urbanización Almonte y el proyecto Obra Treinta & Cinco, esta zona se extiende al occidente e incluye los alrededores del Edificio Mompox hasta aproximadamente la mitad de la ladera que custodia la quebrada La Aguacatala. También se incluye en esta categoría el cauce actual de la quebrada La Aguacatala. Se caracteriza por el depósito de flujos de lodos y/o escombros 1, además de llenos antrópicos y depósitos de deslizamientos asociados a coronas antiguas. En general son las laderas de pendientes muy inclinadas a muy abruptas, de forma recta, sin embargo en la parte norte las pendientes son más suaves.

En cuanto a los análisis de estabilidad no se tiene superficies de falla en esta franja y los perfiles 3, 4 y 6 arrojan probabilidades de falla de 0.000/año, para la condición seudostática y con aumento del nivel freático.

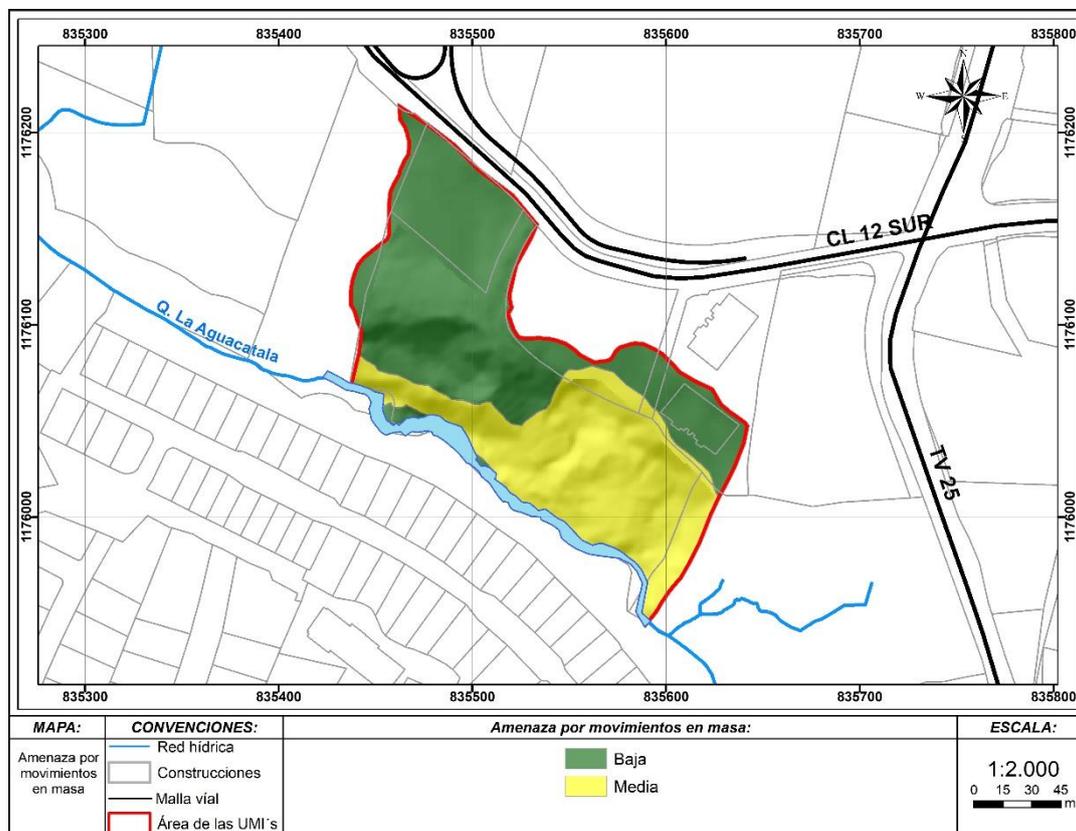


Ilustración 61. Mapa de amenaza por movimientos en masa a partir del análisis de estabilidad

5.2. Análisis de la propagación o distancia de viaje

Una vez calificada y analizada la amenaza por estabilidad, se ubicaron los posibles puntos de generación de movimientos en masa, a lo largo de la parte alta de las laderas donde se tiene amenaza media. Es importante resaltar que la valoración de la amenaza de las zonas afectadas por la propagación está directamente relacionada con la categoría de amenaza adyacente o desde donde se desprende el material.

Los resultados obtenidos muestran que la propagación puede llegar hasta la quebrada La Aguacatala, incluso tiene la posibilidad de sobre pasar el cauce actual y llegar a la margen izquierda (Ilustración 62), lo cual se evidenció en campo con los materiales arrastrados en el evento de 1995.

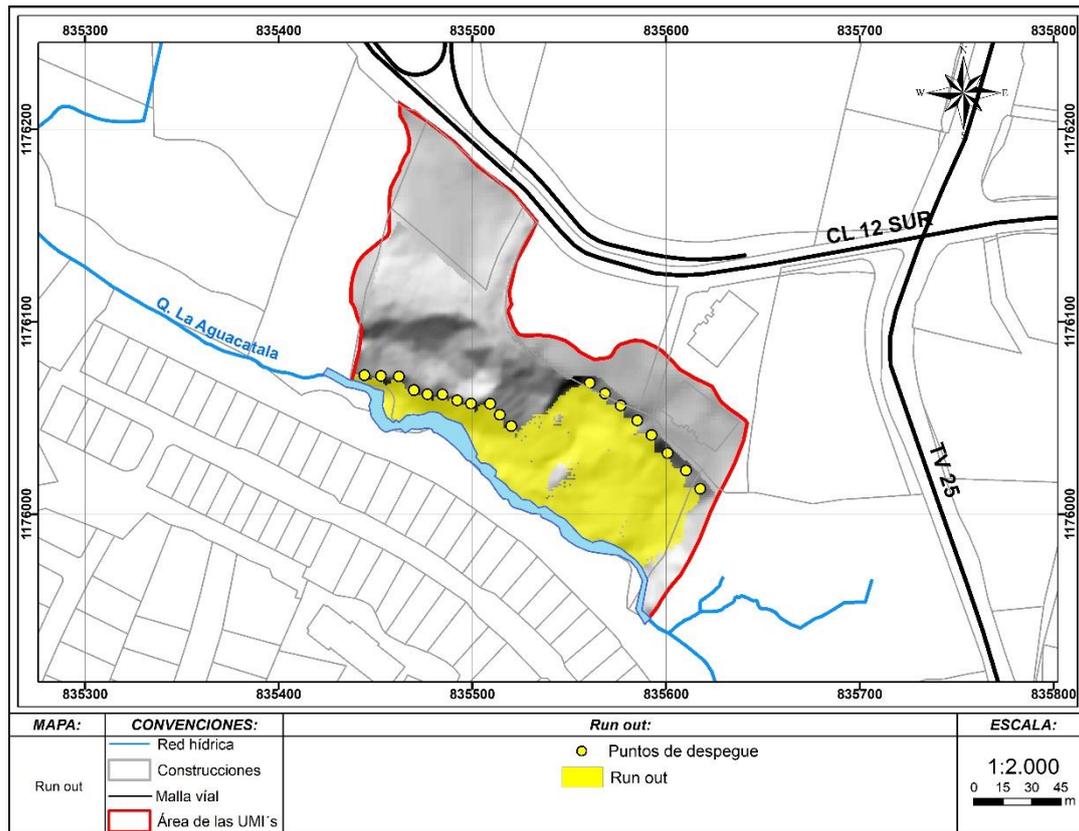


Ilustración 62. Mapa del análisis de la propagación o distancia de viaje

5.3.Amenaza total

El nivel de amenaza está condicionado por la estabilidad propia del terreno en condiciones estáticas, como por la probabilidad de que se vea afectada por la depositación de materiales asociados a movimientos en masa que se generen en la zona circundante.

Al analizar en conjunto la amenaza obtenida a partir de las características propias del terreno, asociadas a las condiciones topográficas y geomecánicas de los materiales que conforman el perfil de suelos, y la trayectoria que puede tener el material desprendido de un eventual movimiento en masa, se determinan tres categorías de amenaza para el área de estudio:

Amenaza Media: Son áreas con un nivel medio de probabilidad que se presenten movimientos en masa, debido a la acción en conjunto de la lluvia, la pendiente y en alguna medida a factores antrópicos. El factor de seguridad de las laderas naturales en esta categoría puede estar entre 1.2 y 1.5; o alternatively con probabilidades de falla o ruptura entre 0,0002/año – 0,05/año. Abarca todas las áreas presentadas en el mapa de amenaza por movimientos en masa a partir del análisis de estabilidad (Ilustración 61) y se incluye el cauce actual de la quebrada La Aguacatala, que puede verse afectado por la masa desplazada de un posible movimiento en masa que ocurra en la parte alta de la ladera (Ilustración 63).

Amenaza Baja: Corresponden a áreas con aceptables condiciones de estabilidad, sin evidencias físicas o históricas de procesos morfodinámicos, o si existen, su densidad es baja, con baja probabilidad de que se presenten movimientos en masa, debido a la acción en conjunto de la lluvia acumulada y las pendientes. El factor de seguridad de las laderas naturales dentro de esta categoría es $FS > 1.5$; o alternativamente probabilidades de falla o ruptura $PF < 0,0002/\text{año}$.

Comprende el sector norte y centro occidental del área de estudio; geomorfológicamente se asocia a las diferentes laderas desarrolladas sobre los depósitos de vertiente. Se destaca que en estos sectores no se identificaron procesos erosivos o movimientos en masa activos o latentes de importancia geotécnica, que puedan condicionar la estabilidad de sector.

Es importante aclarar que la amenaza es dinámica y en la medida que se realicen intervenciones inadecuadas en los suelos de la zona de estudio las categorías de amenaza deben ser revisadas.

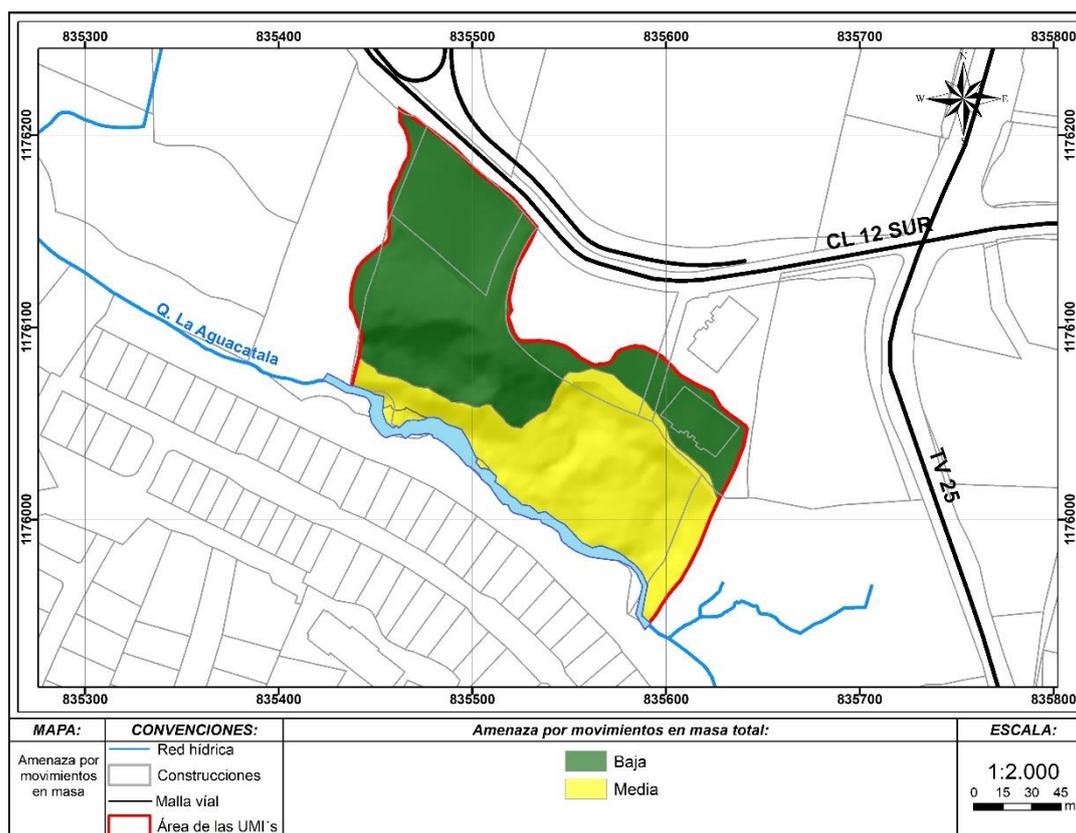


Ilustración 63. Mapa de amenaza por movimientos en masa total

6. Aptitud geológica

La zonificación de la aptitud del suelo o aptitud geológica parte de los aspectos topográficos, geológicos, geomorfológicos y de procesos morfodinámicos identificados durante el trabajo de campo y los cuales condicionan en forma directa el grado de estabilidad de las laderas.

A estos aspectos se agregó la evaluación de la estabilidad de las laderas considerando las obras necesarias para alcanzar factores de seguridad ajustados a los requerimientos existentes en este aspecto. La zonificación referente a la aptitud geológica para el uso y ocupación del suelo se presenta de acuerdo con la clasificación utilizada por las "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" (Acuerdo Metropolitano 09/2012).

En el área de interés se identifican tres tipos de zonas de acuerdo con las características geológicas, geomorfológicas y a la complejidad de los procesos morfodinámicos identificados, las cuales se describen a continuación y se presenta en la Ilustración 64.

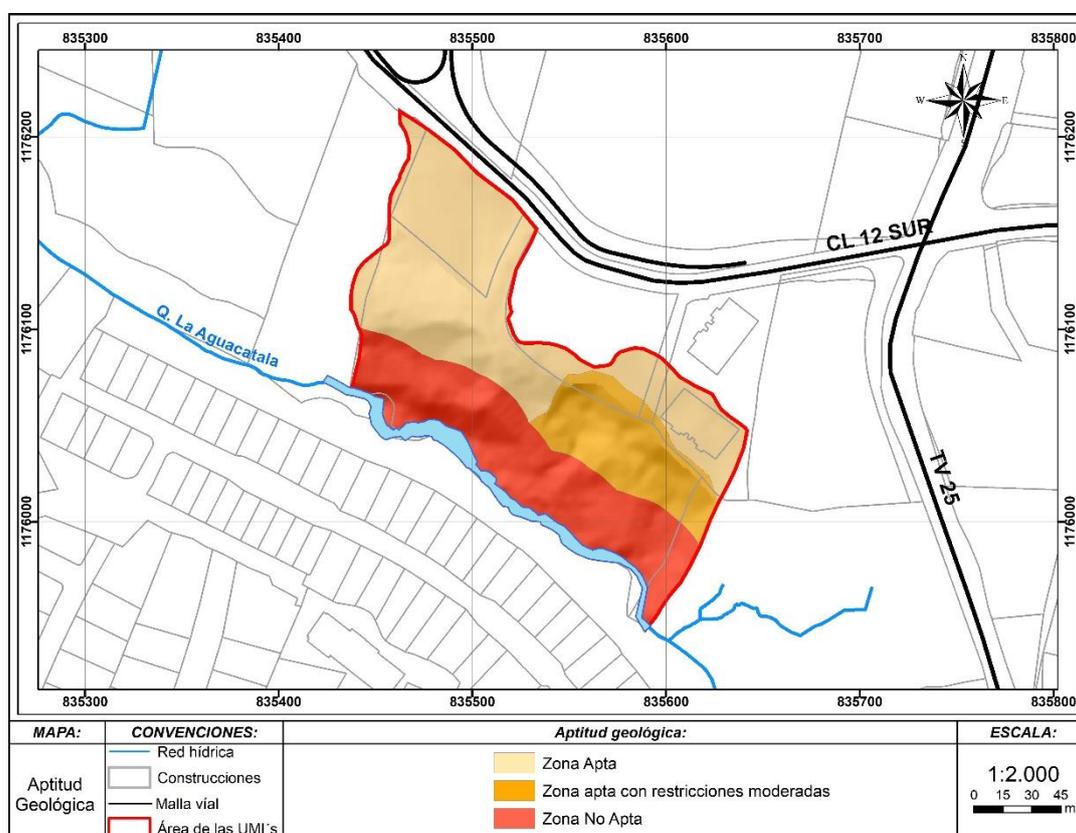


Ilustración 64. Mapa de aptitud geológica

-
- **Zonas aptas:** Corresponden a zonas que presentan alto grado de estabilidad, no se aprecia la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos e inactivos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa que afecten la estabilidad global del predio de interés y de la UMI asociada; la estabilidad global de estas zonas está condicionada al tipo de intervención que se proyecte y al uso y manejo que se dé a estas y a la UMI asociada (Acuerdo Metropolitano 09/2012).

Esta categoría incluye el sector norte y centro occidental del polígono asociado a zonas de amenaza baja; se recomienda en el sector de pendientes con mayor inclinación (muy abruptas a escarpadas) no desarrollar ninguna obra de infraestructura e implementar zonas de conservación ambiental para proteger el sector; donde las pendientes son inferiores a 60% se pueden desarrollar intervenciones urbanísticas sin mayores restricciones, además de completar con intervenciones no estructurales para el manejo de las aguas de escorrentía, especialmente en la parte alta de los taludes con pendientes más fuertes.

- **Zonas aptas con restricciones moderadas:** Corresponden a zonas estables, y cuya estabilidad está condicionada por la incidencia directa que presentan procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa identificados en la UMI asociada; la estabilidad global de estas zonas dependerá del manejo que se dé a los procesos morfodinámicos y al tipo de intervención que se proyecte. Se considera que las obras de estabilización proyectadas son técnica y económicamente viables (Acuerdo Metropolitano 09/2012).

Se identifican al centro y oriente del lote e involucra la porción del terreno donde se identifica una amenaza por movimientos en masa media y los procesos morfodinámicos son latentes. En estas zonas se deben adoptar medidas correctivas y preventivas, tanto estructurales como no estructurales, como manejo adecuado de aguas de escorrentía, además de evitar la conformación de taludes y el desconfiamiento del terreno. Dada que la destinación de esta área será espacio público, se recomienda se ejecuten las obras propuestas, que sea reforestada con especies nativas y no se ubique ningún tipo de infraestructura sobre ella.

- **Zonas no aptas:** Son aquellas con evidente inestabilidad por la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa dentro del lote de interés y la UMI asociada; el estudio considera que las obras de estabilización proyectadas son técnicamente complejas y de alto costo con respecto a las inversiones proyectadas en la zona o predio de interés. Las zonas con restricciones normativas se considerarán como No Aptas (Acuerdo Metropolitano 09/2012).

Estas áreas están asociadas a los retiros a las corrientes hídricas, definidos en el Acuerdo 048 de 2014 para la quebrada La Aguacatala que corresponde a 30 m.

7. Recomendaciones

Las recomendaciones que se presentan a continuación tienen como objetivo disminuir los niveles de amenaza identificados en el polígono en estudio, las cuales corresponden a medidas principalmente de tipo estructural que incluyen obras de ingeniería que buscan la estabilización de las laderas comprometidas, así como obras complementarias que se deben adelantar en todo el área de interés, por lo que para garantizar la estabilidad de la zona y el cambio en las restricciones establecidas se requiere de una intervención de tipo integral en donde se ejecuten de forma conjunta los planteamientos aquí establecidos.

7.1. Análisis de estabilidad en condiciones proyectadas

Una vez concluido el análisis en condiciones actuales se procede a realizar el análisis en condiciones proyectadas, es decir, considerando las obras e intervenciones que se planean hacer en la zona de estudio para obtener factores de seguridad que satisfagan los valores recomendados.

Solo se analizan perfiles que representen las zonas donde se planea la intervención con obras.

PERFIL 1

Para mejorar las condiciones de estabilidad de la ladera se modelaron cuatro filas de anclajes activos de 15 metros de longitud, cada uno compuesto por tres torones de media pulgada y espaciados entre sí 3 metros en la horizontal y en la vertical.

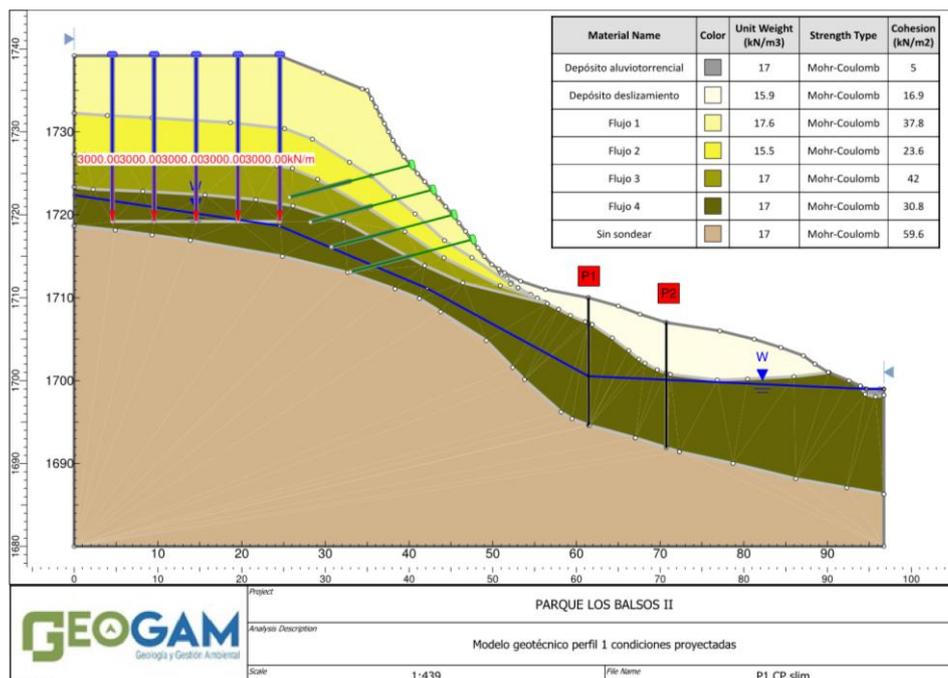


Ilustración 65. Modelo geotécnico perfil 1 – condiciones proyectadas

Para las condiciones proyectadas en el Perfil 1, se obtiene el caso estático una condición que satisface el factor de seguridad mínimo recomendado, con un valor determinístico de 1.519, medio de 1.538 y una probabilidad de falla de 0.0% (Ilustración 66); en el caso seudoestático se encontró similarmente una condición de estabilidad, con un factor de seguridad determinístico de 1.156, un factor medio es de 1.203 y una probabilidad de falla de 3.6% (Ilustración 67).

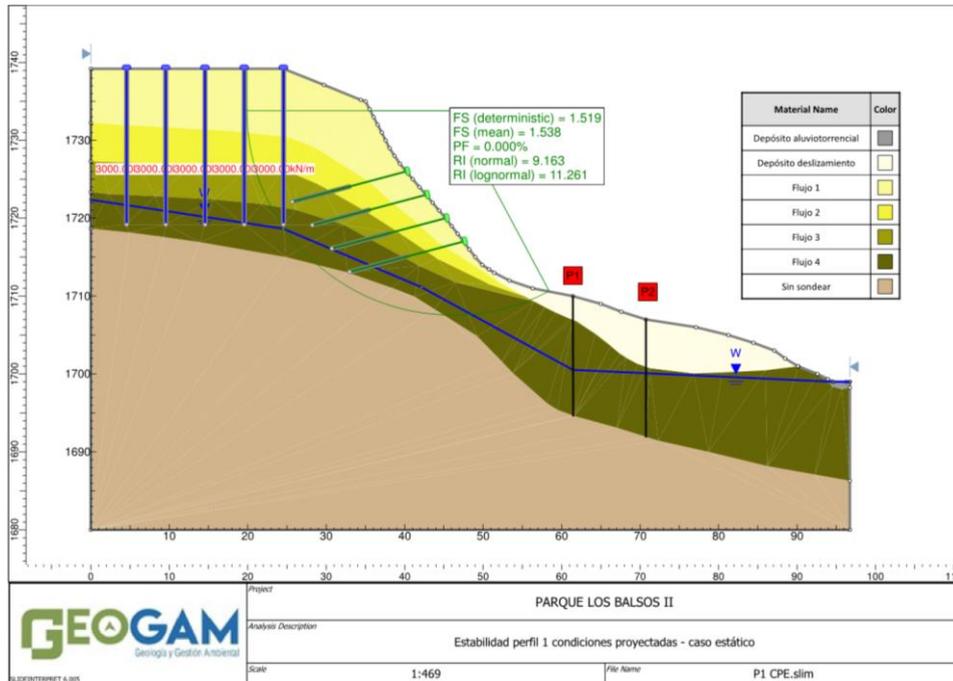


Ilustración 66. Análisis de estabilidad Perfil 1 – caso estático condiciones proyectadas

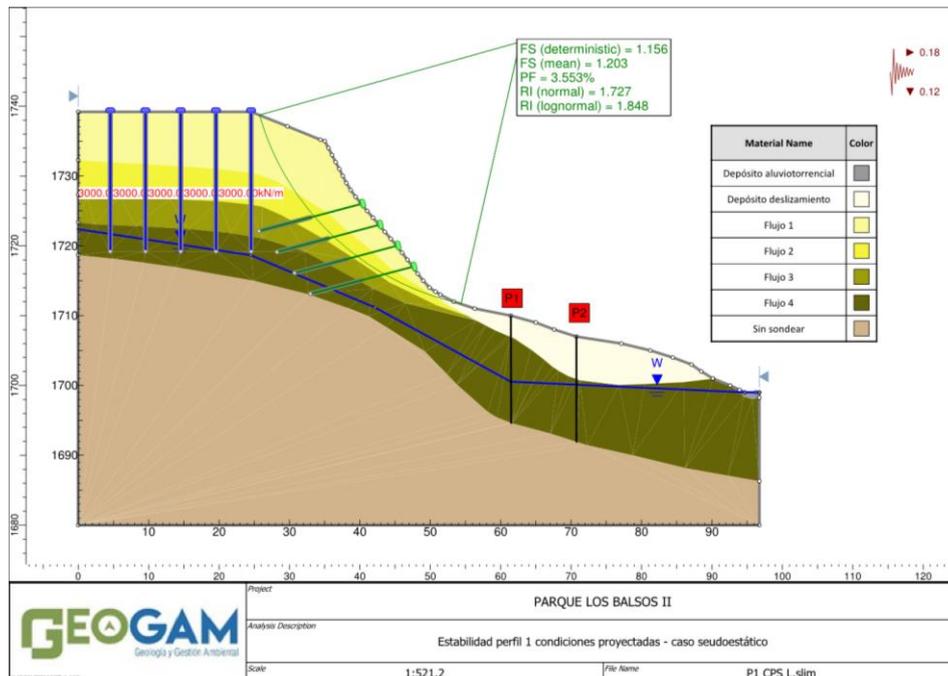


Ilustración 67. Análisis de estabilidad Perfil 1 – caso seudoestático condiciones proyectadas

Adicionalmente se evalúa un caso donde se presente un aumento en el nivel freático, con el fin de considerar una condición más desfavorable en cuanto a estabilidad, obteniendo

factores de seguridad inferiores al caso estático, con un factor de seguridad determinístico de 1.240, un factor de seguridad medio de 1.254 y una probabilidad de falla de 0.0% (Ilustración 68).

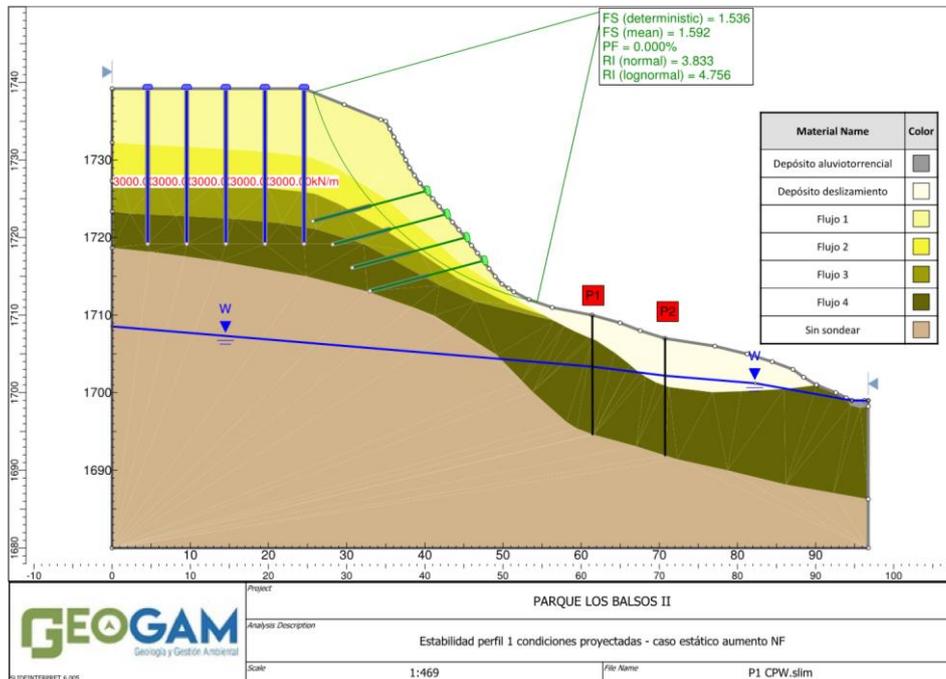


Ilustración 68. Análisis de estabilidad Perfil 1 – caso estático condiciones proyectadas aumento nivel freático

PERFIL 2

Para mejorar las condiciones de estabilidad de la ladera de la parte alta se modelaron dos filas de anclajes activos de 15 metros de longitud, cada uno compuesto por tres torones de media pulgada y espaciados entre sí 3 metros en la horizontal y en la vertical; en el caso de la ladera en la zona media baja del perfil se propone la implementación una batería de drenes sub-horizontales de 15 m de longitud, cuya función será abatir el nivel freático en la zona.

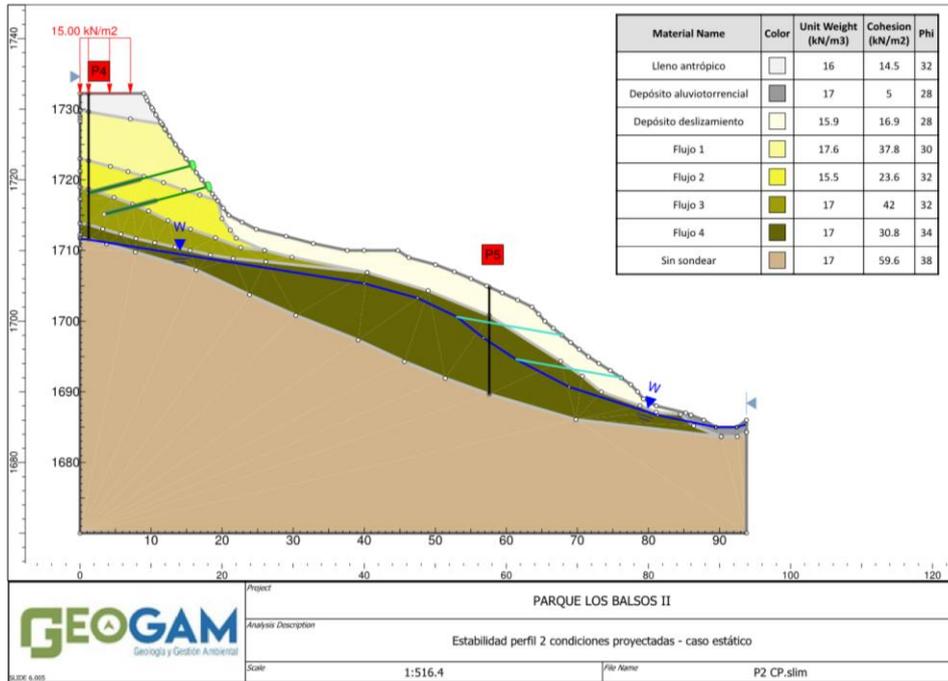


Ilustración 69. Modelo geotécnico perfil 2 - condiciones proyectadas

Para las condiciones proyectadas en el Perfil 2, se obtiene el caso estático una condición que cumple el valor recomendado, con un factor de seguridad determinístico de 1.521, un factor de seguridad medio de 1.602 y una probabilidad de falla de 0.0% (Ilustración 70); en el caso pseudoestático se encontró similarmente una condición que satisface el mínimo recomendado, con un factor de seguridad determinístico de 1.171, un factor medio de 1.233 y una probabilidad de falla de 0.4% (Ilustración 71).

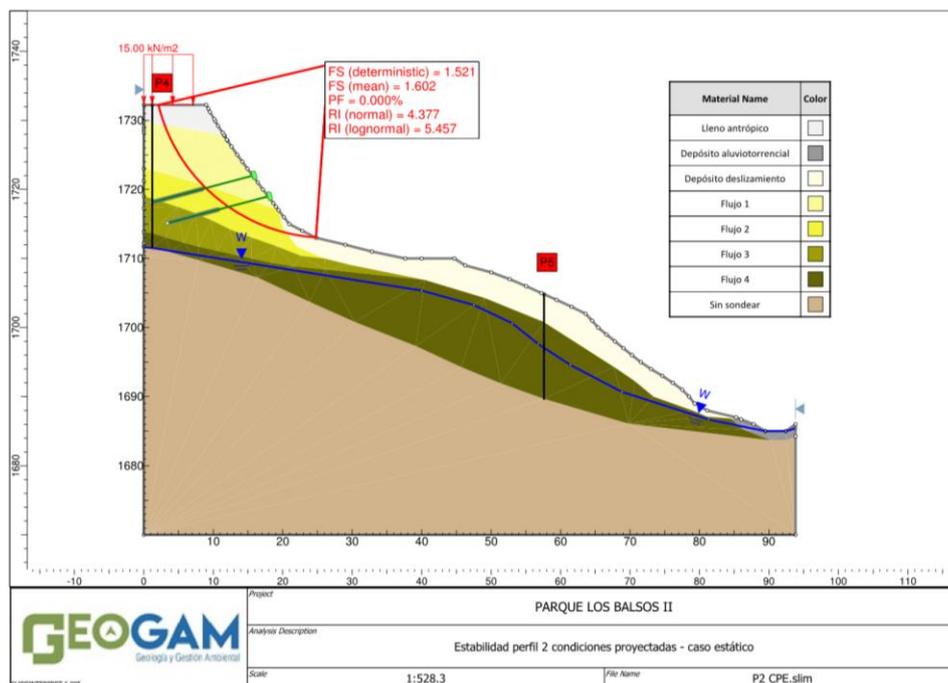


Ilustración 70. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso estático condiciones proyectadas

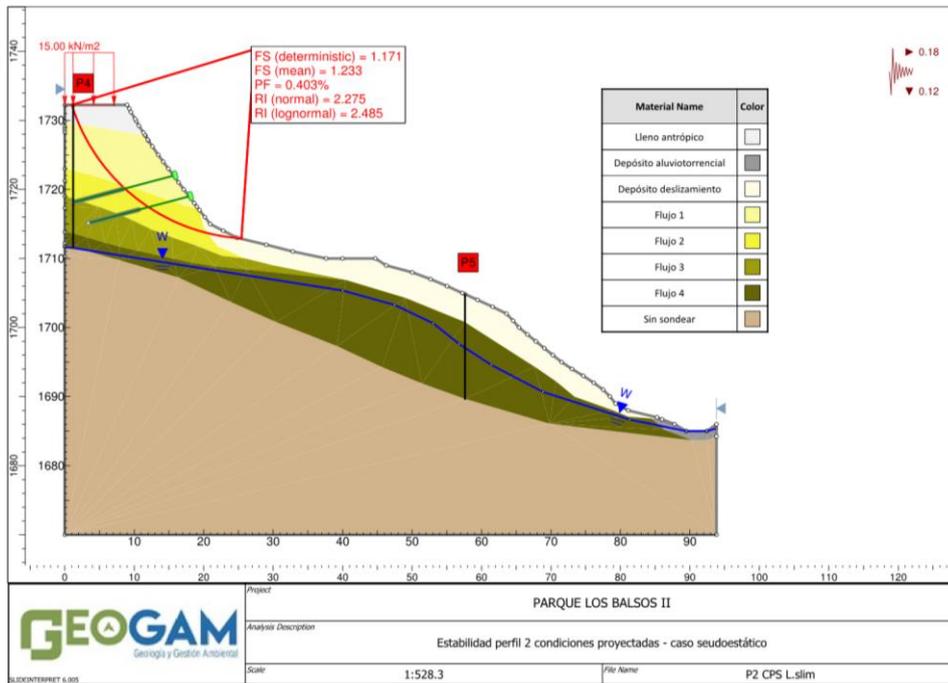


Ilustración 71. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso pseudoestático condiciones proyectadas

Adicionalmente se evalúa un caso donde se presente un aumento en el nivel freático, con el fin de considerar una condición más desfavorable en cuanto a estabilidad, obteniendo un factor de seguridad determinístico de 1.457, un factor de seguridad medio de 1.523, y una probabilidad de falla de 0.0% (Ilustración 72).

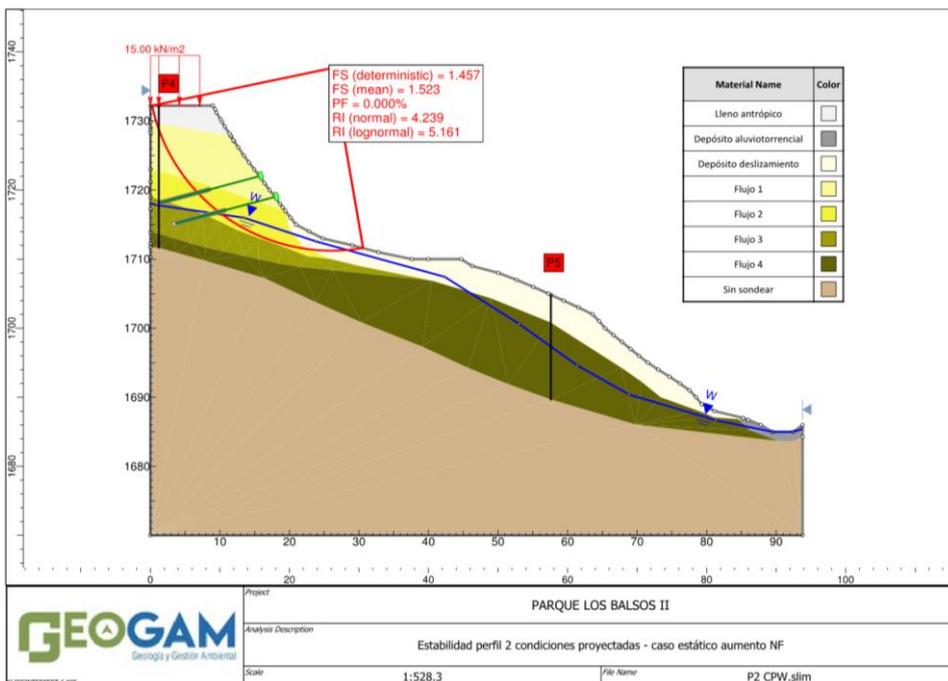


Ilustración 72. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso estático condiciones proyectadas aumento nivel freático

En la zona superior del talud se planea la construcción del proyecto Obra Treinta&Cinco, que contempla la implantación de una edificación apoyada en pilas, por lo que se realizó

un chequeo de la posición de estas en el perfil 2, encontrando que en esta zona las pilas proyectadas de la edificación coinciden espacialmente con los anclajes propuestos. Por lo anterior se realizó un análisis en condiciones proyectadas contemplando si la implantación de las pilas de la edificación es suficiente como medida de contención, tomando como base el diseño arquitectónico, dimensiones y cargas suministrados por la firma Obrasdé.

Según la implantación enviada por la firma Obrasdé, en la zona superior del perfil 2 se proyectan las pilas K1 y K2, con una profundidad de desplante aproximada de 14.5 m; cabe aclararse que en el perfil arquitectónico suministrado se relacionaban 3 pilas, sin embargo en el plano "PLANTA UBICACIÓN DE PILAS Y CAMPANA" solo se definieron los dos elementos anteriormente mencionados.

Al realizar el análisis de estabilidad considerando las pilas de fundación propuestas para el proyecto Obra Treinta&Cinco, se encontró en el caso estático que no se cumple con el valor mínimo recomendado, con un factor de seguridad determinístico de 1.397, un factor de seguridad medio de 1.443 y una probabilidad de falla de 0.000%, esta condición corresponde a una superficie de falla ubicada en el talud donde se implantarían las pilas, y parece ser propiciada por el efecto de las cargas aportadas por la estructura a la ladera (Ilustración 73).

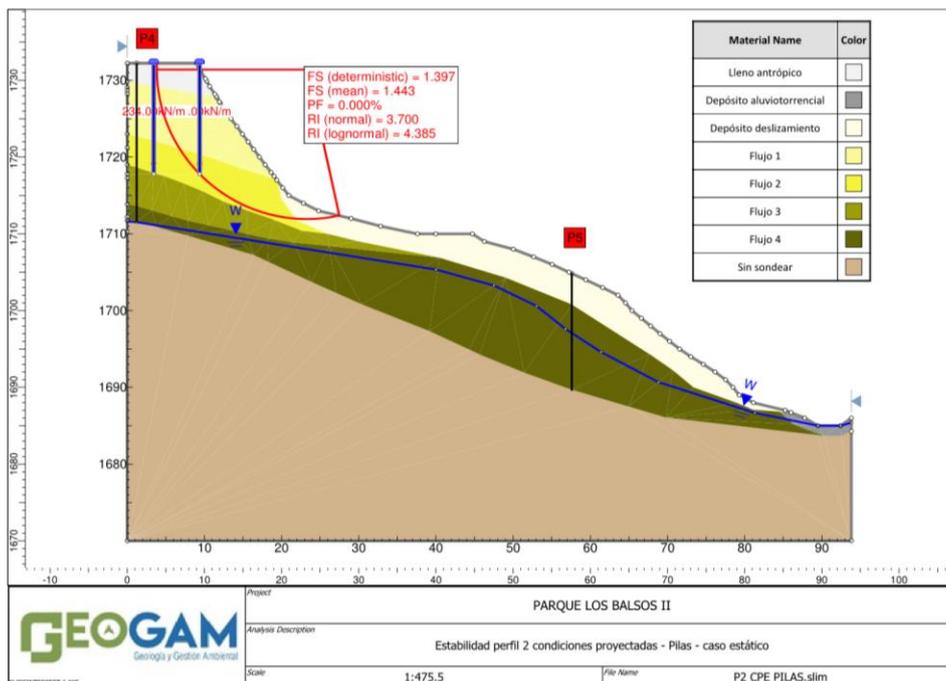


Ilustración 73. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso estático condiciones proyectadas pilas Obra Treinta&Cinco

Se considera entonces que alargar las pilas proyectadas a una profundidad de desplante inferior a la pata del talud inestable permitiría que las pilas proyectadas no induzcan cargas considerables al talud y puedan funcionar como estructura de contención del mismo. Bajo esta premisa se obtiene que en el caso estático se cumple con el valor mínimo recomendado, obteniendo un factor de seguridad determinístico de 1.556, un

factor de seguridad medio de 1.573 y una probabilidad de falla de 0.0% (Ilustración 74); en el caso pseudoestático se encontró similarmente una condición que satisface el mínimo recomendado, con un factor de seguridad determinístico de 1.178, un factor medio de 1.217 y una probabilidad de falla de 5.7 % (Ilustración 75).

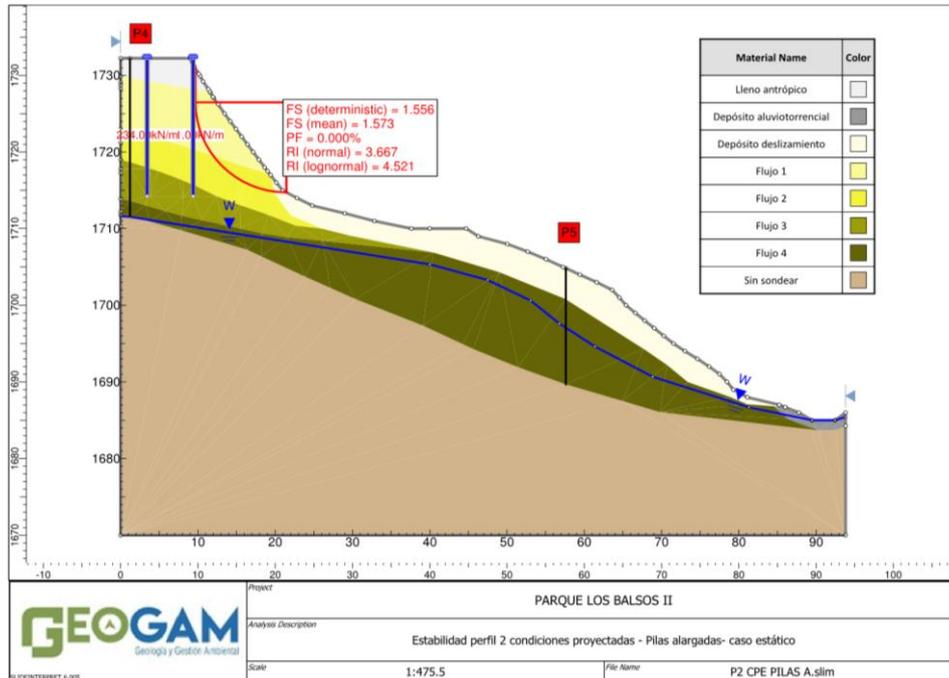


Ilustración 74. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso estático condiciones proyectadas pilas Obra Treinta&Cinco alargadas

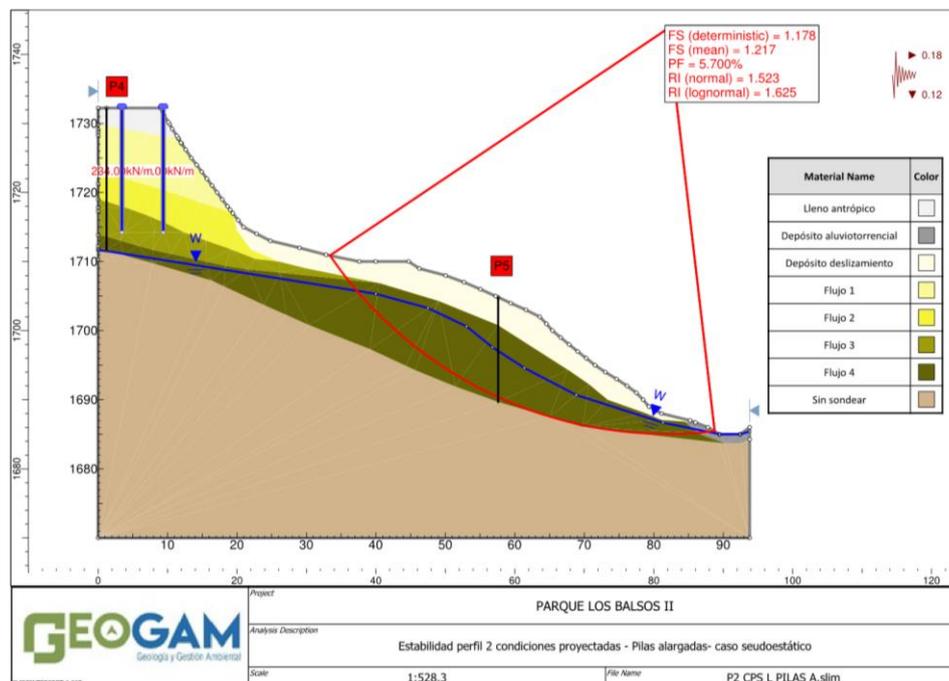


Ilustración 75. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso pseudoestático condiciones proyectadas pilas Obra Treinta&Cinco alargadas

Adicionalmente se evalúa un caso donde se presente un aumento en el nivel freático, con

el fin de considerar una condición más desfavorable en cuanto a estabilidad, obteniendo un factor de seguridad determinístico de 1.505, un factor de seguridad medio de 1.570, y una probabilidad de falla de 0.0% (Ilustración 76).

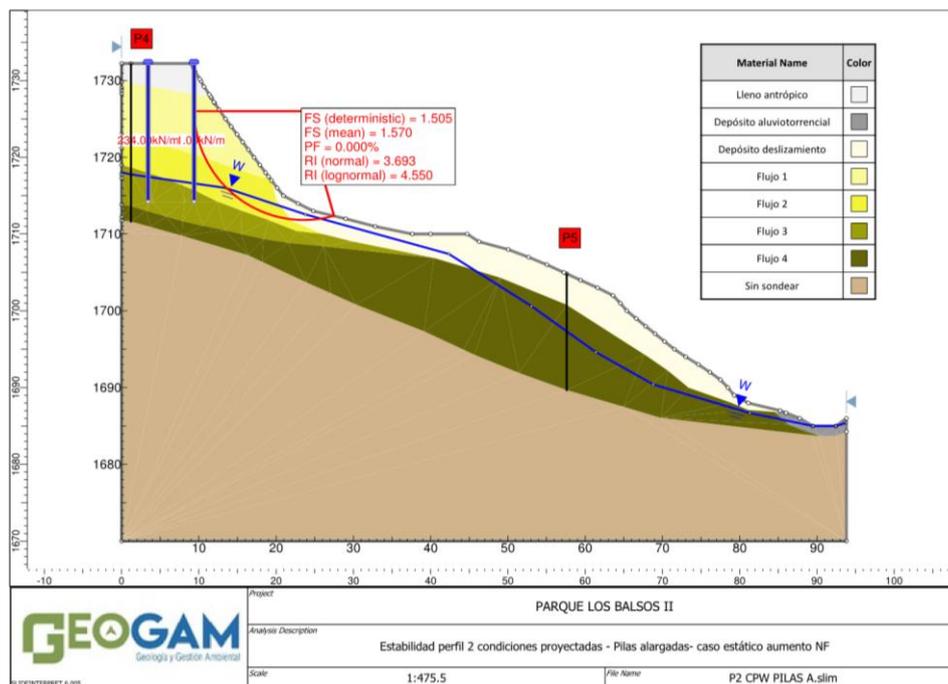


Ilustración 76. Análisis de estabilidad Perfil 2 – caso estático condiciones proyectadas aumento nivel freático pilas Obra Treinta&Cinco alargadas

El análisis anterior muestra que al profundizar las pilas se puede lograr una condición de estabilidad en el talud, descartando así el uso de anclajes en la zona, sin embargo, el análisis realizado corresponde a un estimativo de carácter *PRELIMINAR* y debe ser chequeado, verificado y ajustado por el diseñador geotécnico del proyecto Obra Treinta&Cinco, donde se debe contemplar no solo la capacidad de soporte, cargas y contención, sino además el modelo de deformaciones de la interacción pilas-talud, con base en los requerimientos de la NSR-10.

En caso de no realizarse la obra ni el análisis definitivo de las pilas cómo sistema de contención, se deben implantar los anclajes previamente recomendados en la zona.

PERFIL 3

A pesar de que en este perfil se obtuvieron condiciones satisfactorias en el análisis en condiciones actuales, se modeló éste en condiciones proyectadas para evidenciar el efecto de las obras de manejo de agua en la zona, las cuales corresponden a una batería de drenes sub-horizontales de 15 m de longitud, cuya función será abatir el nivel freático en la zona.

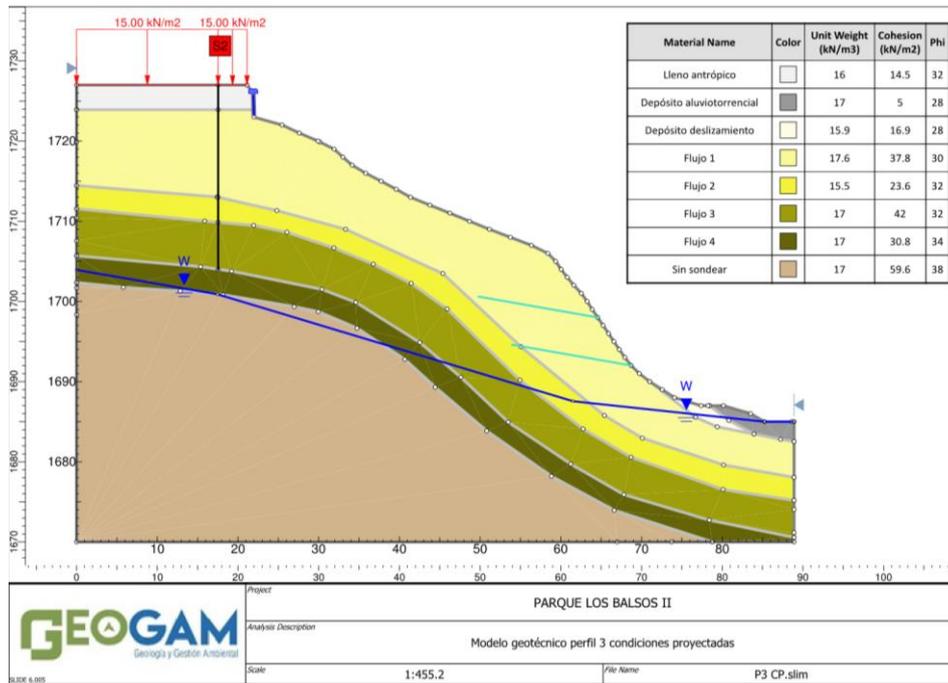


Ilustración 77. Modelo geotécnico perfil 3 - condiciones proyectadas

Para las condiciones proyectadas en el Perfil 3, se obtiene el caso estático una condición de que satisface el valor recomendado, con un factor de seguridad determinístico de 1.504, un factor de seguridad medio de 1.587 y una probabilidad de falla de 0.0% (Ilustración 78); en el caso pseudoestático se encontró similarmente una condición que satisface el mínimo recomendado, con un factor de seguridad determinístico de 1.089, un factor medio de 1.152, y una probabilidad de falla de 7.2% (Ilustración 79).

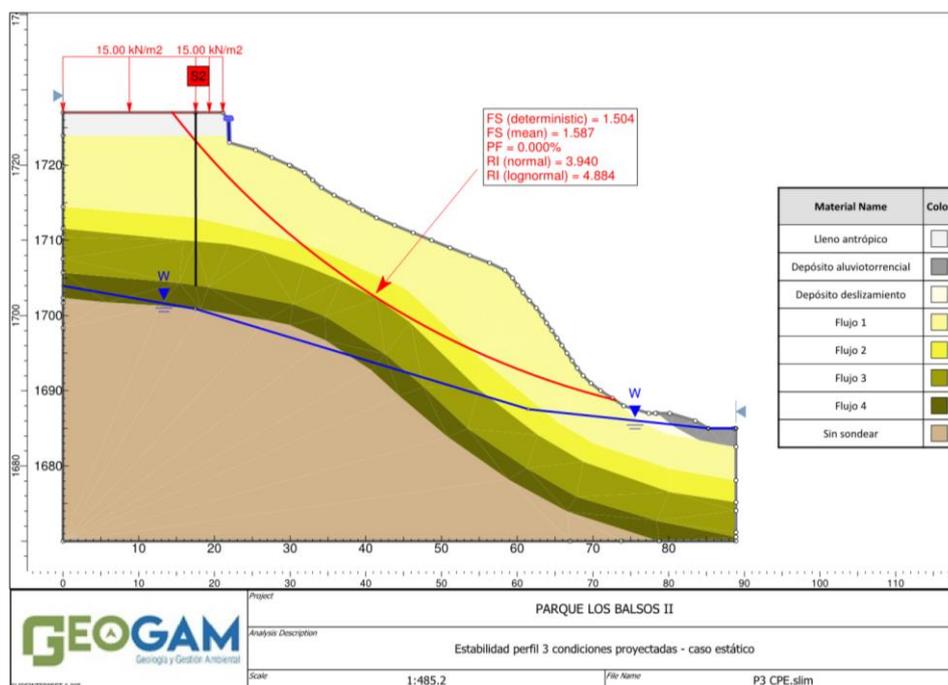


Ilustración 78. Análisis de estabilidad Perfil 3 – caso estático condiciones proyectadas

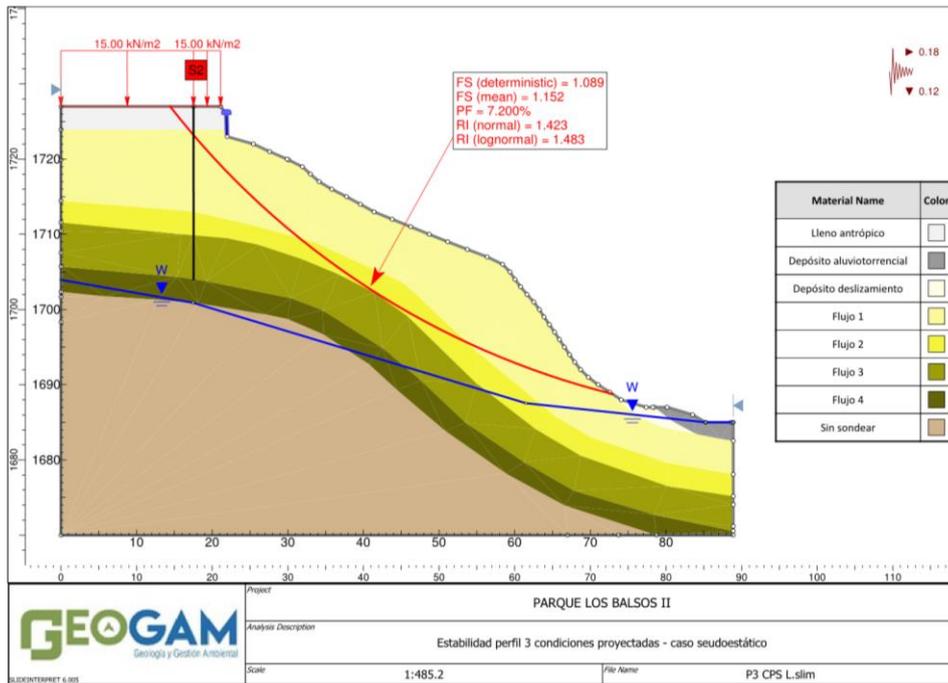


Ilustración 79. Análisis de estabilidad Perfil 3 – caso pseudoestático condiciones proyectadas

Adicionalmente se evalúa un caso donde se presente un aumento en el nivel freático, con el fin de considerar una condición más desfavorable en cuanto a estabilidad, obteniendo factores de seguridad inferiores al caso estático, con un factor de seguridad determinístico de 1.407, un factor de seguridad medio de 1.449, con una probabilidad de falla de 0.0% (Ilustración 80).

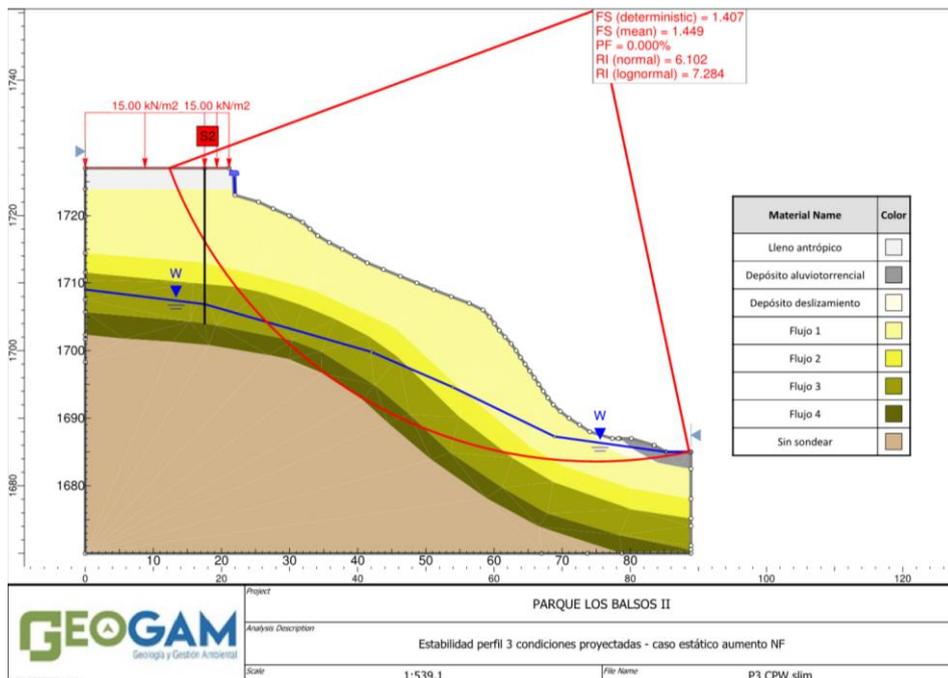


Ilustración 80. Análisis de estabilidad Perfil 3 – caso estático condiciones proyectadas aumento nivel freático

PERFIL 5

Para mejorar las condiciones de estabilidad de la ladera de la parte media baja del perfil se propone la implementación una batería de drenes sub-horizontales de 15 m de longitud, cuya función será abatir el nivel freático en la zona.

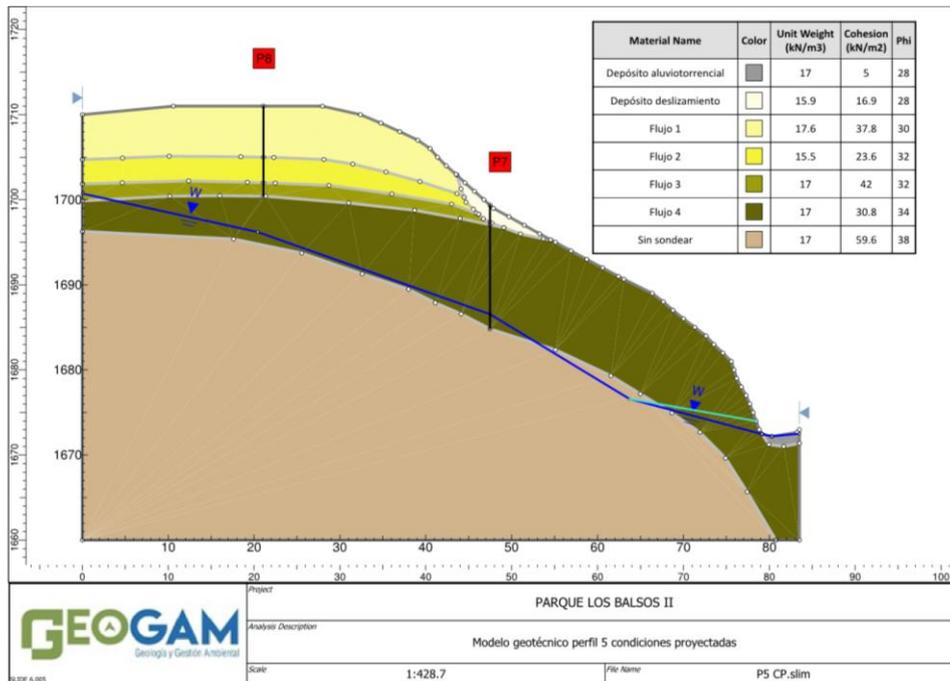


Ilustración 81. Modelo geotécnico perfil 5 - condiciones proyectadas

Para las condiciones proyectadas en el Perfil 5, se obtiene el caso estático una condición de que satisface el valor recomendado, con un factor de seguridad determinístico de 1.501, un factor de seguridad medio de 1.441 y una probabilidad de falla de 0.0% (Ilustración 82); en el caso seudoestático se encontró similarmente una condición que satisface el mínimo recomendado, con un factor de seguridad determinístico de 1.103, un factor medio de 1.145, y una probabilidad de falla de 8.8% (Ilustración 83).

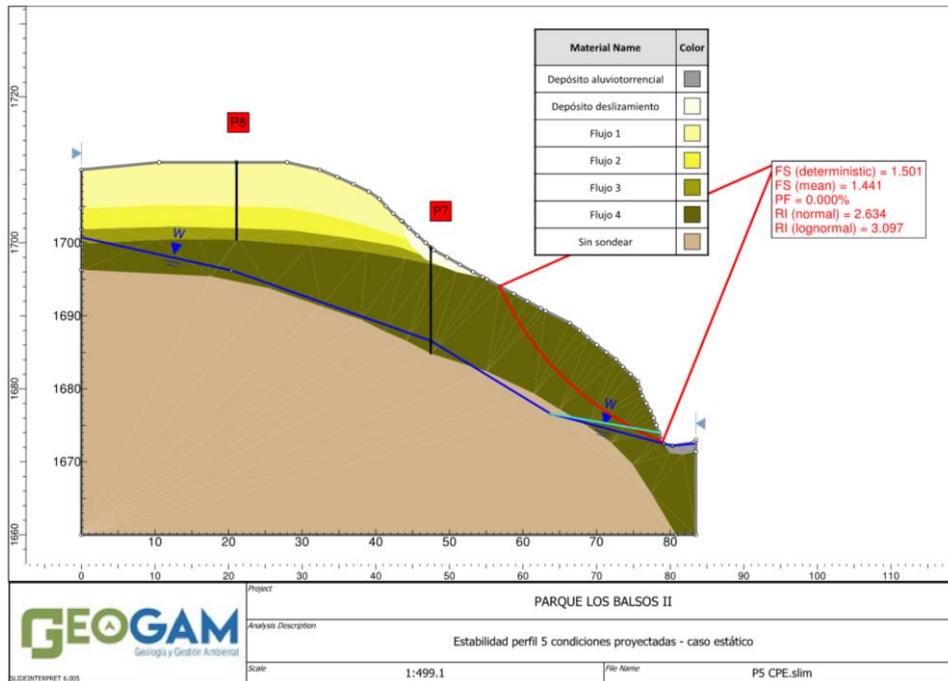


Ilustración 82. Análisis de estabilidad Perfil 5 – caso estático condiciones proyectadas

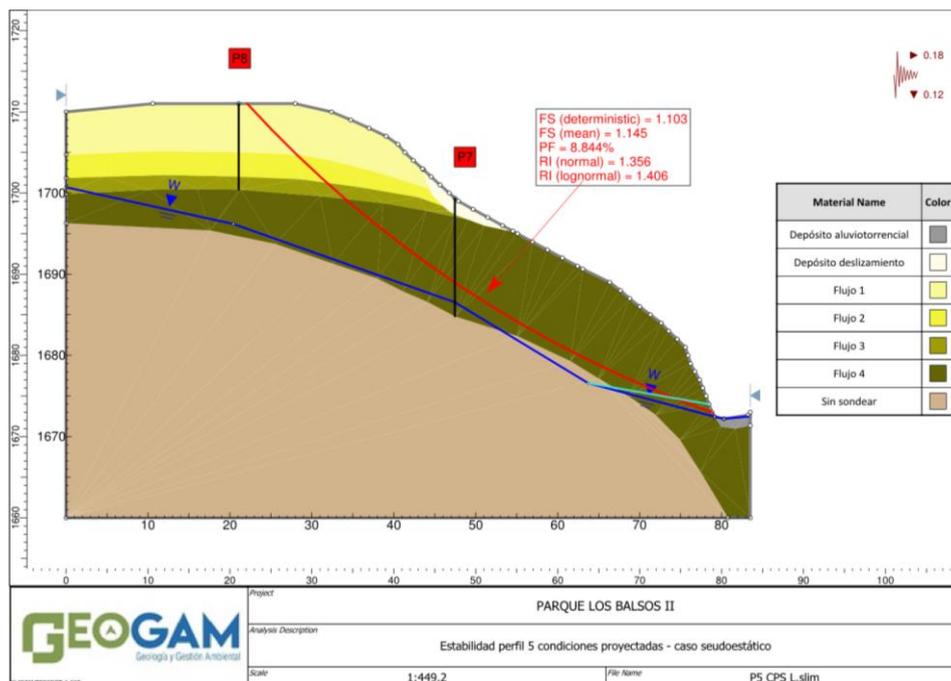


Ilustración 83. Análisis de estabilidad Perfil 5 – caso seudoestático condiciones proyectadas

Adicionalmente se evalúa un caso donde se presente un aumento en el nivel freático, con el fin de considerar una condición más desfavorable en cuanto a estabilidad, obteniendo factores de seguridad inferiores al caso estático, con un factor de seguridad determinístico de 1.487, un factor de seguridad medio de 1.540, con una probabilidad de falla de 0.0% (Ilustración 84).

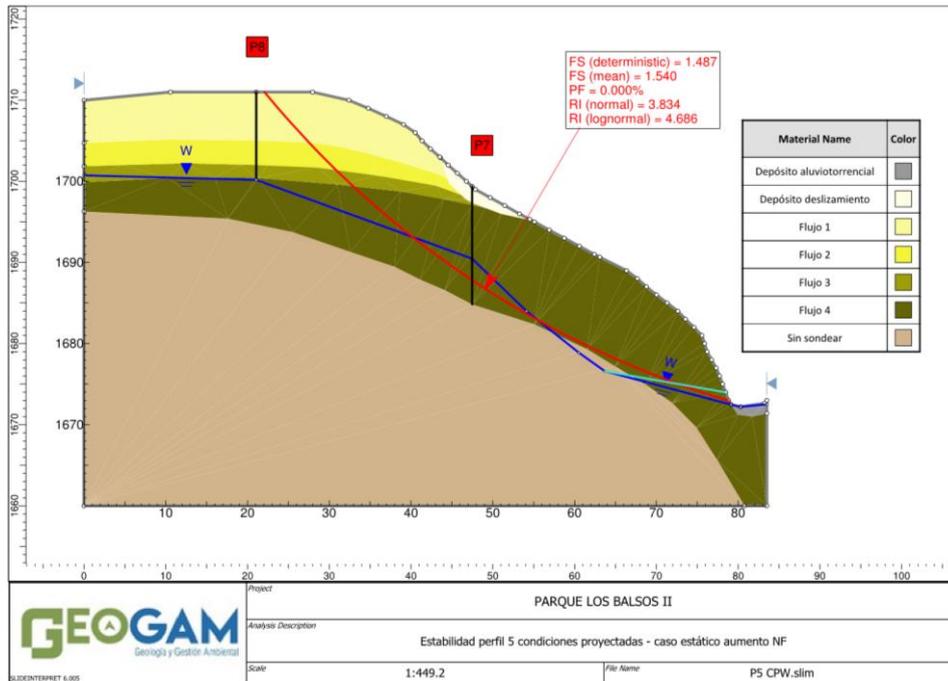


Ilustración 84. Análisis de estabilidad Perfil 5 – caso estático condiciones proyectadas aumento nivel freático

En la siguiente tabla se presenta el consolidado de los factores de seguridad en condiciones proyectadas y su respectivo mapa se aprecia en la Ilustración 85:

Tabla 27. Resultados análisis estabilidad condiciones proyectadas

Condiciones proyectadas						
SECCIÓN	Estático		Seudoestático		Aumento N. F.	
	F.S.	Amenaza	PF/año	Amenaza	PF/año	Amenaza
Perfil 1	1,537	Baja	0,00007	Baja	0,00000	Baja
Perfil 2	1,524	Baja	0,00001	Baja	0,00000	Baja
Perfil 3	1,504	Baja	0,00015	Baja	0,00000	Baja
Perfil 5	1,501	Baja	0,00019	Baja	0,00000	Baja

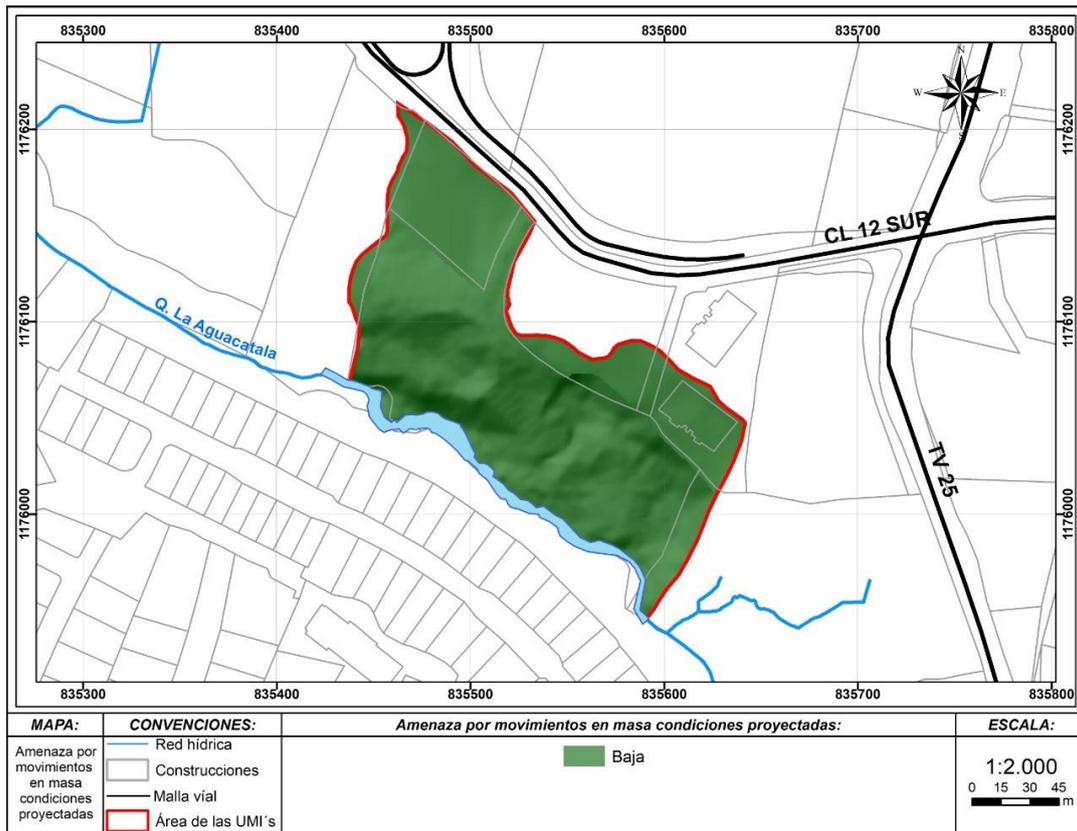


Ilustración 85. Mapa de amenaza por movimientos en masa en condiciones proyectadas

7.2. Consideraciones geotécnicas para el diseño de obras de estabilización

A continuación se presentan las localización en planta de las obras proyectadas en este estudio (Ilustración 86).

En el Anexo 4 se presentan los cálculos para los diseños geotécnicos, que de acuerdo con el dimensionamiento realizado para el perfil 1 y su zona aferente, se requieren 4 líneas de anclajes activos de 15 metros de longitud con 3 torones de media pulgada; en el modelo realizado en slide se obtuvieron factores de seguridad adecuados con este dimensionamiento.

De igual manera se realizó para el perfil y su zona aferente, donde se requieren 2 líneas de anclajes activos de 15 metros de longitud con 3 torones de media pulgada, en el modelo realizado en slide se ajustó a 2 torones, obteniendo factores de seguridad adecuados.

También se propone la construcción de un conjunto de subdrenes horizontales en el talud derecho de la quebrada La Aguacatala, que junto con las recomendaciones para el tensionamiento de anclajes se encuentran en el Anexo 4.

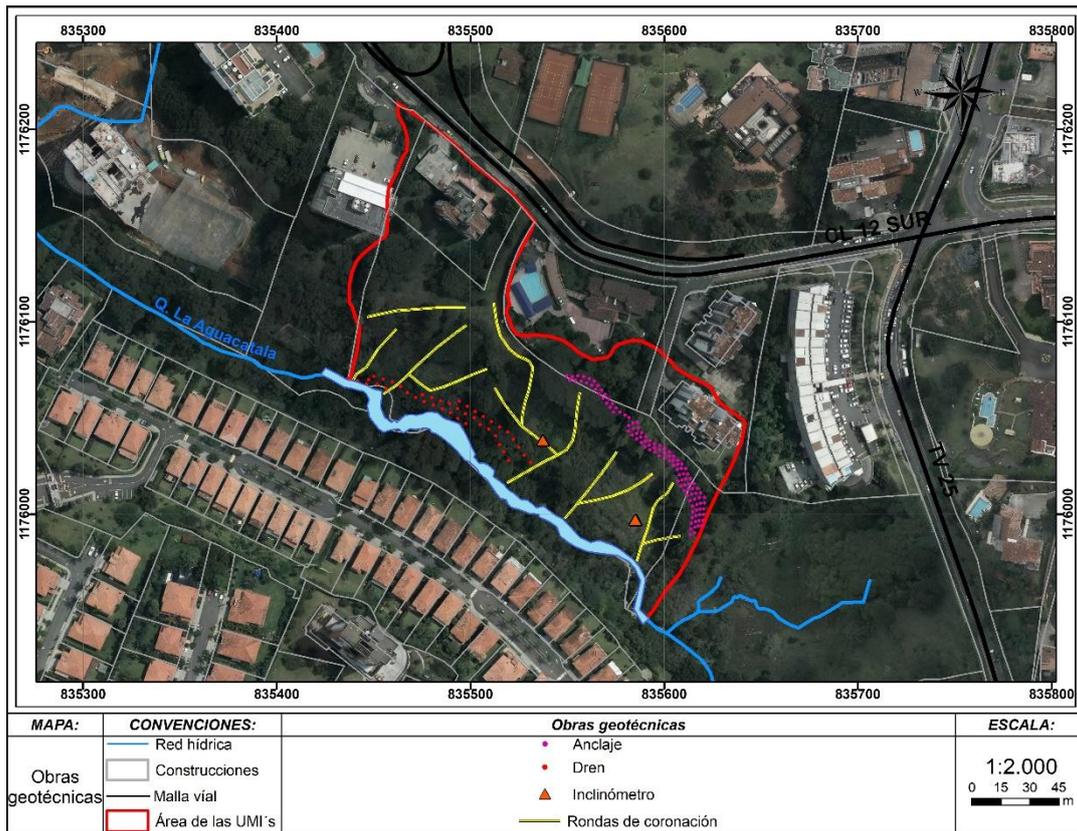


Ilustración 86. Localización de obras proyectadas

7.3. Otras recomendaciones

- Adicional a los sub drenes horizontales mencionados anteriormente se recomienda la implementación de cunetas y rondas de coronación a lo largo del lote, estas se encargarán de captar y conducir las aguas de escorrentía al afluyente de agua más cercano. Estos elementos deberán tener una pendiente no inferior al 2% y no superior al 7%, y se podrán construir con sacos de suelo-cemento como se muestra la siguiente ilustración.

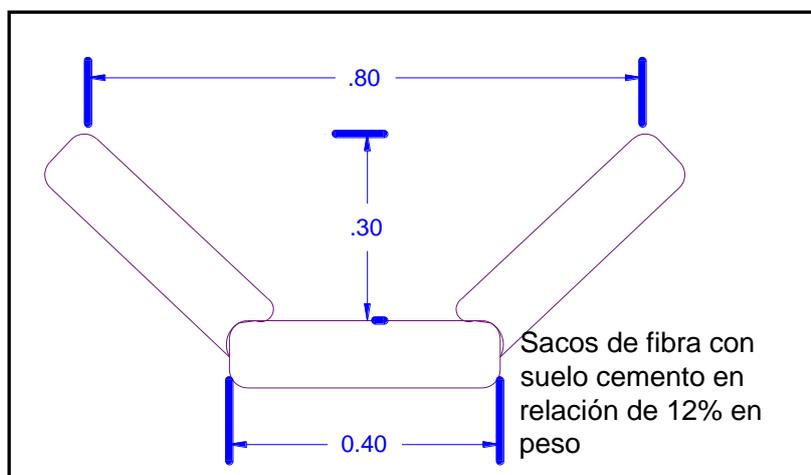


Ilustración 87. Esquemas de cunetas rondas de coronación recomendadas

La localización en planta de las cunetas se presenta en la siguiente ilustración y en todos los casos deberán prolongarse hasta encontrar un canal existente o realizar una entrega adecuada a la quebrada sin generar problemas de erosión (Ilustración 86).

- Para la ejecución de las obras de mitigación es posible que se requiera la tala de algunos árboles por lo que se recomienda realizar el inventario forestal y solicitar los permisos de tala de árboles requeridos.
- En la ladera occidental del área de estudio donde se proyecta la implementación del proyecto, el diseño debe incluir el manejo de aguas en ese sector. También se recomienda en el momento de desarrollar los diseños incluir en el área aledaña del escarpe del movimiento en masa inactivo obras de protección como una estructura metálica y cerca viva para restringir el paso hacia la ladera de pendientes fuertes.
- El cambio en las restricciones de uso del suelo para el polígono en estudio, están sujetas a la ejecución de las obras planteadas y su monitoreo, hasta que se garantice la estabilidad de la zona.
- Se debe realizar un análisis detallado de la red de aguas lluvias y residuales del área de estudio, donde se incluya la influencia de las aguas provenientes de la Loma de los Parras y las edificaciones vecinas, de manera que se realice un manejo adecuado, además que se definan las acciones para controlar las aguas que actualmente están vertiendo directamente sobre la ladera. Esto debe ser adelantado por un profesional especialista.
- Se espera que el manejo de aguas que se realice en el proyecto Obra Treinta & Cinco sea adecuado y pertinente de manera que no se vierta agua directa sobre la zona de los anclajes propuestos. De igual manera, se espera que en dicho proyecto se tomen las medidas necesarias con el muro divisorio con el lote de interés.
- Plan de Seguimiento y Monitoreo: Se han instalado dos inclinómetros en los depósitos de deslizamientos del centro y sur del área de estudio, en las perforaciones 5 y 2 respectivamente. Se recomienda tener en cuenta lo siguiente:
 - ✓ El tubo se ubicó de tal manera que un par de ranuras se encuentren alineadas en la dirección anticipada del movimiento. La ranura que se encuentra, en dirección ladera abajo, se marca como A0 y la ranura opuesta, se marca como A180. Las otras dos ranuras se marcan como B0 y B180 (Ilustración 83).

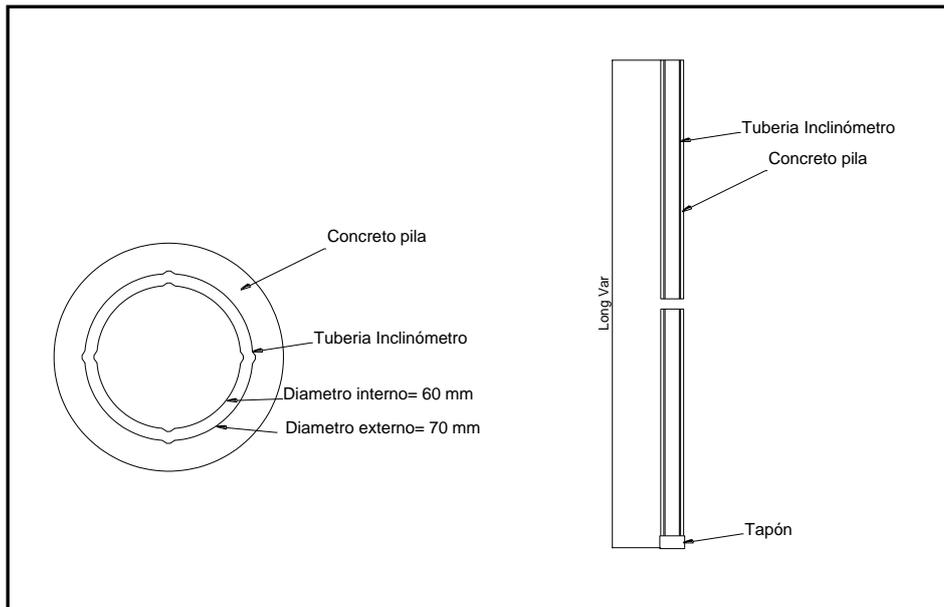


Ilustración 88. Detalle del inclinómetro

- ✓ Se realizó además, el 3 de junio 2020 la lectura de inicio o lectura base de ambos inclinómetros y a partir de esta lectura se recomienda realizar 2 lecturas mínimo hasta la próxima temporada invernal (Anexo 5). Dado que en el momento de instalación de los inclinómetros no se habían construido las obras recomendadas, en caso de falla del inclinómetro antes de la ejecución de las mismas, deberá instalarse otro con el fin de conocer las deformaciones posteriores a la intervención. Una vez construidas las obras se deberá realizar un monitoreo por dos (2) meses con lecturas mensuales a la finalización de las obras.
- ✓ Se consideran deformaciones admisibles hasta de 1 pulgada, cuando se haya alcanzado el 50% de esta deformación se deberá alertar sobre esta condición.

8. Conclusiones generales

- Las unidades geológicas que se identifican en el área de estudio corresponde a una sucesión depósitos de flujos de lodos y/o escombros con diferentes características físicas que permiten diferenciar al menos 4 eventos, pero en conjunto constituyen los materiales característicos de este sector de la ciudad. También se identifica un llano antrópico en la parte norte del sector, los depósitos aluviotorrenciales asociados a la quebrada La Aguacatala y los depósitos de deslizamientos producto de la acumulación de materiales por movimientos en masa ocurridos en diferentes épocas.
- Geomorfológicamente se caracteriza por un conjunto de laderas irregulares a rectas, con pendientes entre muy inclinadas y escarpadas. En cuanto a los procesos morfodinámicos se identifican cicatrices de deslizamientos antiguos y recientes, entre los que se tienen coronas de deslizamientos latentes y activos, además de otros aspectos como generación de surcos asociados a inadecuados manejos de aguas lluvias y de escorrentía.
- Los análisis de estabilidad en condiciones actuales indican zonas donde no se logra satisfacer el factor de seguridad mínimo recomendado, las cuales se encuentran asociadas a procesos de movimientos en masa activos e inactivos y que pueden comprometer no solo la integridad del lote de estudio, sino también de los pedios vecinos y el cauce de la quebrada La Aguacatala. Aunque no hay indicios de una falla inminente es de vital importancia conservar las condiciones de estabilidad con un manejo de aguas superficiales y control de erosión, para evitar la ocurrencia de procesos morfodinámicos adicionales.
- Es importante resaltar que al considerar que en el terreno se produce una elevación del nivel freático, este disminuye sus factores de seguridad en comparación con los obtenidos de las modelaciones realizadas para las características freáticas actuales, esto producto de una alteración del estado de esfuerzos de la masa de suelo cuyas propiedades geomecánicas varían al encontrarse en condiciones saturadas, por lo que resultará importante la implementación de obras de control y manejo de agua que minimicen el aumento de estos niveles por efecto de infiltración y escorrentía asociado a eventos de fuerte precipitación.
- Los análisis de estabilidad en condiciones proyectadas indican que bajo las intervenciones similares a las contempladas en la modelación, el terreno se comportaría de forma estable, sin embargo esta condición debe ser validada con un análisis específico al momento de adelantar los diseños definitivos de las obras proyectadas.
- Se recomienda que no se consideren cortes, explanaciones y llenos de gran magnitud y los taludes se conformen máximo a una relación 2.0H:1.0V.

- En la cartografía del POT de Medellín se identifica en los bordes externos del área de interés pequeños polígonos con diferentes categorías de amenaza a las obtenidas en este estudio. Aunque los bordes no fueron objeto de estudio, a partir de los recorridos de campo y análisis desarrollados en este trabajo, se propone ajustar la cartografía de la siguiente manera:
 - Amenaza alta en el borde sur que corresponde al talud de la margen izquierda de la quebrada La Aguacatala, caracterizado por una ladera corta de pendientes fuertes pero que hace parte del retiro de la quebrada por lo que se puede homologar con la categoría de amenaza media adyacente, sin embargo, no se debe permitir ningún tipo de intervención sobre estas laderas y conservar la cobertura vegetal que la protege.
 - Amenaza media en el borde norte (sector central) donde se identifican condiciones similares al área que la rodea, tanto en los materiales que la conforman como en la morfología, por lo tanto se propone incluir este pequeño polígono en amenaza baja.

La siguiente ilustración presenta la propuesta de ajuste a la cartografía del POT comparada con el empalme sin los ajustes propuestos.

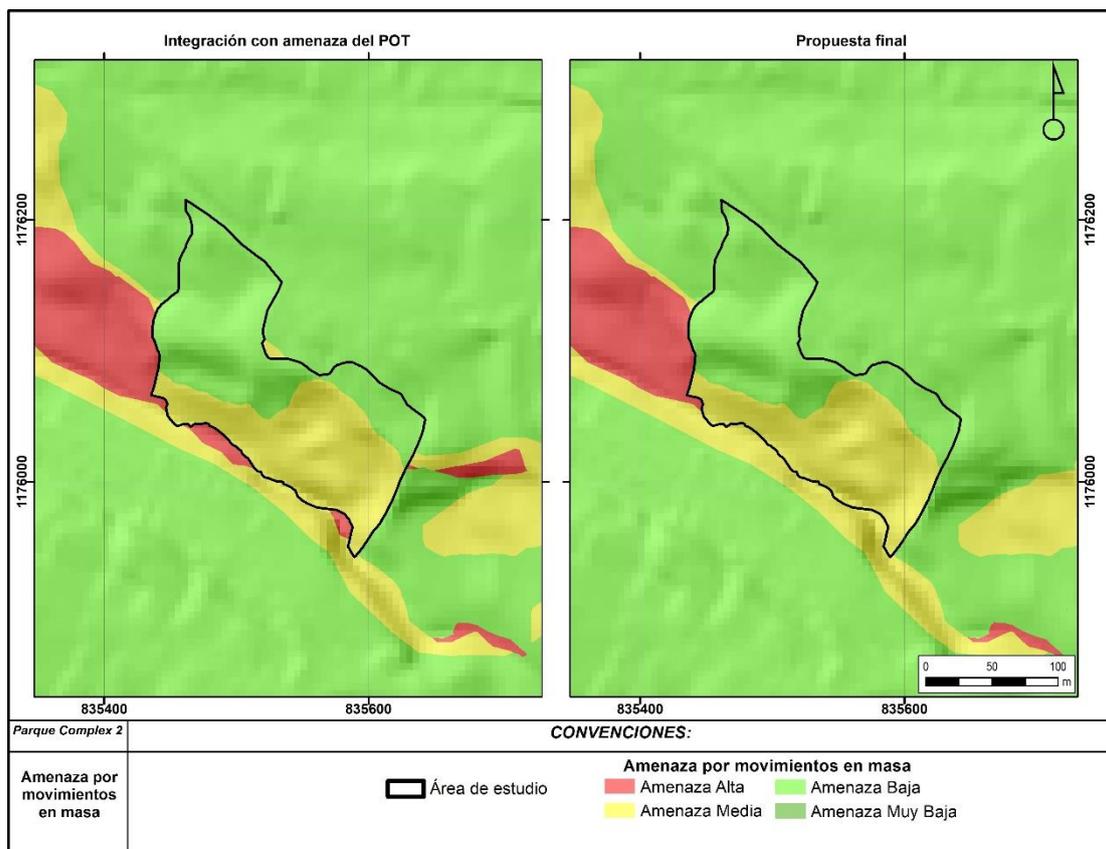


Ilustración 89. Propuesta cartográfica para ajuste de amenaza en bordes del lote Complex 2

9. Limitaciones

Las conclusiones y recomendaciones consignadas en este documento se basan en los resultados de las investigaciones de campo y laboratorio que se describen en los capítulos respectivos y en la experiencia de los profesionales que participaron en el estudio. Las investigaciones programadas, así como los alcances y conclusiones consignadas en el presente informe, se ajustan solo a las características del proyecto en mención.

10. Bibliografía

- ACUERDO METROPOLITANO 09/2012. Directrices y lineamientos para la elaboración de estudios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidrogeológicos y geotécnicos para intervenciones en zonas de ladera. Universidad Nacional de Colombia, Universidad EAFIT y Universidad de Medellín, Medellín.
- ALCALDIA DE MEDELLÍN. 2014. Revisión y ajuste del Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín, Acuerdo 048 de 2014
- ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ – AMVA. 2007. Microzonificación Sísmica Detallada de los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado.
- BADILLO, J. y RODRÍGUEZ, R. 2000. Mecánica de suelos. Tomo I. Fundamentos de la mecánica de suelos. 3ª edición. Editorial Limusa, Ciudad de México
- BOWLES, J. E. 1998. Foundation Analysis and Design. 4ta. Ed., McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- CORREA, A.; MARTENS, U.; RESTREPO, J.J.; ORDÓÑEZ-CARMONA, O.; PIMENTEL, M. 2005. Subdivisión de las metamorfitas básicas de los alrededores de Medellín – cordillera Central de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc.29 (112): 325 – 344.
- DAP (Departamento Administrativo de Planeación), DAGRD, EAFIT. 2019. “Definición y manejo de las áreas de amenaza y riesgo por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales producto de los estudios de riesgo de detalle”. Informe interno.
- DAS, M. B. 2000. Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Thomson Learning, California State University, Sacramento, 4ª edición.
- GEOTÉCNICA. 2018. OBRASDÉ - Estudio geotécnico para cimentaciones proyecto “Obra Treinta & Cinco”. Informe 066-018; 99 p.
- HORTON, P.; JABOYEDOFF, M.; RUDAZ, B.; ZIMMERMAN, M. 2013. Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 869–885.
- JABOYEDOFF, M.; CHOFFET, M.; DERRON, M.H.; HORTON, P.; ALEXANDRE, L.; LONGCHAMP, C.; MAZOTTI, B.; MICHOU, C.; PEDRAZZINI, A. (2012). Preliminary Slope Mass Movement Susceptibility Mapping Using DEM and LiDAR DEM. En B. Pradhan, & M. Buchroithner, *Terrigenous Mass Movements*, pp 109 - 170.

NSR-10, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. 2010. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá.