

**EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA PARA
LA EMPRESA CANTERAS DE COLOMBIA S.A.S.**



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
PROGRAMA ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA
MANIZALES
2016**

**EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA PARA
LA EMPRESA CANTERAS DE COLOMBIA S.A.S.**

DAVID TRUJILLO CATAÑO
SANTIAGO A. VALENCIA MORALES

Trabajo de Grado para optar al título de:
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
PROGRAMA ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA
MANIZALES
2016**

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Agradecemos a Dios por habernos permitido realizar este estudio superior, por no dejarnos desfallecer en el transcurso de la especialización, a la ciudad de Manizales por acogernos de una forma increíble con su clima, su gente, su paisaje y naturaleza increíble.

Gracias a todas nuestras familias, amigos, compañeros y profesores, porque de alguna manera contribuyeron a culminar satisfactoriamente un postgrado lleno de nuevas experiencias y conocimientos que ayudan a enriquecernos tanto personal como profesionalmente. Gracias a la Universidad de Manizales y empresas colaboradoras para la realización de nuestro proyecto final.

CONTENIDO

1.	ÁREA PROBLEMÁTICA.....	12
2.	OBJETIVOS	13
3.	JUSTIFICACIÓN	14
4.	MARCO TEÓRICO.....	15
5.	ALCANCES	21
6.	METODOLOGÍA.....	22
7.	RESULTADOS	34
7.2.1	Lleno antrópico No-1	37
7.2.2	Lleno antrópico No. 2	39
7.2.2.1	Diagnóstico de la zona de depósito	40
7.2.3	Perfil estratigráfico general del lleno.	40
7.2.4	GEOMORFOLOGÍA REGIONAL	41
8.	EXPLORACIÓN GEOFÍSICA CON SÍSMICA DE REFRACCIÓN Y TOMOGRAFÍAS ELECTRICAS	48
9.	EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA	62
10.	SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO ANTE MOVIMIENTOS DE MASA	91
11.	CONCLUSIONES.....	102
12.	RECOMENDACIONES	103
13.	BIBLIOGRAFÍA.....	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Arreglo en campo.....	24
Figura 2.	Tipos de movimiento de onda	25
Figura 3.	Esquema Del Arreglo Electrónico De Wenner. (P) Identifica Electrodo De Potencial y (C) Electrodo De Corriente.	27
Figura 4.	Arreglo Electrónico Schlumberger. (P)Identifica Electrodo De Potencial Y (C) Electrodo De Corriente.....	27
Figura 5.	Metodología de análisis de susceptibilidad por Movimientos en Masa. .	30
Figura 6.	Jerarquía para la elaboración del mapa de susceptibilidad de Movimientos en masas.	33
Figura 7.	Localización zona de disposición de estériles producto de las excavaciones.	34

Figura 8. Roca en explotación actual.	35
Figura 9. Flujos de lodos	37
Figura 11. Áreas a intervenir con la operación minera A-6.	39
Figura 12. Configuración local del lleno de estériles sin estabilizar.....	40
Figura 13. Características del lleno antrópico	41
Figura 14. Panorámica del área de estudio y MDL de la explotación.....	42
Figura 15. Modelo de elevación digital y modelo de pendientes	43
Figura 16: Zonas de pendientes altas y algunos procesos asociados a ellas	44
Figura 17. Algunas zonas de transición en el área de estudio	45
Figura 18: Zonas planas antrópicas con acumulación de aguas.....	46
Figura 19: Zonas planas y altas de acumulación actual de estériles.....	47
Figura 20. Ubicación de Líneas sísmicas.....	49
Figura 21. Adquisición de líneas sísmicas.....	50
Figura 22. Perfil de Velocidad de Onda de Corte (Vs) en Profundidad – L1 Canteras de Colombia.....	50
Figura 23. Perfil de Velocidad de Onda de Corte (Vs) en Profundidad – L2 Canteras de Colombia.....	51
Figura 24. Perfil de Velocidad de Onda de Corte (Vs) en Profundidad – L3 Canteras de Colombia.....	52
Figura 25. Perfil de Velocidad de Onda de Corte (Vs) en Profundidad – L4 Canteras de Colombia.....	53
Figura 26. Perfil de Velocidad de Onda de Corte (Vs) en Profundidad – L5 Canteras de Colombia.....	53
Figura 27. Perfil de Velocidad de Onda de Corte (Vs) en Profundidad – L6 Canteras de Colombia.....	53
Figura 28. Perfil de Velocidad de Onda de Corte (Vs) en Profundidad – L7 Canteras de Colombia.....	54
Figura 29. Perfil de Velocidad de Onda de Corte (Vs) en Profundidad – L8 Canteras de Colombia.....	54
Figura 30. Esquema general de adquisición de datos de tomografía geoeléctrica.	56
Figura 31. Modelo utilizado por el software de inversión.....	57
Figura 32. Ubicación de las líneas tomográficas.	58
Figura 33. Tomografía Línea 1	59
Figura 34. Tomografía Línea 2	60
Figura 35. Tomografía Línea 3.....	60
Figura 36. Tomografía Línea 4.....	61

Figura 37. Modelo de elevación proyectado del lleno de estériles	62
Figura 38. Diseño geométrico retolleno proyectado.....	68
Figura 39. Detalle No 1 - Berma parte superior.....	69
Figura 40. Detalle No 2- Berma parte Inferior.....	69
Figura 41. Conformación de los bancos del retolleno.	71
Figura 42. Modelación del cambio del paisaje en el periodo de abandono minero.	72
Figura 43. Modelo Slide® caso estático en la sección 3-3. F.S=4.28.	78
Figura 44. Modelo Slide® caso pseudoestático en la sección 1-1. F.S=3.032.....	78
Figura 45. Rango de sensibilidad de los parámetros del material de estériles.....	79
Figura 46. Detalle manto filtrante sobre ladera natural.....	82
Figura 47. Localización en planta de las secciones analizadas.	84
Figura 48. Resultado modelación Slide® caso estático conformación definitiva a sección 1-1. F.S=2.401.....	85
Figura 49. Resultado modelación Slide® caso pseudoestático conformación definitiva a sección 1-1. F.S=1.643.....	85
Figura 50. Rango de sensibilidad de los parámetros del material de estériles para primer año de llenado.	86
Figura 51. Localización en planta de las secciones analizadas para el quinto año.	87
Figura 52. Modelo Slide® caso estático en la sección 1-1. F.S=1.826.	88
Figura 53. Modelo Slide® caso pseudoestático en la sección 1-1. F.S=1.198.....	88
Figura 54. Rango de sensibilidad de los parámetros del material de estériles para el quinto año de llenado.....	89
Figura 55. Variación de la cohesión de los estériles vs factor de seguridad.	90
Figura 56. Histograma Geología área de estudio.....	92
Figura 57. Mapa Geología área de estudio.	93
Figura 58. Histograma Geomorfología del área de estudio.....	94
Figura 59. Mapa Geomorfológico del área de estudio.....	95
Figura 61. Histograma Rango de pendiente.....	96
Figura 62. Mapa rango de pendiente.	97
Figura 63. Histograma Usos del Suelo.....	98
Figura 64. Mapa Usos del Suelo.	99
Figura 65. Mapa Susceptibilidad por Movimiento en Masa.	101

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los procesos de remoción en masa (Modificada de Varnes, 1978).....	17
Tabla 2: Metodología para la clasificación de suelos Dearman.....	23
Tabla 3. Valores típicos de resistividad para diferentes tipos de materiales	28
Tabla 4. Matriz de susceptibilidad.	31
Tabla 5. Nivel de susceptibilidad	32
Tabla 6. Ponderación de análisis jerárquico.....	32
Tabla 7 Caracterización sísmica de suelos, según NEHRP (1993).....	48
Tabla 8. Clasificación de los perfiles de suelo- Tabla A.2.4-1 NSR-10.	49
Tabla 9. Parámetros de adquisición tomográfica.	56
Tabla 10. Volumen de llene de estériles y volumen de excavación.	70
Tabla 11. Parámetros Geotécnicos De Los Materiales	74
Tabla 12. Ensayos de corte directo tipo cd sobre estériles	74
Tabla 13. Rangos de clasificación de factores de seguridad para el caso estático y dinámico, según la NSR 2010. (Tomado de la tabla 2.4-1 NSR-2010).....	76
Tabla 14. Calculo de coeficiente de consolidación.....	80
Tabla 15. Coeficiente de consolidación para diferentes materiales.....	81
Tabla 16. Granulometría del colchón drenante.	83
Tabla 17: Evaluación Factores Geológicos.	91
Tabla 18: Evaluación Factores Geomorfológicos.	93
Tabla 19. Tabla de Susceptibilidad de la pendiente. (Tomado y modificado de INGEOMINAS, 2011).....	96
Tabla 20: Evaluación Factores Ambientales y Topográficos.	96
Tabla 21: Evaluación de usos del suelo.	98

GLOSARIO

Geomorfología: Ciencia que estudia las formas de la superficie terrestre y los procesos que la generan. Se dedica a la evaluación de la evolución en la dinámica del ciclo geográfico a partir de una serie de procesos tanto destructivos como constructivos, viéndose afectado por las fuerzas de la gravedad en las zonas más elevadas y colmando de material las zonas de niveles más bajos.

Movimiento en Masa: Procesos esencialmente gravitatorios, por los cuales una parte de la masa del terreno se desplaza a un nivel inferior de la original. Este tipo de procesos está asociado con las precipitaciones altas y los movimientos originados por los movimientos de las placas tectónicas de la tierra, los cuales son precursoras de los movimientos en masa, aumentando las fuerzas desestabilizadoras y reduciendo la resistencia del suelo al deslizamiento.

Sistemas de Información Geográfica: Consiste en una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar, y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos.

Susceptibilidad a Movimientos en Masa: Grado de ocurrencia a un movimiento en masa debido a la interacción de diversos factores propios de las laderas y de su entorno, como condiciones geomorfológicas, geológicas, estructurales, climatológicas y biológicas.

Plan de cierre y abandono minero: Herramienta que permite identificar y cuantificar los impactos ambientales negativos generados en la etapa de cierre de una actividad minera, así como definir medidas de acción presentes y futuras para prevenirlos, minimizarlos y/o mitigarlos y desarrollar un cronograma de ejecución de las medidas proyectadas, de forma tal que se dé cumplimiento al marco jurídico ambiental para la etapa de cierre del sitio.

Geotecnia: Es una de las principales ramas de la geología, se trata de la aplicación de los conocimientos y prácticas mecánica de suelos y rocas para la ejecución de grandes obras de ingeniería como construcciones civiles, hidroeléctricas, como la conservación del medio ambiente.

RESUMEN

Para la construcción de una zona de depositación en el título minero de la empresa Canteras de Colombia S.A., ubicada en el kilómetro uno, autopista Medellín-Bogotá; y con el uso de herramientas de geoprocésamiento SIG, se realizó un estudio para identificar las zonas de mayor susceptibilidad de movimientos en masa, lo que permitió realizar un análisis de gestión del riesgo para evitar posibles desastres y orientar técnicamente el plan de diseño y abandono del título minero.

La evaluación se desarrolló a través de la metodología utilizada por el Servicio Geológico Colombiano, basada en la generación de un álgebra de mapas temáticos y relacionada con procesos de remoción en masa. La información se recopiló, clasificó y evaluó teniendo en cuenta características principales como: adquisición de cartografía base, geología, geomorfología, geofísica y usos del suelo, para determinar la influencia de cada factor en la estabilidad de la zona de estudio, realizar análisis semi-cuantitativo de los factores que condicionan la estabilidad del terreno y ocurrencia de movimientos en masa, y poder estimar el grado de susceptibilidad del área.

PALABRAS CLAVES: Movimientos en masa, sistemas de información geográfica, susceptibilidad.

ABSTRACT

For the construction of depositional area in the mining title "Canteras de Colombia S.A.S.", located at kilometer one Medellin-Bogota highway; with the use of tools of geoprocessing GIS, a study was did identify areas of increased susceptibility of mass movements, allowing an analysis of risk management to avoid potential disasters and technically guide the design and abandonment plan mining title.

The assessment was developed through the methodology used by the Colombian Geological Survey, based on the generation of an algebra of thematic maps and related mass removal processes. The information was collected classified and evaluated taking into account key features such as: acquisition of basic cartography, geology, geomorphology, geophysics and land use to determine the influence of each factor in the stability of the study area, analyzes semi- quantitative factors that affect ground stability and occurrence of mass movements, and to estimate the degree of susceptibility of the area.

KEY WORDS: mass movements, geographic information system, susceptibility.

INTRODUCCIÓN

En este documento se plasma la necesidad de la industria minera por evaluar las condiciones en las que se encuentra una determinada área para ser intervenida el área de abandono minero proyectado y área de llenos antiguos en proceso de reforestación y acopios temporales de estériles, para su disposición, monitoreo control del material extraído en las actividades ejercidas mediante el beneficio.

En la metodología empleada se dará a conocer la importancia de la proyección de depositación del material estéril en una zona adecuada para tal fin, además de la determinación de obras civiles posteriores al análisis de susceptibilidad desde la perspectiva geoesférica en el aprovechamiento del sitio seleccionado que satisfagan la estabilidad de los llenos durante el transcurso de su uso, dado al control que se puede efectuar desde las diferentes herramientas y softwares que se tienen en los Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el fin de monitorear la zona a través del tiempo, siendo este una de las mejores opciones desde el punto de vista ambiental, técnico y económico para la empresa contratante.

Mediante estas herramientas se plantea una serie de recomendaciones que lleven a considerar diseños y construcciones optimas necesarias para el desarrollo del lleno a partir de la extracción del material de interés, siendo este el objeto que garantice el buen desarrollo del proceso constructivo.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA

La ubicación de la zona de estudio se encuentra en la empresa Canteras de Colombia, ubicada en el kilómetro 1 de la autopista vía Medellín-Bogotá, jurisdicción del municipio de Bello, Antioquia.

Área proyectada para la realización investigativo para el monitoreo multitemporal geotécnico del lleno por medio de herramientas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y campañas de campo; proponiendo la ejecución del lleno y disposición del material estéril resultante durante la extracción del material de beneficio por Canteras de Colombia S.A.S.

En el área del proyecto se evaluó las zonas más susceptibles a fenómenos por remoción en masa, considerando fenómenos de gran importancia para el análisis de la zona, con el fin de distribuir y depositar el material estéril, de forma que se tengan prácticas geotécnicas adecuadas para la estabilización durante las etapas proyectadas del depósito, en zonas con menor susceptibilidad a movimientos en masa.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un algebra de mapas mediante softwares de Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el fin de obtener un mapa de susceptibilidad de movimientos en masa para el título minero perteneciente a la empresa Canteras de Colombia S.A.S.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Establecer parámetros a través de componentes temáticos que permitan la obtención del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa, con el fin de evaluar y recomendar la planeación del desarrollo minero en zonas de determinadas para la depositación del material estéril.

Compilar, procesar y evaluar los datos disponibles como información secundaria existente del área del proyecto, para determinar la susceptibilidad de movimientos en masa.

Obtener insumos geoesféricos, por medio de toma de datos en campo y en oficina, para identificar, caracterizar y definir los materiales que lo conforman, con la finalidad de calcular y análisis la estabilidad de la zona.

3. JUSTIFICACIÓN

Es de gran interés para la empresa Canteras de Colombia, realizar un análisis detallado de la zona de estudio a intervenir desde aspectos tanto geológicos como ambientales, que puedan optimizar y garantizar áreas con mayor disponibilidad de depositación de material, esto con el propósito de garantizar sus características geotécnicas a futuro, mediante el monitoreo del estado a través del tiempo, controlar el avance y la calidad del lleno conformado a nivel superficial como a profundidad. Es así como se obtienen soluciones en obras civiles de gran envergadura sin afectar el entorno, minimizando la generación de riesgos tanto geológicos como estructurales donde se pueda ver afectada entidades privadas, equipamientos públicos o pérdidas humanas.

Mediante la elaboración de un algebra de mapas con diferentes softwares de Sistemas de Información Geográfica (SIG), como ArcGis, Global Mapper, Surfer, entre otros; se relacionan los parámetros técnicos analizados, para generar un mapa de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa a la zona de estudio, siendo estos software de gran ayuda actual para fenómenos comunes en nuestro país.

Adicionalmente se utilizan herramientas geofísicas donde se adquiere modelos 2D del terreno, donde se permite visualizar el subsuelo a través de modelamientos y correlaciones estratigráficas para un mejor entendimiento a procesos que son poco perceptibles al ojo humano; es por esto que estas herramientas son de gran interés en el desarrollo de estudios técnicos al momento de corroborar información generada a partir de softwares que muestren la superficie terrestre del área de interés y poder así plantear soluciones a obras que requieren de un mayor detalle a la vulnerabilidad y amenaza por fenómenos naturales.

4. MARCO TEÓRICO

En Colombia la práctica de minería a cielo abierto ha sido frecuente durante los últimos años, debido a la alta demanda que se requiere para el crecimiento urbanístico y equipamientos para el desarrollo de las diferentes ciudades.

La extracción de materiales de agregados por medio de cortes realizados en las laderas de la montaña ha sido objeto de estudio por diferentes entes encargados para el análisis de gestión del riesgo y corporaciones autónomas regionales para controlar, mitigar y prevenir cualquier amenaza asociada a procesos de remoción en masa de poca o gran magnitud debido al gran interés acelerado que se tiene por este material, siendo este en ocasiones poco monitoreado por empresas privadas que omiten los posibles riesgos y daños ambientales que pueden generar en la sociedad y al ambiente.

4.1 MINERÍA A CIELO ABIERTO

La minería a cielo abierto es una explotación que se lleva a cabo sobre la superficie del terreno, observándose a través de periodos de tiempo variaciones en el relieve, en la cual se utilizan medios explosivos y/o mecánicos para extraer dicho material de interés.

El material que no presenta interés económico durante su explotación se considera como material estéril; siendo este material acumulado en lugares fuera de los frentes de explotación y posteriormente abandonados sin ningún control en zonas que a futuro pudiesen ser utilizadas para asentamientos urbanos u otra utilidad.

De tal forma que actualmente la responsabilidad empresarial está considerando estudios para la adecuación de dicho material, con técnicas que garanticen estabilidad y control de los llenos, dando utilidades amigables con el medio ambiente y el paisaje mediante prácticas de restauración y revegetalización de dichos depósitos.

4.1.1 PRINCIPALES TIPOS DE MINA A CIELO ABIERTO:

- **Cantera:** término utilizado para referirse a explotaciones donde se extraen materiales, se usa como material en obras de construcción e infraestructura.
- **Cortas:** son explotaciones generalmente de metales, aunque también podemos encontrar explotaciones de carbón de este tipo. Dicha explotación va aumentando hacia profundidad.

- Descubiertas: esta explotación se lleva a cabo de manera horizontal donde se descubre el terreno, se explota el material de interés y posteriormente se recubre de nuevo la superficie de la zona intervenida.
- Aluviones o placeres: se encuentran dentro de las explotaciones de arena y grava, con el fin de extraer de allí material que tengan algún valor comercial o económico, llevándose a cabo en llanuras de ríos o playas.

4.2 ESTUDIO GEOTÉCNICO

La geotecnia se define como el conjunto de actividades que permiten obtener la información del terreno a partir de exploraciones donde se obtienen valores que permitan observar la capacidad portante, determinar la naturaleza y propiedades del terreno, entre otros; siendo necesarios para definir el tipo y condiciones de cimentación, y propiedades geomecánicas de las rocas (Rodríguez & Ortiz, 1984).

Dicho estudio geotécnico establece que situaciones geomecánicas influyen en la realización del proyecto haciendo referencia a las condiciones físico-mecánicas del subsuelo. Es necesario mencionar que si se requiere de un estudio de estabilidad de laderas este se debe determinar medidas de prevención y control que permitan reducir los niveles de amenaza y riesgo.

4.3 FENOMENOS DE REMOCIÓN EN MASA

Corresponden a un desplazamiento hacia abajo (vertical o inclinado en dirección del pie de una ladera) de un volumen de material litológico importante, en el cual el principal agente es la gravedad. Los términos más utilizados para denominar globalmente estos fenómenos son: movimientos en masa, movimientos de terreno, deslizamientos, deslizamientos de terreno, deslizamientos de vertiente, movimientos de ladera, entre otros. (Varnes, 1996) en Franco, 2004.

Caídas: Según Varnes (1978, 1996), Hutchinson (1988) (en Franco, 2004) una caída se inicia con la separación de suelo o roca desde una ladera a lo largo de una superficie sobre la cual poco o ningún desplazamiento cortante tiene lugar, descendiendo principalmente a través del aire cayendo, rebotando o rodando. El movimiento es de muy rápido a extremadamente rápido.

Este movimiento ocurre generalmente en zonas de alta pendiente y la gravedad constituye el principal agente motor del movimiento. Las caídas, desprendimientos o desplomes son generados por procesos similares, ellos son distinguidos solamente por la magnitud del fenómeno.

Volcamientos: Es la rotación hacia fuera de un talud, de masas de suelo o roca alrededor de un punto o eje por debajo del centro de gravedad de la masa desplazada. El movimiento puede ser dirigido por la gravedad ejercida por el material ladera arriba de la masa desplazada y algunas veces por agua o hielo en fisuras o grietas en la masa. Los volcamientos pueden conducir a caídas o deslizamientos de la masa desplazada, dependiendo de la geometría de la masa que se mueve, la geometría de la superficie de separación y la orientación y extensión de las discontinuidades cinemáticamente activas (Varnes, 1996 en Franco 2004).

Tabla 1. Clasificación de los procesos de remoción en masa (Modificada de Varnes, 1978).

TIPO DE MOVIMIENTO		TIPO DE MATERIAL		
		Roca	Suelo	
Caída (<i>fall</i>)		Caídas de rocas o desprendimientos (<i>rock fall, debris fall & topples</i>)		
Vuelcos (<i>topples</i>)		Vuelcos (<i>topples</i>)		
Deslizamiento (<i>slide</i>)	Rotacional	Asentamiento (<i>slumps</i>)		
	Planar	Deslizamiento de rocas (<i>slides</i>)		
Flujo (<i>flow</i>)		Inconsolidado		
		<i>Húmedo...S. eco</i>	Bloques Flujos de escombros (<i>rock fragment flow</i>)	Detritos Flujo de detritos o derrubio (<i>debris flow</i>)
Desplazamientos laterales		Blocosos		Suelos
Deslizamiento complejo (<i>complex landslide</i>)		Combinación de materiales y tipo de movimiento		

Deslizamientos: Varnes (1978, 1976) y Hutchinson (1988) en Franco 2004) coinciden en definir los deslizamientos como movimientos rápidos pendiente abajo, de suelo o roca sobre una o más superficies críticas de deslizamiento límite. También generan diferentes mecanismos y formas de ruptura que permiten diferentes clasificaciones.

- **Traslacional:** la masa se desplaza a lo largo de una superficie planar, ondulante deslizándose afuera sobre la superficie del terreno original con una dirección casi paralela al talud (Varnes 1978, 1996; Hutchinson 1988 en Franco 2004); los deslizamientos traslacionales son relativamente más superficiales que los deslizamientos rotacionales.
- **Rotacional:** se mueven a lo largo de una superficie de ruptura curva o cóncava; si la superficie de ruptura es circular o cicloidal en perfil, la cinemática dicta que la masa desplazada puede moverse a lo largo de la superficie con poca deformación interna (Varnes 1996 en Franco 2004)

- **Planar:** la masa que se mueve consiste de una sola unidad poco deformada o varias unidades cercanamente relacionadas (Varnes, 1978 en Franco 2004)
- **Compuesto:** Varnes (1996) y Hutchinson (1988) definen los deslizamientos compuestos como deslizamientos intermedios entre rotacionales y traslacionales. Se caracterizan porque las superficies de deslizamiento son marcadamente no circulares, formadas por una combinación de una parte plana curva o plana profunda en la parte trasera y una más plana en la base (Hutchinson 1988)

Flujos: Son movimientos de material litológico de textura fina y gruesa que se desplaza a lo largo de una superficie de falla bien definida. Aunque comúnmente los flujos son caracterizados como movimientos rápidos y compuestos por lodos también pueden ser lentos y compuestos por rocas y suelos no saturados. En general estos movimientos se caracterizan por presentar superficies de ruptura planar a lo largo de una discontinuidad litológica, determinada por el contacto suelo-roca o roca meteorizada-roca fresca, dejando superficies pulidas y estriadas.

4.4 ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE UN TERRENO A PRESENTAR POSIBLES MOVIMIENTOS EN MASA

Existen diversos métodos de evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos a través de SIG. Soeters y van Westen (1996), Aleotti y Chowdhury (1999) y Guzzetti et al. (1999), entre otros autores, proporcionan una amplia visión de los más utilizados, entre los que se incluyen principalmente los métodos estadísticos, determinísticos, indexación y de evaluación directa de la susceptibilidad. La aplicabilidad de cada método a una zona determinada depende sobre todo de las características y extensión de dicha zona, del tipo y extensión de los deslizamientos existentes, de los datos geotécnicos e hidrogeológicos disponibles y de la escala de trabajo (Hervas, 2001).

Con respecto a la utilización de los SIG en estudios de amenaza de movimientos en masa, Mora y Vahrson (1993), realizaron estudios de casos de fallas de taludes en Centroamérica y propusieron un método de predicción de amenaza. En este método se incluyeron tres factores relacionados con la susceptibilidad como: relieve relativo, condiciones litológicas y humedad.

El método empleado para la evaluación de la susceptibilidad requiere en primer lugar la creación de la base de datos mediante la elección de mapas temáticos y cartografía de los factores del terreno condicionantes de la inestabilidad. Para ello se utilizan técnicas tradicionales, como la fointerpretación y el reconocimiento directo de campo, junto con otras de tratamiento digital de imágenes de satélite,

imágenes de sombreado del relieve a partir de Modelos de Elevación del Terreno (MDE) de alta resolución (Hervas, 2001).

El álgebra de mapas se utiliza como herramienta informática por medio de una serie de mapas, donde se realiza un análisis de la susceptibilidad del terreno ante un posible fenómeno natural como los movimientos en masa; considerando las pendientes de sus laderas, usos del suelo, coberturas vegetales, tipos de roca que permiten integrar diferentes temáticas con el fin de dar como resultado un área susceptible a los movimientos en masa.

Esta aplicación proporciona información indicativa de inestabilidad o propensión del terreno de acuerdo a sus condiciones intrínsecas donde la amenaza se consolida como detonante o desencadenante de zonas críticas.

4.5 MARCO REFERENCIAL

El **“DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:100.000”** (Servicio Geológico Colombiano, 2013), aborda dentro de su temática la importancia de desarrollar un proyecto de Actualización del Mapa Nacional de Amenaza relativa por Movimiento en Masa a una escala más desarrollada con el fin de proveer futuros desastres y amenazas, destacando la importancia de que este sería útil para el ordenamiento territorial, regional, para la planeación del desarrollo y la gestión de riesgo, los entes del orden departamental y nacional, usando como su principal herramienta un Sistema de Información Geográfica y destacando el valor que estos tienen para poder llevar a cabo este tipo de proyectos.

En cuanto a **“DISEÑO RETROLLENO DE PIT, DENTRO DE LOS TÍTULOS MINEROS 4381 Y 0788, CANTERAS DE COLOMBIA S.A.S.”** (Febrero, 2015) Su objetivo de estudio fue zonificar el riesgo ambiental de las canteras pertenecientes a la empresa Colombia S.A.S, mediante un SIG, para realizar las recomendaciones de la construcción de bancos y taludes de relleno y el manejo adecuado de aguas superficiales; de esta manera garantizar la estabilidad de las obras que se construirían.

Así mismo en el informe geológico y geotécnico **DISEÑO PARA EL MANEJO HIDRÁULICO, GEOTÉCNICO Y AMBIENTAL DE UN LLENO DE ESTÉRILES EN LA EMPRESA CANTERAS DE COLOMBIA – DE LA COMPAÑÍA ARGOS S.A. (2012)** y con la ayuda de una herramienta de vital como los SIG, se desarrolla un Plan de Manejo Ambiental (PMA), con el fin de prevenir, controlar, mitigar o compensar los efectos adversos que puedan presentar en áreas donde se llevan a

cabo labores mineras; así mismo con el fin de obtener una cartografía geológica detallada del terreno; incluye además la elaboración de esquemas y planos donde se plasma cada una de las medidas a implementar y la estimación de sus costos.

5. ALCANCES

Se diseñó y estructuró toda la información de campo y de oficina obtenida, donde en una primera fase se creó geodatabase, la cual debió integrar la geoinformación como geología, geomorfología, geofísica, usos del suelo y demás, de acuerdo a los parámetros estándares para la realización de la susceptibilidad a movimientos en masa.

- Se recopiló la información cartográfica, fotografías aéreas, el trabajo de campo, donde permitió alimentar, analizar y mejorar información existente de dicha zona, además de generar información obtenida en el presente estudio.
- Se entendió como geoinformación toda aquella información distribuida geográficamente, tales como: cartografía base, geología, geomorfología, geofísica, usos del suelo, pendientes, susceptibilidad, entre otros.
- Se implementó una geodatabase, que permitió adoptar la cartografía básica, nomenclatura de archivos, captura de información en campo; que a futuro permita consultar, alimentar, analizar, procesar y presentar de manera estándar, los diferentes mapas temáticos realizados, garantizando en un posterior proyecto de la zona, el manejo rápido y ágil de la geoinformación.
- Se aplicaron metodologías acordes a las condiciones físicas de la zona de estudio, permitiendo evaluar la susceptibilidad a movimientos en masa y la estabilidad del terreno donde se tiene proyectado la realización del llenado y la depositación del material estéril.

6. METODOLOGÍA

A continuación se describen las actividades realizadas para la ejecución del proyecto:

6.1 RECOPIACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA INFORMACIÓN SECUNDARIA EXISTENTE.

Se planteó como primera medida, compilar, procesar y evaluar los datos disponibles acerca del sitio respectivo, con parámetros geológicos, geomorfológicos, bases de datos espaciales y uso del suelo en cada una de las zonas identificadas como posibles sitios de almacenamientos de materiales productos de las excavaciones, cortes y re conformaciones dentro del área del proyecto.

6.2 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

Mediante la inspección de campo se pudo identificar cada una de las unidades geológicas y formaciones superficiales presentes en los sitios evaluados desde la información secundaria existente y la exploración de campo realizada; donde también se realizaron los levantamientos de procesos morfodinámicos y demás fenómenos que podrían generar problemas de inestabilidad en cada uno de los sitios destinados como depósitos de materiales.

Para definir los perfiles de meteorización de las rocas existentes se utilizó la clasificación de Dearman (1991) presentada en la

Tabla 2.

Tabla 2: Metodología para la clasificación de suelos Dearman.

Grado	Criterio Límite	Descripción
VI	Textura Ausente	La roca se ha decolorado y transformado completamente en suelo en el cual se ha perdido la estructura original de la roca parental. Existe gran cambio de volumen.
V	Textura original presente y núcleos ausentes.	La roca se encuentra transformada en suelo pero conserva la textura original. Se pueden encontrar bloques de rocas. Las propiedades del suelo dependen de la naturaleza de la roca parental. Puede excavar a mano.
IV	Núcleos de roca presentes	Roca decolorada, las discontinuidades pueden estar abiertas y tener decoloradas las paredes la estructura original cerca de las discontinuidades puede estar alterada, menos del 50% del material es roca. La recuperación varía entre un 10 y 50% y el RQD varía entre 10 y 30%.

6.3 EXPLORACIÓN GEOELÉCTRICA Y SÍSMICA

Se definió la elaboración de un estudio de tomografía geoelectrica para verificar la disposición de los estratos a profundidad, saturación de agua en el subsuelo que contribuye a la desestabilización del terreno, con el fin de obtener un perfil de

resistividades del subsuelo en 2D del área de estudio, permitiendo realizar una interpretación de las unidades geológicas presentes y en base a ellas emitir recomendaciones para la actividad específica de interés, además con la exploración sísmica se permite determinar la velocidad de propagación de onda transversal u onda S de los materiales existentes, con el fin de emplear los resultados del ensayo, para interpretar la estratigrafía del sitio a lo largo del área según la extensión de los geófonos.

Para la ejecución de los ensayos sísmicos se utilizó la metodología descrita en las normas ASTM D 5777-00 (Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigations) y ASTM D 6429-99 (Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods) en combinación con los manuales y procedimientos de la casa fabricante de los equipos.

6.3.1 ENSAYO REFRACCIÓN SÍSMICA

El método de refracción sísmica consiste en la medición del tiempo de viaje de ondas sísmicas compresionales (V_p), generadas por una fuente impulsiva, desde un punto de disparo hasta unos sensores anclados a la superficie, llamados geófonos. El tiempo de viaje se mide desde el instante del impacto, conocido como “tiempo cero”, hasta el momento en que las ondas son recibidas después de haber viajado por las primeras capas del subsuelo. Con las medidas de tiempos de viaje y distancia, es posible entender con buena certeza las velocidades de ondas en el subsuelo, las cuales son un indicador indirecto de la geometría y propiedades elásticas de estos materiales.

El pulso sísmico generado en superficie viaja a través del subsuelo a manera de frentes de onda, que se propagan en las tres direcciones del espacio. Aquellas que viajan hacia el centro de la tierra eventualmente encontrarán interfaces en las cuales las ondas pueden reflejarse, refractarse o generar otros tipos de ondas; para el método de refracción sísmica las ondas de interés son aquellas que han sido refractadas a su paso por las varias capas del suelo.

El esquema del ensayo se muestra en la Figura 1.

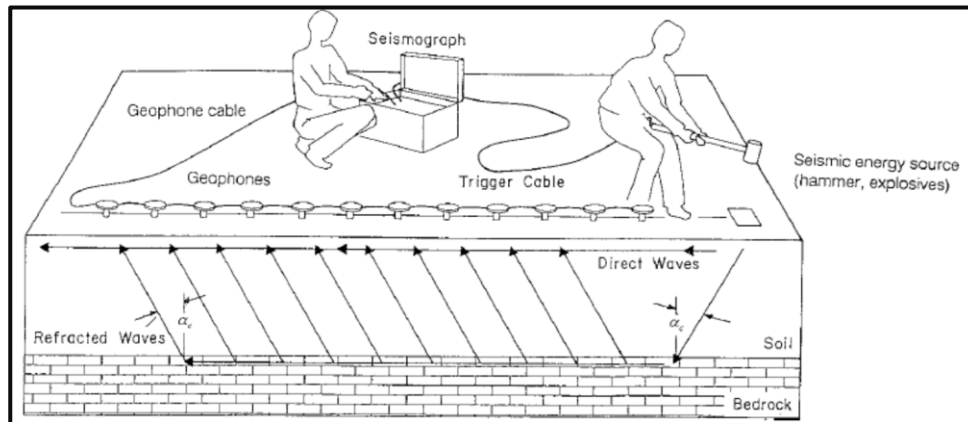


Figura 1. Arreglo en campo
Fuente: Tomado de ASTM d5777-00, 2011

Ensayo MASW

Dentro de las técnicas basadas en la dispersión de ondas superficiales destaca el MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves). Es un método desarrollado a finales de los años 90 en Estados Unidos. Sus principales ventajas son que puede emplear (y combinar si es necesario) ondas Rayleigh generadas de manera activa (mediante maza, vibrador o fuente explosiva) o pasiva (tráfico, viento, mareas, etc.).

Otra ventaja de este método es que, además de analizar el modo fundamental de dispersión de las ondas Rayleigh, puede incorporar información proveniente de los modos superiores de vibración, generando de este modo modelos de velocidad de mayor resolución.

Actualmente, es el método geofísico basado en la dispersión de ondas superficiales más popular en todo el mundo, dada su fiabilidad y versatilidad. Con una separación entre geófonos variable (entre 0.5 y 5.0 m) y un sistema de desplazamiento optimizado se obtienen modelos de velocidad de ondas S (V_s) de alta resolución en pocos minutos.

En la se Figura 2 se presenta el comportamiento de las diferentes ondas en superficie.

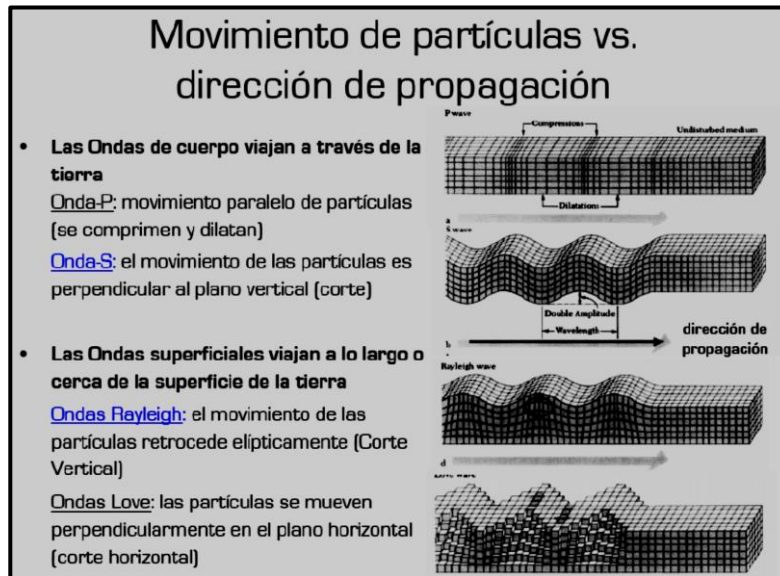


Figura 2. Tipos de movimiento de onda
Fuente: Tomado de ASTM D5777-00, 2011

6.3.2 GENERALIDADES Y MÉTODO DE PROSPECCIÓN

La exploración geoelectrica permite observar a partir de los valores y contrastes de resistividad, con el fin de determinar las profundidades a las que se encuentran las unidades con diferentes valores de resistividad, partiendo de la interpretación de una curva observada de resistividades aparentes. La interpretación de las curvas de sondeo obtenidas en campo con parámetros teóricos y con los registros de columnas estratigráficas conocidas, permiten la interpretación del sondeo.

6.3.3 BASE DEL MÉTODO

Cuando se aplica corriente por conducción en el suelo a través de electrodos, cualquier variación en conductividad en el subsuelo altera el flujo de corriente dentro de éste y éste a su vez afecta la distribución del potencial eléctrico.

El grado al cual el potencial en superficie es afectado depende del tamaño, localización, forma y conductividad del material que conforma la sección investigada a partir de las medidas de potencial hechas en superficie.

La práctica usual es inyectar corriente al subsuelo por medio de dos electrodos y medir la diferencia de potencial entre un segundo par colocado en línea entre los primeros. A partir de los valores de diferencia de potencial, la corriente aplicada y también la separación de electrodos, una cantidad denominada "Resistividad Aparente" puede calcularse.

En un suelo homogéneo, ésta corresponde a la verdadera resistividad y usualmente representa un promedio establecido de las resistividades de todas las formaciones a través de las cuales la corriente pasa. La variación es de esta resistividad aparente con el cambio en la posición o espaciamiento de los electrodos, la que da información acerca de las variaciones en la estratificación del subsuelo.

Las curvas del sondeo se interpretan con la ayuda de modelos matemáticos o curvas patrones, la cual es representada en un diagrama bilogarítmico en donde se deduce la resistividad (Ohm-m) y la profundidad (Espesor-m) de las diferentes capas que conforman el subsuelo.

6.3.4 CONFIGURACIÓN DE ELECTRODOS

Según lo que se pretenda determinar, sea la variación lateral o en profundidad de las características del subsuelo, el método geoelectrico ofrece varios arreglos electrónicos para realizar las medidas en campo. Estos arreglos están definidos por la ubicación de los electrodos de potencial, P, y de corriente, C, en la realización de los sondeos. Para la ejecución del proyecto se propone utilizar la tomografía eléctrica y el sondeo eléctrico vertical, lo cuales utilizan respectivamente los arreglos Wenner alfa y Schlumberger.

Estos arreglos se muestran en las Figura 3 y Figura 4.

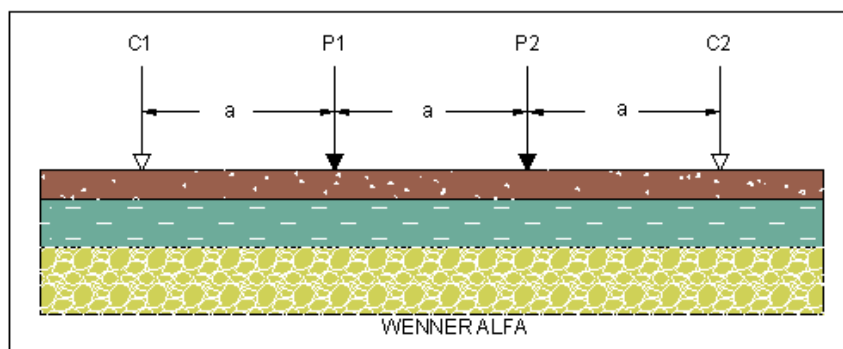


Figura 3. Esquema Del Arreglo Electrónico De Wenner. (P) Identifica Electrodos De Potencial y (C) Electrodos De Corriente.

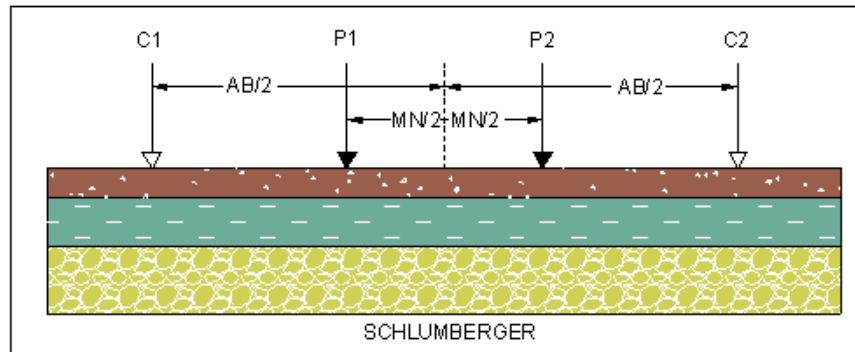


Figura 4. Arreglo Electrónico Schlumberger. (P) Identifica Electrodo De Potencial Y (C) Electrodo De Corriente.

En los SEV una señal de corriente eléctrica bien definida es inyectada en el terreno a través de los electrodos de corriente (A-B). El cambio de voltaje resultante es medido entre los electrodos de potencial (M-N) colocados entre los electrodos de corriente. El equipo de geoelectrica genera la señal de corriente (I) y mide a su vez la señal resultante de voltaje (DV), para luego calcular su cociente (DV/I). Multiplicando este valor resultante por una constante que depende de los valores de espaciamento dados a los electrodos AB y MN, se obtiene la resistividad aparente (ρ_0) que corresponde al valor promedio ponderado de las resistividades de todas las formaciones a través de las cuales la corriente se desplaza. El (ρ_0) es expresado en ohmios-metro (ohm-m).

Las resistividades aparentes obtenidas en campo se graficaron en papel logarítmico. El proceso de interpretación de las gráficas se realizó con la obtención y distribución de resistividades verdaderas en el subsuelo a partir de leyes físico-matemáticas y se modelaron las curvas geoelectricas. Estas curvas se correlacionaron con los registros de pozos existentes, cercanos al sitio de sondeo. Finalmente se obtuvieron los perfiles estratigráficos.

En la interpretación hidrogeológica, debe a su vez, considerarse que el valor de la resistividad real puede variar en un intervalo muy amplio para el mismo material dependiendo de sus características particulares y de sus condiciones de saturación. Finalmente, el modelo geoelectrico resulta de la combinación de los modelos físicos con la información geológica existente.

En la preparación de los modelos y en su interpretación juega un papel más importante el gradiente resistividad aparente/profundidad que permite definir los niveles en los que se presentan contrastes de resistividad que pueden ser correlacionados con cambios litológicos. Los valores teóricos típicos (preliminares)

de resistividad de los diferentes materiales y condiciones de los depósitos no consolidados que se encuentran por encima del basamento se consignan en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores típicos de resistividad para diferentes tipos de materiales

Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000 Ω m
Basamento. Roca fracturada	1500-5000 Ω m
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100-2000 Ω m
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada	50-100 Ω m
Gruss parcialmente saturado	500-1000 Ω m
Gruss saturado	40-60 Ω m
Saprolito parcialmente saturado	200-500 Ω m
Saprolito saturado	40-100 Ω m
Gravas parcialmente saturadas	500-2000 Ω m
Gravas saturadas	300-500 Ω m
Arenas parcialmente saturadas	400-700 Ω m
Arenas saturadas	100-200 Ω m
Limos parcialmente saturados	100-200 Ω m
Limos saturados	20-100 Ω m
Limos saturados con agua salada	5-15 Ω m
Arcillas parcialmente saturadas	20-40 Ω m
Arcillas saturadas	5-20 Ω m
Arcillas saturadas con agua salada	1-10 Ω m
Ceniza volcánica seca	1000-2000 Ω m
Ceniza volcánica húmeda	300-1000 Ω m

6.4 PROCESAMIENTO EN OFICINA

Se llevó a cabo operaciones de análisis de información cartográfica mediante el procesamiento digital de imágenes y el Modelo de Elevación Digital (DEM), por medio de herramientas SIG como ArcGis, Global Mapper, entre otros, para obtener mapas que permiten la interpretación adecuada en dicha zona de estudio. A partir de esta información se generó los mapas geoesféricos preliminares, mapas que fueron la base para el desarrollo de campo y objeto de este estudio.

La metodología para obtener el mapa de susceptibilidad, consiste en recolectar información secundaria de cartografía base, imágenes satelitales que permitan obtener los mapas temáticos de geología, geomorfología, usos del suelo y pendientes. Por tratarse de un estudio a escala pequeña, debe evaluarse la susceptibilidad con métodos básicos, es decir, aquellos basados en procesos

geomorfológicos, con lo cual se obtiene una zonificación preliminar. La selección del método de zonificación adecuada y disponible para este proyecto dependió de varios factores como: disponibilidad, calidad y exactitud de los datos, la resolución de zonificación, los resultados requeridos, la escala de la zonificación, entre otros.

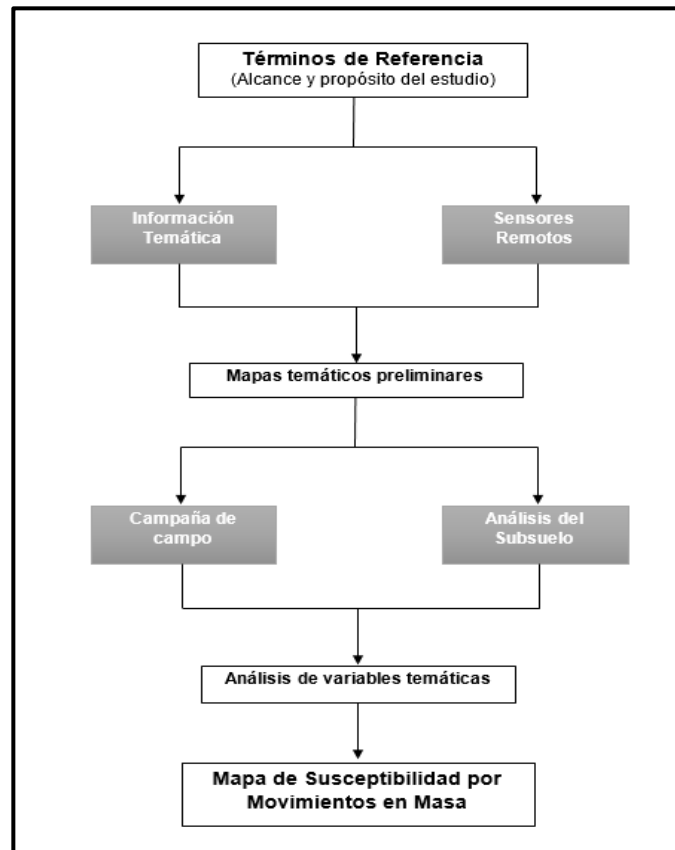


Figura 5. Metodología de análisis de susceptibilidad por Movimientos en Masa.
Fuente: Este estudio.

Para la generación del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa se emplearon variables cualitativas como geología, geomorfología, uso del suelo y dentro de las variables cuantitativas se utilizaron pendientes que es derivada del Modelo de Elevación Digital (DEM). Para este análisis fue necesario considerar los insumos de información cartográfica básica, definiendo el área, el objetivo final del estudio los alcances y los recursos con que se cuenta en este proyecto. Definido la adquisición cartográfica se debe obtener la cartografía base tanto en formato digital como análogo de los diferentes temáticos a utilizar en el mapa de susceptibilidad.

La metodología consiste en establecer un sistema de estandarización, dado que las variables originales se expresan en unidades de medida diferente, con rangos distintos y con una amplia gama de posibilidades de interpretación en función de la representatividad o adecuación para un objetivo concreto (Eastman, 1999). Para cada variable geográfica se analizaron las diferentes propiedades que afectan las laderas y según su importancia se establecieron pesos (Método Heurístico) a los factores considerados, expresándolos cuantitativamente con el peso de ponderación para cada uno de ellos en el potencial de procesos de ladera entre 0 y 5, donde 5 es el valor que indica la más alta influencia sobre la susceptibilidad y 0 ninguna influencia, valores adoptados según el conocimiento empírico que se tenga. En esta etapa se consideraron los atributos pendiente, geología, geomorfología y usos del suelo con los índices presentados en la Tabla 4.

Tabla 4. Matriz de susceptibilidad.

SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO ANTE MOVIMIENTOS DE MASA		
VARIABLES	FACTORES	ESCALA DE CALIFICACIÓN
Geomorfología	Vertientes Antrópicas Altas	4
	Vertientes Antrópicas Medias	3
	Vertientes Antrópicas Bajas	2
Usos del suelo	Área depósitos de estériles antiguo	5
	Áreas Intervenidas y Regeneradas	4
	Áreas a intervenir con la operación minera	3
	Área de depósitos de estériles en revegetalización	4
	Área de protección	2
	Área intervenida – infraestructura minera	2
Geología	Depósitos aluvial	2
	Dunita de Medellín	2
	Flujo de Escombros	3
	Lleno de Estériles	4
	Lleno de estériles recientes	5
	Suelo Antrópico	2
Pendientes	0 – 30 grados	2
	30 – 40 grados	3
	40 – 60 grados	4
	>60 grados	5

Luego de asignarles los valores de evaluación se procede a unificar cada atributo en un archivo Raster, estos archivos son superpuestos por medio del software

Arcgis 10.1 considerando los pesos establecidos, dando como resultado un Raster único con la sumatoria de todos los atributos analizados.

Con base en la sumatoria de atributos obtenida, se clasifica el nivel de susceptibilidad de acuerdo a los índices de la Tabla 5. **Nivel de susceptibilidad**, siendo estas representadas en el mapa definitivo de acuerdo a la opinión de expertos relacionadas con la expectativa de deslizamiento. Evaluación se fundamenta basada en el análisis de los procesos que actúan directamente sobre el terreno, desestabilizando las laderas del objeto de estudio.

Tabla 5. Nivel de susceptibilidad

Susceptibilidad	Rango numérico de la sumatoria	Índice de la susceptibilidad
Muy Baja	4 – 6	1
Baja	7 – 9	2
Media	10– 13	3
Alta	14 – 17	4
Muy Alta	18 – 20	5

Esta metodología usa el álgebra de mapas para determinar la influencia de cada factor el cual está apoyada en una plataforma SIG para realizar un análisis semi-cuantitativo entre los diferentes factores para determinar la amenaza natural.

Esta información se desarrolló mediante la herramienta Slope y posteriormente fue reclasificada en varios rangos por la herramienta Reclassify. Luego de tener cada una de estas variables digitalizadas y en formato Shapefile se migro a una geodatabase convirtiéndose en Feature Class, con el fin de poder analizar la topología de cada una de estas, mediante las reglas topológicas Must not overlap y Must no Have Gaps.

Posteriormente corregidas cada una de estas capas se procedió a migrar cada una de estas a formato Raster, asignándoles un valor determinado a cada celda según el criterio asignado a los atributos que conforman cada uno de estos elementos analizados, para luego realizar un algebra de mapas y así obtener en formato Raster de la susceptibilidad, todo esto con la ayuda de la herramienta Map Algebra/Raster Calculator, el cual suma cada uno de los valores asignados a cada variable intervenida, mediante el análisis jerárquico se asignan porcentaje de peso a cada una de las variables considerando su importancia y afectación a la susceptibilidad de movimientos en masa.

Tabla 6. Ponderación de análisis jerárquico.

Mapa Temático	Porcentaje %
---------------	--------------

Pendientes	40
Geología	25
Geomorfología	15
Usos del Suelo	20

La mayoría de estos mapas fueron digitalizados en el software ArcGis con la información adquirida del proyecto; lo cual fue estudiada y analizada en detalle para cada una de estas variables de la zona, y otra parte fue obtenida mediante un análisis Raster (pendientes y la morfometría), ambas obtenidas de la información secundaria suministrada por Canteras de Colombia S.A.S. El cual contaba con una alta precisión, lo que dio la posibilidad de obtener datos más precisos sobre los rangos de pendientes.

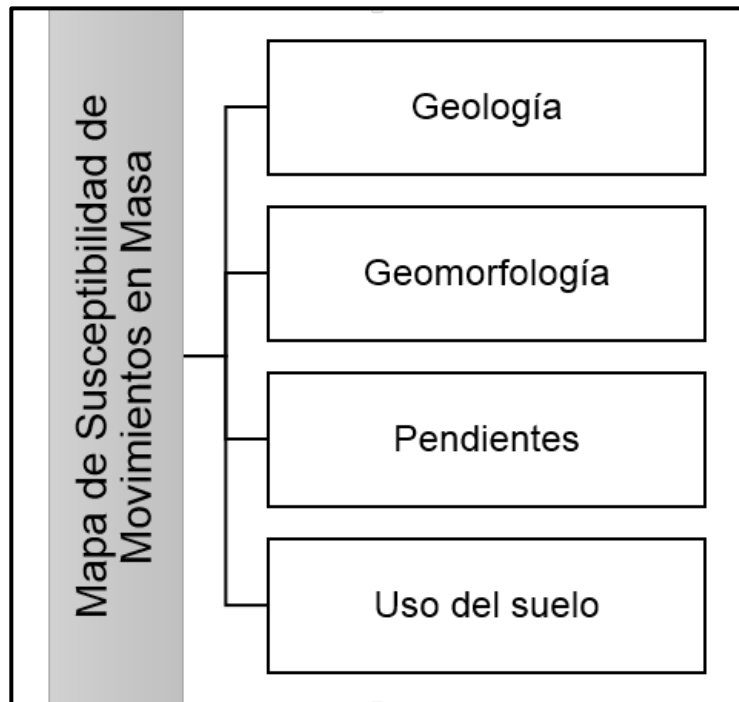


Figura 6. Jerarquía para la elaboración del mapa de susceptibilidad de Movimientos en masas.
Fuente: Este estudio.

6.5 EXPLORACIÓN DE CAMPO

Realización de la descripción de los sondeos, apiques, u otros procedimientos exploratorios, con el objeto de identificar los perfiles estratigráficos de cada uno de los sitios proyectados para los llenos antrópicos a desarrollar.

7. RESULTADOS

7.1 EVALUACIÓN GEOESFERICA DE LOS LLENOS ACTUALES

7.1.1 LOCALIZACIÓN

El área de estudio se encuentra localizada en inmediaciones de la planta de material para agregados en la empresa Canteras de Colombia S.A.S., ubicada en el kilómetro 1, autopista Medellín-Bogotá, en área rural del municipio de Bello (Antioquia).

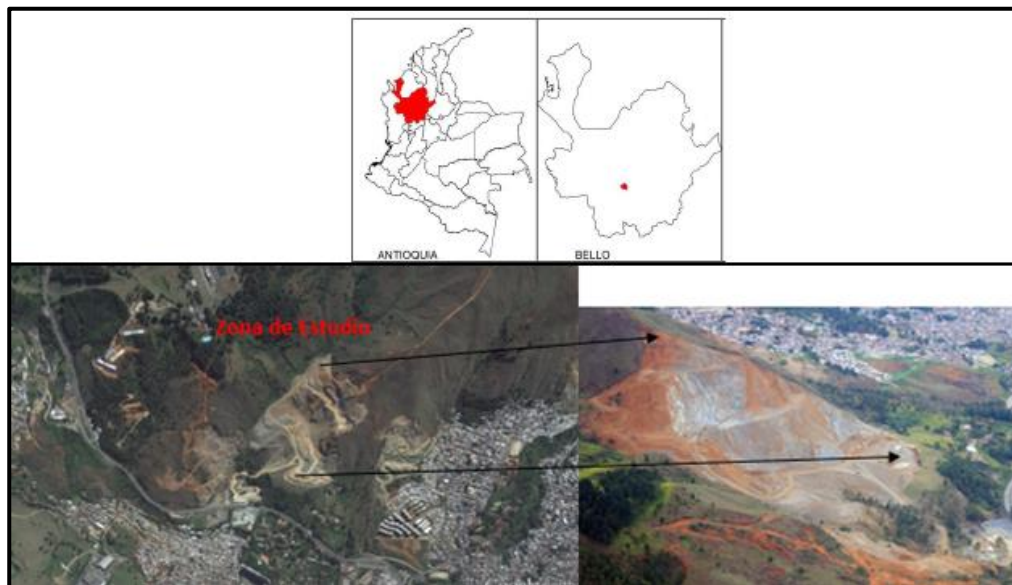


Figura 7. Localización zona de disposición de estériles producto de las excavaciones.
Fuente: Este estudio.

7.2 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

7.2.1 GEOLOGÍA DEL AREA DE ESTUDIO

En la zona de estudio se tienen rocas ígneas como dunitas, depósitos recientes de origen de vertiente y depósitos antrópicos (lleno de estériles). Estas unidades de rocas se estudiaron de forma directa para obtener una buena caracterización de la roca fresca y de los perfiles de meteorización, condición fundamental para apoyar los análisis de susceptibilidad a movimientos en masa.

7.2.1.1 ROCAS ÍGNEAS

Las rocas ígneas que afloran en el área de explotación corresponden a las denominadas Dunitas de Medellín.

- **Dunitas de Medellín (Kdm)**

Estas rocas afloran principalmente en la cantera y se presentan sobre una topografía abrupta, y normalmente reposan en contacto fallado sobre las anfibolitas de Medellín, desarrollando una zona de esquistos cloríticos actinolíticos replegados en el contacto.

Estas rocas tienen diferentes presentaciones según su estado de alteración, desde azul oscuro a negro en estado fresco hasta diferentes tonalidades de verde con variaciones a café y gris plomo cuando están meteorizadas, exhiben un intenso fracturamiento haciéndose más fuerte en cercanía a la zona de contacto con la anfibolita, su textura es de grano fino hasta masiva. En contacto con la anfibolita son de color verde claro, textura foliada, aspecto talcoso, brillo céreo y tacto graso.

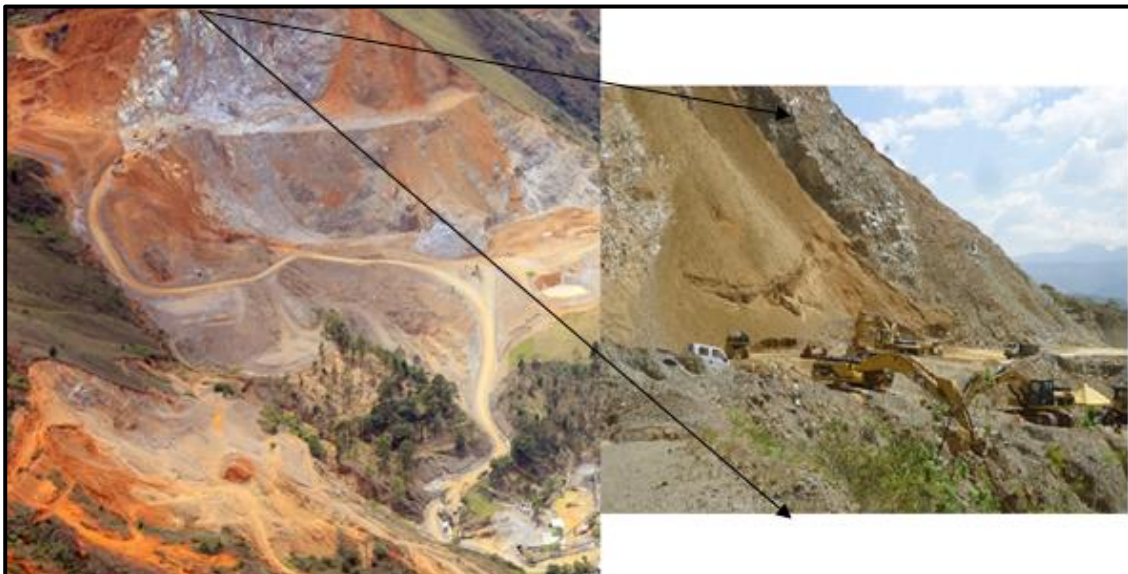


Figura 8. Roca en explotación actual.
Fuente: Este estudio.

A continuación se describe el perfil de meteorización generalizado para esta unidad litológica:

- Horizontes A-B: Estrato orgánico de color café oscuro, textura limo-arcillosa, contiene cantos decimétricos de cuarzo, óxidos de hierro hacia la base, formando costras duras de color café oscuro, su espesor puede variar de 0,40 - 1 m.
- Horizonte V: Matriz con textura arcillo-limosa, color rojo intenso que varía a amarillo ocre y moteados de color vino tinto, consistencia dura, baja plasticidad, seca, moderadamente cementado, contiene bloques de roca altamente alterados, que exhiben foliación cataclástica, con un espesor de 1,5 m.
- Horizonte IV: En afloramiento tiene características de un flujo de escombros, sin embargo en realidad corresponde a una brecha tectónica donde predomina la porción gruesa en un 80%, los bloques de roca son de tamaño hasta centimétrico, angulosos, irregulares con forma de elipsoides deformados, cuyos espacios intersticiales son ocupados por una matriz de color verde manzana con textura arcillo limosa, tiene un espesor de 50 m.

- **Depósitos de Vertiente: Flujos de lodos (Qfl).**

Se caracterizan por el predominio de la fracción fina (matriz) en oposición a la fracción gruesa (bloques y fragmentos de roca de variada composición). Generan un suelo limo arcilloso, de coloración roja a naranja con motas amarillas y claras, con presencia de bloques meteorizados; la relación matriz a bloques es 80/20 y el grado de meteorización varía de V a VI.

En estos depósitos la matriz varía de arcillas a arenas y el grado de meteorización se encuentra entre III y IV. Es común encontrar algunos bloques de roca erráticamente distribuidos en superficie ligeramente meteorizados; así como también costras literáticas en los dos primeros niveles del perfil de meteorización. Se cree que el espesor promedio de esta unidad varía entre 15 m y 20 m.

Los flujos de este tipo que aflora en los títulos mineros en general son de poca ocurrencia. Un perfil de meteorización generalizado se presenta a continuación:

- Horizontes A-B. Limo café oscuro a amarillo rojizo con nódulos de hierro, con tamaños arenas gruesas distribuidos en la base de la capa, el espesor es de 0,7 m.

- Horizonte VI. Limoarenoso, de color pardo rojizo, no plástico, consistencia dura, seco cementación débil, su espesor es de unos 0,5 m.
- Horizonte V. Matriz parda rojiza, limoarenosa, no plástica, consistencia, dura, seca, y cementación débil, con un espesor de 12 m.



Figura 9. Flujos de lodos
Fuente: Este estudio.

7.2.1 LLENO ANTRÓPICO NO-1

Al inicio de la explotación se realizó una disposición de estériles sobre una de las laderas de la mina, específicamente sobre la parte baja del título limitando con la autopista Medellín - Bogotá, esta corresponde a las laderas del antiguo lleno, localmente escalonadas, con diferentes quiebres de pendiente, sin problemas de erosión e inestabilidad activo, actualmente cubiertas con vegetación que enmascaran los materiales allí depositados.

Los materiales depositados en el sitio se pueden clasificar de la siguiente forma:

- **MATERIA ORGÁNICA (MATERIAL DE DESCAPOTE):**

Se define como el primer material a separar y a clasificar en un desarrollo minero, este material se encontró a diferentes profundidades en los sondeos exploratorios

hechos, lo que permite definir que no se clasifico en las primeras etapas del desarrollo minero.

- **MATERIAL LIMO ARCILLOSO Y LIMO ARENOSO**

Dentro del perfil de meteorización se define un horizonte con matriz de textura arcillo-limosa, color rojo intenso que varía a amarillo ocre y moteados de color vino tinto y verdes, consistencia dura, baja plasticidad, seca, moderadamente cementado, que contiene bloques de roca altamente alterados.

Este material está mezclado con materia orgánica y fragmentos de roca, y es retirado de los frentes de desarrollo minero para la preparación de la explotación.

Dicho material se comporta como la matriz del lleno y debido a las condiciones de mezcla se encuentra con fragmentos finos hasta con fragmentos de tamaños métricos.

- **ROCA DESCOMPUESTA**

En un gran porcentaje del lleno se encuentran bloques rocosos en un estado moderado a bajo de meteorización y cuya composición varía de igual manera que para las litologías anteriormente descritas. Cabe resaltar que los bloques poseen un amplio rango de meteorización, ésta característica se debe a que estos materiales se generaron a partir de descapotes y excavación de los flujos de escombros más antiguos ya meteorizados. La matriz es heterogénea, húmeda con un bajo grado de consolidación, variando en proporción con respecto a los bloques en un amplio rango. Por lo general se presentan bloques y cantos menores de cuatro metros, subangulares y heterométricos en una matriz limo-arenosa a limo-arcillosa. Se determinó también, sectores constituidos en su totalidad por suelos fino granulares.

7.2.1.1 DIAGNÓSTICO DE LA ZONA DE DEPÓSITO

Con respecto a las observaciones hechas en campo, se puede establecer que durante la construcción de este lleno no se siguieron normas técnicas ni para la adecuación del terreno previo al inicio de las actividades de depositación, ni durante las actividades de depositación. Es así como no se presenta descapote, ni obras de drenaje, de igual manera no hay obras de cierre.

Se determinó que en la zona en que están dispuestos los estériles se están presentando movimientos de baja magnitud que dan origen a un deslizamiento compuesto, el cual involucra básicamente los materiales de relleno y en la base suelo residual de dunita.

Durante los procesos de disposición de estériles, los dos pequeños drenajes que cruzaban la ladera en dirección norte-sur fueron tapados.



Figura 10. Áreas a intervenir con la operación minera A-6.
Fuente: Este estudio.

7.2.2 LLENO ANTRÓPICO NO. 2

Continuo a la zona de retiro de la quebrada, se caracteriza desde el punto de vista geológico la presencia en superficie de un lleno de estériles antiguo.

Este lleno fue formado por el proceso de remoción de material, de descapote y material estéril extraídas en las primeras etapas de operación de la mina, donde debido a la facilidad de las condiciones topográficas se depositó.

Dependiendo de la relación entre el material grueso granular y el fino granular depositado, se pudo denominar como lleno grano soportado si hay un predominio del material grueso. El basamento de este depósito está definido por una roca cristalina muy fracturada por procesos tectónicos y mineros.

El depósito se define a zonas de altas pendientes, su condición estratigráfica son clastos del orden de 2 a 3 metros, los cuales han sido dispuestos en la zona como

parte del desarrollo minero. Los clastos contenidos provienen casi que en la totalidad del estéril de la explotación de la cantera, y es posible encontrar también algunas cantidades de material más fino vertido recientemente continuando con la una línea de ausencia de clasificación para estos materiales.

Esta unidad se encuentra con condiciones de estabilidad crítica, dado a que los materiales que lo conforman no presentan muy baja cohesión, lo cual junto a las altas pendientes en las que estos se encuentran podría ocasionar problemas principalmente en la estabilidad de las vías de acceso a la zona de explotación, así como ocasionalmente generar caída de rocas o movimientos en masa sobre vías o el personal que esté laborando en las distintas áreas de la mina.

7.2.2.1 DIAGNÓSTICO DE LA ZONA DE DEPÓSITO

No se construyó ningún sistema de drenaje para controlar las aguas de escorrentía que corrían por los taludes conformados.

Los residuos fueron dispuestos sin controles tales como la limpieza de la base del terraplen, la selección y separación de los materiales, la construcción de filtros y sistemas de sub-drenaje y la compactación de los estériles.



Figura 11. Configuración local del lleno de estériles sin estabilizar.
Fuente: Este estudio.

7.2.3 PERFIL ESTRATIGRÁFICO GENERAL DEL LLENO.

- Horizonte A-B. Compuesto por materiales orgánicos de color café, con un espesor aproximado de 1 m.
- Horizonte IV. Bloques intensamente meteorizados, con algunos bloques totalmente meteorizados asimilados por la matriz, de unos 5 m de espesor.
- Horizonte III. Cantos de roca de tamaño hasta métricos, con una relación bloques matriz de 70/30, la matriz posee una textura areno-gravosa de color gris, húmeda, consistencia muy dura, no plástica y moderadamente cementada, con un espesor de unos 14 m.

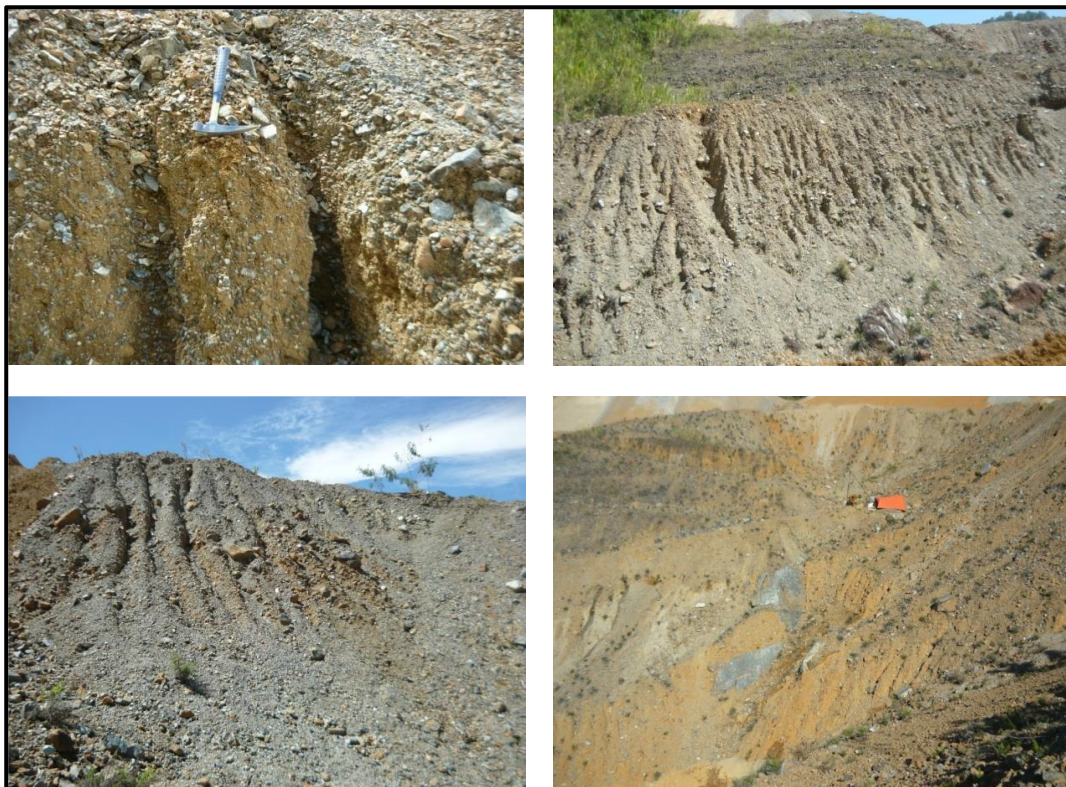


Figura 12. Características del lleno antrópico
Fuente: Este estudio.

7.2.4 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

Geomorfológicamente la zona de estudio se encuentra sobre la ladera oriental del Valle de Aburrá el cual siempre ha estado supeditado a la controversia de su origen,

ya que muchos autores plantean su origen a partir de procesos erosivos mientras que otros ponen sobre la mesa un origen tectónico para el mismo.

De una manera más particular la empresa Canteras de Colombia se encuentra ubicada entonces en la parte del escarpe nororiental del Valle de Aburrá, el cual corresponde a zonas de pendientes abruptas y es la parte media entre lo que actualmente es la parte baja del valle con el altiplano del oriente antioqueño; las geoformas en la región también son muy dependientes de la situación climática que han moldeado las rocas, asociadas a estas también los factores antrópicos como es el caso del actual trabajo.

Según Rodríguez et al. (2005), esta zona se encuentra en lo que él catalogó como “cañón” y específicamente en el escarpe de este último, el cual limita las superficies de erosión y el valle, en el cual predominan las altas pendientes y la presencia de depósitos de talud.

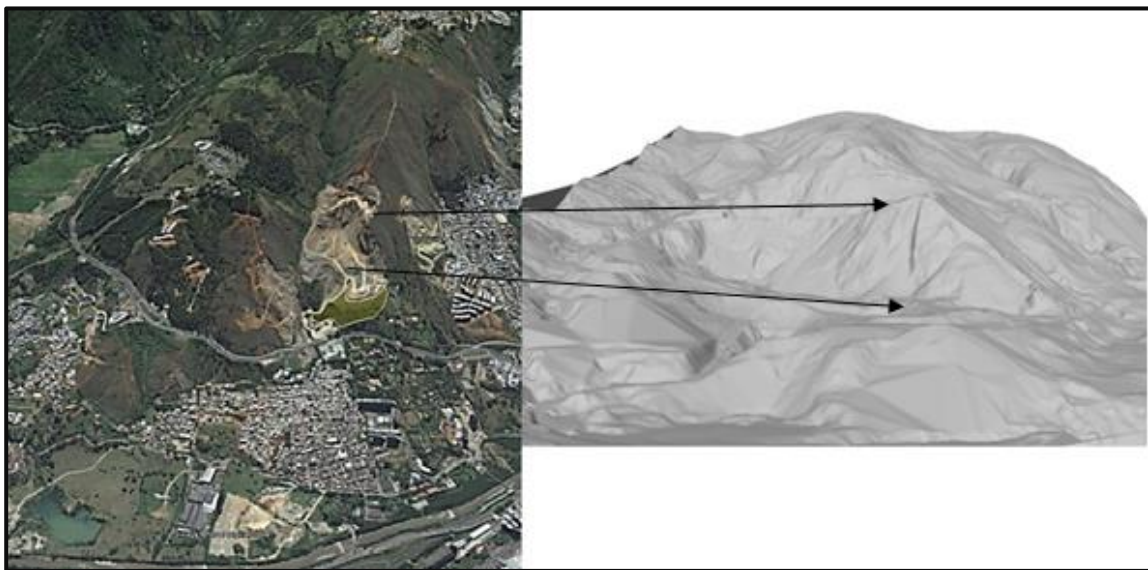


Figura 13. Panorámica del área de estudio y MDL de la explotación.

Fuente: Este estudio.

7.2.4.1 GEOMORFOLOGÍA DEL AREA PARA EL TITULO MINERO

Dentro de los aspectos que se tuvieron en cuenta para la elaboración de un análisis de la morfología del terreno, única y exclusivamente se tuvo en cuenta que los rasgos del relieve que se exhiben en el sector de estudio corresponden a zonas intervenidas antrópicamente y que ninguna de las expresiones morfológicas ha sido labradas por algún cauce o algún factor geológico y/o estructural.

Se presenta una discriminación básica por la inclinación de las pendientes así como por su ubicación topográfica que se presentarán en un mapa de pendientes.

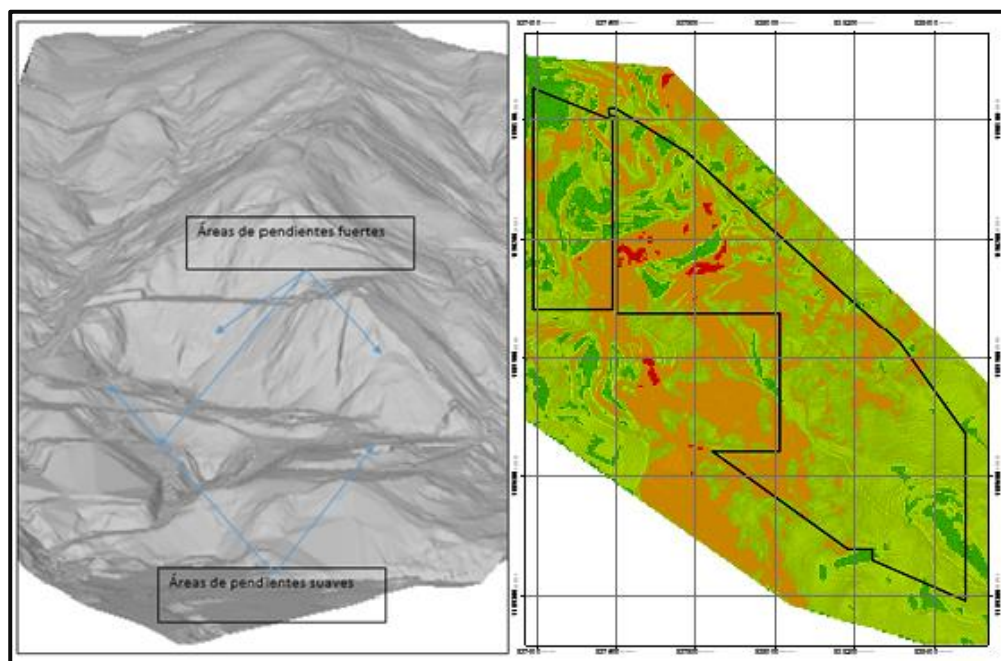


Figura 14. Modelo de elevación digital y modelo de pendientes
Fuente: Este estudio.

- **Zonas de pendientes altas**

En una zona correspondiente aproximadamente al 80% del área de trabajo se describe una unidad geomorfológica antrópica que se caracteriza por presentar pendientes muy altas, la mayoría cercanas al 100%.



Figura 15: Zonas de pendientes altas y algunos procesos asociados a ellas
Fuente: Este estudio.

Esta unidad se caracteriza ampliamente en todas las laderas fuertes del llano de estériles antiguo las cuales transportan aguas hasta las zonas planas y bajas donde se acumulan; en el sector nororiental hay presencia de una vegetación que intenta dar estabilidad, pero las fuertes pendientes son las predominantes en el sector con presencia de pequeños descansos en la topografía que dan alguna estabilidad a los materiales.

- **Zonas de transición**

Con este nombre se clasifican a unas pequeñas zonas que se encuentran principalmente, entre la unidad geomorfológica anterior y las vías de acceso, y que corresponden ya sea a controles para la estabilidad de la vía o material que los vehículos que transportan el producto de la vía ha removido y reacomodado en el proceso de cargue y descargue del material (Ver Figura 16); se toma como unidad independiente ya que moldea la topografía a la escala en que se está trabajando.



Figura 16. Algunas zonas de transición en el área de estudio
Fuente: Este estudio.

- **Zonas planas y bajas**

Dentro de esta unidad se clasifica un sector en la parte baja del lleno que se caracteriza por pendientes muy bajas y consiste en la terminación de las laderas del lleno hacia las cotas más bajas del polígono en estudio. Esta unidad ha sido labrada antrópicamente y se observan evidencias de asentamiento de material por maquinaria pesada (Ver Figura 17).

En este sector hay presencia de dos cajas de inspección de aguas de una canalización actual que se encuentra debajo del lleno; la ausencia de pendientes en la superficie ocasiona un estancamiento de aguas que mantiene el suelo húmedo y en estado de encharcamiento. En las inmediaciones de la parte más baja se encuentra una zona donde se depositan materiales estériles y finos y que recogen las aguas de escorrentía que bajan desde las vías de acceso y que finalmente se infiltran hasta llegar a las partes más bajas.

En este sitio los únicos dos procesos que se identifican son la acumulación y encharcamiento de aguas y la infiltración de corrientes de agua como ya describieron anteriormente; los mencionados pueden ser un problema en cuanto a la inestabilidad por lo que se deben tener en cuenta en el momento del diseño de las obras de contingencia.



Figura 17: Zonas planas antrópicas con acumulación de aguas

Fuente: Este estudio.

- **Zonas planas y altas**

Con este nombre se denominan las zonas de pendientes muy bajas y que se encuentran en sectores topográficos altos correspondientes a las cotas 1600 y 1621 m.s.n.m. Estos son lugares aplanados por maquinaria pesada y corresponden a la parte alta de los llenos de estériles que ha dispuesto la empresa (Ver Figura 18).

Uno de estos sectores, especialmente el que se encuentra topográficamente más alto, es actualmente uno de los sitios donde se realiza el acopio temporal del estéril de la mina, los cuales únicamente son depositados allí sin ningún tipo de tratamiento geotécnico ni estabilización.

Como procesos se observa la infiltración de aguas favorecida por la permeabilidad y la nula clasificación del material depositado, lo cual podría un factor que desestabilice los taludes y pendientes formadas por el lleno.



Figura 18: Zonas planas y altas de acumulación actual de estériles
Fuente: Este estudio.

8. EXPLORACIÓN GEOFÍSICA CON SÍSMICA DE REFRACCIÓN Y TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS

8.1 DESCRIPCIÓN DE LA EXPLORACIÓN

Se realizaron ocho líneas de refracción sísmica en los sitios definidos por el personal técnico, utilizando el arreglo geométrico ya dispuesto para el ensayo de refracción sísmica, se tomaron registros de las ondas superficiales tipo Rayleigh utilizando el ruido ambiental, con el propósito de adelantar el ensayo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), el cual proporciona como resultado el perfil de velocidad de propagación de onda de corte en profundidad.

Se realiza la exploración mediante ensayos de refracción sísmica, empleando 24 geófonos verticales de 4.5 Hz, para el ensayo se realizan lecturas excitadas por el golpe de martillo sobre una placa a tiempos de muestreo de 512 ms y registros en intervalos de 1 ms.

8.2 INTERPRETACIÓN DE LAS LÍNEAS

Las interpretaciones presentadas en este documento, se basan en las respuestas de velocidad de onda S obtenidas mediante las líneas sísmicas utilizando el método de refracción MASW (Análisis multicanal de onda superficial). Las interpretaciones se entregarán en función de la clasificación sísmica; diversos autores proponen relaciones de velocidades de onda Vs asociadas con el tipo de suelo a una descripción macro, los lineamientos propuestos por la National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP) son aceptados en Estados Unidos (IBC, 2006), Canadá, Colombia, Turquía, Taiwán y otros países. Para clasificar tipos de suelo, NEHRP (1993) con base en la velocidad de onda corte en los 20 m superficiales (Vs20), propone lo que se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7 Caracterización sísmica de suelos, según NEHRP (1993).

TIPO	Vs 30(m/s)	Descripción
A	>1.500	Roca Dura
B	760-1.500	Roca
C	360-760	Roca Blanda y Suelo Muy Denso
D	180-360	Suelo Rígido
E	<180	Suelo Blando
F	Suelos especiales (licuables, colapsables, arcillas muy plásticas, suelos Orgánicos)	

De igual forma la NSR10 en su título A presenta la siguiente clasificación para la definición del perfil de suelo:

Tabla 8. Clasificación de los perfiles de suelo- Tabla A.2.4-1 NSR-10.

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

8.2.1 UBICACIÓN DE LAS LÍNEAS



Figura 19. Ubicación de Líneas sísmicas.

Fuente: Este estudio.



Figura 20. Adquisición de líneas sísmicas.
Fuente: Este estudio.

8.2.4.1 LÍNEA SÍSMICA L1

Se elaboró un modelo interpretativo de acuerdo con la variación de V_s respecto a la profundidad, de la forma que se presenta en la Figura 21.

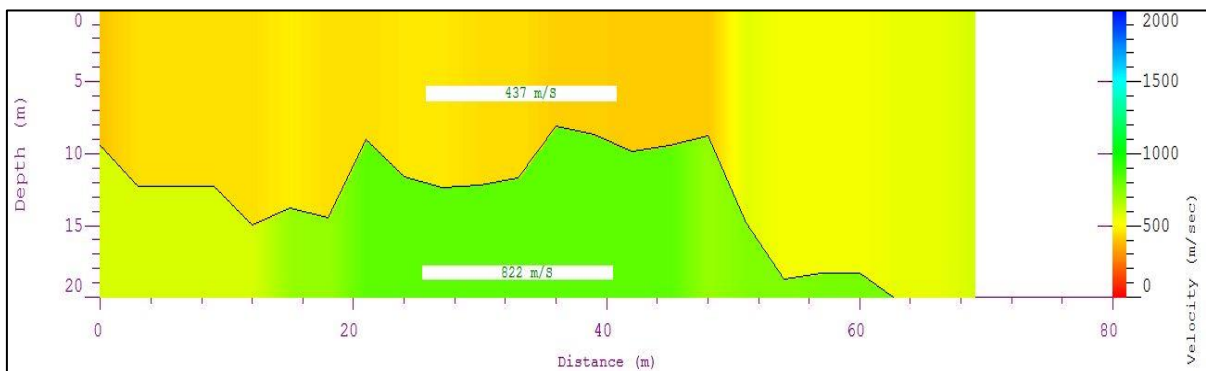


Figura 21. Perfil de Velocidad de Onda de Corte (V_s) en Profundidad – L1 Canteras de Colombia.
Fuente: Este estudio.

Según la clasificación de la NEHRP (1993), NSR10 y los resultados obtenidos, se encuentra una primera capa correspondiente a tipo de **suelo C** con un espesor entre **10.0 y 20m**, y una velocidad de propagación de onda de **V_s 437 m/s**

aproximadamente. Estas velocidades corresponden, según la tabla 5 a rocas blandas o suelos densos, de acuerdo con las tomografías eléctricas de la zona, así como los sondeos de perforación, esta zona corresponde a llenos antrópicos diseñados para la actividad de extracción de la cantera, que están compuestos principalmente, por gravas y bloques de roca fresca a levemente meteorizada en matriz de suelo limo arenoso con arcilla.

A continuación se encuentra una segunda capa correspondiente a **tipo B**, con una profundidad hasta el alcance de la línea con velocidad de propagación de onda de **Vs 822 m/s.**, catalogado como perfil de roca de rigidez media, lo que también puede corresponder a las rocas fracturadas del perfil de meteorización.

El lleno presenta un espesor constante, que alcanza 16 a 19 m de profundidad, entre las abscisas -3 y 98, y disminuye en su costado derecho (zona cercana a la vía).

8.2.4.2 LÍNEA SÍSMICA L2

Se elaboró un modelo interpretativo de acuerdo con la variación de Vs respecto a la profundidad, de la forma que se presenta en la Figura 22.

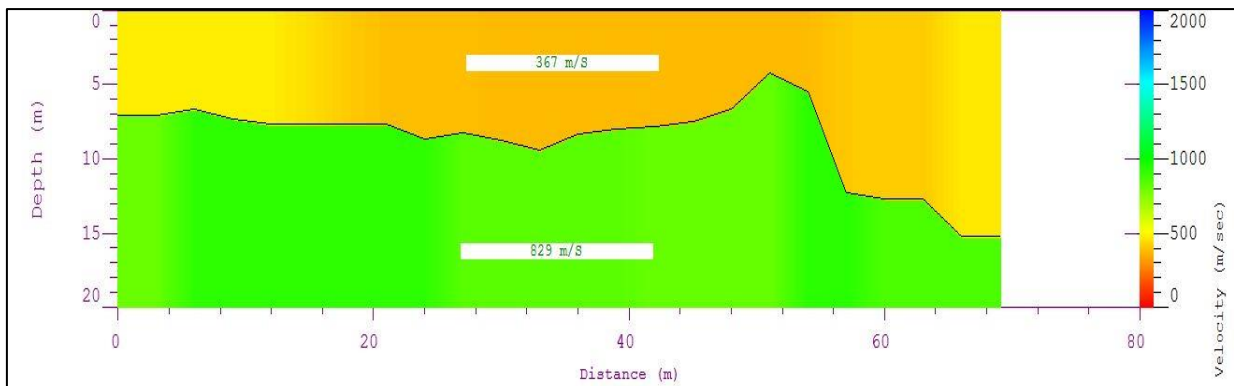


Figura 22. Perfil de Velocidad de Onda de Corte (Vs) en Profundidad – L2 Canteras de Colombia.
Fuente: Este estudio.

La Línea L2 posee las mismas características que la Línea L1, donde se distinguen dos capas, una de suelo **Tipo C**, y la otra de **Tipo B**. La primera capa corresponde a los llenos antrópicos desarrollados para los trabajos de explotación de la cantera descrito en la línea anterior. La segunda corresponde a llenos antrópicos de mayor consolidación y al perfil de meteorización de la zona en su parte de rocas fracturadas.

8.2.4.3 LÍNEA SÍSMICA L3

Se elaboró un modelo interpretativo de acuerdo con la variación de Vs respecto a la profundidad, de la forma que se presenta en la Figura 23.

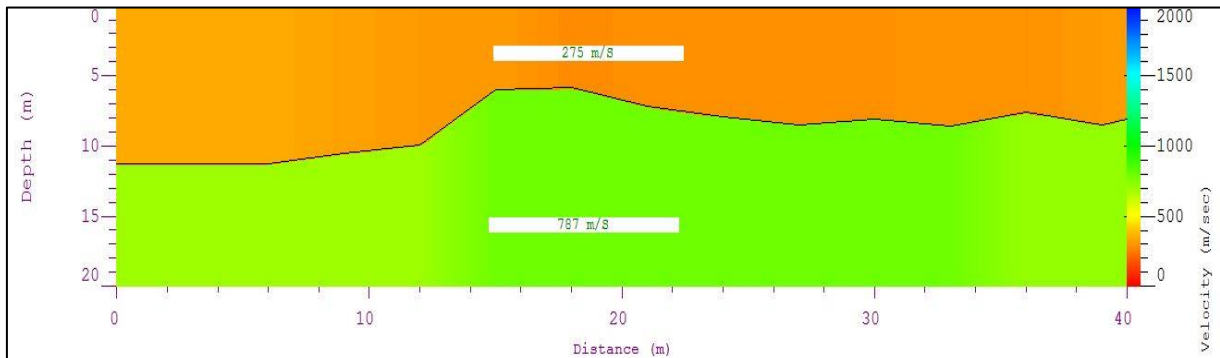


Figura 23. Perfil de Velocidad de Onda de Corte (Vs) en Profundidad – L3 Canteras de Colombia.
Fuente: Este estudio.

Según la clasificación de la NEHRP (1993), NSR10 y los resultados obtenidos, se encuentra una primera capa correspondiente a tipo de **suelo D** con un espesor entre **5.0 y 10m**, y una velocidad de propagación de onda de **Vs 275 m/s** aproximadamente. Estas velocidades corresponden, según la tabla 5, a suelos rígidos, de acuerdo con las tomografías eléctricas de la zona, así como los sondeos de perforación, esta zona corresponde a llenos antrópicos diseñados para la actividad de extracción de la cantera, que están compuestos principalmente, por gravas y bloques de roca fresca a levemente meteorizada en matriz de suelo limo arenoso con arcilla.

A continuación se encuentra una segunda capa correspondiente a **tipo B**, con una profundidad hasta el alcance de la línea con velocidad de propagación de onda de **Vs 767 m/s.**, catalogado como perfil de roca de rigidez media, lo que también puede corresponder a las rocas fracturadas del perfil de meteorización.

8.2.4.4 LÍNEAS SÍSMICAS L4, L5, L6 Y L7

Se elaboró un modelo interpretativo de acuerdo con la variación de Vs respecto a la profundidad, de la forma que se presenta en las imágenes 16, 17, 18 y 19.

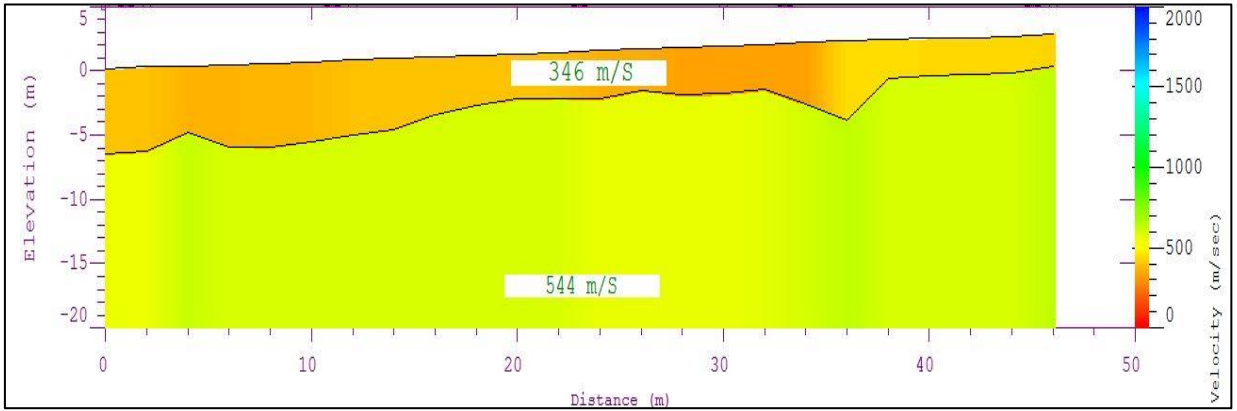


Figura 24. Perfil de Velocidad de Onda de Corte (V_s) en Profundidad – L4 Canteras de Colombia.
Fuente: Este estudio.

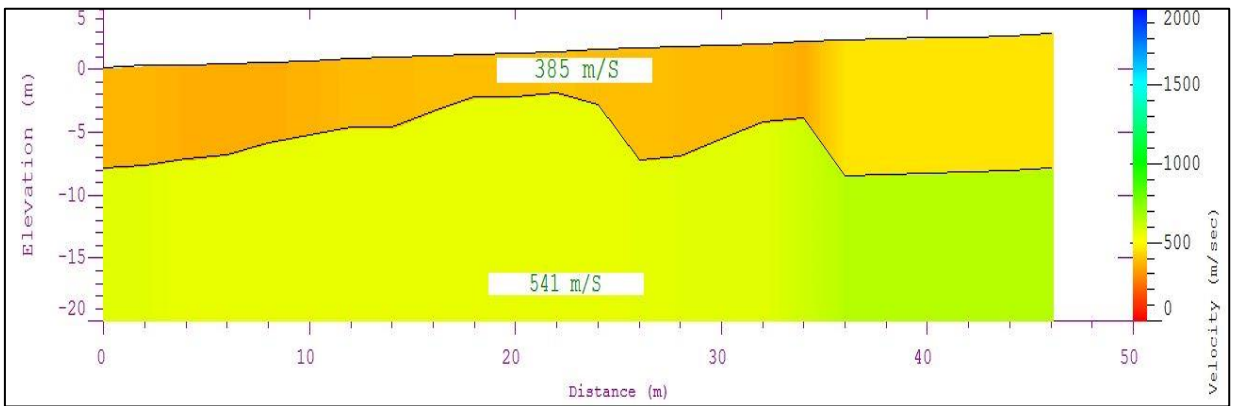


Figura 25. Perfil de Velocidad de Onda de Corte (V_s) en Profundidad – L5 Canteras de Colombia.
Fuente: Este estudio.

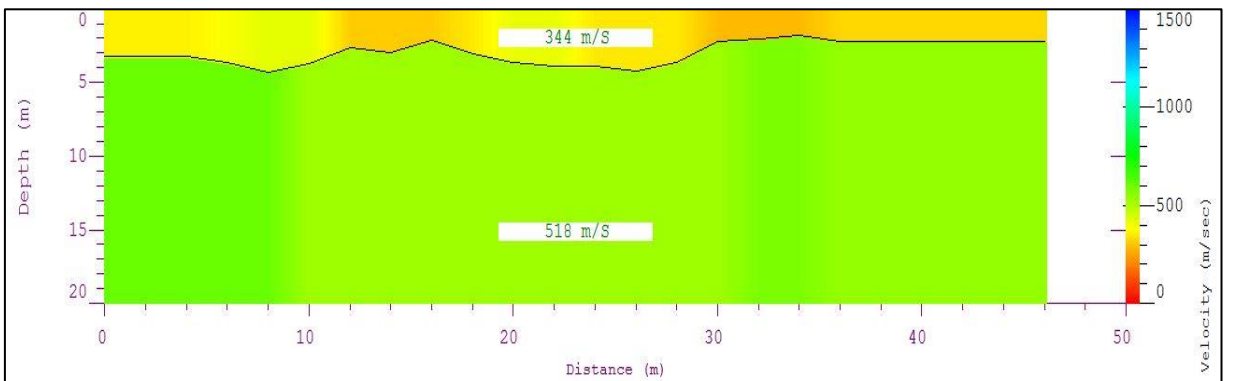


Figura 26. Perfil de Velocidad de Onda de Corte (V_s) en Profundidad – L6 Canteras de Colombia.
Fuente: Este estudio.

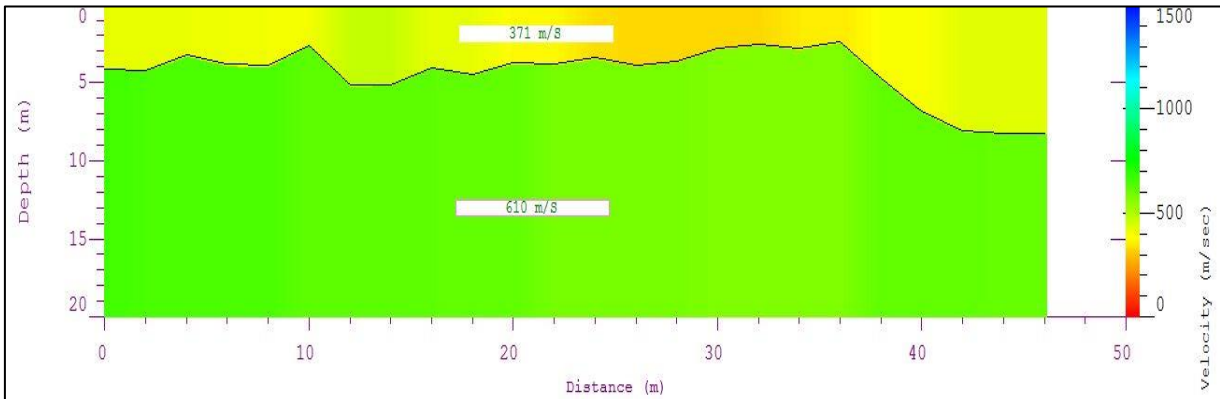


Figura 27. Perfil de Velocidad de Onda de Corte (V_s) en Profundidad – L7 Canteras de Colombia.
Fuente: Este estudio.

Según la clasificación de la NEHRP (1993), NSR10 y los resultados obtenidos, se encuentra una capa correspondiente a tipo de **suelo C** con un espesor de **20m** aproximadamente, y una velocidad de propagación de onda de **V_s 346 a 544 m/s** aproximadamente. Estas velocidades corresponden, según la tabla 5, a suelos rígidos, de acuerdo con las tomografías eléctricas de la zona, así como los sondeos de perforación, esta zona corresponde a llenos antrópicos diseñados para la actividad de extracción de la cantera, que están compuestos principalmente, por gravas y bloques de roca fresca a levemente meteorizada en matriz de suelo limo arenoso con arcilla.

8.2.4.5 LÍNEA SÍSMICA L8

Se elaboró un modelo interpretativo de acuerdo con la variación de V_s respecto a la profundidad, de la forma que se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

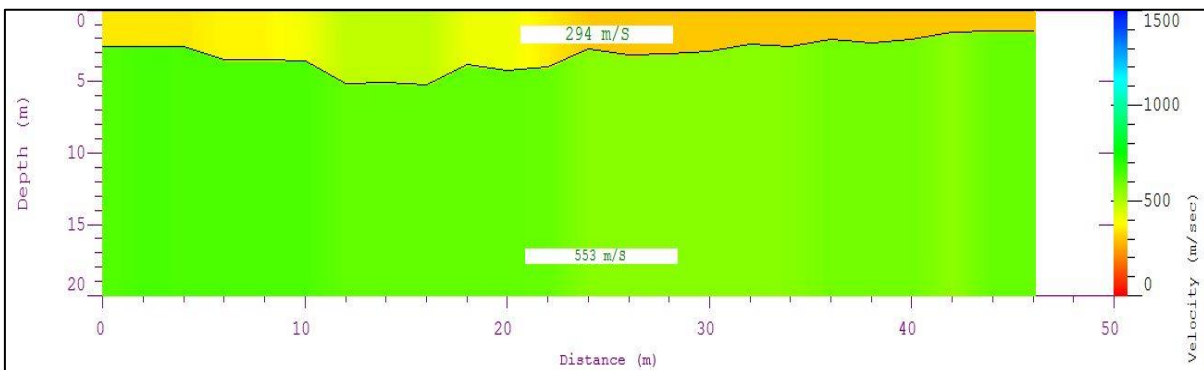


Figura 28. Perfil de Velocidad de Onda de Corte (V_s) en Profundidad – L8 Canteras de Colombia.
Fuente: Este estudio.

Según la clasificación de la NEHRP (1993), NSR10 y los resultados obtenidos, se encuentra una primera capa correspondiente a tipo de **suelo D** con un espesor entre **3 y 5 m**, y una velocidad de propagación de onda de **Vs 294 m/s** aproximadamente. Estas velocidades corresponden, según la tabla 5, a suelos rígidos, de acuerdo con las tomografías eléctricas de la zona, así como los sondeos de perforación, esta zona corresponde a llenos antrópicos diseñados para la actividad de extracción de la cantera, que están compuestos principalmente, por gravas y bloques de roca fresca a levemente meteorizada en matriz de suelo limo arenoso con arcilla.

A continuación se encuentra una segunda capa correspondiente a **tipo B**, con una profundidad hasta el alcance de la línea con velocidad de propagación de onda de **Vs 553 m/s.**, catalogado como perfil de roca de rigidez media, lo que también puede corresponder a las rocas fracturadas del perfil de meteorización.

8.3 EXPLORACIÓN GEOELÉCTRICA (TOMOGRFÍA ELÉCTRICA)

8.3.1 INTERPRETACIÓN

Se debe tener en cuenta que los resultados de una prospección geoelectrica pueden ser afectados por diferentes variables que pueden actuar simultáneamente. Desde el punto de vista técnico las variaciones en la resistencia de contacto de los electrodos son quizá la mayor fuente de errores de medición. Las variaciones topográficas y anomalías de resistividad locales (superficiales) pueden también representar errores en el modelo generado.

Durante el proceso de adquisición de datos las variaciones meteorológicas pueden también ser fuente de ruido en los datos. La adecuación entre la heterogeneidad del medio y la configuración eléctrica utilizada puede también causar distorsión en la representación gráfica. En el proceso de inversión e interpretación se debe tener en cuenta el principio de no-unicidad que indica que un conjunto de medidas pueden corresponder a varios tipos de modelos y que solo la corroboración y calibración con datos externos (cartografía geológica, geoquímica y perforaciones) puede resolver las ambigüedades que se generen.

La adquisición de datos se realizó empleando un método multielectrodo como el mostrado en la Figura 29, la configuración que se utilizó fue la Schlumberger.

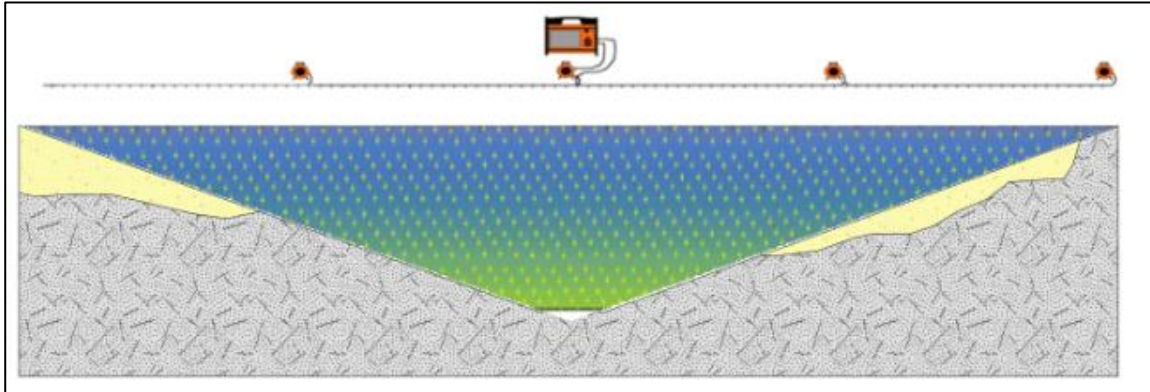


Figura 29. Esquema general de adquisición de datos de tomografía geoelectrica.

Los parámetros de adquisición de cada tomografía se muestran a continuación:

Tabla 9. Parámetros de adquisición tomográfica.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Distancia entre electrodos	5	mts
Cantidad de electrodos	80	
Distancia máxima entre electrodos	200	mts
Número de medidas	576	
Orientación:		
Línea L1	N45E	
Línea L2	N15W	
Línea L3	N45W	
Línea L4	N65W	
Fecha de inicio	17/03/2016	
Fecha de finalización	17/03/2016	
Marca de equipo	ABEM	
Referencia	TERRAMETER LS	
Número de canales	64	
Número de tendidos	4	
Longitud total del tendido		mts
Penetración	35	mts

8.3.2 PROCESAMIENTO DE DATOS

El procesamiento se realizó utilizando el software RES2DINV que se basa en un arreglo de bloques (Figura 30) en donde cada "x" representa un punto en

profundidad del terreno con un valor de resistividad aparente. Una vez obtenidos los datos de resistividad aparente en la pseudosección es utilizado el algoritmo del modelo inverso para la obtención de las resistividades reales del subsuelo, mediante el método de mínimos cuadrados (Sasaki 1992). Los datos fueron filtrados basados en criterios de desviación estadística RMS.

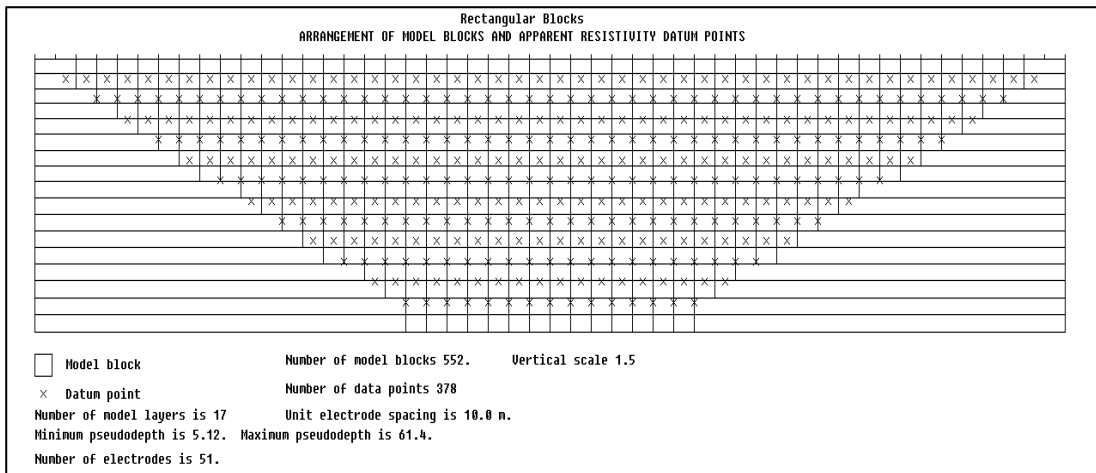


Figura 30. Modelo utilizado por el software de inversión
Fuente: Basado en Sasaki, 1992.

8.3.3 DESCRIPCIÓN E INTERPRETACIÓN.

Para este trabajo se realizaron 4 líneas tomográficas de hasta 200 metros de longitud, en la siguiente imagen se muestra la ubicación de cada una de las líneas en la zona de estudio, seguido de la interpretación de dichas líneas.

Las resistividades obtenidas en las tomografías se ajustan a lo verificado en la geología de superficie, con niveles de confiabilidad que se pueden catalogar como aceptables a buenos.

El procesamiento de la secuencia tomográfica presenta ajustes de convergencia adecuados, con porcentajes de error en iteración por debajo del 10%.

La mayor parte de la zona de estudio se encuentra sobre llenos antrópicos producto de las actividades diarias de la cantera y de la disposición de materiales para adecuación de espacios.

De acuerdo al perfil de resistividades, el material que se encuentra en la zona está compuesto principalmente por bloques gravas y limos arenosos, con afloramientos

de roca fracturada en algunas partes y suelo saprolítico, principalmente en los cortes de la cantera.

Se evidencian zonas de saturación media a alta, principalmente en las partes altas de los cortes, esto se puede diferenciar por los bajos valores de resistividad que se muestran en las gráficas de las líneas tomográficas.



Figura 31. Ubicación de las líneas tomográficas.
Fuente: Google Earth y modificado en este estudio.

8.3.3.1 TOMOGRAFIA LINEA 1

La tomografía 1 tiene una longitud total de 175 metros con una penetración máxima de 35 metros y usando el modelo de inversión se obtiene un perfil de resistividades. Se observan unos niveles de resistividad variados (A), que se asocia a la presencia de materiales tipo gravas y arenas en matriz limo arcillosa intercalados con arcillas, con un espesor aproximado de 15 metros, corresponde a un lleno antrópico con fragmentos de roca, matriz arenosa con limo.

Las zonas marcadas como (B) se asocia a la presencia de arenas finas y limos, que corresponden a suelos residuales y saprolíticos, acompañados en la parte más

profunda de roca fracturada, estas corresponden a las zonas de mayor resistividad en la parte de mayor profundidad del estudio.

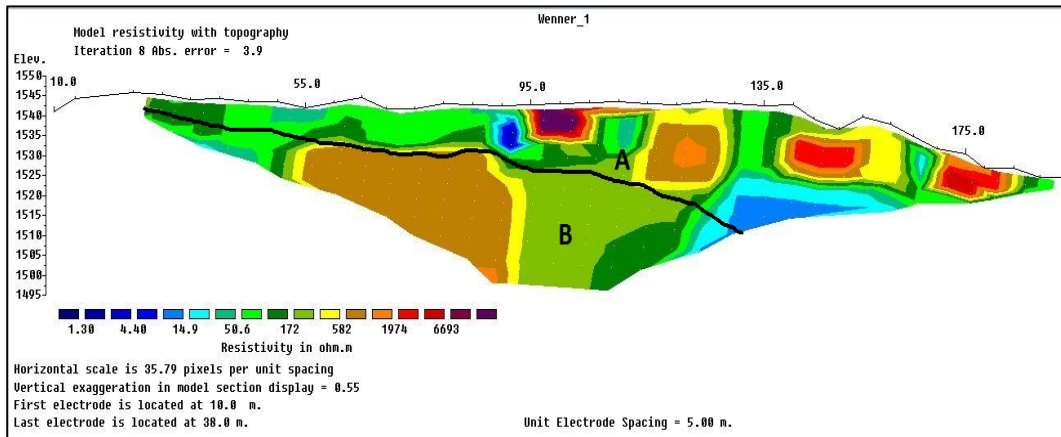


Figura 32. Tomografía Línea 1
Fuente: Este estudio.

8.3.3.2 TOMOGRAFÍA DE LA LÍNEA 2

La tomografía 2 tiene una longitud de 100 metros aproximadamente con una penetración máxima de 20 metros. En la zona denominada A, se definen resistividades variadas que se asocia a la presencia de materiales tipo gravas y arenas en matriz limo arcillosa intercalados con arcillas, con un espesor aproximado de 10 metros. Este nivel corresponde a lleno antrópico con niveles medios a bajos de saturación.

Para el nivel B se tiene la presencia de materiales limosos a limoarenosos con fragmentos de roca y posiblemente corresponda a llenos antrópicos más consolidados con niveles de resistividades medias a altas y bajos niveles de saturación.

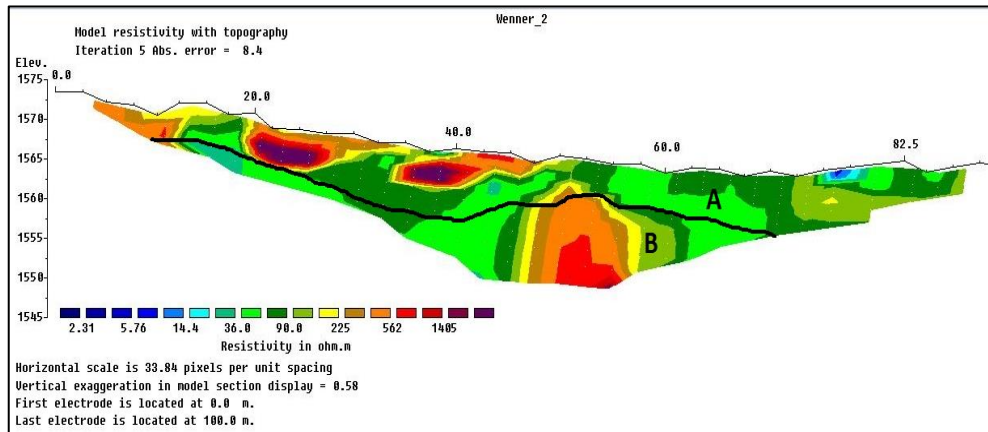


Figura 33. Tomografía Línea 2
Fuente: Este estudio.

8.3.3.3 TOMOGRAFÍA DE LA LÍNEA 3

La tomografía 3 tiene una longitud de 170 metros aproximadamente con una penetración máxima de 25 metros. En la zona denominada A, se definen resistividades variadas que se asocia a la presencia de materiales tipo gravas y arenas en matriz limo arcillosa intercalados con arcillas, con un espesor aproximado de 10 metros. Este nivel corresponde a lleno antrópico con niveles altos de saturación.

Para el nivel B se tiene la presencia de materiales limosos a limoarenosos con fragmentos de roca y posiblemente corresponda a roca fracturada con niveles muy bajos de saturación.

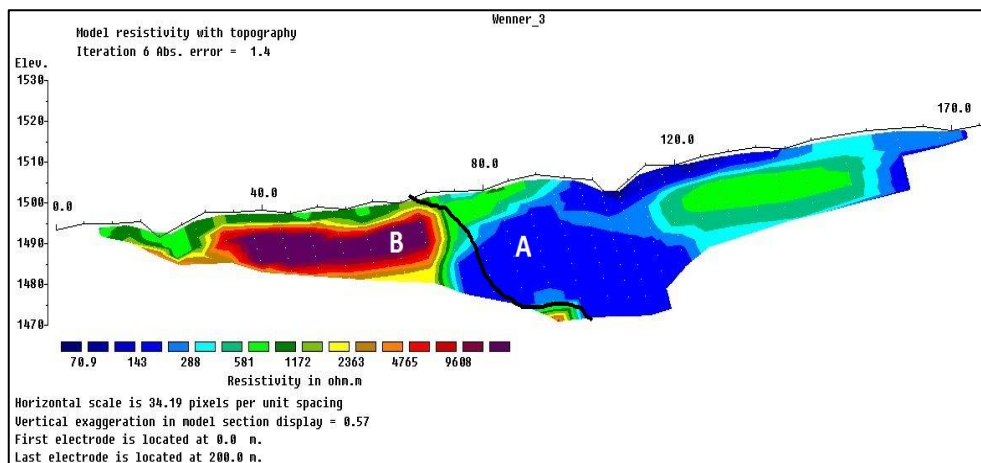


Figura 34. Tomografía Línea 3
Fuente: Este estudio.

8.3.3.4 TOMOGRAFÍA DE LÍNEA 4

La tomografía 4 tiene una longitud total de 200 metros con una penetración máxima de 35 metros y usando el modelo de inversión se obtiene un perfil de resistividades. Se observan unos niveles de resistividad variados (A), que se asocia a la presencia de materiales tipo gravas y arenas en matriz limo arcillosa intercalados con arcillas, con un espesor aproximado de 15 metros, corresponde a un lleno antrópico con fragmentos de roca, matriz arenosa con limo.

Las zonas marcadas como (B) se asocian a la presencia de arenas finas y limos y fragmentos de roca que corresponden a llenos antrópicos con materiales más consolidados en la parte más profunda, pero que presenta una alta saturación en la parte alta del corte.

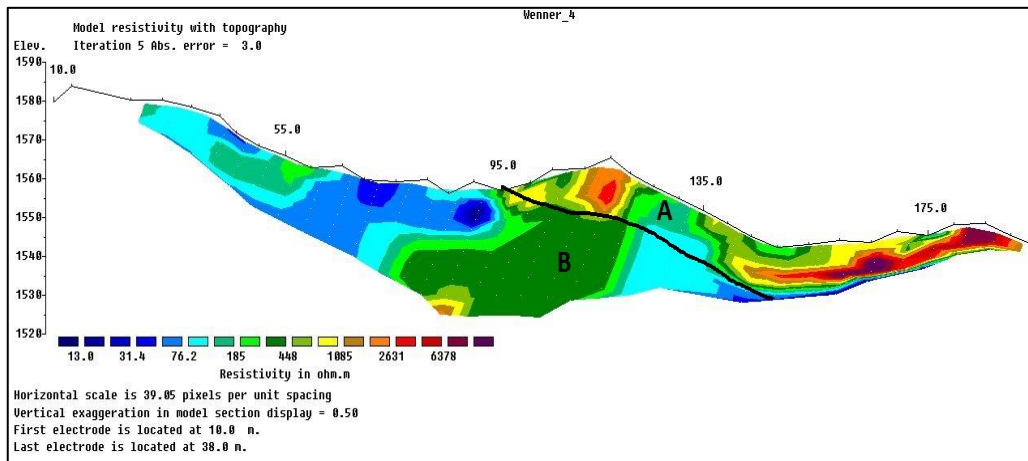


Figura 35. Tomografía Línea 4
Fuente: Este estudio.

9. EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

9.1 MODELO PROYECTADO DEL LLENO DENTRO DEL PLAN DE ABANDONO MINERO

En el área del proyecto se presentan dos áreas de llenos de estériles antiguos y una temporal, en estos sitios se realizó las evaluaciones geológico-geotécnicas de análisis de estabilidad.

De acuerdo con la interpretación de las exploraciones realizadas y la identificación de la secuencia de horizontes de suelo se procedió a realizar una serie de análisis de estabilidad teniendo en cuenta los parámetros geotécnicos estimados y la topografía presente en la zona de estudio.

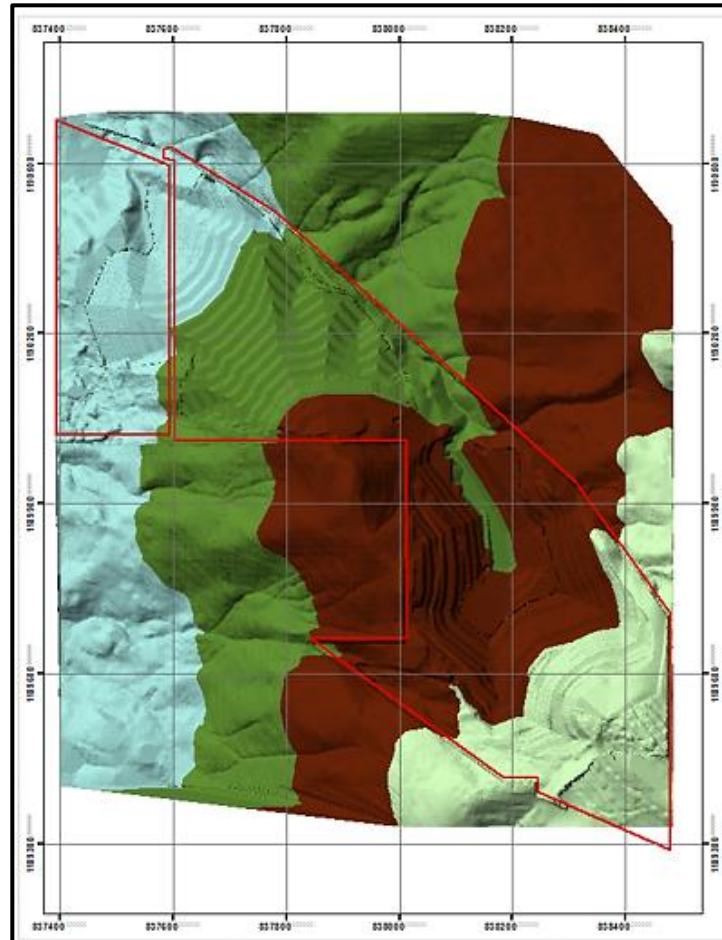


Figura 36. Modelo de elevación proyectado del lleno de estériles
Fuente: Este estudio.



Imagen 1. Llenos de estériles antiguos para evaluación
Fuente: Este estudio.

9.2 ZONIFICACIÓN DE ÁREAS DE MANEJO

A continuación se hace una descripción de cada una de las zonas en que se subdividió el área a ser intervenida con los llenos en la etapa de abandono, teniendo en cuenta las zonas menos susceptibles a movimientos en masa obtenidos anteriormente.

9.2.1 ÁREAS DE PROTECCIÓN (A-1):

En estas áreas se incluyen los retiros de los cursos de agua y de los predios vecinos, las cuales no son, ni serán, intervenidas por las operaciones de extracción minera y en las cuales se ha preservado la vegetación natural, haciéndose además un refuerzo con especies nativas reforestadas por la titular de la concesión minera (Ver Imagen 2).

Además de una zona de retiro de un drenaje, localizado en el límite nororiental del título minero la cual se ha establecido en 30 metros medidos a partir de la orilla de dicho cauce.



Imagen 2. Parte alta del área de estudio retiro a la fuente hídrica
Fuente: Este estudio.

9.2.2 ÁREAS INTERVENIDAS Y REGENERADAS (A-2)

En esta área se incluyen las zonas de depósito de estériles que ya han sido regeneradas en su totalidad, entendiéndose por esto, que sobre ellas ya se ha llevado a cabo una reforestación y adecuación de canales para manejo de escorrentía y por consiguiente una correcta adecuación y estabilización geotécnica de los taludes y el lleno (Ver Imagen 3).



Imagen 3. Áreas de llenos intervenidos
Fuente: Este estudio.

9.2.3 ÁREAS DE ESCOMBRERAS EN REVEGETACIÓN (A-3)

En estas áreas se incluyen las zonas de acumulación de estériles removidos o escombreras, que ya han alcanzado su capacidad de almacenamiento para dichos materiales. Por lo tanto, a la fecha de este informe, están en proceso de estabilización y revegetación, para incorporarse a las áreas tipo A-2, cuando la vegetación implantada alcance un nivel de enraizamiento que le permita estabilizar la escombrera hasta unos niveles correlacionables con las áreas naturales no intervenidas (Ver Imagen 4).



Imagen 4. Áreas de escombrera activa A-3
Fuente: Este estudio.

9.2.4 ÁREAS DE ESCOMBRERA ACTIVA (A-4)

Actualmente, en la mina se tiene un sector de acopio temporal en la cual habrán de depositarse los materiales estériles que resultarán del proceso de extracción en los procesos actuales y con una proyección futura.

Dicha área tiene algunas zonas que ya han sido regeneradas y otras donde se tiene reservado un espacio de ocupación para los materiales estériles, como ya se ha indicado y lo cual puede verse en la Imagen 5, en el modelo en 3D y las fotografías que muestran el área de recepción de materiales estériles.

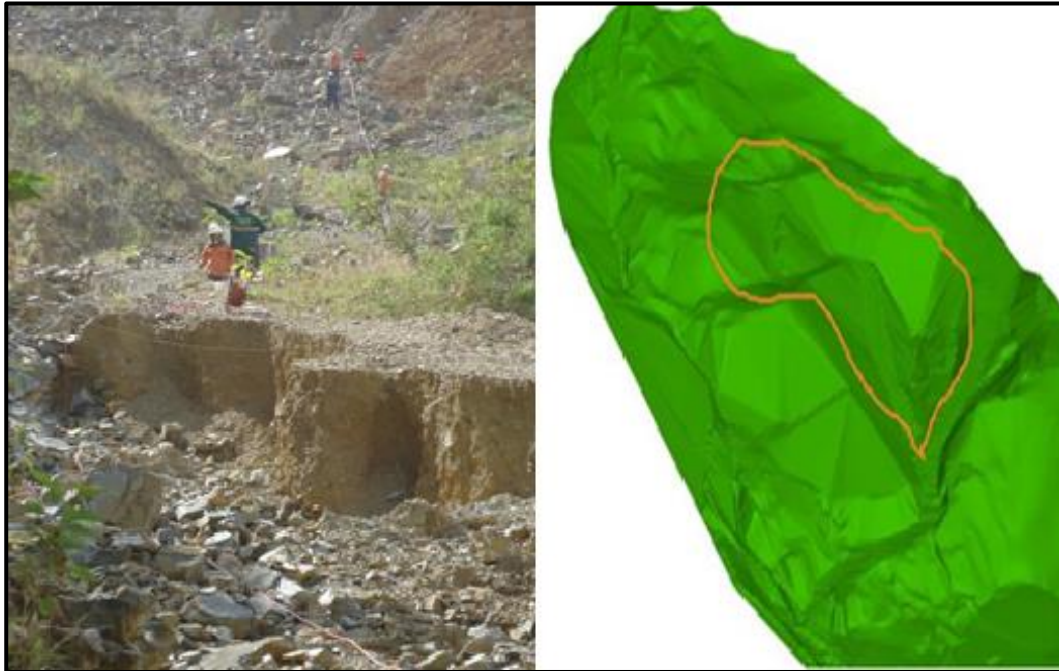


Imagen 5. Áreas de escombrera activa A-4
Fuente: Este estudio.

9.2.5 ÁREAS INTERVENIDAS CON OBRAS DE INFRAESTRUCTURA MINERA (A-5)

En estas áreas se consideran aquellas que se emplean para que la operación del proyecto minero sea llevada técnicamente. Se incluyen allí, las vías de acceso, tanto a la mina, como a los mismos frentes internos de trabajo, las instalaciones de oficinas de la mina, el campamento para operadores y visitantes con sus espacios de parqueadero, jardines, así como las áreas ocupadas por el sistema de reducción de tamaños (planta de beneficio). También se incluyen los accesos al patio de carga y despacho (Ver Imagen 6).



Imagen 6. Áreas intervenidas con obras de infraestructura minera A-5
Fuente: Este estudio.

9.2.6 ÁREAS A INTERVENIR CON LA OPERACIÓN MINERA (A-6)

En estas áreas se ha considerado el yacimiento de material útil que es explotable por el sistema de extracción de minería a cielo abierto por el método de bancos escalonados. Para la determinación de los límites de esta área, no sólo se han tenido en cuenta los factores geológicos, sino los condicionamientos mineros de extracción sin afectar las zonas clasificadas como A1, es decir, los retiros de los cursos de agua y de los predios vecinos (Ver Imagen 7).

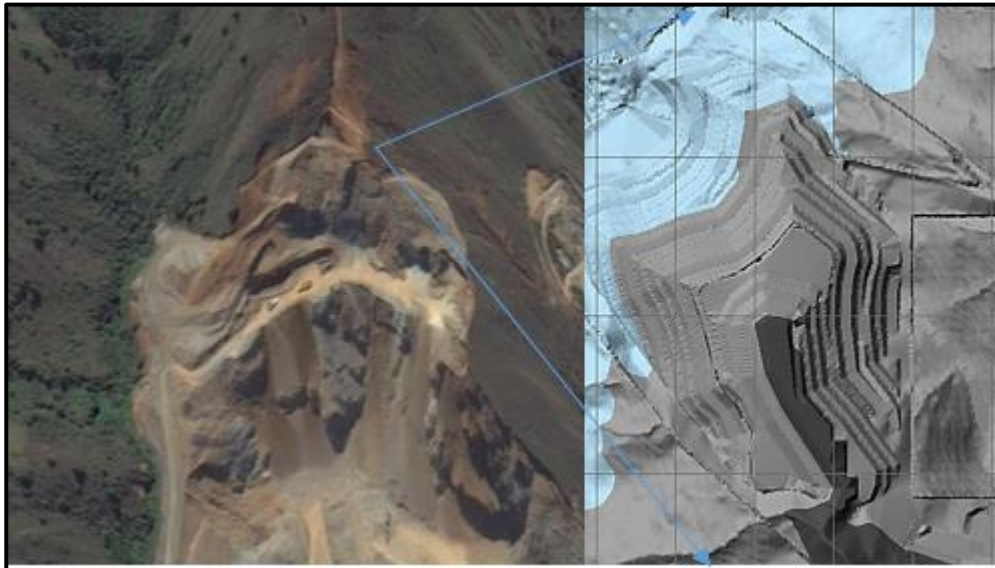


Imagen 7. Áreas a intervenir con la operación minera A-6
Fuente: Este estudio.

“Los taludes del retolleno deberán presentar una altura de 10,0 m con una inclinación 1 H: 1V (45°) y bermas de 12,0 metros de longitud. Para la mayor pendiente del pit de explotación (perfil A- A'), dicho retolleno comenzará su conformación a partir de la cota 1601 m.s.n.m. hasta llegar a la cota 1720 m.s.n.m. Para esta sección (perfil A-A'), se deberán conformar 12 (doce) bancos. La siguiente figura muestra la conformación de los bancos del retolleno.”

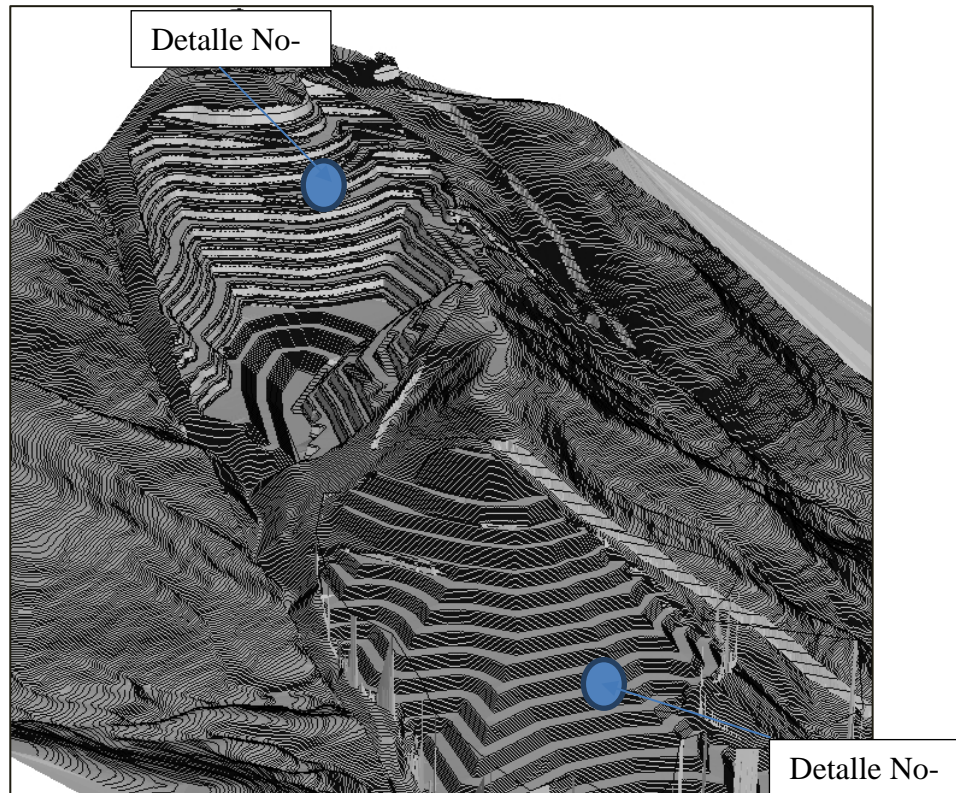


Figura 37. Diseño geométrico retolleno proyectado.
Fuente: Este estudio.

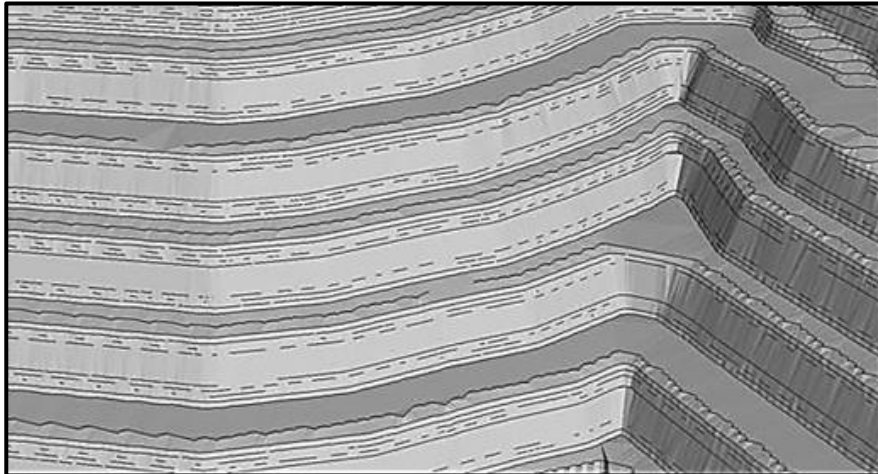


Figura 38. Detalle No 1 - Berma parte superior
Fuente: Este estudio.

En el diseño proyectado en planos en el año 20 se presenta un diseño geométrico de conformación diferente con pendientes más fuertes y bermas más angostas.

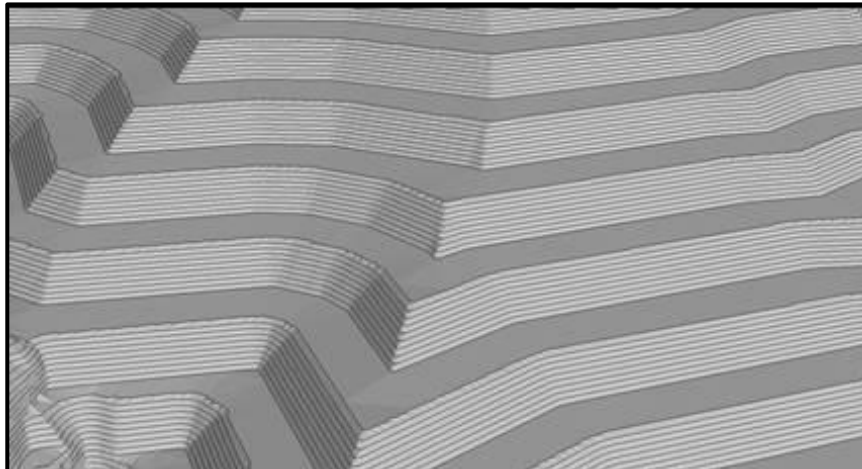


Figura 39. Detalle No 2- Berma parte Inferior
Fuente: Este estudio.

La parte inferior presenta pendientes mucho más suaves con bermas y alturas menos pronunciadas.

9.2.7 ANÁLISIS DE LA PROYECCIÓN DEL LLENO DENTRO DEL PLAN DE ABANDONO.

Los análisis parten de la cantidad de material que se piensa almacenar en el sitio durante 25 años aproximados a la ejecución del frente de explotación asignada por Canteras de Colombia S.A.S., la cual esta información es suministrada por el ente contratante. Considerando que la geotecnia no es objeto de estudio de este trabajo, se tuvieron en cuenta algunos años representativos para el proyecto.

Tabla 10. Volumen de llene de estériles y volumen de excavación.

ETAPA	VOLUMEN DE LLENO (m ³)
Año 1 mes 1	13,350.00
Año 1 mes 2	21,907.90
Año 1 mes 3	36260.47
Año 1 mes 4	47,779.08
Año 1 mes 5	57,641.24
Año 1 mes 6	70,768.19
Año 1 mes 7	80,242.99
Año 1 mes 8	93,805.97
Año 1 mes 9	105,282.82
Año 1 mes 10	116,203.11
Año 1 mes 11	127,401.95
Año 1 mes 12	138,544.00
Año 2	307,429.25
Año 3	468,091.53
Año 4	613,966.28
Año 5	737,192.24
Año 6	1,018,578.32
Año 7 - Año 11	1,664,367.12
Año 12 - Año 16	1,909,551.67
Año 17 - Año 21	2,022,167.82
Año 22 - Año 26	2,026,230.64

9.2.8 CONFORMACIÓN DEL LLENO RECOMENDADA

De acuerdo con los análisis de estabilidad, la geometría del retollo proyectado que presenta mayor estabilidad corresponde a la siguiente:

- Inclinación de cada talud: 45° .
- Altura de bancos: 10,0 metros.
- Longitud de berma: 12,0 metros.
- Ángulo global de la conformación: 24° .

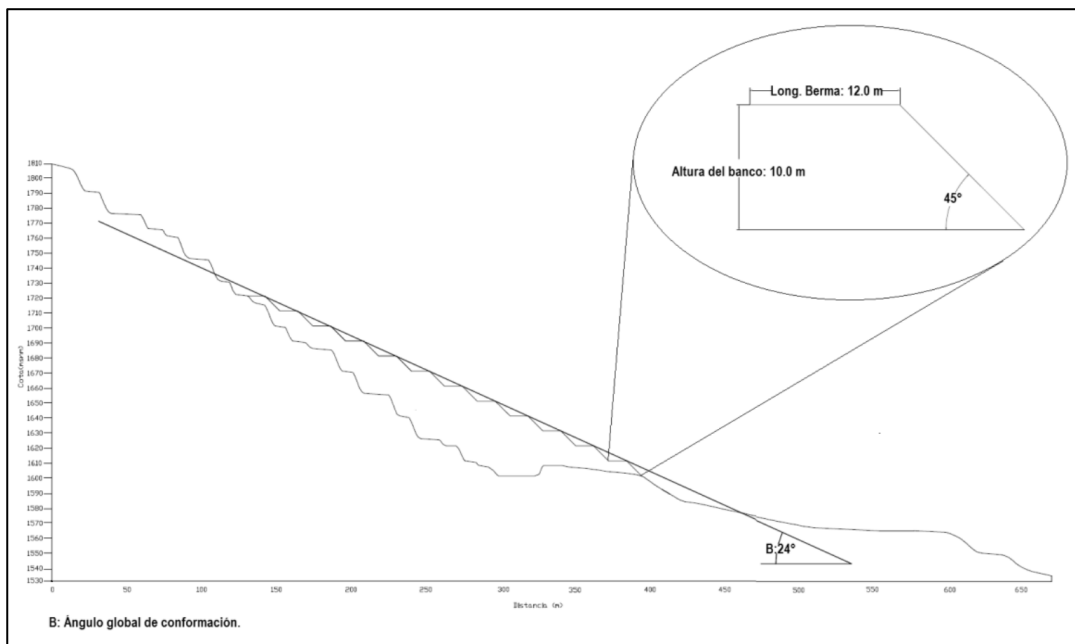


Figura 40. Conformación de los bancos del retollo.

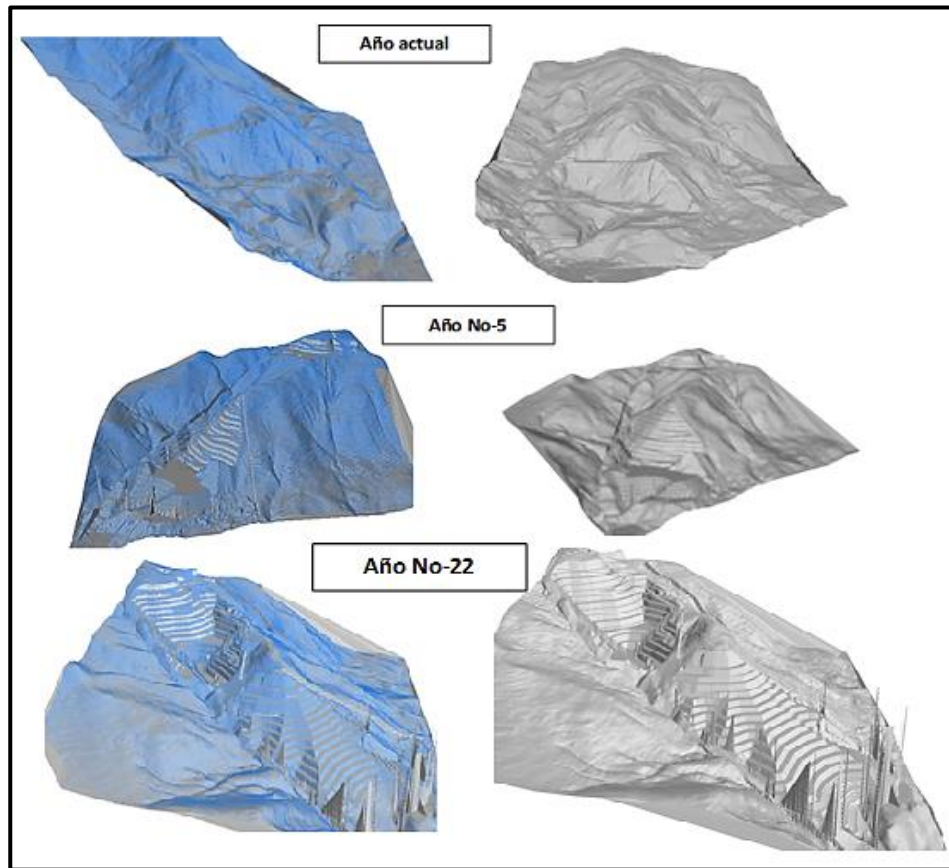


Figura 41. Modelación del cambio del paisaje en el periodo de abandono minero.

Se adelantó un plan de exploración del subsuelo y ensayos con el fin de determinar las características físicas y parámetros de resistencia y deformación, requeridos para llevar a cabo los análisis de estabilidad del sitio donde se realizara la disposición de los materiales sobrantes o estériles producto de la explotación de la cantera con base a la caracterización del subsuelo en todos los sitios.

Se procedió a analizar los resultados obtenidos en las perforaciones geotécnicas, los ensayos geofísicos de campo y laboratorio que se han realizado en la zona en la cantera para tal fin.

9.2.9 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS

Las características geotécnicas a las que se hace alusión en este apartado, vienen dadas como consecuencia del análisis de la información obtenida de la exploración tanto superficial como en profundidad (perforaciones), además de los resultados obtenidos con las exploraciones geológicas encontradas.

De acuerdo a lo anterior se encontró que la zona está conformada por:

- **Dunita de Medellín:**

De acuerdo con el recorrido de campo y los registros de las perforaciones ejecutadas, esta roca presenta diaclasas (N80°W/62°SW) que funcionan como discontinuidades y tienden a ser puntos débiles en la resistencia de las rocas en el sector de interés sólo se presentan tres sitios donde aflora la roca, los primeros dos ubicados en una zona de altas pendientes en las partes más bajas del sitio, una tercera se encuentra expuesta gracias a la erosión por surcos en que se encuentra en lo que actualmente corresponde a una vía en desuso en la mina. Las demás observaciones de roca fresca se realizaron en los registros de exploración del subsuelo.

- **Área de depósito de estériles antiguo sin estabilizar:**

Esta unidad contiene más del 50% del área superficial contenida dentro de la obra. Corresponde a zonas de altas pendientes de un depósito antrópico que no tiene ninguna selección teniendo clastos desde milimétricos, y algunos del orden de 2 a 3 metros, los cuales han sido dispuestos en la zona como parte del desarrollo minero.

- **Área de depósito de estériles antiguo revegetalizado.**

Esta unidad corresponde a una zona de depósito antrópico la cual en la actualidad se encuentra siendo revegetalizada como parte del proceso de recuperación y abandono minero. Esta zona ha sido manejada adecuadamente con obras y manejo de las aguas de escorrentía pero prácticamente los materiales son similares a los que se van a emplear en este proyecto.

9.2.10 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS

Para realizar los diferentes análisis de estabilidad que permitan el diseño de las obras a construir para garantizar la seguridad y estabilización de la zona de estudio, se requiere caracterizar los diferentes materiales, definiendo principalmente los parámetros de resistencia al corte.

Para determinar estos parámetros se utilizaron los resultados del ensayo de resistencia a la penetración estándar efectuados en las perforaciones y correlaciones que permiten cuantificar el ángulo de fricción interna con base en este ensayo, los ensayos de laboratorio de clasificación y correlaciones como las presentadas en la Norma Alemana DIN 1055.

Adicionalmente, se tuvo en cuenta los ensayos de resistencia al corte directa tipo consolidado no drenado efectuados. Para el caso particular de los escombros sólidos, se emplearon parámetros de resistencia al corte estimados previamente para este tipo de material.

Los parámetros de resistencia al corte finalmente seleccionados para los materiales de interés en este estudio se muestran en Tabla 11.

Tabla 11. Parámetros Geotécnicos De Los Materiales

Horizonte	c (kPa)		ø (°)		γ (kN/m ³)	
	□	□	□	□	□	□
Depósito de estériles (Escombros Sólidos)**	45.9	24.5	35.6	7.1	17.7	1.8
Depósito de vertiente	32	8	35	10	17.4	2
Suelo Residual IA-IB y Saprolito IC	72		35.5	5	17.4	2
Roca Meteorizada IIA-IIB.	180		40	5	18.4	2
Roca	9250		40	5	18.4	2

Tabla 12. Ensayos de corte directo tipo cd sobre estériles

TIPO DE MUESTRA	COHESIÓN (Kpa)	ø	γ kN/m3)
EN CAMPO	68	25	17.4
EN CAMPO	71	42	17.4
EN CAMPO	26	35	15.8
EN LABORATORIO	16.2	33.8	17.2
EN LABORATORIO	48.2	42.1	20.8
PROMEDIO	45.9	35.6	17.7
DESVIACION ESTANDAR	24.5	7.1	1.8

Para los escombros, se tuvieron en cuenta además de valores promedio de cohesión y ángulo de fricción interna la desviación estándar, con lo cual se consideró una posible variación de este parámetro por cambios ambientales.

Para el suelo residual y el saprolito, se tuvo en cuenta una cohesión menor que la del ensayo de corte directo para considerar una reducción de este parámetro también por cambios ambientales.

9.2.11 MODELACIÓN DE EQUILIBRIO LÍMITE Y DE ESFUERZO DEFORMACIÓN

9.2.11.1 FACTOR DE SEGURIDAD

La formulación matemática del fenómeno físico para la evaluación de la estabilidad de los depósitos como del terreno natural de los diferentes sitios definidos para esta actividad, consideraron los aspectos geométricos y físicos de los diferentes fenómenos que se deben analizar para garantizar la seguridad y su funcionalidad; para esto se procedió a caracterizando los materiales mediante un modelo constitutivo que represente los suelos con parámetros mecánicos correspondientes.

La mayoría de problemas de estabilidad de taludes tanto naturales como artificiales, incluyen complejidades relacionados con la geometría, anisotropía, comportamiento no lineal, esfuerzos “in situ” y la presencia de procesos concomitantes como presiones de poros y cargas sísmicas. (Suárez, J, Análisis Geotécnico, 2009).

Es aceptable indicar que la evaluación de la estabilidad de un lleno, es un aspecto que cobra toda la importancia desde la perspectiva de definir con certeza el comportamiento de estabilidad esperado. Es cuando se convierte en un aspecto relevante para la determinación del factor de seguridad (FS), asociado a la estabilidad del lleno como del sitio donde va estar desplantado.

El factor de seguridad consistente esencialmente en un análisis comparativo entre el esfuerzo cortante desarrollado en la superficie potencial de falla dentro del material empleado para el lleno, con la resistencia cortante del material in-situ, ya sea suelo o roca.

Con el objeto de garantizar la estabilidad y seguridad de los depósitos se propuso que el valor límite para el factor de seguridad en el caso estático, es seleccionado a partir de las sugerencias de Geotechnical Engineering Office (2004), que recomienda clasificar dentro de la categoría de riesgo alto, aquellos taludes que puedan afectar vías con mucho tránsito y con amplia posibilidad de afectaciones en construcciones comerciales, para riesgos económicos y de vidas, respectivamente (GSM, 2002).

El criterio establecido para los factores de seguridad se presenta en la Tabla 13. Donde se clasifican los factores de seguridad en intervalos para los casos estáticos y pseudoestático los cuales se adoptaron considerando que el talud es fijo, además se relacionan los factores de seguridad obtenidos en la modelación. En las figuras 29 y 30, se presentan los esquemas de los casos analizados, la superficie de falla crítica y su factor de seguridad correspondiente.

Tabla 13. Rangos de clasificación de factores de seguridad para el caso estático y dinámico, según la NSR 2010. (Tomado de la tabla 2.4-1 NSR-2010).

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 proceso de análisis se contemplaron dos escenarios los cuales se describen a continuación:

- i) En el primer escenario considera la condición estática el cual se subdividió en dos casos: a) representación de las condiciones actuales del terreno, b) condiciones con las obras planteadas y que hacen parte de los depósitos.
- ii) El segundo escenario que se contempló, fue la de una carga pseudoestático.

Para estas condiciones se tuvo en cuenta que las condiciones de carga sísmicas fueron simuladas usando una aproximación pseudo-estática. Para un evento sísmico, tenemos entonces que la aceleración máxima solo se mantendrá por una fracción de segundos. El análisis pseudo-estático modela los eventos sísmicos conservadoramente con aceleración y dirección constantes, es decir, como un pulso infinito. Usualmente en ingeniería geotécnica se usa una fracción del peak de aceleración esperada al utilizar una modelación pseudo-estática para análisis sísmicos aplicando un coeficiente de aceleración horizontal (K_h).

Para la definición de la aceleración máxima se tuvo en cuenta lo estipulado en la Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente NSR10. De acuerdo con esta norma el proyecto se ubica en la zona de Amenaza Sísmica Intermedia, correspondiéndole una aceleración pico efectiva Horizontal A_a = 0.15g. De esta forma, el coeficiente de aceleración horizontal K_h se determina de la siguiente forma.

$$K_h = (A_a) \times (K_{ST}) \times (F_a)$$

Donde:

- K_h : Coeficiente de Aceleración Horizontal Efectiva.
- A_a : Coeficiente de Aceleración pico efectiva horizontal. Tomado de la NSR-2012 $A_a=0.15$.
- K_{ST} : Coeficiente sísmico de diseño para análisis pseudoestático de taludes. De acuerdo a la norma NSR-2010 es $2/3$.
- F_a : Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos, debido a los efectos de sitio, adimensional. Tomado NSR-2010. Es $F_a=1.50$.

De acuerdo con las condiciones geotécnicas encontradas en la zona de estudio tenemos que el coeficiente de aceleración Horizontal es:

$$K_h = (0.15) \times \left(\frac{2}{3}\right) \times (1.5) = 0.15$$

Este valor entonces es el coeficiente de aceleración horizontal para realizar el análisis pseudoestático, la aceleración vertical corresponde a $1/2$, de la aceleración horizontal. Se consideraron en todos los escenarios y casos superficies de falla global y local del tipo circular.

El criterio establecido para los factores de seguridad se presenta en la Tabla 13. En estas tablas se clasifican los factores de seguridad en intervalos para los casos estáticos y pseudoestático los cuales se adoptaron considerando que el talud es fijo; además se relacionan los factores de seguridad obtenidos en la modelación y teniendo en cuenta lo estipulado por la NSR10.

Se presenta a continuación la geometría y los análisis de los modelos cargados en el programa de equilibrio límite SLIDE® y la descripción gráfica de las envolventes de falla, de los nueve sitios que se escogieron, tanto en condiciones naturales como con las condiciones finales de los depósitos. Se describen las secciones como sigue:

9.2.12 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL DEPÓSITO PRIMER MES.

Para el primer mes el volumen almacenado es del orden de 13.350 m^3 . El resultado del análisis de estabilidad para las condiciones del sitio es el siguiente.

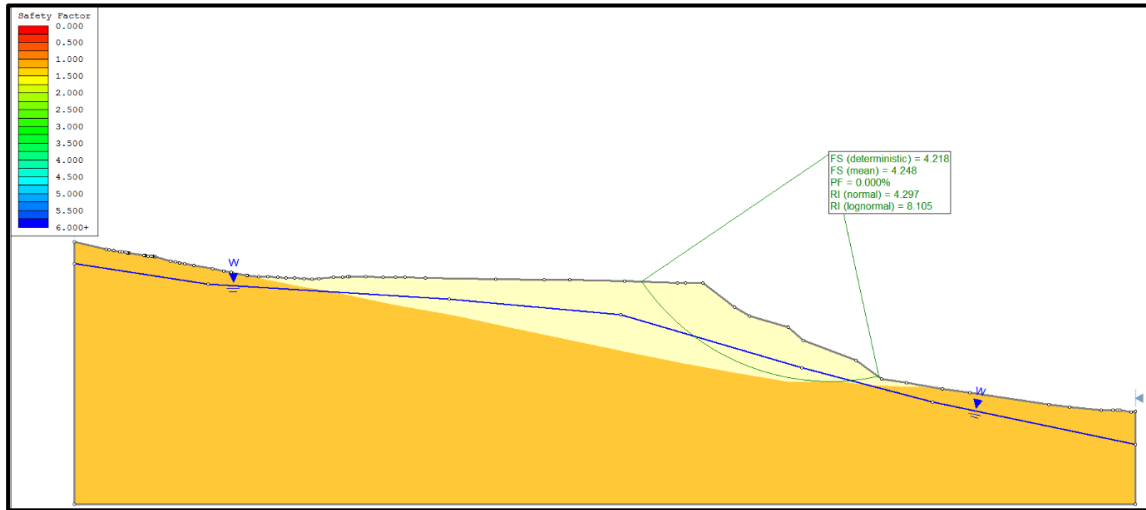


Figura 42. Modelo Slide® caso estático en la sección 3-3. F.S=4.28.
Fuente: Este estudio.

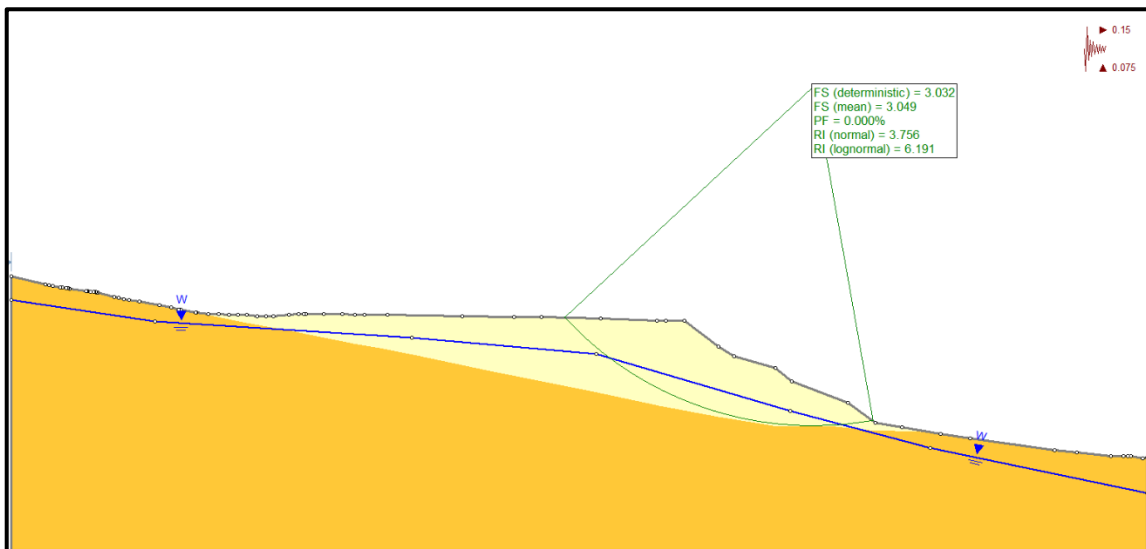


Figura 43. Modelo Slide® caso pseudoestático en la sección 1-1. F.S=3.032.
Fuente: Este estudio.

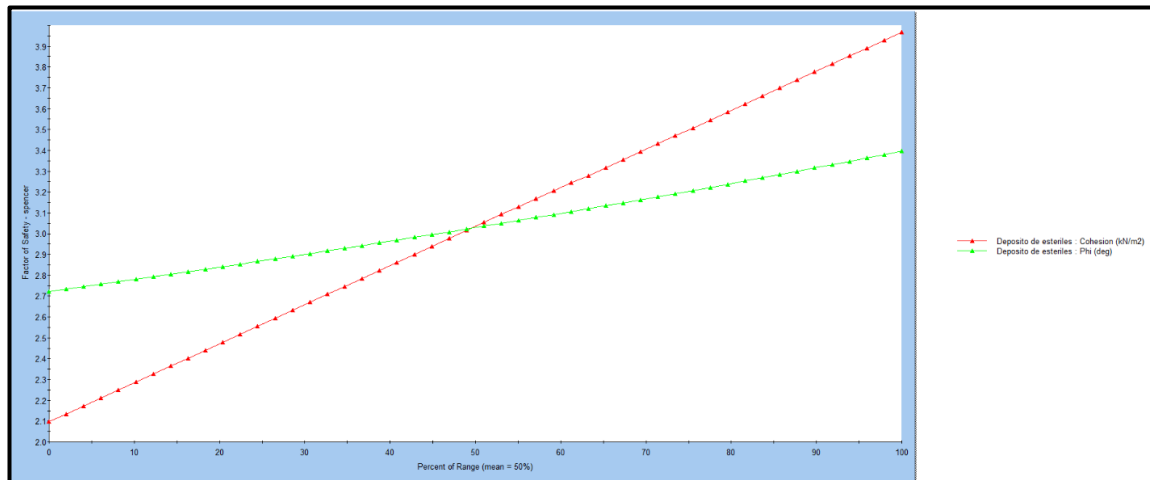


Figura 44. Rango de sensibilidad de los parámetros del material de estériles.

Fuente: Este estudio.

Como se puede ver en la Figura 42 y Figura 43, el factor de seguridad que se tiene al realizar esta primera etapa es del orden de 4.24 en condiciones estáticas, lo que indica que el lleno para estas condiciones es seguro además de presentar una probabilidad de falla de 0.0 y con un riesgo de afectación bajo para el caso pseudoestático el factor de seguridad es $F.S=3.03$, al igual que el caso estático se comprueba que las condiciones en esta etapa es segura, además al realizar el análisis de sensibilidad de los parámetros del lleno teniendo en cuenta su gran variabilidad de resultados encontramos que es seguro siendo el parámetro de la cohesión de los materiales la que más puede influir en los resultados.

Con el objeto de garantizarla estabilidad del lleno y la consolidación del mismo durante el periodo de construcción, se procedió a construir unas capas de arena intermedias dentro del lleno, para que de esta manera se garantice que una vez terminado el depósito éste no va a sufrir procesos de consolidación y no se va a presentar una disminución en las características de resistencia al corte de los materiales del lleno. Para tal fin tenemos que los resultados de los ensayos de consolidación realizados para los materiales típicos a disponer en los sitios, se encontraron valores del coeficiente de consolidación (C_v), tal como se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Calculo de coeficiente de consolidación.

Estimación de Cv a partir del método del Rectángulo Hiperbólico (Sridharan and Rao (1981) and Sridharan and Prakash (1985)).							
DATOS DE LA MUESTRA		ETAPA DE CONSOLIDACIÓN					
		ESFUERZO (Kpa)	25	50	100	200	400
		Tiempo (min)	Deformación vertical (0.0001 in)				
Diámetro (cm)	5.0	0.00	0	0	0	0	0
Altura (cm)	2.2	0.15	102	243	458	1038	1517
Área (cm ²)	19.64	0.50	108	247	466	1045	1528
Volumen (cm ³)	43.08	1.00	119	254	480	1060	1550
Peso suelo húmedo (g)	85.7	2.00	132	259	498	1082	1577
Peso suelo seco (g)	66.2	4.00	148	265	518	1106	1605
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.989	8.00	158	275	535	1126	1627
Densidad seca (g/cm ³)	1.536	15.00	165	291	548	1142	1643
Gravedad específica	2.241	30.00	172	306	560	1150	1655
Peso del anillo (g)	133.7	60.00	178	316	568	1165	1665
Peso del anillo + suelo húmedo (g)	206.4	120.00	188	322	577	1175	1675
Deformación por saturación (in)	12	240.00	194	330	582	1181	1684
Deformación consolidación		1440.00	200	350	608	1210	1702
ESTIMACION LINEAL (y=mx+b)	(m)		1.9659	1.1239	0.6472	0.3253	0.2313
	(b)		6.3873	4.2492	1.5732	0.4387	0.1643
	H (mm)		22.0000	21.4920	20.6030	19.0587	15.9853
	t ₆₀ (min)		3.1301	3.6425	2.3416	1.2994	0.6843
	T ₆₀		0.2863	0.2863	0.2863	0.2863	0.2863
	Cv (mm ² /min)		44.2661	36.3027	51.8962	80.0269	106.9080
	Cv (cm ² /s)		0.0074	0.0061	0.0086	0.0133	0.0178
	mv (cm ² /Kg)		0.0924	0.0709	0.0636	0.0802	0.0391
	k (cm/s)		6.814E-07	4.290E-07	5.502E-07	1.070E-06	6.965E-07

El resultado encontrado para la modelación del lleno tenemos que el coeficiente de consolidación es 0,0156 cm²/seg. A partir de estos resultados se procedió a ubicar las capas de drenaje dentro del lleno con el objeto de garantizar su consolidación durante el proceso de adecuación de los estériles.

De acuerdo con el resultado anterior y partiendo de la experiencia en estos materiales tenemos que las características de los materiales procedentes de las excavaciones y que se dispondrán en las zonas de depósito, son las siguientes:

Tabla 15. Coeficiente de consolidación para diferentes materiales.

MATERIAL	Cv (cm ² /seg.)	Cv (m ² /día)	Hcrit/2 (m)
Lleno	0,0156	0,249696	1.50
Residual	0,0218	0,188352	1,78
U – Grado de consolidación	99	%	
T – Factor de tiempo	1.781	Adimensional	
t – Tiempo de	30	días	

De acuerdo con los resultados obtenidos en el cuadro anterior donde se correlaciona los valores del grado de consolidación (u) ideal del 99% y tiempo de consolidación de 30 días, el cual corresponde aproximadamente el tiempo que se demora en disponer el espesor de lleno, se recomienda la implementación de capas drenantes en arena y grava de espesor intercaladas con el material de lleno y espaciadas verticalmente cada 3.0 m durante el proceso constructivo de los depósitos, ver Figura 45.

Terzaghi (1925) propuso la teoría de la velocidad de consolidación unidimensional en suelos arcillosos saturados, como:

$$t = \frac{T * H^2}{Cv}$$

Dónde:

t = Tiempo de asentamiento (días).

T = Factor de tiempo (adimensional).

Cv = Coeficiente de consolidación (cm²/seg).

H = Trayectoria del drenaje promedio más larga durante la consolidación.

U = Grado de consolidación promedio

Se evidenció que con los cálculos anteriormente estimados que el terraplén conformado como zona de depósito sería apto a ser utilizado a los 30 días después de terminado la conformación del lleno.

Además, se recomienda que para la construcción de cualquier obra civil en los sitios de depósito, se realice un estudio geotécnico particular de acuerdo con la norma

NSR-10, con el fin de determinar la capacidad portante y establecer las recomendaciones constructivas particulares para las estructuras a construir.

De acuerdo con los resultados obtenidos con los ensayos de consolidación los depósitos se deberán conformar por capas de 3.0 m de espesor, el cual debe ser compactado a la humedad natural; se deberá colocar sobre cada una de estas capas, una capa de arena y grava de 0,15 m de espesor, que esté en contacto con la superficie y con la ladera natural, ver Figura 45.

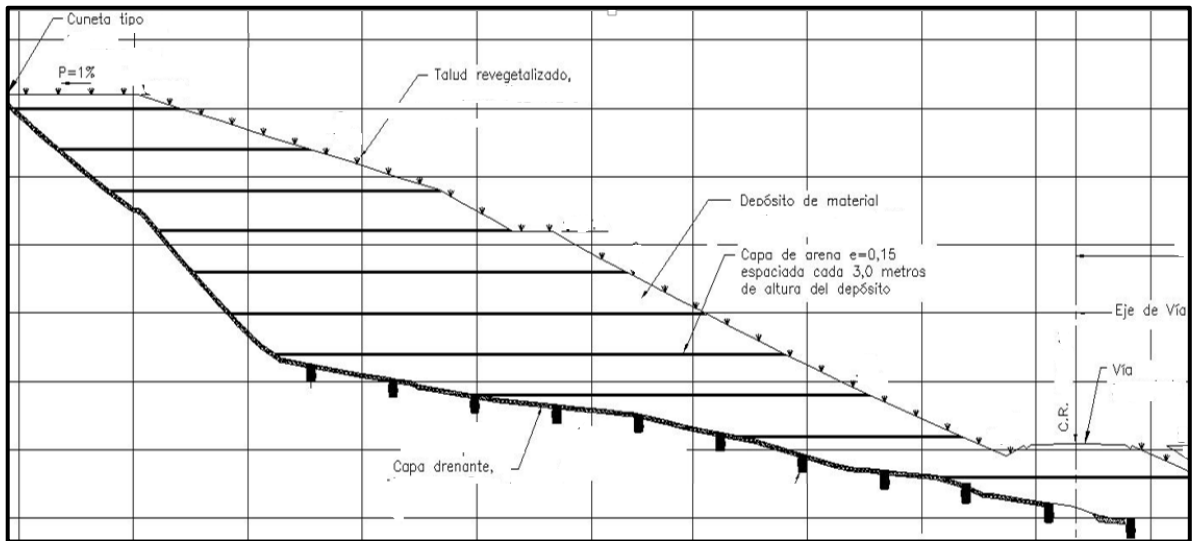


Figura 45. Detalle manto filtrante sobre ladera natural.

Una vez se garantiza que el terreno donde se va a construir el depósito, es estable se procede a realizar el análisis para determinar la conformación más adecuada y la capacidad máxima de almacenamiento, a continuación se muestran los resultados de la conformación final del sitio.

Con el objeto de garantizar la estabilidad del depósito, se debe construir un colchón drenante, después de adecuar la zona este tendrá la siguiente granulometría la cual está especificada en la Tabla 16.

Tabla 16. Granulometría del colchón drenante.

GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL DE FILTRO								
TAMIZ	2"	3/4"	3/8"	#4	#10	#40	#60	#200
% PASA	100	75-100	55-85	40-65	25-45	0-25	0-15	0

Después de construido este colchón se empezó con el lleno del depósito pero tal y como se especificó en los párrafos anteriores. Con el objeto de garantizar la estabilidad del lleno se deberá construir las capas de arena intermedias dentro del lleno, espaciadas verticalmente cada 3.0 m durante el proceso constructivo, ver Figura 45. Detalle manto filtrante sobre ladera natural.

9.2.13 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD PARA EL PRIMER AÑO DE LLENADO.

Para el primer año de llenado y Teniendo en cuenta todas las características de drenaje y de consolidación que se especificaron anteriormente procedemos a calcular la estabilidad. Para el primer año el volumen almacenado es del orden de 632,922.55 m³.

La sección de análisis fue aquella que presenta las condiciones más desfavorables en la Figura 46, se muestran las secciones de estudio.

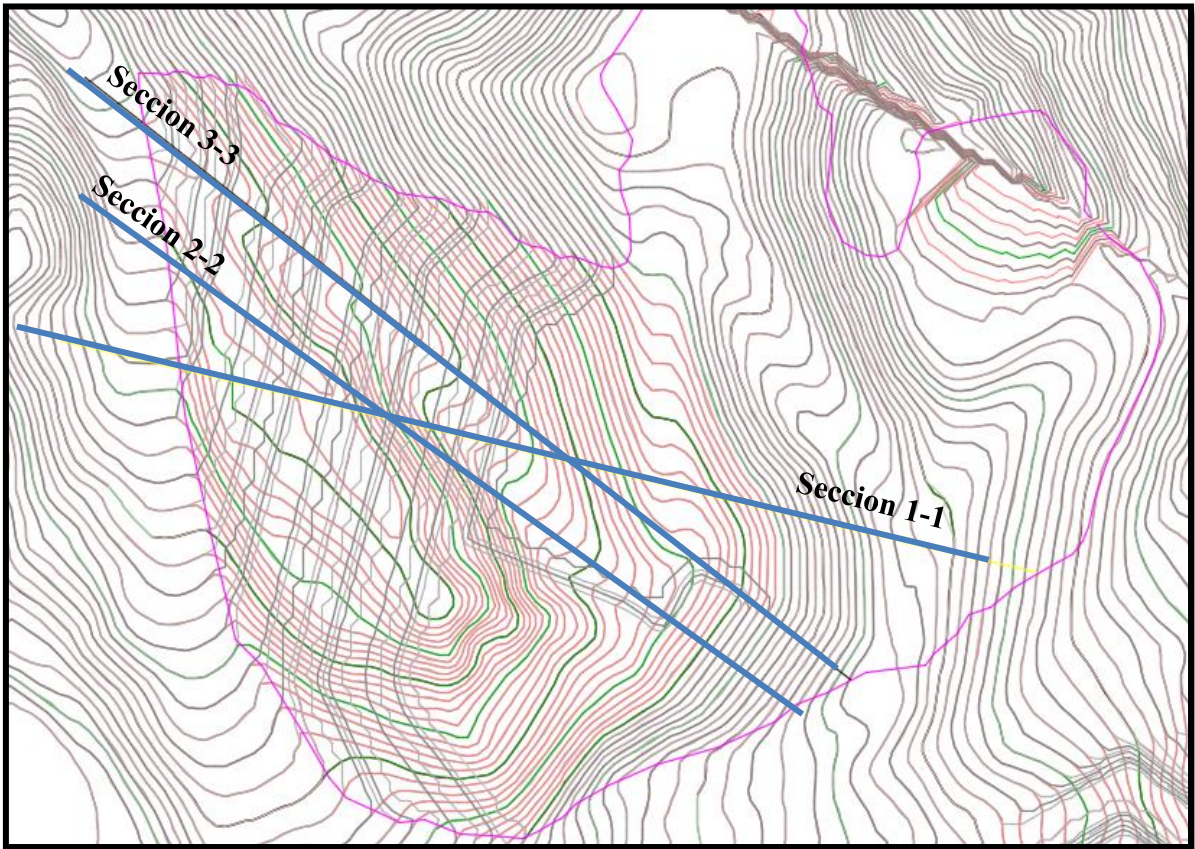


Figura 46. Localización en planta de las secciones analizadas.
Fuente: Este estudio.

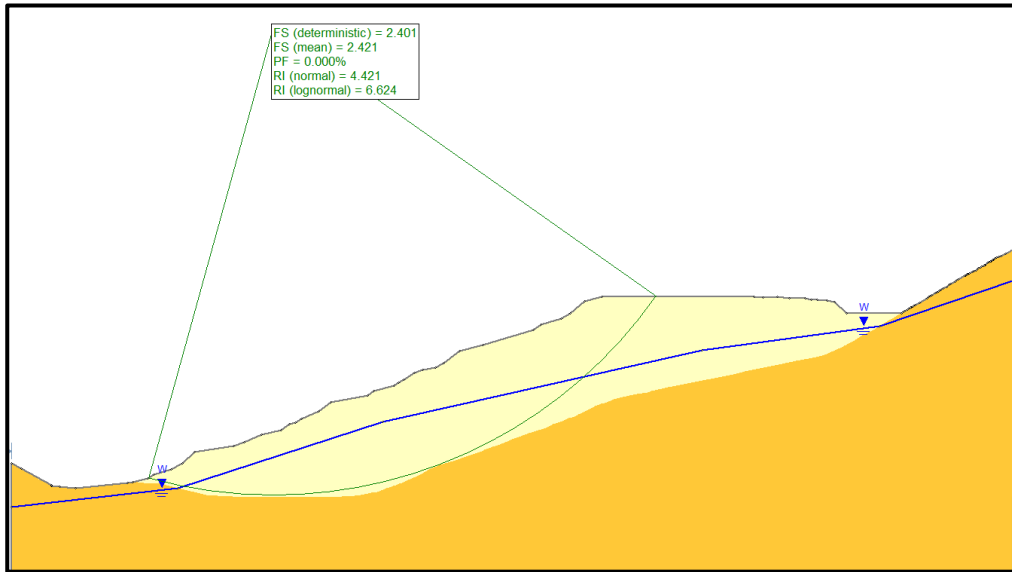


Figura 47. Resultado modelación Slide® caso estático conformación definitiva a sección 1-1.
F.S=2.401.

Fuente: Este estudio.

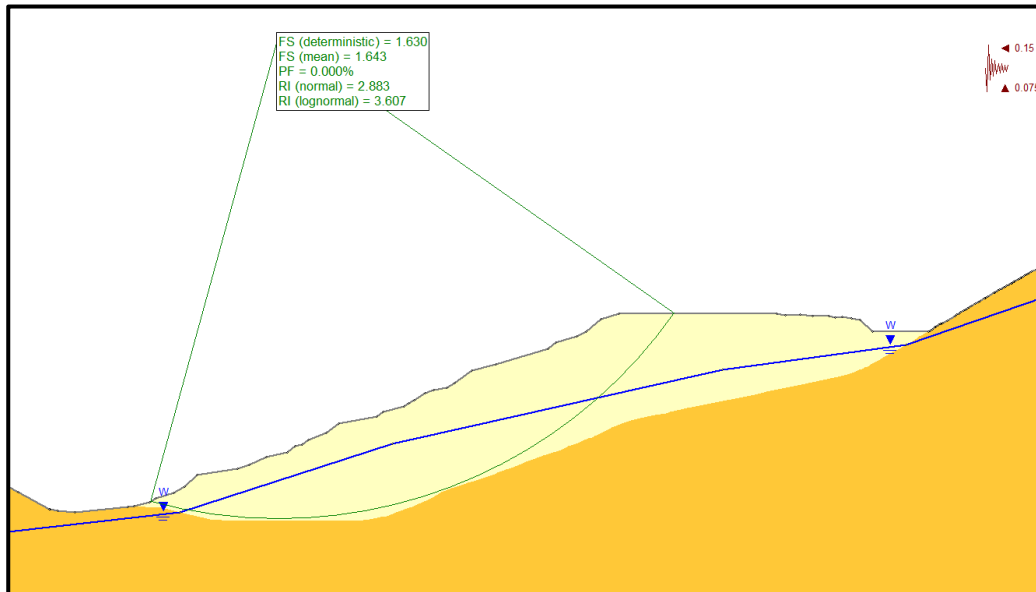


Figura 48. Resultado modelación Slide® caso pseudoestático conformación definitiva a sección 1-1.
F.S=1.643.

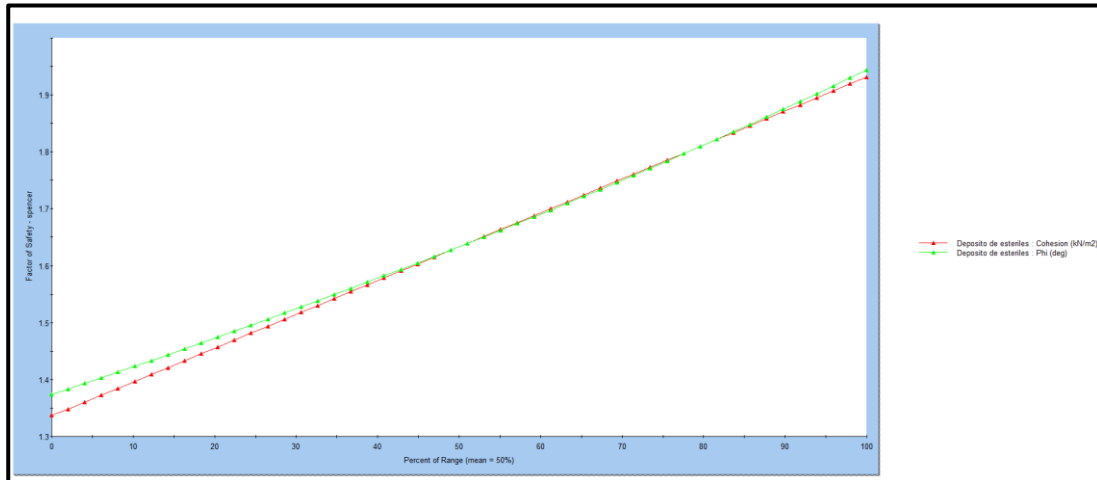


Figura 49. Rango de sensibilidad de los parámetros del material de esteriles para primer año de llenado.
Fuente: Este estudio.

Como se puede ver en la Figura 47 y Figura 48. El factor de seguridad que se tiene después de haber logrado el primer año de conformación del depósito en el caso estático es del orden de 2.401 en condiciones estáticas, lo que indica que para el primer año de llenado este califica como una condición ideal y con un riesgo de afectación bajo para el caso seudoestático el factor de seguridad es $F.S=1.643$, al igual que el caso estático se comprueba que la conformación que se logró, además de haber realizada todas las obras sugeridas en este informe es aceptable para realizar la obra. Además para este volumen de lleno el análisis de sensibilidad muestra que es seguro y que al considerar la variabilidad de sus resultados en los parámetros mecánicos muestra que el factor de seguridad mínimo que se puede presentar es del orden de 1.32 para el caso seudoestático confirmando que para el primer año de llenado la zona es segura y confiable.

9.2.13.1 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL DEPÓSITO PARA EL QUINTO AÑO.

Para el quinto año de llenado y teniendo en cuenta todas las características de drenaje y de consolidación que se especificaron anteriormente, se procedió con el cálculo para la estabilidad. Para este año el volumen almacenado es del orden de 737,192.24 m³.

La sección de análisis fue aquella que presenta las condiciones más desfavorables en la Figura 50, se muestran las secciones de estudio.

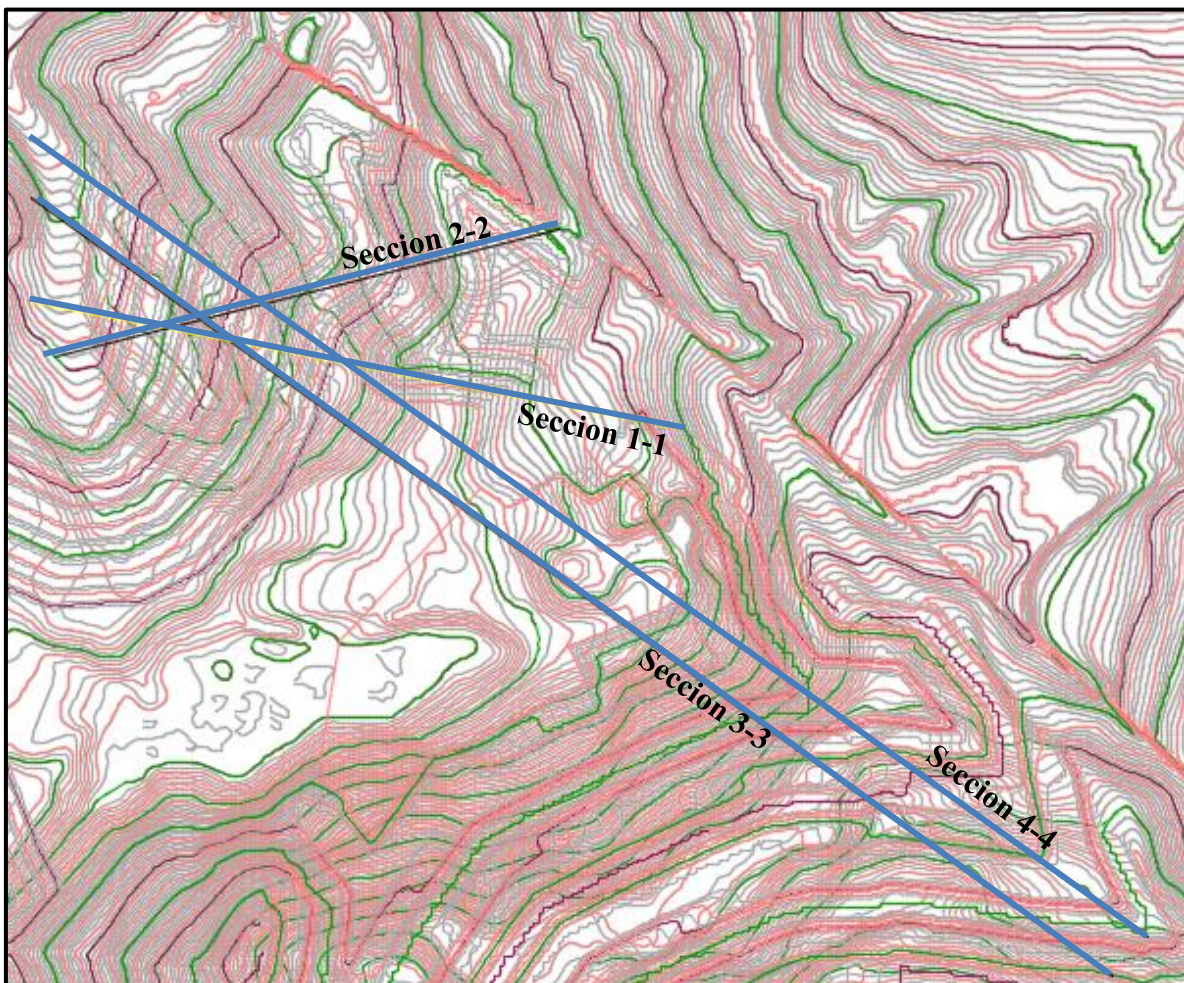


Figura 50. Localización en planta de las secciones analizadas para el quinto año.
Fuente: Este estudio.

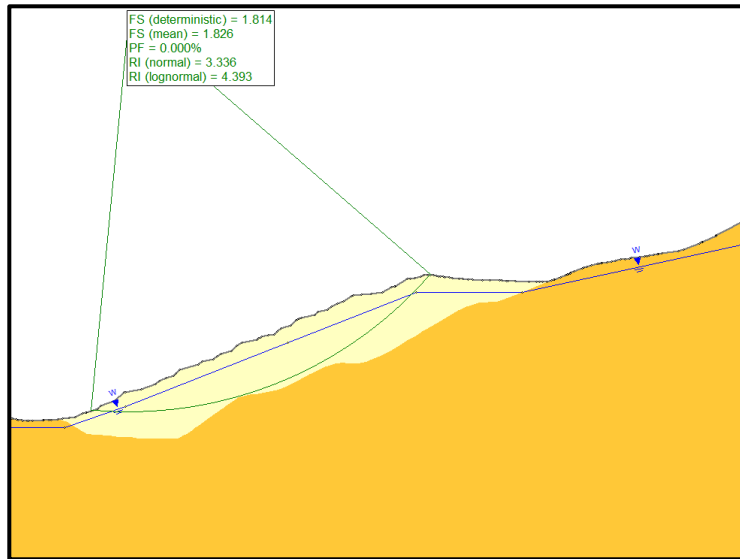


Figura 51. Modelo Slide® caso estático en la sección 1-1. F.S.=1.826.
Fuente: Este estudio.

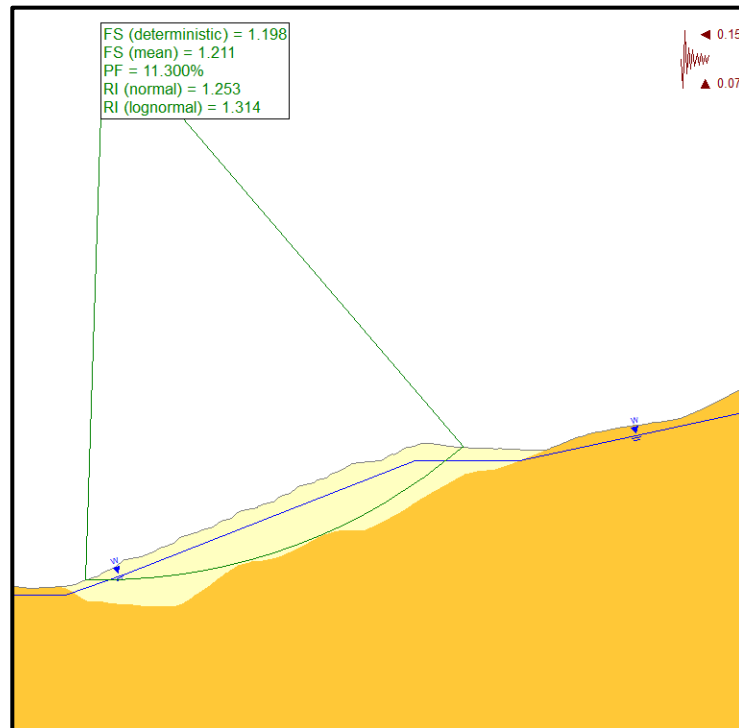


Figura 52. Modelo Slide® caso pseudoestático en la sección 1-1. F.S.=1.198.
Fuente: Este estudio.

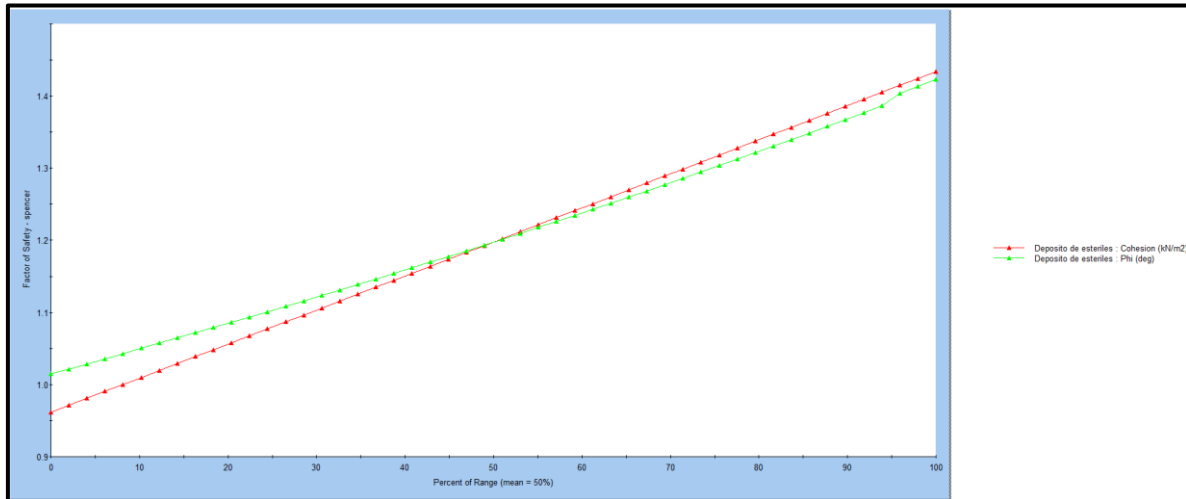


Figura 53. Rango de sensibilidad de los parámetros del material de estériles para el quinto año de llenado.

Fuente: Este estudio.

Como se puede ver en la Figura 51 y Figura 52. El factor de seguridad que se tiene después de haber logrado el quinto año de conformación del depósito en el caso estático es del orden de 1.826 en condiciones estáticas, lo que indica que para este año de llenado este califica como una condición ideal y con un riesgo de afectación medio para el caso seudoestático el factor de seguridad es $F.S=1.198$, al igual que el caso estático se comprueba que la conformación que se logró, además de haber realizada todas las obras sugeridas en este informe es aceptable a media, para realizar la obra.

La probabilidad de falla es del orden de 11.3% esto indica que dado la gran variabilidad de las propiedades mecánicas de los estériles para este año, se tienen una probabilidad entre media a alta de que se lleguen a presentar problemas. Además para este volumen de lleno el análisis de sensibilidad muestra que al considerar la variabilidad de sus resultados en los parámetros mecánicos muestra que el factor de seguridad mínimo que se puede presentar es del orden de 0.96 para el caso seudoestático confirmando que para este año de llenado, la zona presenta una incertidumbre muy alta generando una probabilidad de falla muy alta esto debido a la gran variabilidad de materiales y de las propiedades mecánicas, lo que sugiere que se podría corregir para permitir tener una seguridad más alta siempre y cuando los materiales empleados tenga una cohesión mayor a 31 KPa, esto indica que si se quiere almacenar más de esta cantidad se debe pensar en materiales que no sean muy granulares además de que la compactación dentro del lleno y la forma de disposición deben ser muy rigurosas.

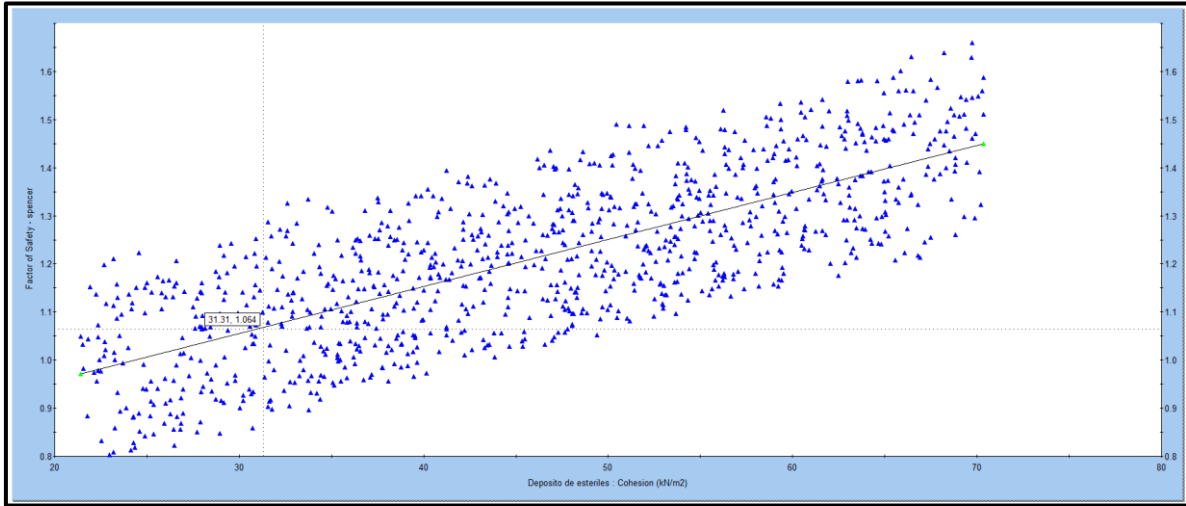


Figura 54. Variación de la cohesión de los esteriles vs factor de seguridad.

10. SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO ANTE MOVIMIENTOS DE MASA

El análisis de susceptibilidad hace énfasis en la distribución de movimientos en masa en la ladera, debido a los procesos de vertientes generados por desequilibrios del terreno, tomando en consideración el enfoque geoesférico de la zona, cuyo objetivo es determinar la inestabilidad y representar cartográficamente mediante el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa.

Teniendo como base la plataforma SIG, se efectuó la evaluación de la susceptibilidad del terreno a ser afectado por movimientos de masa. Para esto se utilizó una metodología que usa el álgebra de mapas temáticos para determinar la influencia de cada factor en la estabilidad de la zona de estudio, permitiendo realizar un análisis semi-cuantitativo entre los diferentes factores que condicionan la estabilidad del terreno y la ocurrencia de movimientos en masa, logrando así estimar el grado de susceptibilidad del área evaluada.

10.1 EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD

10.1.1 VARIABLES EVALUADAS

10.1.1.1 GEOLOGÍA

Se analiza la geología de la zona, el cual permite clasificar y caracterizar el suelo, con el fin de establecer las unidades y tener en cuenta la distribución de los diferentes materiales a lo largo de la zona de estudio. Cada uno de estos materiales presenta propiedades intrínsecas y ofrece diferentes respuestas ante los agentes que actúan para su alteración y así poder determinar la susceptibilidad de cada uno de ellos a que se produzca un movimiento en masa, ver Tabla 17.

Tabla 17: Evaluación Factores Geológicos.

Factores	Área (m2)	Área (ha)	Porcentaje (%)
Deposito Aluvial	7672,643268	0,77	1,43
Dunita de Medellín	376882,5618	37,69	70,37
Flujo de Escombros	50927,30312	5,09	9,51
Lleno de Estériles	74056,89285	7,41	13,83
Lleno de Estériles Recientes	17279,6155	1,73	3,23
Suelo Antrópico	8772,389973	0,88	1,64
Total		53,56	100

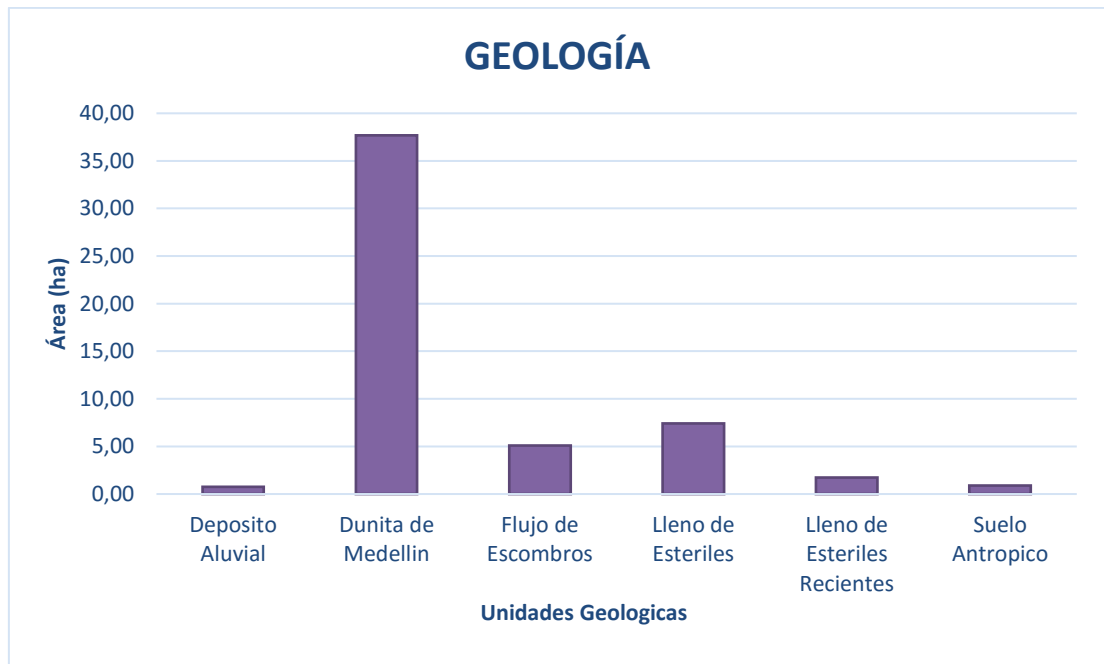


Figura 55. Histograma Geología área de estudio.
Fuente: Este estudio.

De acuerdo a la tabla anterior dentro del área de estudio se presenta que la unidad geológica que predomina en la zona es la Dunita de Medellín con un área de 37.69 ha, abarcando un 70.30% de todo el territorio.

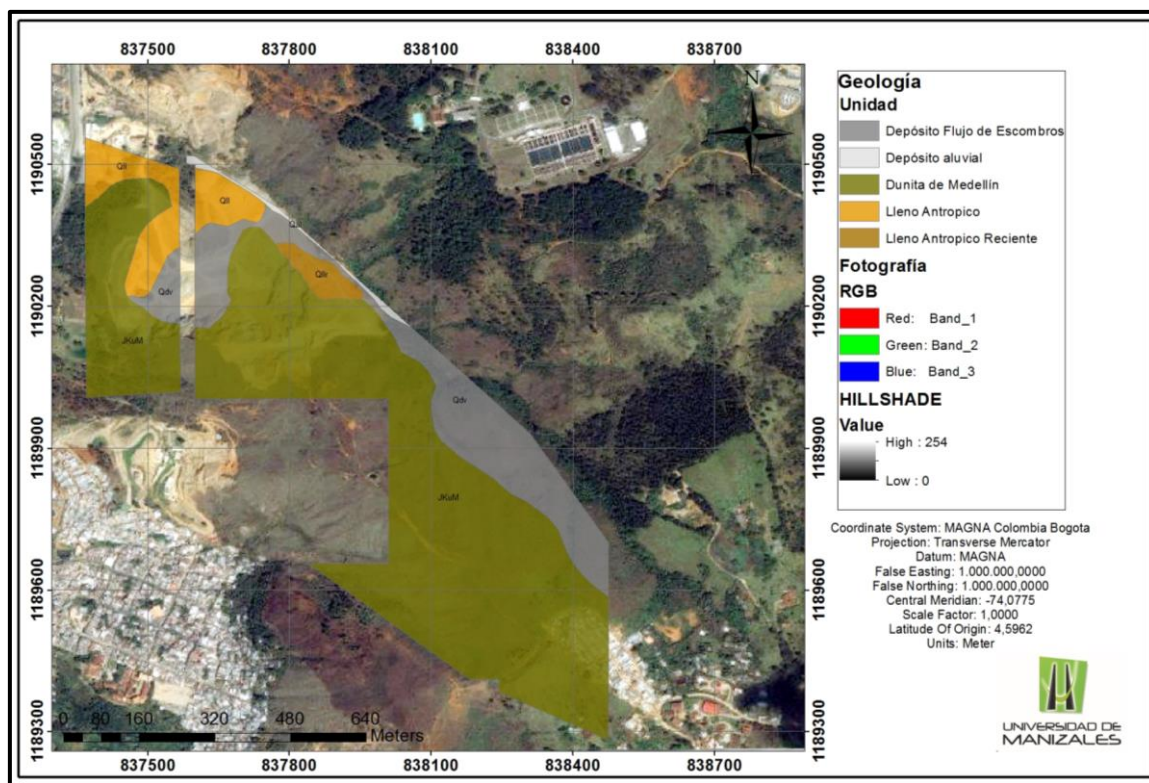


Figura 56. Mapa Geología área de estudio.
Fuente: Este estudio.

10.1.1.2 GEOMORFOLOGIA

Esta variable nos da una apreciación más clara y detallada de las formas del relieve que presenta la zona de estudio y nos da un indicio de la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del terreno. Las características de la geomorfología de la zona de estudio son:

Tabla 18: Evaluación Factores Geomorfológicos.

Factores	Área (m2)	Área (ha)	Porcentaje (%)
Vertientes Antrópicas bajas	274566,58	27,46	51,16
Vertientes Antrópicas medias	140982,29	14,10	26,27
Vertientes Antrópicas altas	121085,31	12,11	22,56
Total	536634,18	53,66	100

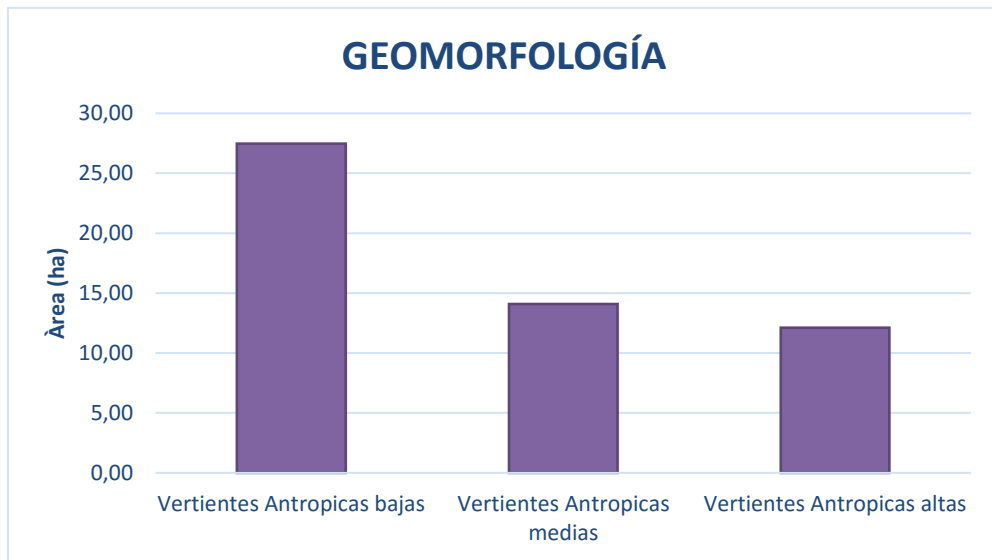


Figura 57. Histograma Geomorfología del área de estudio.
Fuente: Este estudio.

En la Figura 57, se puede observar que las vertientes antropicas bajas son las que presentan mayor area en la zona de estudio abarcando un 51.18% de todo el territorio, seguido por las vertientes medias en un 26.27%, y las vertientes altas en un 22.56%.

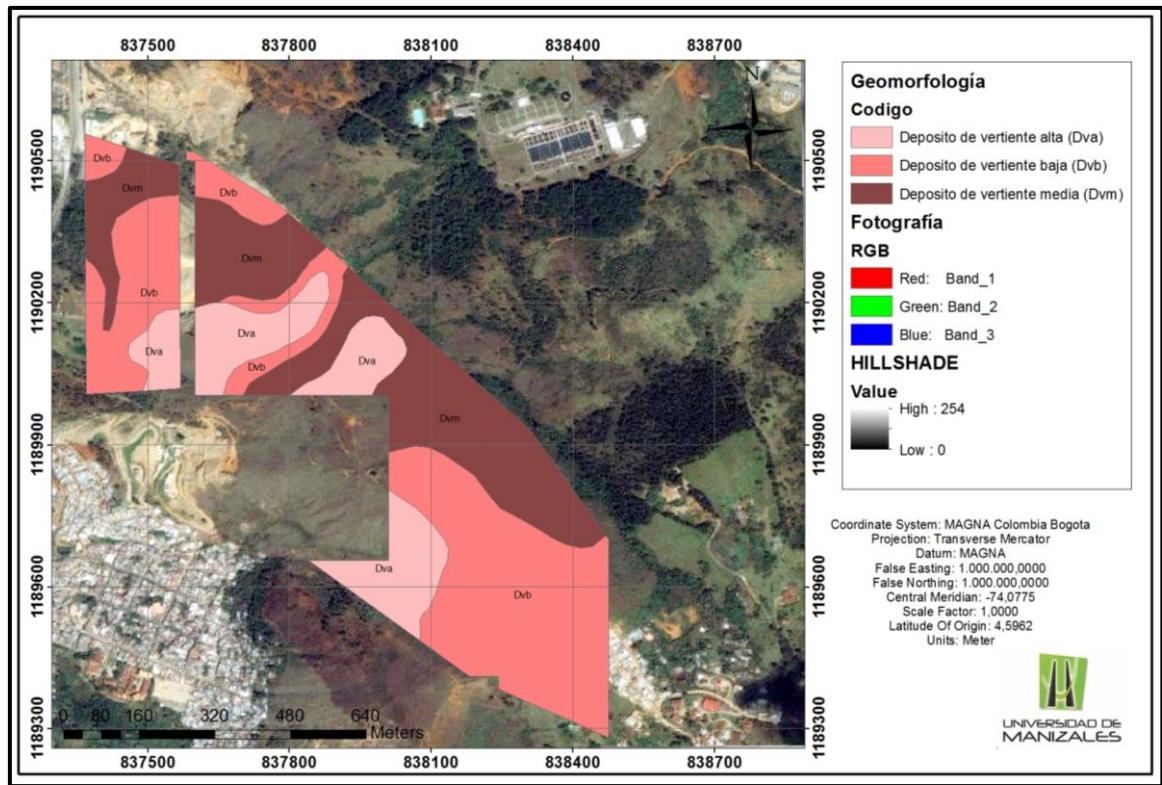


Figura 58. Mapa Geomorfológico del área de estudio.
Fuente: Este estudio.

10.1.1.3 PENDIENTES

La pendiente se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal. Su valor es expresado en grados de 0° a 90° o en porcentaje, este es relacionado con los movimientos en masa, considerando que a mayor grado de pendiente aumenta la susceptibilidad a los movimientos en masa.

El estudio de las pendientes que se presentan en el área de estudio permite realizar un estudio más detallado y preciso de la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del terreno, las pendientes que se presentan son las siguientes: la siguiente clasificación permite tener con claridad los valores arrojados en el modelamiento del terreno.

Mediante la topografía obtenida de la zona de estudio se procede a la elaboración de un Modelo de Elevación Digital del terreno, donde posteriormente se procesan las pendientes de la zona.

Tabla 19. Tabla de Susceptibilidad de la pendiente. (Tomado y modificado de INGEOMINAS, 2011).

Clasificación	Descripción	Susceptibilidad
1	Plana a suavemente inclinada	Muy Baja
2	Inclinada	Baja - Media
3	Muy Inclinada	Alta
4	Abrupta o Escarpada	Muy Alta

Tabla 20: Evaluación Factores Ambientales y Topográficos.

Factores	Área (m ²)	Área (ha)	Porcentaje (%)
0-30 grados	359.630,49	35,96	67,078
30-40 grados	124.815,48	12,48	23,281
40-60 grados	51.505,25	5,15	9,607
>60 grados	185,58	0,02	0,035
Total	536136,80	53,61	100

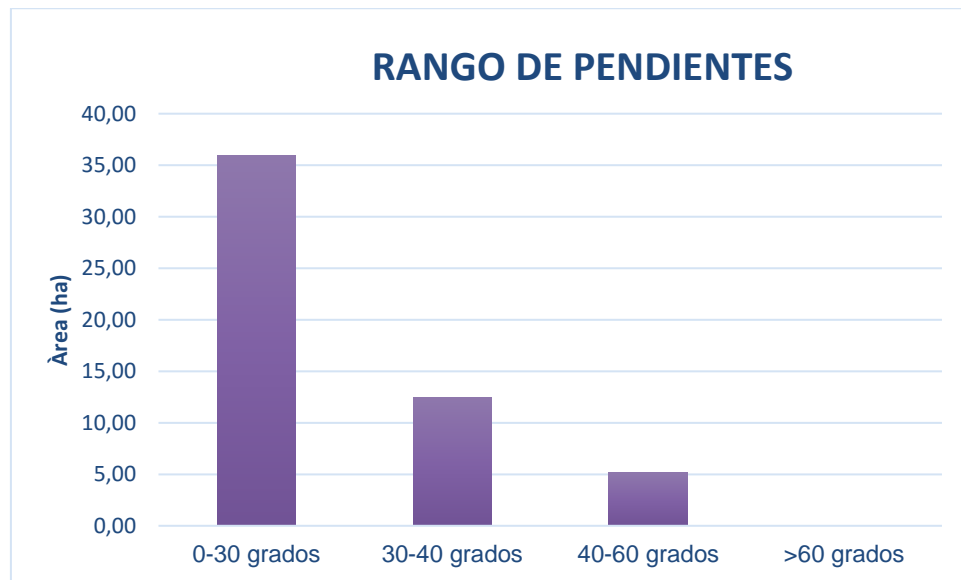


Figura 59. Histograma Rango de pendiente.
Fuente: Este estudio.

En la Figura 59, se observa que el área de estudio se caracteriza por presentar pendientes bajas de 0-30° en un 67,08%, seguido de pendientes medias en un 23,28%, y por último pendientes altas entre un 0 a 9%.

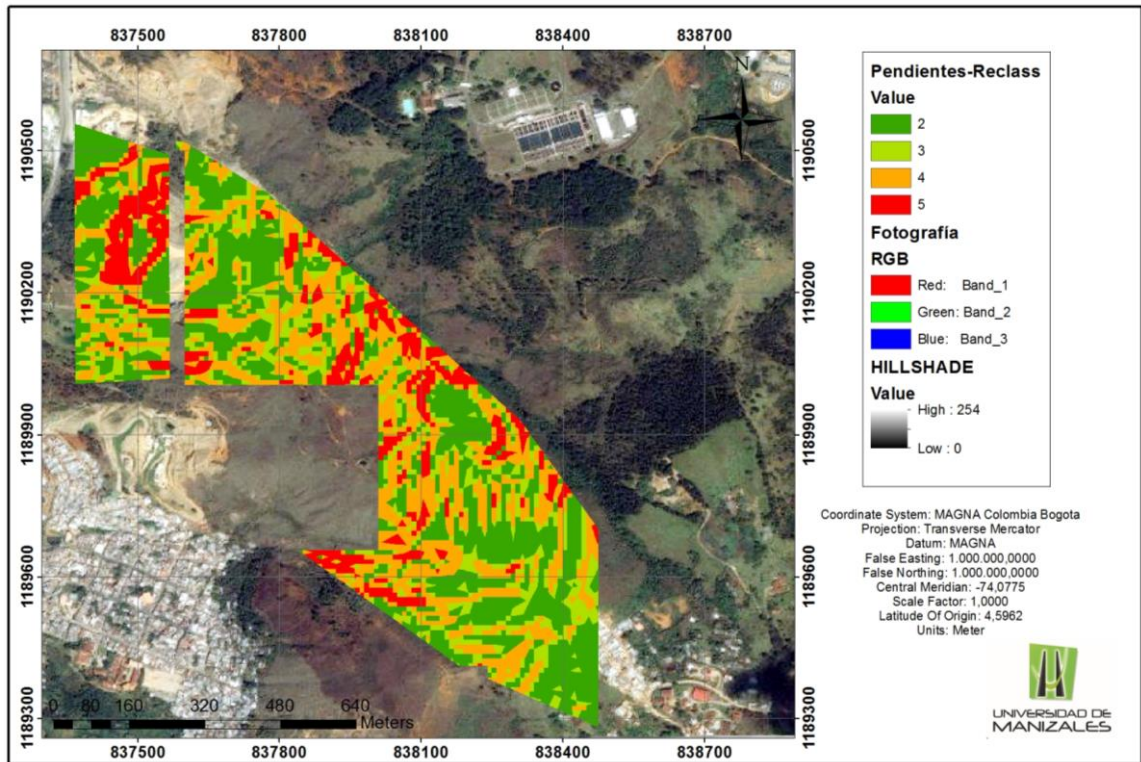


Figura 60. Mapa rango de pendiente.
Fuente: Este estudio.

10.1.1.4 USOS DEL SUELO

La génesis de los suelos parte de un estado litológico y su evolución los lleva a un momento en el tiempo en el que tendrán una capacidad y respuesta ante la dinámica de las coberturas vegetales, la incidencia del clima y la intervención humana. Para inferir la capacidad y respuesta, debe ser orientada a la posibilidad de deterioro y movimientos del suelo y estimar que tan susceptible o predispuesto este a movimientos en masa (SGC, 2013).

Para un mejor entendimiento en las áreas estudiadas, se delimitan las áreas cuyo fin ha sido otorgado por Canteras de Colombia, considerando que no se realizó un análisis detallado o una metodología adecuada como lo hace el ente encargado para el país como lo es el Instituto Agustín Codazzi (IGAC), donde se consideran variables físicas como: textura, estructura, consistencia, materia orgánica, profundidad total de perfil de suelos, tipo de arcilla, capacidad de almacenamiento o retención de agua del suelo, discontinuidad textural, drenaje natural, taxonomía y erosión actual, variables que representan mejor el estado o la susceptibilidad de los suelos a los movimientos en masa.

Los usos del suelo que se estén desarrollando actualmente en el área de estudio permite realizar un estudio detallado y preciso de la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre el terreno, los usos del suelo que se desarrollan en la zona son:

Tabla 21: Evaluación de usos del suelo.

Factores	Tipo	Área (m2)	Área (ha)	Porcentaje (%)
Área de Protección	A1	50751,01	5,08	9,47
Área Intervenido y Regeneradas	A2	10137,70	1,01	1,89
Área de Depósitos de Estériles en Revegetación	A3	46127,50	4,61	8,60
Área Depósitos de Estériles Activa	A4	13495,25	1,35	2,52
Área intervenida - infraestructura minera	A5	31881,63	3,19	5,95
Área a Intervenir con la operación Minera	A6	383728,39	38,37	71,57
Total		536121,47	53,61	100

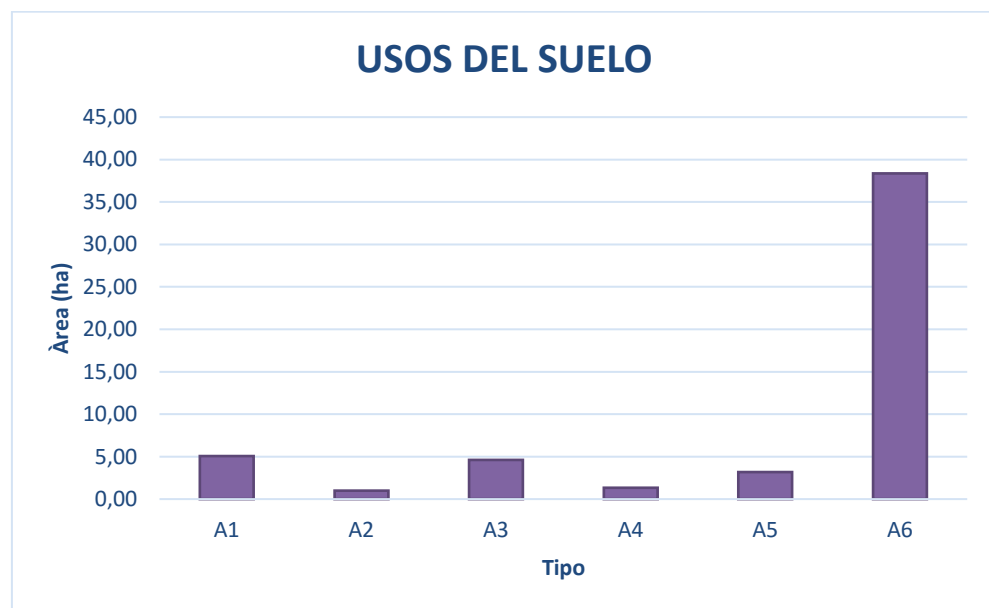


Figura 61. Histograma Usos del Suelo.
Fuente: Este estudio.

En la Figura 62, se puede observar que el Área a Intervenir con la operación Minera es la zona que presenta mayor área abarcando un 71.57% de todo el territorio, el resto de las zonas abarcan un territorio entre el 9% al 1% siendo el de menor área las zonas intervenidas y regeneradas con 1.01 Ha.

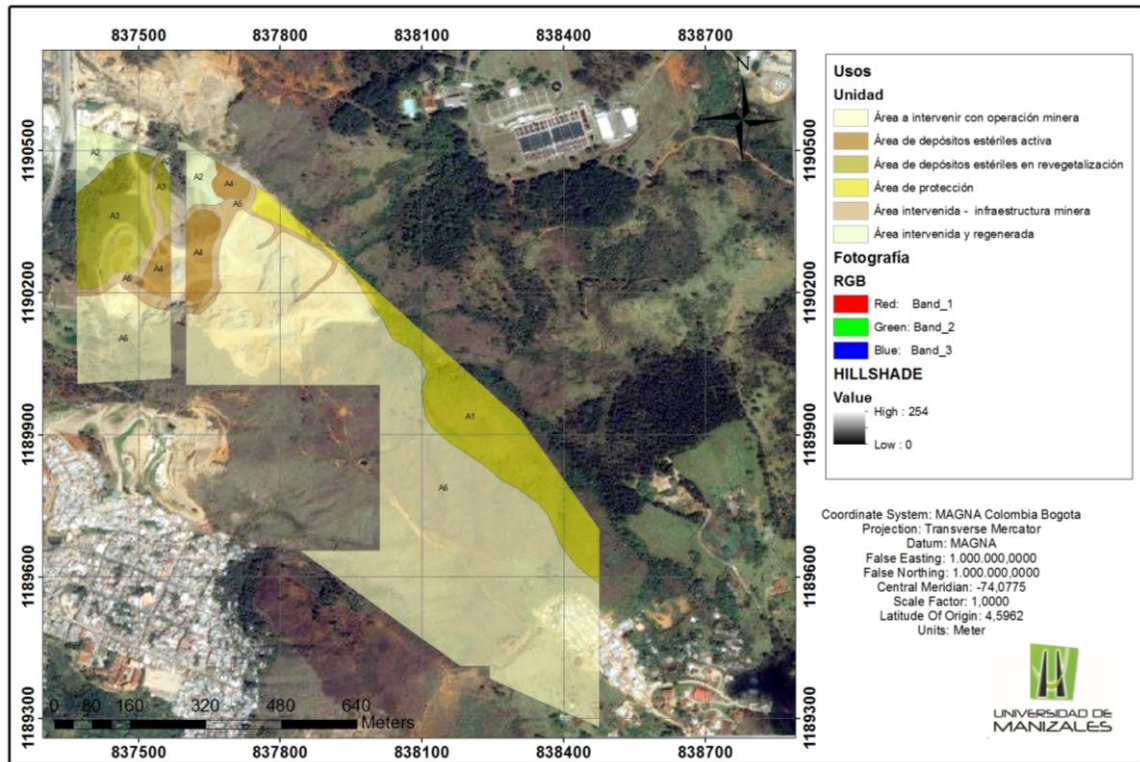


Figura 62. Mapa Usos del Suelo.
Fuente: Este estudio.

10.2 SUSCEPTIBILIDAD

En este estudio se consideró incluir la geología, geomorfología, pendientes y usos del suelo, cuya relación define los valores de la susceptibilidad. Esta relación es expresada en valores ponderados los cuales se derivan en la definición de los temáticos utilizados para este análisis final, sin embargo la preferencia más importante para el análisis de susceptibilidad está fuertemente ligada a las pendientes y la geología, ya que son las variables que representan la dinámica, su evolución a través del tiempo geológico y de manera implícita determina la naturaleza y las propiedades de los materiales (suelo y roca) de las cuales se puede predecir, el comportamiento, estado y forma.

Después de aplicar la metodología del álgebra de mapas explicada anteriormente se obtuvo el mapa de susceptibilidad que se presenta en la siguiente imagen, representando por rangos la clasificación de la susceptibilidad como: muy baja, baja, media, alta y muy alta.

Susceptibilidad muy baja: se consideran zonas suavemente inclinadas, con valores entre 4 y 6, donde su composición litológica corresponde a rocas con resistencia extremadamente dura a dura. En estas áreas se pueden encontrar

arbustales y algún medio de preservación forestal, lo cual se considera como medio de preservación del suelo y no genera susceptibilidad a movimientos en masa.

Susceptibilidad baja: se consideran zonas de ladera con pendientes inclinadas, con rangos entre 7 y 9, de composición litológica de rocas ígneas pertenecientes a la Dunita de Medellín que se consideran de resistencia extremadamente dura a dura, con espesores de suelos residuales superiores a los 5 m, que en gran medida condicionan la posibilidad de ocurrencia de procesos de movimientos en masa tales como rotacionales, traslacionales, presencia de procesos erosivos como surcos y cárcavas.

Susceptibilidad media: se consideran zonas de ladera muy inclinadas a abruptas, con valores de 9 a 13, litológicamente se expresan en rocas ígneas y metamórficas con resistencia dura, con generación de espesos horizontes de suelos residuales, los cuales condicionan la ocurrencia de movimientos en masa tales como rotacionales, traslacionales, presencia de procesos erosivos como surcos, cárcavas y áreas utilizadas en la explotación minera con inestabilidad generada por procesos de extracción de material o por procesos erosivos de baja intensidad.

Susceptibilidad alta: se consideran zonas de ladera abruptas a escarpadas con rangos de valores entre 14 y 17, litológicamente se originan en rocas que han sido altamente fracturadas, rocas duras con espesores grandes de suelo residual, o con presencia de depósitos coluviales de poca extensión; zonas propicias para la generación de procesos tipo flujo, caída de suelos y de rocas, presentando procesos erosivos de surcos y cárcavas, además de mal uso del suelo como la extracción de material de minería.

Susceptibilidad muy alta: se consideran zonas de ladera muy escarpadas, con valores entre 18 a 20, en cuerpos de roca muy afectados estructuralmente, a pesar de considerarse rocas con resistencia muy alta, están han sido afectadas intensamente por procesos dinámicos y químicos en la generación de suelos residuales y presencia de depósitos coluviales de poca extensión, zonas propicias para la generación de procesos tipo flujo, caída de suelos y de rocas, presentando procesos erosivos de surcos y cárcavas, además de mal uso del suelo como la extracción de material de minería.

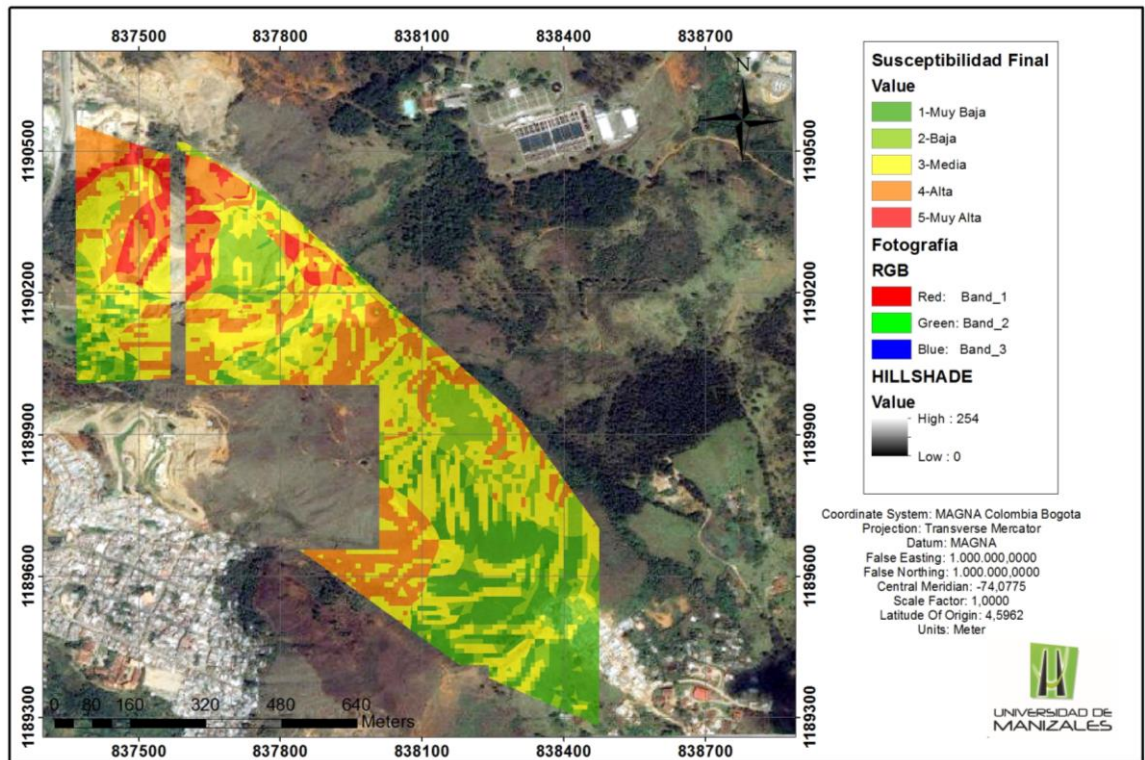


Figura 63. Mapa Susceptibilidad por Movimiento en Masa.
Fuente: Este estudio.

Las susceptibilidades altas en la zona de estudio corresponden principalmente a las zonas donde se encuentra formaciones de flujos de escombros, pendientes altas y áreas a intervenir con la operación minera, y las zonas que presentan los más bajos rangos de susceptibilidad son las zonas con pendientes bajas donde se encuentran formaciones geológicas de la Dunita de Medellín.

11. CONCLUSIONES

- Considerando el área a desarrollar, el presente estudio involucró información con las características propias de herramientas SIG para el manejo, procesamiento, análisis y publicación de la información geoespacial con que se contó en las diferentes temáticas plasmadas en el documento final.
- Las susceptibilidades altas en la zona de estudio corresponden principalmente a las zonas donde se encuentran formaciones de flujos de escombros y/o lodos, y las zonas con pendientes altas a muy altas.
- Se obtuvieron mapas temáticos para desarrollar el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa, a los cuales se les asignaron valores de peso de manera subjetiva, con el fin de observar las zonas con menor riesgo en movimientos en masa para la depositación del material estéril.
- El principal uso del suelo en la zona de estudio corresponde al área a intervenir con la operación minera. La cual presenta una susceptibilidad media a movimientos en masa.
- Los estudios de susceptibilidad a posibles fenómenos geológicos como lo son los movimientos en masa nos permiten estar un paso adelante en gestión del riesgo, se identifican sectores idóneos para que se presenten dichos eventos y de esta manera estamos generando conciencia a posibles desastres, igualmente contar con una organización más detallada de una zona o región.
- Los SIG nos permiten modelar infinidad de variables, ya que estos pueden procesar gran cantidad de información siendo una herramienta de alto valor que nos dejara plasmar en un solo mapa las características e información de varias temáticas.
- De los procesos estudiados y analizados, se determina que la remoción de la capa vegetal, es una causa de erosión, que favorecen la ocurrencia de fenómenos naturales como movimientos en masa. Por estas razones, se concluye que, la dinámica del uso del suelo es un factor detonante a la ocurrencia de procesos denudativos.

12.RECOMENDACIONES

- Se recomienda contar hoy en día con herramientas de apoyo visual para la toma de decisiones, tales como Sistemas de Información Geográfica que permiten al profesional o usuario, entender la dinámica de un terreno específico a través del tiempo, con información concreta y actualizada, que de una u otra forma puede ser manipulada de acuerdo al interés requerido, sirviendo de apoyo para la toma de decisiones, como valor agregado a los diferentes componentes geoesféricos requeridos por la industria ante entes gubernamentales donde se demuestre un plan de monitoreo y mitigación del riesgo que podría generarse ante cualquier desequilibrio natural.
- Actualmente la cartografía digital juega un papel muy importante en la era tecnológica, lo cual los Sistemas de Información Geográfica sirven como una carta de navegación para estudiar, analizar y entender cualquier proceso o fenómeno natural que requiera ser profundizado, de tal manera que la adquisición de esta información digital sea actual, georeferenciada y confiable con el fin de homologar la información siendo de esta manera punto de partida para la realización de cualquier estudio puntual.
- Los Sistemas de Información Geográfica son vitales para la realización de metodologías donde se requieran análisis de vulnerabilidad, susceptibilidad y riesgo a movimientos en masa, cabe resaltar que una buena comprensión del producto final, requiere de insumos digitales con mayor detalle, ya que son valores agregados con mayor exactitud al momento de determinar áreas vulnerables a fenómenos naturales a los cuales se exponen hoy en día las poblaciones con mayores factibilidades de desastres naturales.
- Por medio del análisis de susceptibilidad de movimientos en masa de un área determinada, se adquiere mayor información sobre el riesgo al momento de realizar cualquier obra constructiva considerando que con esta información se obtiene conocimiento para el ordenamiento del territorio, zonas de riesgo o con pronóstico de amenaza puntual por deslizamientos para alertas tempranas.
- Al momento de realizar el procesamiento de la susceptibilidad por movimientos en masa, es de considerar un mayor área de trabajo que permita obtener información con mayor precisión y calidad en la información adquirida, ya que por ser este un análisis para un área pequeña, requiere de correcciones topológicas, suavización de las capas raster y la utilización de detonantes como sismos, fallas y precipitación.

13. BIBLIOGRAFÍA

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRA. Microzonificación Sísmica Detallada de los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La estrella, Caldas y Envigado. Consorcio Microzonificación. Medellín, 2006, p. 1-745.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation, ASTM D5777-00. West Conshohoken PA: ASTM International, 2011.

CARVAJAL, José e INGEOMINAS. PROPUESTA DE ESTANDARIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA EN COLOMBIA. Bogotá, 2011.

CARVAJAL, José; et al. PROPUESTA METODOLÓGICA SISTEMÁTICA PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS ANALÍTICOS APLICADOS A LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA. Escala 1:100.000. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, 2012.

CRUDEN D.M.; VARNES D.J. 1996. Landslide types and processes. In Turner A.K; Shuster R.L. (ed). Landslides: Investigation and Mitigation. Transp. Res. Board, Special Report 247, 36-75.

Diseño para el manejo hidráulico, geotécnico y ambiental de un lleno de estériles en la empresa Canteras de Colombia – de la compañía argos s.a. (2012)

EASTMAN, R. (1999). Evaluation multicriterio and GIS. En Longley, P., Goodchild, M.F., Maquire, D.J., & Rhind, D. ed. Geographical Information Systems (2), 493-502.

GOMEZ CHAMORRO N.; OSORIO BETANCUR Y. & SALAZAR TAMAYO J.A (2013) Sig para determinar la susceptibilidad a movimientos en masa en la cuenca del río Campoalegre. Trabajo de grado (Especialistas en Sistemas de Información Geográfica), Manizales (Colombia): Universidad de Manizales, Facultad de Ciencias e ingeniería. 16-17-18 p.

HERRERA HEBERT J. (2006) Métodos de minería a cielo abierto. Universidad Politécnica de Madrid, escuela técnica superior de ingenieros de minas.

IDEAR INGENIERIA, DISEÑOS Y EJECUCIÓN DE PROYECTOS S.A.S (2015) Diseño Retroleno de Pit, dentro de los títulos mineros 4381 y 0788, Canteras de Colombia S.A.S.

INGEOMINAS. 2001. Evaluación del Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa. Guía Metodológica, 29-49. Bogotá.

NAVARRO VIDAL J. (2012) *“SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA DE MOVIMIENTOS DE LADERA MEDIANTE S.I.G. EN EL MUNICIPIO DE BERLÍN, EL SALVADOR”*. Trabajo de grado (MASTER: TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA), Berlín (El Salvador): UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID, Facultad de Ciencias e ingeniería. 26 p.

RODRIGUEZ, S. Estado del Arte de los Métodos de Zonificación de la Susceptibilidad, Amenaza y Riesgo por proceso de Movimientos en Masa en Laderas, Universidad de Caldas, Manizales, 2005.

SASAKI, Yutaka. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. En: Geophysical Prospecting 40, 1992, p. 453-463.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Documento metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:100.000. Bogotá, 2013, p. 1-158.

SUÁREZ, J. Deslizamientos: análisis geotécnico. Tomos I y II. Medellín. Disponible en página Web: www.erosion.com.co.

REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMORESISTENTE. NSR10. Bogotá, 2010.

Varnes, D. J. 1978. "*Slope movement types and processes*". In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33

ZOHDY, Adel. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner soundings curves. Geophysicist. V. 56. 1989.