



S.I. SERINCO LTDA.

SERVICIOS INTEGRALES DE INGENIERÍA, GEOTECNIA Y CONSTRUCCIÓN LIMITADA

MAS DE 30 AÑOS CIMENTANDO EL DESARROLLO DE LOS PROYECTOS Y OBRAS DE INGENIERIA

SOLUCIONES GEOTECNICAS Y DE INGENIERIA CONFIABLES

**INFORME DE AVANCE No 2: COMPONENTES EXPLORACIÓN Y
CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA, MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO Y
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD - SECTOR LA ESPERANZA**

PROYECTO
**ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA REALIZAR OBRAS DE MITIGACIÓN DE
DESLIZAMIENTOS UBICADOS EN: LA URBANIZACIÓN MIRADOR DE LA
ESPERANZA, EL SECTOR LA FUENTE Y QUEBRADA BECERRAS KILÓMETRO 4
VIA DUITAMA CHARALÁ - MUNICIPIO DE DUITAMA**

DICIEMBRE DE 2023

PROYECTO
ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA REALIZAR OBRAS DE MITIGACIÓN DE
DESLIZAMIENTOS UBICADOS EN: LA URBANIZACIÓN MIRADOR DE LA
ESPERANZA, EL SECTOR LA FUENTE Y QUEBRADA BECERRAS KILÓMETRO 4
VIA DUITAMA CHARALÁ - MUNICIPIO DE DUITAMA

INFORME DE AVANCE No 2: COMPONENTES EXPLORACIÓN Y
CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA, MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO Y
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD - SECTOR LA ESPERANZA

S.I. SERINCO LTDA
SERVICIOS INTEGRALES DE INGENIERÍA, GEOTECNIA Y CONSTRUCCIÓN LIMITADA
ÁREA: GEOTECNIA E INGENIERIA
SOLUCIONES GEOTECNICAS Y DE INGENIERIA CONFIABLES
MAS DE 30 AÑOS CIMENTANDO EL DESARROLLO DE LOS PROYECTOS Y OBRAS DE INGENIERIA

CLIENTE SOLICITANTE: ALCALDÍA MUNICIPAL DE DUITAMA

DUITAMA - BOYACÁ

DICIEMBRE DE 2023

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	6
1. EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL ÁREA.....	7
1.1. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DETALLADAS PARA EL ÁREA	7
1.2. EXPLORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO MEDIANTE PERFORACIONES.....	9
1.3. CARACTERIZACIÓN GEOTECNICA DEL MACIZO ROCOSO MEDIANTE ENSAYOS EN LABORATORIO	13
1.4. RESULTADOS DE LA EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL PERFIL DEL ÁREA DEL PROYECTO.	13
1.4.1. DESCRIPCIÓN DEL PERFIL DEL MACIZO ROCOSO DEL ÁREA DEL PROYECTO	13
1.5. NIVEL PIEZOMÉTRICO Y DE AGUAS FREÁTICAS EN EL AREA DE FUNDACION DEL PROYECTO.....	14
1.6. ESTUDIO GEO-MECÁNICO DEL MACIZO ROCOSO	14
1.6.1. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MATRIZ ROCOSA.....	14
1.6.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MATRIZ ROCOSA	15
Ensayo de compresión simple	15
Ensayos de índice manual de resistencia de roca en campo (ISRM, 1981):.....	16
Ensayo de carga puntual.....	18
Martillo de Schmidt.....	20
1.6.3. CARACTERIZACIÓN DE DISCONTINUIDADES.....	22
1.6.4. CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO SMR.....	30
Clasificación geomecánica RMR	33
SMR y factores (f_1 , f_2 , f_3 y f_4) – Análisis para perfil A -A '	35
1.6.5. GSI (GEOLOGICAL STRENGTH ÍNDEX) ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA, HOEK ET AL (1995).	36
1.7. PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO.....	37
2. MODELO GEOLÓGICO - GEOTÉCNICO.....	39
3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD	42
3.1. CRITERIOS PARA EVALUAR LA ESTABILIDAD GENERAL DEL TALUD	42
3.1.1. CONSIDERACIONES SOBRE EL NIVEL FREÁTICO O TABLA DE AGUA.....	44
3.1.2. PARÁMETROS SÍSMICOS:	44
3.2. MODELAMIENTO EN SOFTWARE.....	45
3.2.1. MODELAMIENTO DEL ESTADO ACTUAL DEL TALUD.....	45
3.3. ANÁLISIS CINEMÁTICO.....	48
3.3.1. DESLIZAMIENTO POR FALLA PLANAR	49
3.3.2. DESLIZAMIENTO POR CUÑAS	50
3.3.3. VOLCAMIENTO DIRECTO.....	51
3.3.4. VOLCAMIENTO POR FLEXURA	52
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de los apiques de exploración geotécnica en el área del proyecto.	9
Figura 2. Correlación estratigráfica de apiques realizados en campo.	12
Figura 3. Perfil promedio del macizo rocoso ubicado en el sector La Fuente.....	13
Figura 4. Martillo Schmidt o esclerómetro, empleado para toma de datos de resistencia a la compresión. .	21
Figura 5. Resultados gráficos de ensayo con martillo de Schmidt en labores de campo.....	22
Figura 6. Tipos de rugosidades en discontinuidades.	24
Figura 7. Representación de datos en software Dips. Distribución de concentración de polos.	27
Figura 8. Familias de discontinuidades identificadas.....	28
Figura 9. Identificación en campo de propiedades físicas de las discontinuidades.....	29
Figura 10. Rugosidad de las discontinuidades analizadas, valor promedio de JRC = 11.....	29
Figura 11. Parámetros de resistencia de juntas para análisis de deslizamiento Planar (planos de estratificación) Realizado en el software RocPlane de Rocscience.	30
Figura 12. Clases de estabilidad mediante la metodología SMR. Tomado de Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.	32
Figura 13. Relación de índice SMR con el tipo de falla para taludes. Tomado de Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.	32
Figura 14. Corte para el análisis cinemático del talud y clasificación SMR del macizo.	33
Figura 15. Clasificación del macizo rocoso GSI.	37
Figura 16. Mapa de planta del modelo geológico geotécnico del sector “Mirador La Esperanza”.	39
Figura 17. Corte A – A’. Perfil del Modelo geológico geotécnico del sector “Mirador La Esperanza”.	40
Figura 18. Corte para el análisis de estabilidad general del talud.....	43
Figura 19. Perfil geológico - geotécnico del talud en su condición actual.	43
Figura 20. Análisis de estabilidad del talud general, condición actual, análisis estático.	46
Figura 21. Análisis de estabilidad del talud general, condición actual, análisis pseudoestático.	47
Figura 22. Análisis de estabilidad de bloques por deslizamiento Planar (planos críticos) bajo condiciones estáticas.....	47
Figura 23. Análisis de estabilidad de bloques por deslizamiento planar (Planos críticos) bajo condiciones sísmicas (análisis pseudoestático).....	48
Figura 24. Análisis cinemático, deslizamiento por falla planar.....	49
Figura 25. Análisis cinemático, deslizamiento por cuñas.	50
Figura 26. Análisis cinemático, deslizamiento por volcamiento directo.....	51
Figura 27. Análisis cinemático, deslizamiento por volcamiento flexural.....	52

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1 y 2. Bloques sueltos producto de la erosión.	8
Fotografía 3 y 4. Cuñas e interacción entre discontinuidades evidenciadas en el macizo rocoso.....	8
Fotografías 5, 6, 7, 8, 9. Registro fotográfico de pruebas de exploración del macizo rocoso utilizando equipo por el método de percusión en el área del proyecto y visualización de perfil rocoso.	11
Fotografía 10, 11, 12 y 13. Fotografías de las muestras del macizo rocoso y ensayo de resistencia a la compresión simple.....	16
Fotografías 14 y 15. Fotografías de caracterización manual de muestras para determinar rango de resistencia.....	18
Fotografía 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 y 24. Ensayo de carga por punta en muestras de roca.	20
Fotografía 25 y 26. Toma de datos de resistencia a la compresión en campo, empleando martillo de Schmidt o esclerómetro.	21

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Resultado de laboratorio. Ensayo de propiedades físicas compresión simple.	15
Tabla 2. Resultado de laboratorio. Ensayo de compresión simple.	16
Tabla 3. Valores de resistencia para Ensayos de Índice manual de resistencia de roca en campo (ISRM, 1981)	17
Tabla 4. Valores de resistencia de las muestras, de acuerdo a la caracterización manual (ISRM, 1981).....	17
Tabla 5. Relación de resultados de resistencia de la roca.	22
Tabla 6. Valores para clasificación de discontinuidades según el espaciado.	23
Tabla 7. Valores de longitud de discontinuidades para clasificación en RMR.	23
Tabla 8. Descripción de las filtraciones en las discontinuidades.	24
Tabla 9. Parámetros de caracterización de las diaclasas.	25
Tabla 10. Datos tomados en campo. Características de discontinuidades.....	26
Tabla 11. Factor de ajuste de clasificación SMR (Romana, 1985).	31
Tabla 12. Clasificación del macizo rocoso RMR.	33
Tabla 13. Clasificación de macizo rocoso RMR, parámetros mecánicos sugeridos.	35
Tabla 14. Consolidado para determinar el SMR de la ladera representada por el perfil A – A'. (El SMR se hace para las condiciones de falla planar y falla por volcamiento).....	36
Tabla 15. Clases de estabilidad SMR (Romana, 1985).	36
Tabla 16. Clases de estabilidad SMR (Romana, 1985).	36
Tabla 17. Determinación de los parámetros de resistencia del macizo rocoso.	38

INTRODUCCIÓN

Este informe contiene el avance N°2 del proyecto “*ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA REALIZAR OBRAS DE MITIGACIÓN DEL DESLIZAMIENTO UBICADO EN LA URBANIZACIÓN MIRADOR DE LA ESPERANZA*” en el municipio de Duitama.

En el presente informe se incluye lo acordado para el segundo documento técnico de avance que contiene los siguientes componentes: Exploración del subsuelo, ensayos de laboratorio (Caracterización), modelo geológico geotécnico. Adicionalmente se incluye el avance a nivel de análisis de estabilidad y cinemático del talud en su estado actual. Se anexan los componentes citados y requeridos para el sustento respectivo de los mismos.

La exploración y caracterización comprende varias actividades realizadas en campo y laboratorio para identificar las propiedades físicas y mecánicas del subsuelo. Para este caso, las actividades fueron enfocadas con base en el material del talud que corresponde a roca; por lo tanto, la exploración se llevó a cabo en el ámbito de la cinemática y por ello se tienen apiques de baja profundidad para el muestreo superficial y subsuperficial y el levantamiento y estudio de las discontinuidades para el entendimiento general del macizo rocoso. Se reconoce como esencial llevar a cabo una exploración y descripción adecuada de los materiales para poder establecer el modelo geológico - geotécnico del lugar del proyecto. A partir del modelo resultante, se realizó el análisis de estabilidad del talud.

El estudio se realizó a solicitud de la *ALCALDÍA MUNICIPAL DE DUITAMA*.

1. EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL ÁREA

El perfil del macizo rocoso del proyecto se caracterizó con base en los tres pilares de investigación en geotecnia; mediante la exploración directa con sondeos o perforaciones, la experimentación o caracterización a través de pruebas o ensayos en campo y laboratorio y el análisis de los resultados obtenidos; para establecer el modelo geológico – geotécnico del macizo rocoso de fundación o implantación.

1.1. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DETALLADAS PARA EL ÁREA

Aspectos generales			
Topografía	Inclinada escarpada.	Formación geológica/Suelos	Conejo (Kscn)
Cobertura:	Pastos, arbustos enanos y árboles de considerable altura.		
Suelo o roca de fundación	Arenisca de grano medio, de coloración amarillo crema, de resistencia media; y baja permeabilidad, expansión volumétrica y deformabilidad.	Descripción del macizo rocoso	Competente.
Drenaje			
Drenajes permanentes cercanos	--	Distancia/Posición	--
Drenajes intermitentes cercanos	--	Distancia/Posición	--
Observaciones	--		
Inconvenientes geotécnicos existentes en el área			
Fenómenos erosivos	Se evidencia erosión en las caras expuestas del macizo rocoso por materiales poco competentes como arcillolitas.	Estado / Ubicación	Los procesos erosivos que se identificaron, presentan condición activa con severidad alta.
Movimientos en masa	Caída de bloques, deslizamiento de material poco competente.	Estado / Ubicación	Los movimientos que se identificaron, presentan condición activa con severidad alta.
Taludes o cortes	Talud antrópico con inclinación promedio de aproximadamente 50° a excepción de la parte de los movimientos activos en donde se presentan	Distancia/Posición	General.

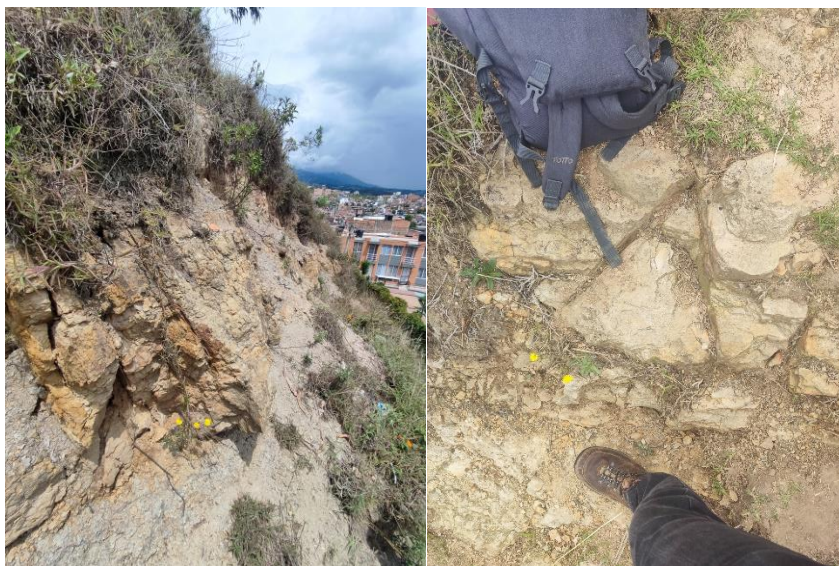
	inclinaciones de 80° – 90°.		
--	-----------------------------	--	--

En la parte central del talud se observó meteorización diferencial que se caracteriza por erosionar los estratos de la formación cuyos componentes son más friables, quedando así los materiales más resistentes colgando. Se puede concluir que para la construcción de la urbanización se realiza un corte en el macizo exponiéndolo a la meteorización diferenciada de capas arcillosas que desaparecen y dejan suspendidos bloques de arenisca que también influenciados por la disposición estructural se desprenden y se convierten en un factor crítico para la contención de caída de rocas, que se evidencia varían en tamaño. (Fotografía 1 y 2).



Fotografía 1 y 2. Bloques sueltos producto de la erosión.

En la extensión de talud que se evalúa es visible la presencia de una familia de diaclasas con ángulos de buzamiento superiores a 70°, que forman cuñas que se presentan en forma de rotura o separación en la que una porción de la arenisca queda atrapada entre dos superficies de fractura, creando un espacio triangular o en forma de cuña entre las superficies de fractura, como se muestra en las fotografías 3 y 4.



Fotografía 3 y 4. Cuñas e interacción entre discontinuidades evidenciadas en el macizo rocoso.

Dentro de la exploración geotécnica y los hallazgos; otro factor de riesgo es la influencia de los árboles, ya que sus raíces pueden contribuir tanto a la cohesión del suelo como a tensiones que podrían desencadenar más caídas de material, además en este escenario, los eucaliptos en la parte superior de la ladera alcanzan tamaños que podrían al caer afectar las edificaciones.

1.2. EXPLORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO MEDIANTE PERFORACIONES

Los criterios establecidos para definir el número y profundidad de los sondeos de exploración del macizo fueron la tipología y estructura del proyecto, los lineamientos dados en el *título H* de la norma *NSR-10* y la experiencia del consultor. Se efectuaron simultáneamente los ensayos de resistencia a la penetración dinámica en campo tipo DCPT. En la figura 1 se presenta la ubicación de los sondeos de exploración sobre la planta topográfica del área de proyecto.



Figura 1. Ubicación de los apiques de exploración geotécnica en el área del proyecto.





Fotografías 5, 6, 7, 8, 9 . Registro fotográfico de pruebas de exploración del macizo rocoso utilizando equipo por el método de percusión en el área del proyecto y visualización de perfil rocoso.

En la tabla siguiente se resume el programa de exploración y ensayos dinámicos de campo ejecutados:

Numero de sondeos	0.0 (Cero)	Profundidad promedio de investigación	2.0 m
Numero de apiques	4.0 (Cuatro)		
Método de perforación	Percusión con ensayos de penetración dinámica	Equipo	Mecánico combinado
Ensayo SPT	No	Ensayo DCPT	Sí
Recuperación de muestras alteradas	No	Recuperación de muestras inalteradas o testigos de roca, (núcleos) y rocas superficiales	Sí
Recuperación de muestras semi-alteradas con Split Spoon	No	Motivo del fin de la perforación o exploración en profundidad	Rechazo a la penetración dinámica DCPT en el macizo rocoso.

Con base en la exploración realizada fue posible conocer las características estratigráficas y composicionales detalladas del perfil del macizo, además se ejecutaron ensayos directos de resistencia del macizo en campo y se realizó un muestreo representativo del mismo, el cual permitió conocer las propiedades índices, de resistencia al corte y parámetros geomecánicos mediante ensayos de caracterización geotécnica en laboratorio.

Cada uno de los registros estratigráficos tomados en las perforaciones de exploración realizadas, se correlacionaron teniendo en cuenta las características litológicas y de propiedades geomecánicas.

En la figura 3 se presenta el perfil promedio obtenido a partir de la correlación estratigráfica de los registros de los apiques 1 a 4. La figura sintetiza y resume la información extractada mediante ensayos en campo y laboratorio para cada uno de los apiques de exploración realizados y las capas estratigráficas determinadas o diferenciadas. Esta figura muestra de forma general, en escala, los valores de la resistencia a la compresión simple, a carga por punta, el peso unitario y la resistencia a la penetración dinámica en campo tipo DCPT; escalas que están relacionadas contra la profundidad de exploración. Las figuras Nos 1 a 4 del *Anexo No 1* muestran los registros detallados de las perforaciones individuales para cada uno de los apiques de exploración. A partir de los diferentes registros, se realiza la correlación correspondiente que se observa en la figura 2.

El nivel de referencia para la elaboración de los perfiles descritos, corresponde al nivel superficial de la topografía actual del terreno, en cada uno de los sitios puntuales de perforación.

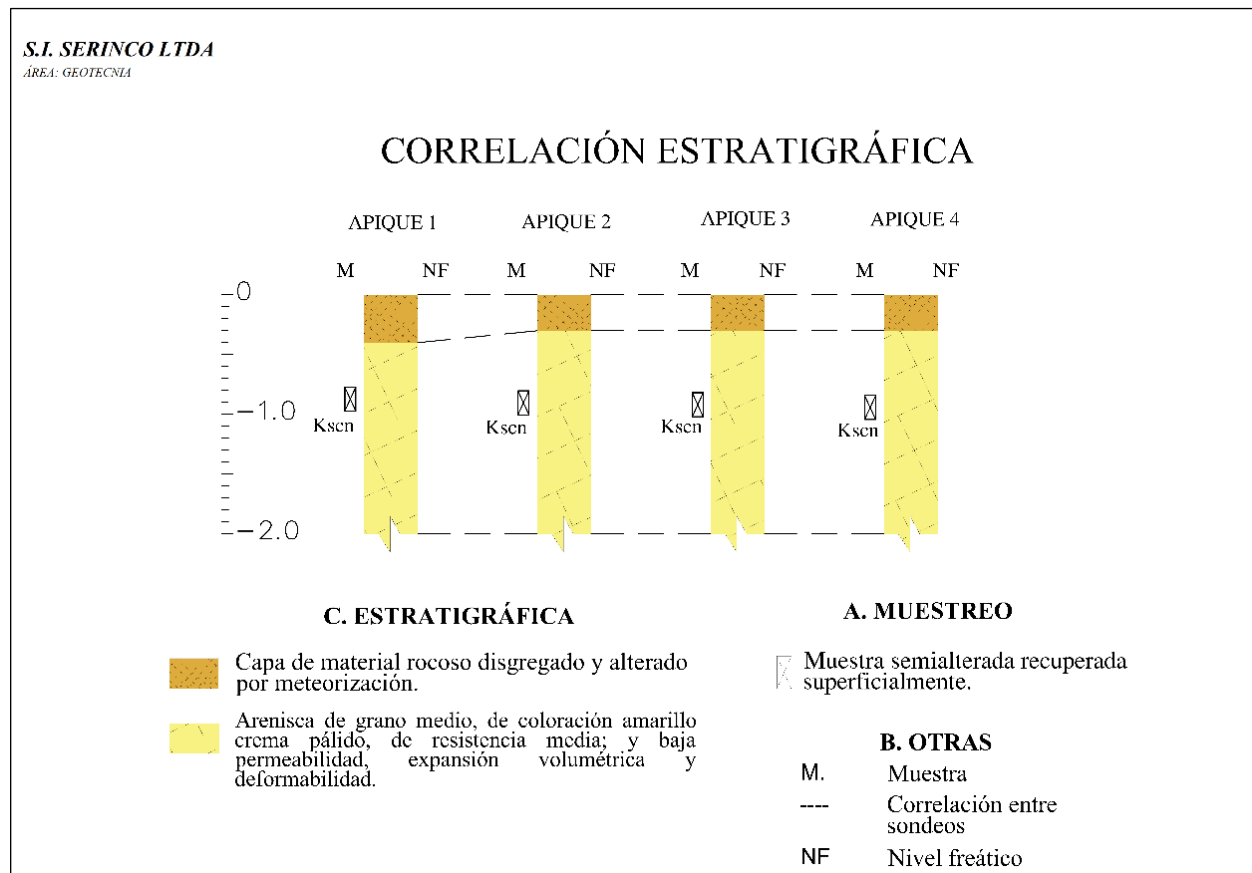


Figura 2. Correlación estratigráfica de apiques realizados en campo.



Figura 3. Perfil promedio del macizo rocoso ubicado en el sector La Fuente.

1.3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO MEDIANTE ENSAYOS EN LABORATORIO

Sobre el muestreo representativo de las capas del macizo rocoso, se practicó el programa de ensayos para la caracterización geotécnica que se describe en la tabla inferior.

Programa de ensayos de laboratorio			
Humedad Natural	Sí	Peso Unitario	Sí
Carga por punta	Sí	Tilt Test	Sí
Resistencia a la compresión	Sí	Otros	--

En el Anexo No. 2 del presente informe, se muestran los resultados detallados de los ensayos de caracterización en laboratorio para las muestras recuperadas en campo durante la exploración del perfil del macizo rocoso en el área del proyecto.

1.4. RESULTADOS DE LA EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL PERFIL DEL ÁREA DEL PROYECTO.

1.4.1. DESCRIPCIÓN DEL PERFIL DEL MACIZO ROCOSO DEL ÁREA DEL PROYECTO

El perfil del macizo rocoso está constituido por material tipo areniscas de color amarillo crema de cementación media, y meteorización alta para bloques superficiales; poco compresibles y con potencial expansivo muy bajo, de resistencia alta y densidad alta hacia profundidad; manifestando incluso rechazo a los ensayos de penetración dinámica DCPT.

<i>Grado de variabilidad estratigráfica horizontal</i>	<i>Grado de variabilidad estratigráfica vertical</i>
<i>Muy baja:</i> El perfil identificado es homogéneo en macizo rocoso sin cambios en litología y tendencias estructurales o cinemáticas en toda la extensión del predio.	<i>Baja:</i> El perfil identificado está compuesto de un macizo rocoso con cambios hacia la parte inferior del talud en litología con capas de bajos espesores de arcillolitas.
<i>Variabilidad en la coloración</i>	<i>Variabilidad en la clasificación (ISRM y GSI)</i>

<i>Baja:</i> El perfil de suelo presenta coloraciones amarillas crema y claras para las areniscas y grises claros para las intercalaciones de arcillolitas, a la vista no hay un cambio fuerte de tonalidades. El material más superficial presenta tonalidades naranjas en algunas zonas.	<i>Baja:</i> La totalidad de las muestras del macizo rocoso se clasifican como areniscas que presentan una resistencia de tipo R2.
<i>Observaciones:</i> --	

1.5. NIVEL PIEZOMÉTRICO Y DE AGUAS FREÁTICAS EN EL AREA DE FUNDACION DEL PROYECTO

Se identificó presencia de Nivel Freático	No	Presenta Distribución uniforme en el predio	N.A
Presenta tabla de agua estática	No	Profundidad del Agua Freática	N.A
Presenta tabla de agua confinada	No	Pérdida de Confinamiento	No
		Nivel Libre de aguas freáticas	No
Observaciones: Durante la exploración geotécnica no se identificó la presencia de aguas freáticas en ninguno los sondeos ejecutados. Debido a la composición arenosa del macizo rocoso, su estratificación a contrapendiente y el grado de fracturamiento de las rocas que lo componen; no se presentan niveles libres de aguas freáticas.			

1.6. ESTUDIO GEO-MECÁNICO DEL MACIZO ROCOSO

Los estudios geotécnicos, en este caso, la caracterización geo mecánica, se realiza con el fin de determinar las propiedades físicas y mecánicas del macizo rocoso, su comportamiento ante los incrementos de esfuerzos aplicados sobre éste en un momento dado, ya sea por el apoyo de obras civiles o el desconfinamiento y conformación de taludes artificiales.

Se realiza un detallado reconocimiento geológico, en el cual se efectúan pruebas de campo y mediciones de las características del macizo, tanto en la matriz rocosa como en las discontinuidades que conforman el macizo, y se complementa con ensayos de laboratorio a las muestras tomadas del área estudiada. El objetivo de esta caracterización es para la evaluación de la estabilidad del macizo, en estado actual y su comportamiento ante cortes y excavaciones, cuantificándola mediante factores de seguridad.

El compendio de pruebas de campo y laboratorio para materiales del macizo rocoso se presentan en el *Anexo No. 2*.

1.6.1. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MATRIZ ROCOSA

Se realizó la recolección de muestras del macizo rocoso, con el fin de realizar los ensayos de laboratorio requeridos para la identificación y cálculo de las propiedades físicas. Los resultados de estos ensayos pueden apreciarse en el *Anexo No.2*.

Tabla 1. Resultado de laboratorio. Ensayo de propiedades físicas compresión simple.

MUESTRA	ALTURA (cm)	LONGITUD DESPUES DEL REFRENTADO (cm)	LONGITUD DE LADOS (cm)		RELACIÓN H/D	PESO (g)	DENSIDAD O PESO UNITARIO (g/cm3)
			L1	L2			
MUESTRA DE ARENISCA #1	13.90	13.90	6.3	6.0	2.27	1052.5	2.01
MUESTRA DE ARENISCA #2	11.50	11.50	5.8	5.5	2.05	736.7	2.03
MUESTRA DE ARENISCA #3	12.00	12.00	5.6	5.3	2.20	710.8	1.99
MUESTRA DE ARENISCA #4	11.86	11.86	5.5	5.7	2.11	735.7	1.97

1.6.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MATRIZ ROCOSA

La estabilidad de los taludes artificiales y laderas adyacentes, depende de las condiciones estructurales en que se encuentre el macizo rocoso y de la relación que existe entre los esfuerzos generados en la roca y su resistencia

Ensayo de compresión simple

Uno de los parámetros fundamentales en la caracterización mecánica del macizo rocoso es la resistencia a la compresión simple, ya que permite estimar la curva envolvente de resistencia de la roca intacta, así como asociar la capacidad de la matriz rocosa a la hora de asumir esfuerzos. Este parámetro se vuelve aún más indispensable en el contexto de macizos cuya matriz rocosa es significativamente blanda, ya que la falla ante esfuerzos inducidos puede darse a través de dicha matriz pese que las condiciones cinemáticas puedan ser favorables. En el caso del área estudiada, las rocas de arenisca aflorantes son maduras y duras debido a la buena cementación que presentan; por tanto, son prioritarias para dicho ensayo.



Fotografía 10, 11, 12 y 13. Fotografías de las muestras del macizo rocoso y ensayo de resistencia a la compresión simple.

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos de compresión simple realizados

Tabla 2. Resultado de laboratorio. Ensayo de compresión simple.

Muestra	Carga absorbida (kg)	Resistencia a la compresión	
		kg/cm ²	MPa
Arenisca M1	3484	94.6	9.5
Arenisca M2	2162	68.7	6.9
Arenisca M3	1880	64.3	6.4
Arenisca M4	1570	50.4	5.0

Ensayos de índice manual de resistencia de roca en campo (ISRM, 1981):

Los ensayos manuales en campo son pruebas auxiliares, que permiten complementar y enriquecer los datos obtenidos en laboratorio, se trata de pruebas manuales con herramientas de uso común en trabajo de campo, que permiten aproximar el rango de resistencias que la matriz rocosa presenta en el lugar, y por su practicidad es posible levantar una buena base de datos del lugar estudiado, con el fin de complementar los ensayos de laboratorio.

A continuación, se presenta la tabla utilizada para la caracterización geotécnica de rocas por medio del ensayo de índice manual de resistencia de roca en campo (ISRM, 1981) y el resumen de resistencia de cada una de las muestras.

Tabla 3. Valores de resistencia para Ensayos de Índice manual de resistencia de roca en campo (ISRM, 1981)

Clase	Descripción	Identificación del campo	Valor aproximado de la resistencia a compresión simple	
			Mpa	Kg/cm²
R₀	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña	0.25 – 1.0	2.5 - 10
R₁	Roca muy blanda	Deleznable bajo golpes del martillo de geólogo, puede rayarse con una navaja. Se talla fácilmente con una navaja	1.0-5.0	10-50
R₂	Roca blanda	Puede rayarse con dificultad con la navaja, se pueden hacer marcas poco profundas golpeando fuertemente con la punta del martillo	5.0-25	50-250
R₃	Roca moderadamente dura	No se puede rayar con una navaja la muestra en mano, se puede romper con un golpe firme del martillo de geólogo, al impacto la punta del martillo indenta hasta 5 mm.	25-50	250-500
R₄	Roca dura	Se necesita más de un golpe con el martillo de geólogo para romper la muestra, especímenes sostenidos en la mano se rompe con un simple golpe de martillo	50-100	500-1000
R₅	Roca muy dura	Se necesita muchos golpes con el martillo de geólogo para romper la muestra.	100-250	1000-2500
R₆	Roca extremadamente dura	El martillo produce solamente descarrillado de la muestra, sonido metálico de golpe. Solo saltan esquirlas de roca.	> 250	> 2500

Tabla 4. Valores de resistencia de las muestras, de acuerdo a la caracterización manual (ISRM, 1981)

Descripción	Resistencia ISRM 1981	Mpa
Muestras 1	R2	5 a 25
Muestras 2	R3	25 a 50
Muestras 3	R2	5 a 25
Muestras 4	R3	25 a 50
Muestras 5	R3	25 a 50
Muestras 6	R2	5 a 25
Muestras 7	R2	5 a 25
Muestras 8	R2	5 a 25
Muestras 9	R2	5 a 25



Fotografías 14 y 15. Caracterización manual de muestras para determinar rango de resistencia en campo.

Ensayo de carga puntual

Otro ensayo complementario a la compresión simple, es el de carga por punta, que permite estimar de forma indirecta la resistencia a la compresión simple; es un ensayo de fácil implementación, por tal motivo, es una buena opción para complementar la información de laboratorio. A continuación, se presentan los resultados de los ensayos:





Fotografía 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 y 24. Ensayo de carga por punta en muestras de roca.

Tabla No 1. Resultados ensayos de carga por punta en muestras de roca.

Muestra - localización	W Prom. mm	D Prom. mm	WD mm²	(De)2 mm²	Is MPa	Is 50 MPa	$\sigma c1$ MPa	$\sigma c1$ Kg/cm²
Muestra 1: Arenisca	44.8	50.50	2259.88	2877.36	0.918	0.948	22.7	227.4
Muestra 2: Arenisca	54.0	48.25	2605.50	3317.43	0.433	0.462	11.1	110.8
Muestra 3: Arenisca	48.5	58.75	2849.38	3627.94	0.396	0.431	10.3	103.4
Muestra 4: Arenisca	58.3	54.75	3189.19	4060.60	0.822	0.917	22.0	220.1
Muestra 5: Arenisca	64.0	47.00	3008.00	3829.90	1.286	1.415	34.0	339.7
Muestra 6: Arenisca	82.0	65.00	5330.00	6786.37	0.305	0.382	9.2	91.7
Muestra 7: Arenisca	68.0	54.75	3723.00	4740.27	0.704	0.814	19.5	195.3
Muestra 8: Arenisca	65.5	47.00	3078.50	3919.67	0.690	0.764	18.3	183.3
Muestra 9: Arenisca	52.3	50.00	2612.50	3326.34	2.339	2.494	59.9	598.5

Martillo de Schmidt

El martillo de Schmidt o también llamado esclerómetro originalmente se aplica a hormigones para conocer su resistencia, pero también se ha extendido su uso a macizos rocosos para determinar de forma indirecta, la resistencia a compresión axial de una roca. Es muy práctico y útil ya que, de forma rápida, se puede tener una aproximación de la resistencia de una roca “in situ”. El martillo de Schmidt, es un instrumento que

permite estimar aproximadamente la resistencia a compresión simple de una roca, ya sea en un talud, túnel, testigo de roca o discontinuidad mediante el rebote que produce el muelle que se aloja en su interior, después de un impacto sobre una superficie rocosa.



Figura 4. Martillo Schmidt o esclerómetro, empleado para toma de datos de resistencia a la compresión.



Fotografía 25 y 26. Toma de datos de resistencia a la compresión en campo, empleando martillo de Schmidt o esclerómetro.

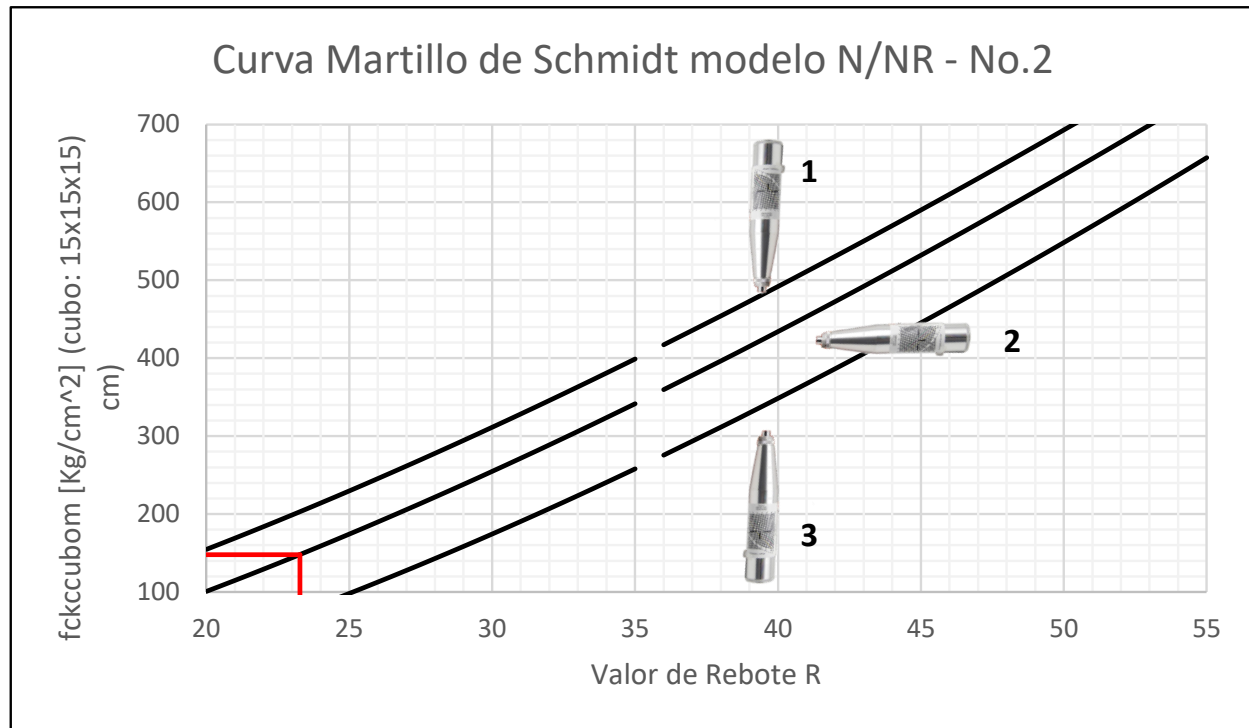


Figura 5. Resultados gráficos de ensayo con martillo de Schmidt en labores de campo.

Tabla 5. Relación de resultados de resistencia de la roca.

Resultados de Martillo Schmidt			
Conjunto de prueba	Valor Promedio Rebote	Modo	σ_{ci} (Mpa)
1	23	A (2)	14.52

1.6.3. CARACTERIZACIÓN DE DISCONTINUIDADES

Un macizo rocoso se constituye generalmente de un conjunto comprendido por la matriz rocosa y las discontinuidades presentes en dicha matriz, en el caso de que existan planos de estratificación, fallas o diaclasas; comúnmente las agrupaciones de estas reciben el nombre de familias, las cuales rigen el comportamiento cinemático del macizo rocoso, comprendido como una agrupación de rocas, organizadas en bloques separados entre sí por vacíos y fracturas propias de la evolución tectónica de dichas capas rocosas.

El estudio de la orientación de las discontinuidades y su influencia en la estabilidad de las laderas se lleva a cabo mediante el empleo de la técnica conocida como proyección estereográfica. Con esta herramienta es posible analizar la estructura del macizo rocoso, y determinar si la orientación de las discontinuidades y su rugosidad hacen que se cumplan los requisitos cinemáticos que puedan dar lugar a una inestabilidad por efecto de las excavaciones proyectadas.

Superficies de discontinuidad: Una discontinuidad es una superficie de fractura o de interface entre materiales de distinto comportamiento en el macizo rocoso, que tiene baja o nula resistencia a la tracción; como planos de estratificación, diaclasas, espejos de fallas, estructuras sedimentarias y metamórficas, etc. Una superficie de discontinuidad está abierta o puede abrirse fácilmente a causa de las tensiones introducidas por un esfuerzo superficial.

Orientación: Para definir un plano de discontinuidad, la forma más sencilla es por medio de la magnitud de dos datos; el primero es la dirección de la mayor pendiente del plano respecto al norte geográfico de la tierra, y se conoce como dirección azimutal del buzamiento, y la segunda magnitud es el valor del buzamiento del plano, es decir, la magnitud de la inclinación máxima que presenta el plano; ambas medidas en degradantes (sistema sexagesimal) se obtiene por medio de la brújula análoga o digital.

Espaciado: Describe la distancia entre las discontinuidades, y por lo tanto el tamaño de los bloques de roca intacta, que están delimitados por las discontinuidades.

Tabla 6. Valores para clasificación de discontinuidades según el espaciado.

Descripción	Espaciado (m)
Extremadamente Pequeño	0.02
Muy Pequeño	0.02-0.06
Pequeño	0.06-0.2
Moderado	0.2-0.6
Grande	0.6-2
Muy Grande	2-6
Extremadamente Grande	6

Continuidad de discontinuidades: Indica la extensión de la discontinuidad (longitud en un sentido (Rumbo o buzamiento), esta se puede clasificar de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 7. Valores de longitud de discontinuidades para clasificación en RMR.

Descripción	Dimensión (m)
Continuidad muy pequeña	1
Continuidad pequeña	1-3
Continuidad Media	3-10
Continuidad Alta	10-20
Continuidad muy alta	20

Rugosidad: Indica la irregularidad de la superficie de discontinuidad, es una medida cualitativa y se determina con la observación directa en campo.

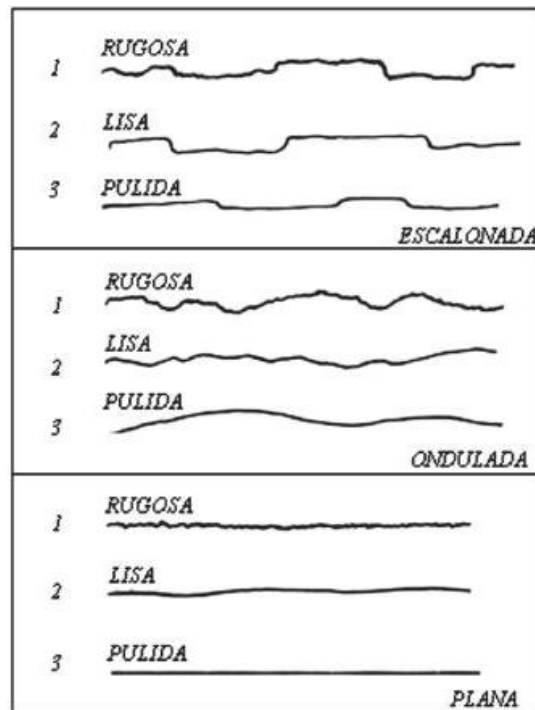


Figura 6. Tipos de rugosidades en discontinuidades.

Resistencia de las juntas de discontinuidades: Se expresa en función de la rugosidad de las juntas y la resistencia de la matriz rocosa superficial inmediata a la discontinuidad en el caso de que la abertura de la discontinuidad sea muy pequeña y no esté ocupada por materiales de relleno.

Abertura: Distancia que separa las paredes adyacentes de una discontinuidad abierta, en la que el espacio intermedio tiene agua, aire o material de relleno.

Relleno: Se refiere al material que ocupa el espacio de abertura de una discontinuidad. El relleno cobra importancia cuando tiene el espesor suficiente para controlar el comportamiento mecánico y la resistencia al corte en las discontinuidades.

Circulación de agua: El grado de filtración de agua en discontinuidades individuales o en familias específicas expuestas en un afloramiento puede ser descrito según la siguiente tabla, esta describe el grado de permeabilidad primaria y secundaria del macizo rocoso, así como las presiones de poros y alteraciones minerales en las caras de las discontinuidades.

Tabla 8. Descripción de las filtraciones en las discontinuidades.

Clase	Discontinuidades sin relleno	Discontinuidades con relleno
I	Junta muy plana y cerrada. Aparece seca y no parece posible que circule agua	Relleno muy consolidado y seco, no es posible el flujo de agua
II	Junta seca sin evidencia de flujo de agua	Relleno húmedo, pero sin agua libre
III	Junta seca, pero con evidencia de haber circulado agua	Relleno mojado con goteo ocasional

IV	Junta húmeda, pero sin agua libre	Relleno que muestra señales de lavado, flujo de agua continuo (estimar caudal en l/min)
V	Junta con rezume, ocasionalmente goteo, pero sin flujo continuo	Relleno localmente lavado, flujo considerable según canales preferentes (estimar presión y caudal)
VI	Junta con flujo continuo de agua (estimar el caudal en l/min y la presión)	Rellenos completamente lavados, presiones de agua elevadas.

Medidas de discontinuidades: En la siguiente tabla se resumen los datos preponderantes de familias de diaclasas proveniente del estudio estadístico de los datos tomados en campo para este estudio La tabla 9, muestra los datos recolectados en campo. Los análisis estadísticos para cada familia se encuentran en el *Anexo No 2*.

Tabla 9. Parámetros de caracterización de las diaclasas.

Tipo	Separación (m)	Continuidad (m)	Abertura (mm)	Rugosidad	Relleno	Alteración	Agua
0. Diaclasa Fam. 1	0,2 - 0,6	< 1	2,5 – 10	Ondulada – Rugosa	Media	Algo alterada	Seca
1. Estratificación Fam. 2	0,06 - 2,0	3 - 10	< 0,1	Ondulada - Rugosa	No presenta	NA	Seca
2. Diaclasa Fam. 3	0,06 - 2,0	< 1	< 0,1	Escalonada rugosa.	No presenta	NA	Seca
3. Diaclasa Fam. 4	0,06 - 2,0	< 1	< 0,1	Escalonada rugosa.	No presenta	NA	Seca

IR Orgánico

Para tener una visión grafica de los datos estructurales medidos en el macizo rocoso y tomados durante las visitas de campo, se hizo uso del software *DIPS 7.0*, el cual permite analizar y visualizar este tipo de información; a partir del cual se obtienen la distribución de polos, en proyección estereográfica equiareal. Se parte de un total de 39 datos estructurales compuestos por azimuth y buzamiento, a partir de los cuales se obtienen las gráficas antes mencionadas que se muestran a continuación con su respectiva descripción.

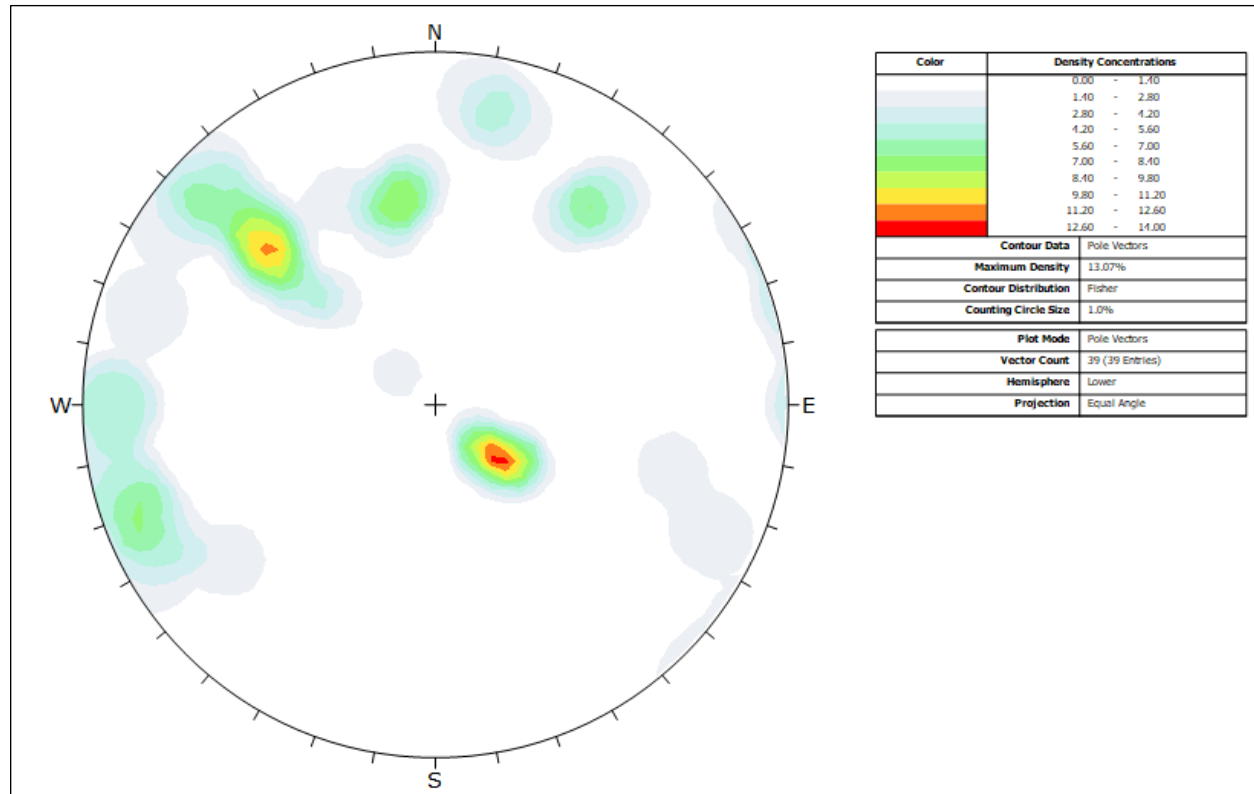


Figura 7. Representación de datos en software *Dips*. Distribución de concentración de polos.

A partir de un total de 39 datos estructurales ingresados al software, se obtuvo la representación gráfica mostrada, en la cual se observa la distribución de polos sobre la falsilla, y a partir de la cual se identifican tendencias de familias.

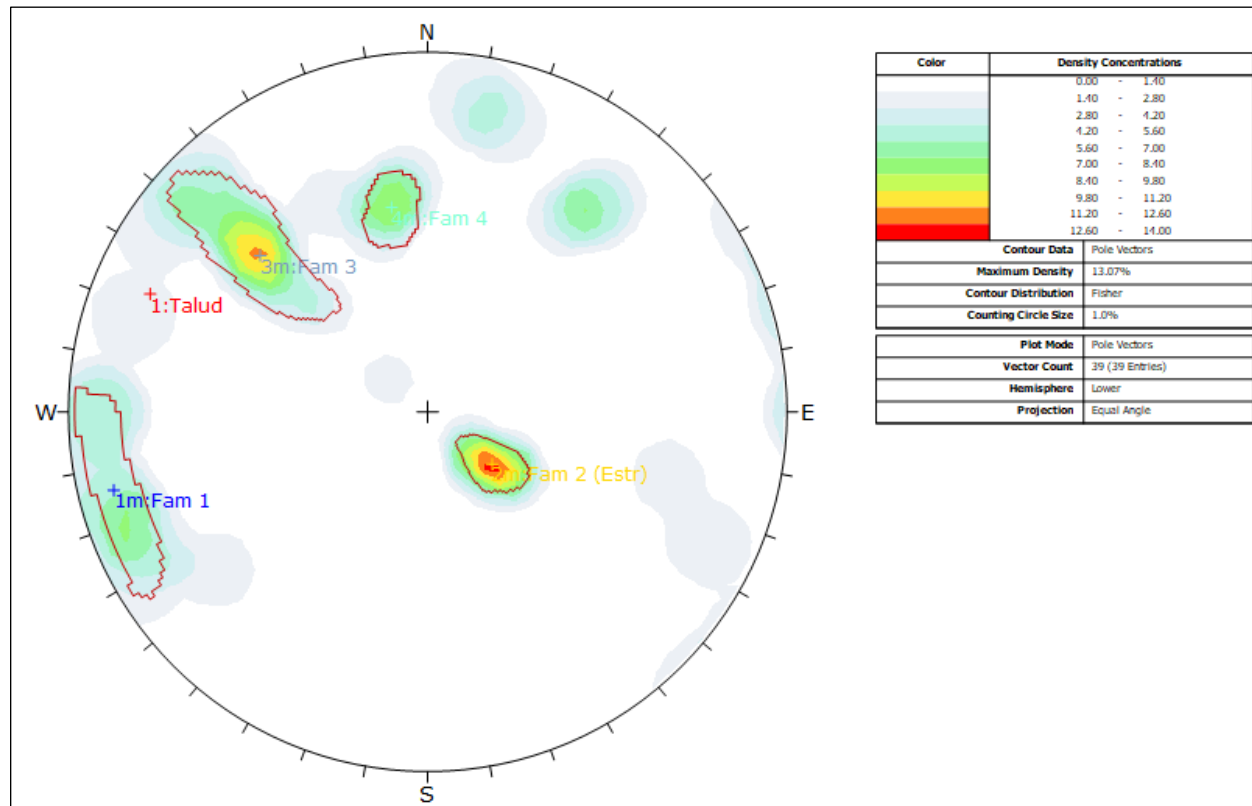


Figura 8. Familias de discontinuidades identificadas.

Dichas concentraciones se organizaron en cuatro grupos representados por tres planos o familias relacionados con diaclasas, y el cuarto, la estratificación. Se presentan las orientaciones promedio de cada familia definidas mediante dato azimuthal y buzamiento:

Familia diaclasas F1: 76/84
 Estratificación F2: 309/26
 Familia diaclasas F3: 133/84
 Familia diaclasas F4: 170/60.

Condiciones mecánicas de las discontinuidades

Con base en las observaciones realizadas en campo, se identificó y caracterizó el grupo de discontinuidades relacionadas con la estratificación, que resultan proclives a presentar y presentan deslizamientos planares en la superficie del talud. Su parametrización se realizó siguiendo los criterios de Barton – Bandis, basados en las características geométricas de las superficies de las discontinuidades, la resistencia de la matriz rocosa y el coeficiente de fricción de la superficie.

A nivel general se trata de discontinuidades poco espaciadas, con relleno, significativamente escalonadas - onduladas y rugosas, por lo tanto, se asume que la resistencia de la discontinuidad depende de las características de las rocas en contacto y la geometría de la discontinuidad, salvo en casos puntuales donde existirá un control del relleno en la resistencia de la discontinuidad. Se obtuvo un coeficiente de fricción

básico de 29° grados en las superficies rocosas, mediante ensayos de Tilt - test en campo y un valor residual de 21°.



Figura 9. Identificación en campo de propiedades físicas de las discontinuidades.

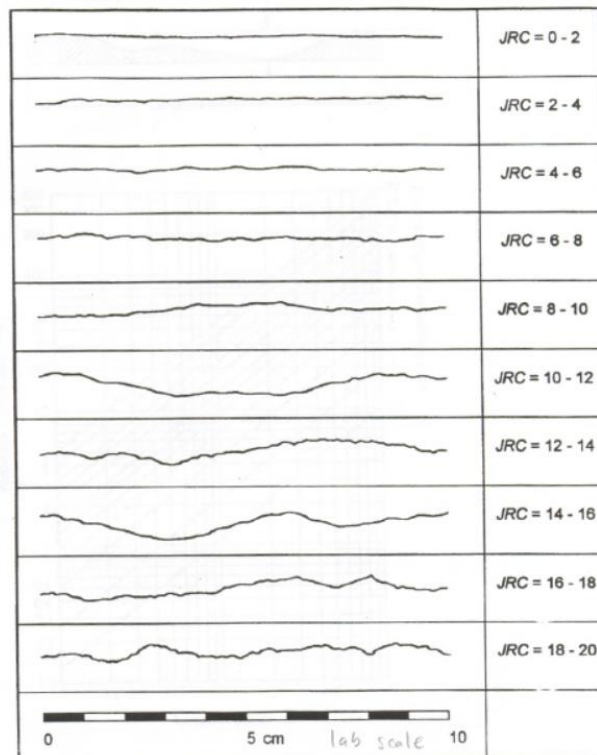


Figura 10. Rugosidad de las discontinuidades analizadas, valor promedio de JRC = 11

Figura 11. Parámetros de resistencia de juntas para análisis de deslizamiento Planar (planos de estratificación) Realizado en el software RocPlane de Rocscience.

1.6.4. CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO SMR

De acuerdo a la exploración y caracterización de la zona, se pudo observar que se presenta una homogeneidad en cuanto al tipo de roca y por ende, no hay diferencias superficiales y a profundidad en sus propiedades físicas y mecánicas. Se caracteriza a la roca del macizo como una roca de resistencia intermedia de arenisca (Ria) según nomenclatura UGI (Unidades de Geología para Ingeniería).

Romana (1985) propone la clasificación de la estabilidad de taludes en roca en función del SMR (Slope Mass Rating), definido como una modificación del sistema RMR (Rock Mass Rating) propuesto por Bieniawski (1973). El SMR está dado por la ecuación:

$$SMR = RMR + (F1 \times F2 \times F3) + F4$$

Donde

F1 depende del paralelismo entre el rumbo de las discontinuidades y la cara del talud y se define como:

$$F1 = (1 - \sin(\alpha_j - \alpha_s))$$

Donde

α_j es dirección de discontinuidad.

α_s es dirección del talud

Los valores que puede obtener este parámetro se encuentran entre (0,15-1,0).

F2 depende del buzamiento de la discontinuidad en la rotura plana y se define como, analíticamente se obtiene por la expresión:

$$F2 = \tan^2(\beta_j)$$

Donde

β_j es buzamiento de la discontinuidad. Los valores que puede obtener este parámetro se encuentran entre 0,15 y 1,0.

F3 representa la relación entre los buzamientos de la discontinuidad y del talud, dada por los valores propuestos por Bieniawski (1973)

F4 representa el factor de ajuste según el método de excavación.

De una manera resumida, la siguiente tabla muestra el proceso para obtener estos factores.

Tabla 11. Factor de ajuste de clasificación SMR (Romana, 1985).

Factores de ajuste de las juntas. F1, F2 y F3.	Muy Favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
Planar: $\alpha_j - \alpha_s$	> 30°	30° - 20°	20° - 10°	10° - 5°	< 5°
Vuelco: $\alpha_j - \alpha_s - 180^\circ$	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
Analítico:	$F_1 = [1 - \sin(\alpha_j - \alpha_s)]^2$				
$[\beta_j]$	< 20°	20° - 30°	30° - 35°	35° - 45°	> 45°
Valores Planar	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
Valores Vuelco	1.00				
Ajuste analítico:	$F_2 = [\tan(\beta_j)]^2$				
Planar $[\beta_j - \beta_s]$	> 10°	10° - 0°	0°	0° - (-10°)	< -10°
Vuelco $[\beta_j + \beta_s]$	< 110°	110° - 120°	> 120°	-	-
Valores:	0	-6	-25	-50	-60
Ajuste analítico:	F3= Se mantienen los valores propuestos por Bieniawski (1976 – 1979).				
Factor de ajuste por el método de excavación.	F4= Valores empíricos establecidos para cada método de excavación.				
	Talud natural	Pre corte	Voladura Suave	Voladura o mecánico	Voladura deficiente
	+15	+10	+8	0	-8

Esta metodología permite estimar de manera cualitativa la posibilidad cinemática de un talud, a partir de parámetros que definen la calidad del macizo, como se observa en la siguiente tabla:

CLASE SMR	I 110-81	II 80-61	III 60-41	IV 40-21	V 20-0
Descripción	Muy buena	Buena	Normal	Mala	Muy mala
Estabilidad	Totalmente estable	Estable	Parcialmente estable	Inestable	Totalmente inestable. Grandes roturas por planos continuos o por la masa. Reexcavación
Roturas	Ninguna	Algunos bloques	Algunas juntas o muchas cuñas	Juntas o grandes cuñas	
Tratamiento	Ninguno	Ocasional	Sistemático	Corrección	

Figura 12. Clases de estabilidad mediante la metodología SMR. Tomado de Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.

MECANISMO DE FALLA	FALLA PLANAR		FALLA DE CUÑA		FALLA POR VOLTEO	
Relación	SMR > 60	Ninguna	SMR > 75	Muy pocas	SMR > 65	Ninguna
	60 > SMR > 40	Importantes	75 > SMR > 40	Algunas	65 > SMR > 50	Menores
	40 > SMR > 15	Muy grandes	40 > SMR > 75	Muchas	50 > SMR > 30	Muy grandes

Figura 13. Relación de índice SMR con el tipo de falla para taludes. Tomado de Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.

Para el actual proyecto se realizó el análisis de SMR para la zona del talud más crítica que ha presentado inestabilidad y caída de bloques. El corte se puede observar en la siguiente figura:



Figura 14. Corte para el análisis cinemático del talud y clasificación SMR del macizo.

Clasificación geomecánica RMR

La clasificación geomecánica RMR permite obtener un índice de calidad del macizo rocoso a partir de 5 parámetros:

1. Resistencia de la roca intacta.
2. Índice de calidad de la roca.
3. Espaciamiento de las discontinuidades
4. Condición de las discontinuidades.
5. Presencia de agua.

Cada parámetro tiene un puntaje y unas subclasificaciones asignadas y se van sumando (Ver tabla 12).

Tabla 12. Clasificación del macizo rocoso RMR.

Parámetro: Resistencia de la matriz rocosa (MPa)							
Ensayos de carga puntual	>10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)		
Compresión simple	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	1<

Puntuación	15	12	7	4	2	1	0
RQD	90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%		
Puntuación	20	17	13	6	3		
Separación entre discontinuidades		>2m	0.6-2m	0.2-0.6m	0.06-0.2m	<0.06m	
Puntuación		20	15	10	8	5	
Parámetro: Estado de las discontinuidades							
Longitud de la discontinuidad	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m		
Puntuación	6	4	2	1	0		
Abertura	Nada	<0.1mm	0.1-1mm	1-5mm	>5mm		
Puntuación	6	5	3	1	0		
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
Puntuación	6	5	3	1	0		
Relleno	Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno blando <5mm	Relleno blando >5mm		
Puntuación	6	4	2	2	0		
Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
Puntuación	6	5	3	1	0		
Caudal por 10m del túnel NA	Nulo	10 litros/minuto	10-25 litros/minuto	25-125 litros/minuto	>125 litros/minuto		
Relación: Presión de agua/tensión principal mayor	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
Estado general	Seco	Ligeramente seco	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
Puntuación	15	10	7	4	0		
Corrección por la orientación de las discontinuidades							
Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables	
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12	
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25	
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60	
Clasificación							
Clase	I	II	III	IV	V		
Calidad	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala		
Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	<20		

RMR BÁSICO = 61

RMR CON CORRECCIONES POR ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES = 56

De acuerdo a los resultados obtenidos a partir de las tablas anteriores se clasifica el macizo rocoso según la siguiente tabla:

Tabla 13. Clasificación de macizo rocoso RMR, parámetros mecánicos sugeridos.

Índice RMR: calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR				
Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión	Ángulo de rozamiento
I	Muy buena	100-81	> 4 kg/cm ²	>45°
II	Buena	80-61	3-4 kg/cm ²	35°-45°
III	Media	60-41	2-3 kg/cm ²	25°-35°
IV	Mala	40-21	1-2 kg/cm ²	15°-25°
V	Muy mala	< 20	< 1 kg/cm ²	< 15°

El índice RMR va desde 0 hasta 100 puntos a partir de los cuales el macizo rocoso puede clasificarse en 5 categorías.

Muy buena: 100 – 81

Buena: 80 – 61

Media: 60 – 41

Mala: 40 – 21

Muy mala: <20

El RMR general que se obtuvo para el macizo rocoso fue de 61, y se realizó el debido ajuste por orientación, el RMR básico se clasificó de la siguiente manera:

	Resistencia de la roca	RQD	Espaciamiento discontinuidades	Condición discontinuidades	Agua
Valoración	10 (Mpa)	58	0,06 – 0,2 (m)	Ondulada rugosa, abertura < 0.1 mm, bordes duros.	Seco
Puntaje	2	11.5	8.5	24	15

SMR y factores (f1, f2, f3 y f4) – Análisis para perfil A -A'

De acuerdo a la metodología anteriormente descrita se obtuvieron los siguientes resultados para el análisis del talud que se inclina en dirección sureste, identificada con el corte transversal A -A'. El factor de ajuste según método de excavación (F4) corresponde a 0.

Tabla 14. Consolidado para determinar el SMR de la ladera representada por el perfil A – A'. (El SMR se hace para las condiciones de falla planar y falla por volcamiento)

FAMILIA	BUZAMIENTO	AZIMUT DEL BUZAMIENTO	FAMILIA	RMR (CORREGIDO)	P	F1	F2	P PARA F3	F3	SMR P	T PARA F1	F1	F2	T PARA F3	F3	SMR T	SMR MÁS BAJO POR FAMILIA
TALUD	80	113	TALUD														
1	84	76	FAM 1	61.00	37	0.15	1.00	4	-6	60.1	217	0.15	1	164	-25	57.25	57.25
2	26	309	PLANO DE ESTRATIFICACIÓN	61.00	196	0.15	0.40	-54	-60	57.4	16	0.7	1	106	0	61	57.4
3	67	132	FAM 3	61.00	19	0.7	1.00	-13	-60	19	161	0.15	1	147	-25	57.25	19
4	60	170	FAM 4	61.00	57	0.15	1.00	-20	-60	52	123	0.15	1	140	-25	57.25	52

Tabla 15. Clases de estabilidad SMR (Romana, 1985).

Tipo de Rotura	Intervalos SMR	Frecuencia
Planas	SMR > 60 60 > SMR > 40 40 > SMR > 15	Ninguna Importantes Muy grandes
Por vuelco	SMR > 65 65 > SMR > 50 50 > SMR > 30	Ninguna Menores Importantes

Tabla 16. Clases de estabilidad SMR (Romana, 1985).

Descripción de las clases SMR										
Clase N°	Vb	Va	IVb	IVa	IIIb	IIIa	IIb	IIa	Ib	Ia
Descripción	Muy mala		Mala		Normal		Buena		Muy buena	
Estabilidad	Totalmente inestable		Inestable		Parcialmente inestable		Estable		Totalmente estable	
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por la matriz		Grandes juntas y/o grandes cuñas		Algunas juntas o muchas cuñas		Algunos bloques		Ninguna	
Sostenimientos	re excavación		Importantes		Sistemáticos		ocasionales		Ninguna	

1.6.5. GSI (GEOLOGICAL STRENGTH INDEX) ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA, HOEK ET AL (1995).

La determinación de los parámetros del GSI se basa en las descripciones de la calidad del macizo rocoso en lugar de formular datos de entrada cuantitativos como en los sistemas RMR, Q y RMI. El GSI es utilizado para la estimación de los parámetros de entrada para el cálculo de la resistencia, solo es una relación empírica y los procesos asociados a las clasificaciones de la ingeniería de rocas.

Bajo estas consideraciones y con las características propias del macizo rocoso y las unidades geo mecánicas definidas se obtuvo un valor de GSI. Desde el punto de vista mecánico las rocas aflorantes son blandas a intermedias, y las condiciones de las discontinuidades en cuanto a espaciamiento, aberturas, rellenos de las mismas y rugosidad resultan desfavorables a niveles superficiales; hacia el interior, el macizo aumenta su calidad y competencia.

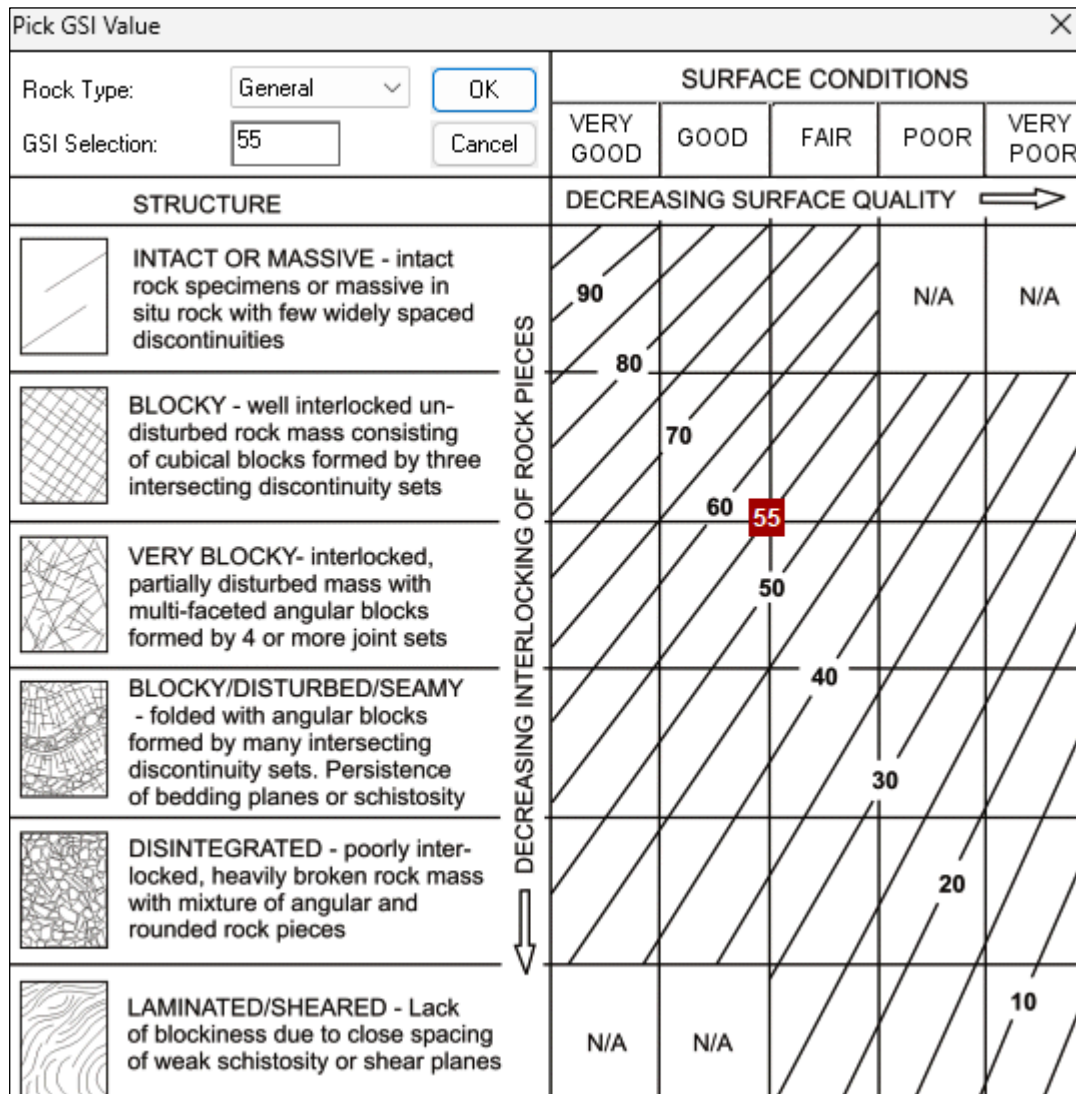


Figura 15. Clasificación del macizo rocoso GSI.

1.7. PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO

El criterio de rotura usado fue el criterio de rotura generalizado de Hoek-Brown. Los parámetros de entrada son los obtenidos de los ensayos de roca, así como correlaciones y valores de literatura de forma complementaria. el criterio de Hoek Brown – utiliza el Sigci (compresión simple), mi (estimado mediante el ensayo de compresión simple y el ensayo de tracción indirecta), y los valores cualitativos del GSI y D a partir de observaciones y comparaciones relativas.

Con los anteriores datos se calcula la Cohesión, el ángulo de fricción interna de la roca (ϕ), el módulo de deformación, el esfuerzo a la compresión global del macizo rocoso y demás parámetros necesarios para el estudio del macizo.

El factor D, identifica el grado de perturbación del macizo rocoso teniendo en cuenta los métodos de excavación y la relajación de esfuerzos. Debido a que se no contemplan métodos muy agresivos para la excavación. El valor estimado para el factor D es de 0.

Los datos de entrada y resultados de la aplicación se encuentran relacionados en la siguiente tabla.

Tabla 17. Determinación de los parámetros de resistencia del macizo rocoso.

DATOS DE ENTRADA ROCLAB		DATOS DE SALIDA ROCLAB	
<i>Sigci</i>	10 Mpa	<i>Mb</i>	3.408
<i>GSI</i>	55	<i>S</i>	0.0067
<i>Mi</i>	17	<i>a</i>	0,504
<i>D</i>	0	<i>C</i>	0.160 Mpa
<i>H Talud</i>	15 m	<i>Ø</i>	54.28°
<i>Tipo de roca</i>	Arenisca	<i>Em</i>	1122.77 Mpa
		<i>σc</i>	2.497 Mpa

2. MODELO GEOLÓGICO - GEOTÉCNICO

Con base en la exploración y caracterización realizada y expuesta anteriormente, se pudo obtener el modelo geológico geotécnico del área a estudiar. Este tipo de modelo integra información geológica con propiedades geotécnicas para proporcionar una representación detallada del subsuelo y sus características. A partir del modelo resultante, se permite analizar la estabilidad de talud y en función de los resultados de la evaluación, se diseñan las medidas más óptimas para prevenir o mitigar los problemas geotécnicos presentes.

A continuación, se presenta el modelo geológico geotécnico desde planta y perfil, obtenido del área del proyecto y las características de los materiales del mismo.

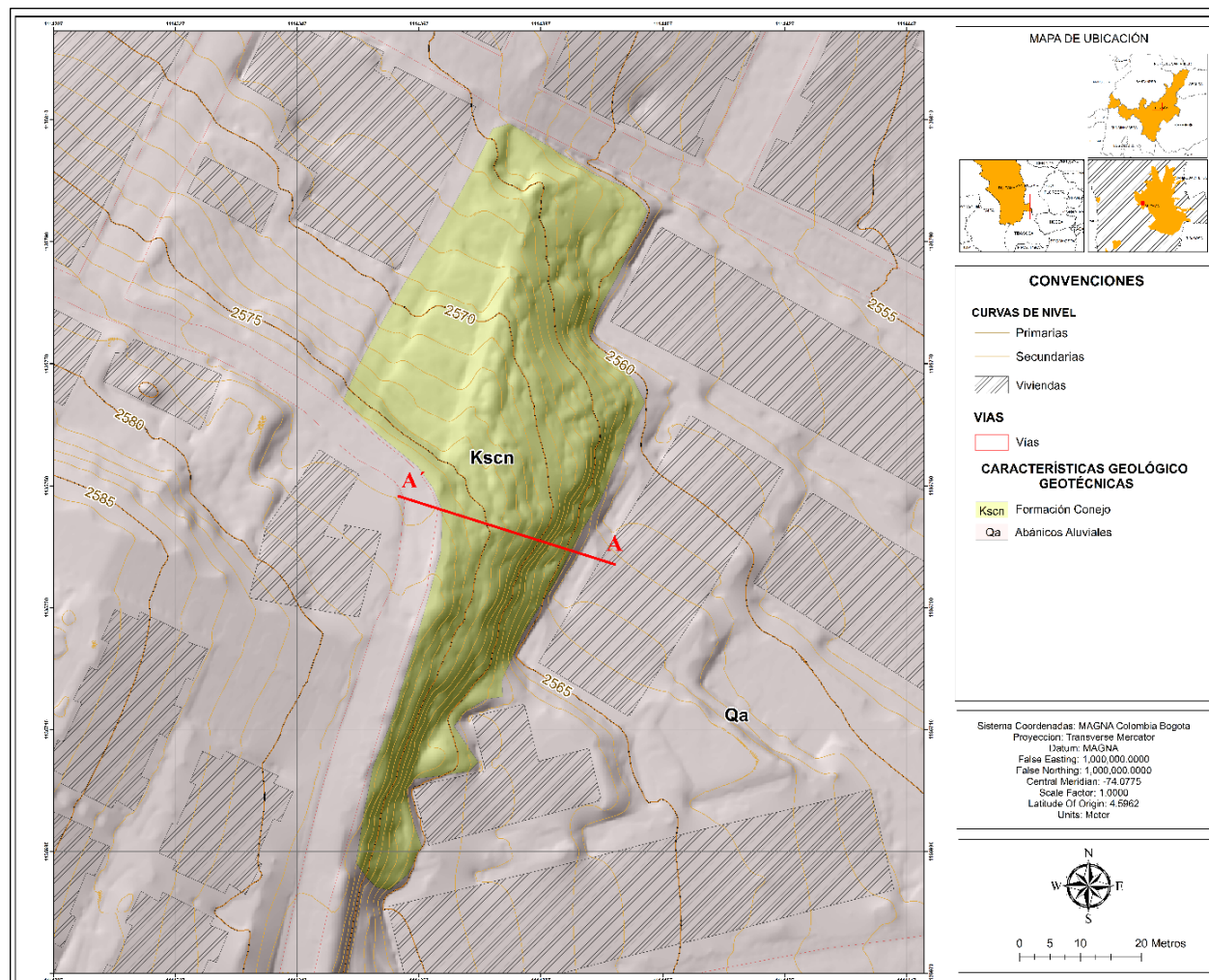


Figura 16. Mapa de planta del modelo geológico geotécnico del sector “Mirador La Esperanza”.

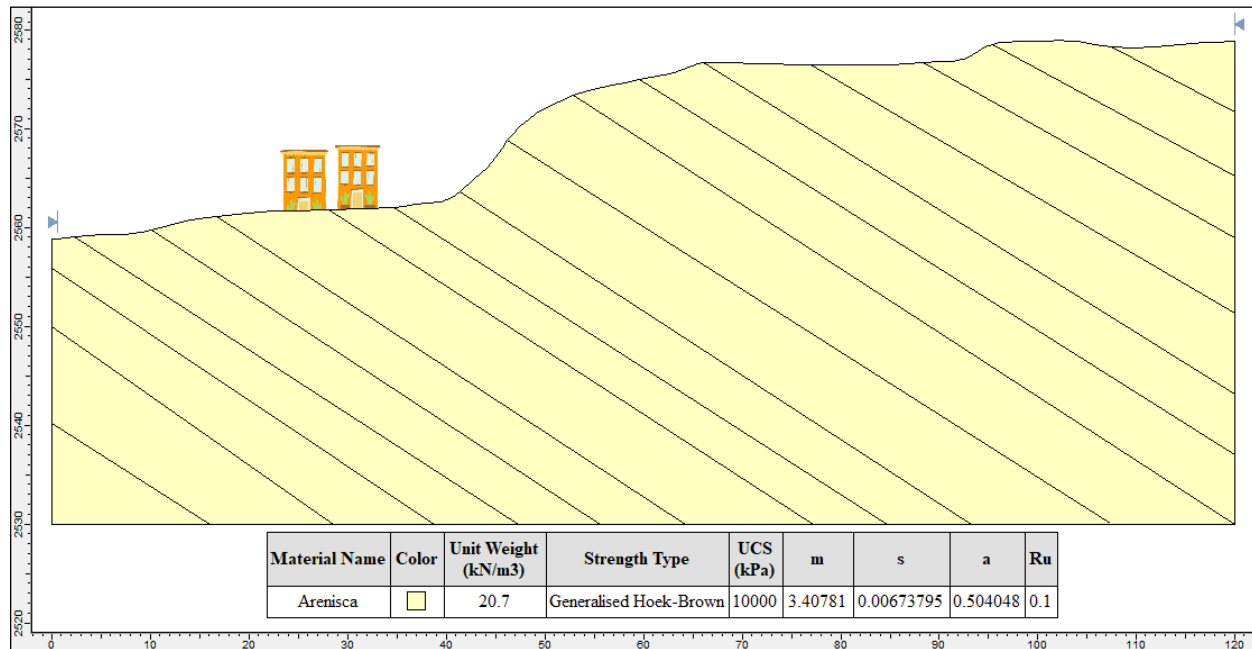


Figura 17. Corte A – A'. Perfil del Modelo geológico geotécnico del sector “Mirador La Esperanza”.

El área del proyecto se compone de dos materiales litológicos. Por un lado, hacia la parte de la corona y el pie del talud, se presenta un depósito de abanico aluvial; por el otro, el macizo rocoso del talud está compuesto de arenisca de la formación Conejo (Kscn). La inestabilidad y la problemática que se presenta en el área, específicamente involucra a la parte de las areniscas; dentro del depósito no se encuentran problemas de tipo geotécnico, el depósito no se ubica dentro del área inestable y tampoco se evidencian efectos sobre el mismo.

La arenisca del macizo rocoso es una roca con resistencia media – baja, de índice de resistencia geológica entre 50 y 60. En cuanto a parámetros geotécnicos de roca y del macizo, se presentan los observados en la siguiente tabla.

Areniscas R2 (ISMR)	
PARÁMETRO	VALOR
γ	2.11 tn/m ³
σ_{CI}	10 MPa
GSI	55
m_i	17
D	0
mb	3.408
s	0.0067
a	0.504
C' (Cohesión)	150 KPa
Φ' (Ángulo de fricción)	54.28°
Módulo de deformación	1122 MPa

El macizo rocoso no presenta nivel freático; en general se encuentran 4 familias de discontinuidades que controlan el comportamiento geomecánico del talud. Los deslizamientos y caídas de rocas son principalmente influenciados por la familia de discontinuidades con un azimut de 133° y una inclinación de 88° , su interacción con las demás familias, el estado de las propiedades físico mecánicas de las mismas (expuesto y caracterizado anteriormente) y, por otro lado, el factor de erosión diferencial por niveles de roca menos competentes y de bajo espesor de arcillolita y limolita. El talud presenta una baja variabilidad en cuanto a su composición. Sin embargo, el macizo rocoso es de baja calidad superficialmente, más o menos 0.3 - 0.4 m, pero hacia su interior mejoran las propiedades geomecánicas, se concluye, entonces, que la mayor parte del macizo es de buena calidad.

3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD

3.1. CRITERIOS PARA EVALUAR LA ESTABILIDAD GENERAL DEL TALUD

Para el análisis de estabilidad del talud, así como la estabilidad de los bloques o paquetes rocosos superficiales del mismo susceptibles a deslizamiento planar, se consideran los siguientes escenarios:

- Estado actual de la ladera; considerando condiciones estáticas sin efecto sísmico y con efecto sísmico (Análisis pseudo estático).
- Análisis de bloques colgantes sobre el talud ante deslizamientos planares sobre las discontinuidades correspondientes a familia de diaclasas “F3”, siendo la condición más crítica; considerando condiciones estáticas sin efecto sísmico y con efecto sísmico (Análisis pseudo estático), condiciones críticas de saturación en el caso de que esta condición sea realista.

Las consideraciones respectivas para los análisis, son las establecidas en la norma sismo resistente NSR 10, Título H, capítulo H.5.2, así como lo establecido en el numeral A.2 del título de esta misma norma en cuanto a los parámetros sísmicos para el análisis pseudo - estático de estabilidad de taludes.

La posición y orientación del perfil para el análisis, se escogió para un modelo promedio de las características geométricas de la ladera y adicionalmente la tendencia de las pendientes. Posteriormente con la información de exploración y caracterización geo mecánica, se extractaron los parámetros mecánicos del material. A continuación, se presenta el corte desde planta y perfil con la distribución de las capas o estratos encontrados generalizado a nivel del macizo rocoso.



Figura 18. Corte para el análisis de estabilidad general del talud.

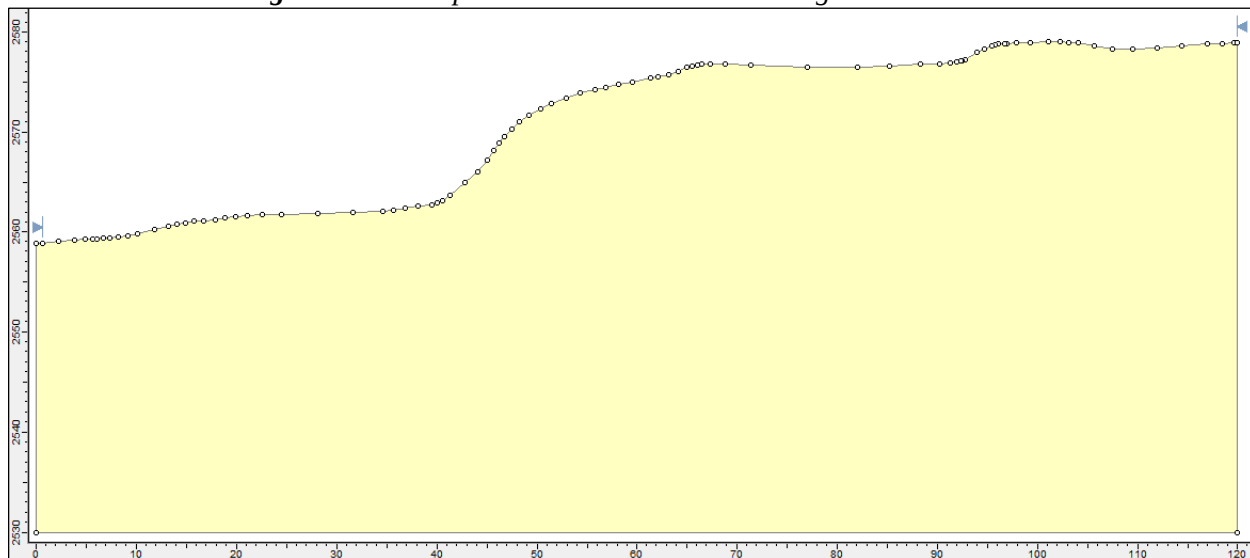


Figura 19. Perfil geológico - geotécnico del talud en su condición actual.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	UCS (kPa)	m	s	a	Ru
Arenisca		20.7	Generalised Hoek-Brown	10000	3.40781	0.00673795	0.504048	0.1

Tabla 18. Parámetros geomecánicos del talud.

La metodología planteada para la evaluación de amenaza consiste en la aplicación de los criterios establecidos en la tabla H.2.4-1 de la NSR-10 que se resume en lo siguiente:

Tabla 19. Factores de seguridad básicos mínimos para estabilidad de taludes.

Condición	Diseño	Construcción
Taludes-condición estática y agua subterránea normal	1,50	1,25
Taludes condición Pseudo estática con agua subterránea normal y coeficiente sísmico de diseño.	1,05	1,00

3.1.1. CONSIDERACIONES SOBRE EL NIVEL FREÁTICO O TABLA DE AGUA

En el talud no se encontró nivel freático alguno y las condiciones de las juntas denotaban el estado predominante del talud. La misma condición del macizo rocoso en cuanto a las direcciones y buzamientos de las discontinuidades, el estado de las mismas, y la composición de la matriz rocosa, no permite la captación o almacenamiento de agua. Las rocas de la formación geológica encontrada y relacionada directamente con la ladera, en su mayoría corresponden a rocas de alta permeabilidad primaria y secundaria, lo cual limita la capacidad de retención de agua en las partes altas de las laderas, esta última fluye rápidamente hacia partes más bajas en el interior del macizo rocoso.

De lo anterior no se estima nivel freático incluso en escenarios críticos, descartando la hipótesis de saturación total del talud, pues no es un escenario realista en este caso.

3.1.2. PARÁMETROS SÍSMICOS:

La clasificación del perfil del suelo corresponde con Tipo B, según NSR-10. El periodo de retorno para el cual se obtiene dicha aceleración corresponde a 475 años.

Del estudio general de amenaza sísmica de Colombia (2009) se extraen las aceleraciones sísmicas en función del periodo de retorno sísmico para Duitama.

Tabla 20. Parámetros Sísmicos y nivel de amenaza Tr 475años (NSR – 10).

Zona de amenaza sísmica	Alta
Aa Coef. De aceleración pico efectiva (g)	0.16

Tabla 21. Clasificación del tipo de suelo y obras civiles según NSR 10.

Perfil Tipo	A
Aa	0.2

Av	0.25
A. Sísmica	Alta
Fa	0.8
Coef impor I	I

El coeficiente de importancia de la estructura fue definido por el tipo del proyecto; en conformidad con la tipología de las obras y lo establecido en la NSR- 10.

Para el cálculo del coeficiente sísmico de diseño para análisis pseudo estático de taludes KST o conocido como Kh se ha seguido lo estipulado en el numeral H.5.2.5 de NSR-10, como se muestra a continuación, encontrando que $K_h = 0,20$.

Tabla 22. *Parámetros sísmicos calculados para análisis pseudo estático del talud.*

a_{max}	Aceleración máxima del terreno ($S_a = A_a * F_a * I$)	0.16
K_{ST}/a_{max}	Mínimo para análisis pseudoestático de taludes	1
K_{ST}	Coef. Sísmico de diseño para análisis pseudoestático (K_h)	0.16
K_v	Coef. Aceleración Vertical definido como $2/3K_h$	0.11

3.2. MODELAMIENTO EN SOFTWARE

3.2.1. MODELAMIENTO DEL ESTADO ACTUAL DEL TALUD

Para el análisis de estabilidad se considera apropiado el método de equilibrio límite en el software slide v6 con la metodología de Janbú Corregido ya que, de los métodos disponibles en el software, este asume un factor de ajuste por las simplificaciones en las que se basa. Se obtuvieron los siguientes factores de seguridad:

Tabla 23. *Resultados del análisis de equilibrio límite para los perfiles analizados.*

Perfil	Condición estática Fs.	Condición sísmica pseudo estática Fs.	Cumplimiento NSR 10 título H
Talud general	8.57	5.77	Sí
Bloques superficiales por deslizamiento Planar por familia 1 de discontinuidades.	1.07	0.72	No

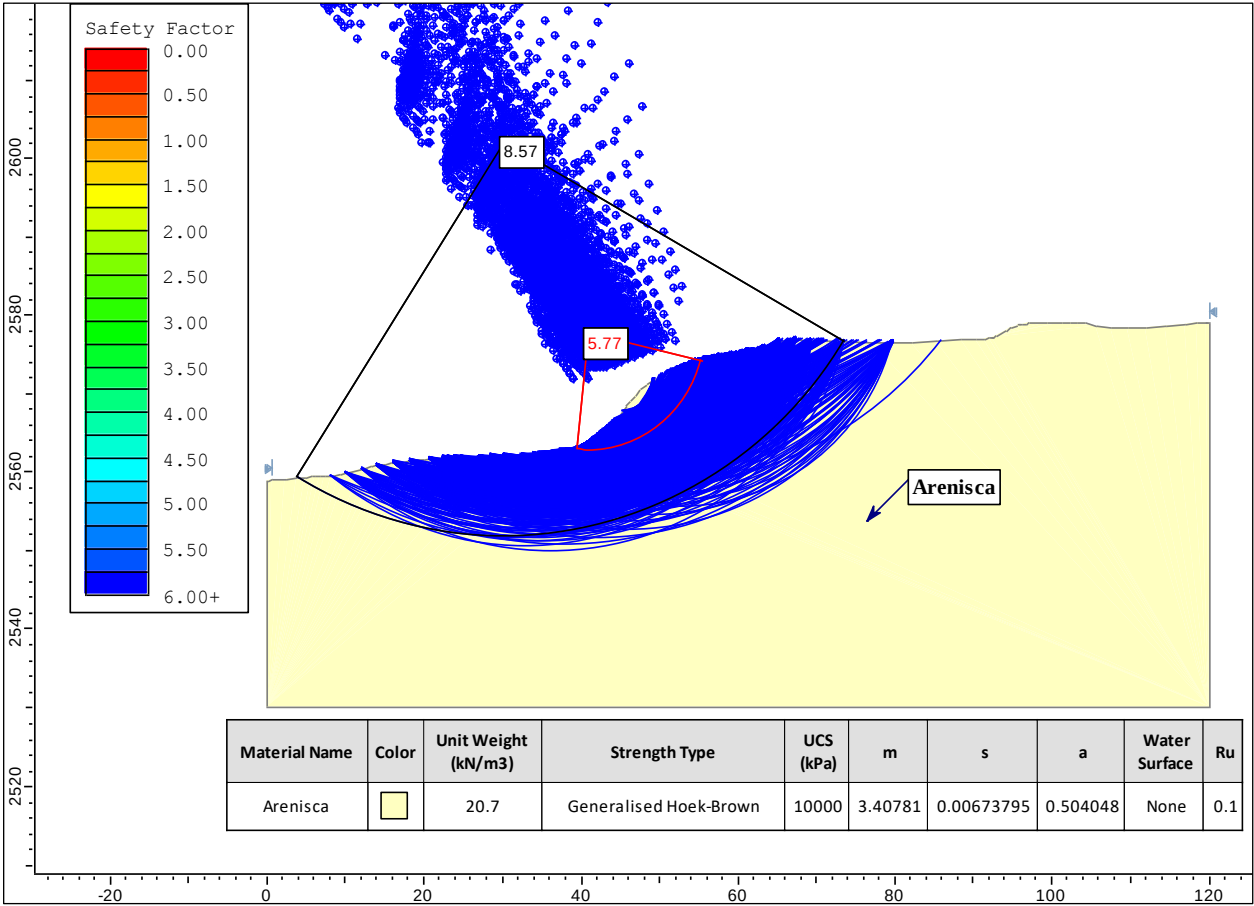


Figura 20. Análisis de estabilidad del talud general, condición actual, análisis estático.

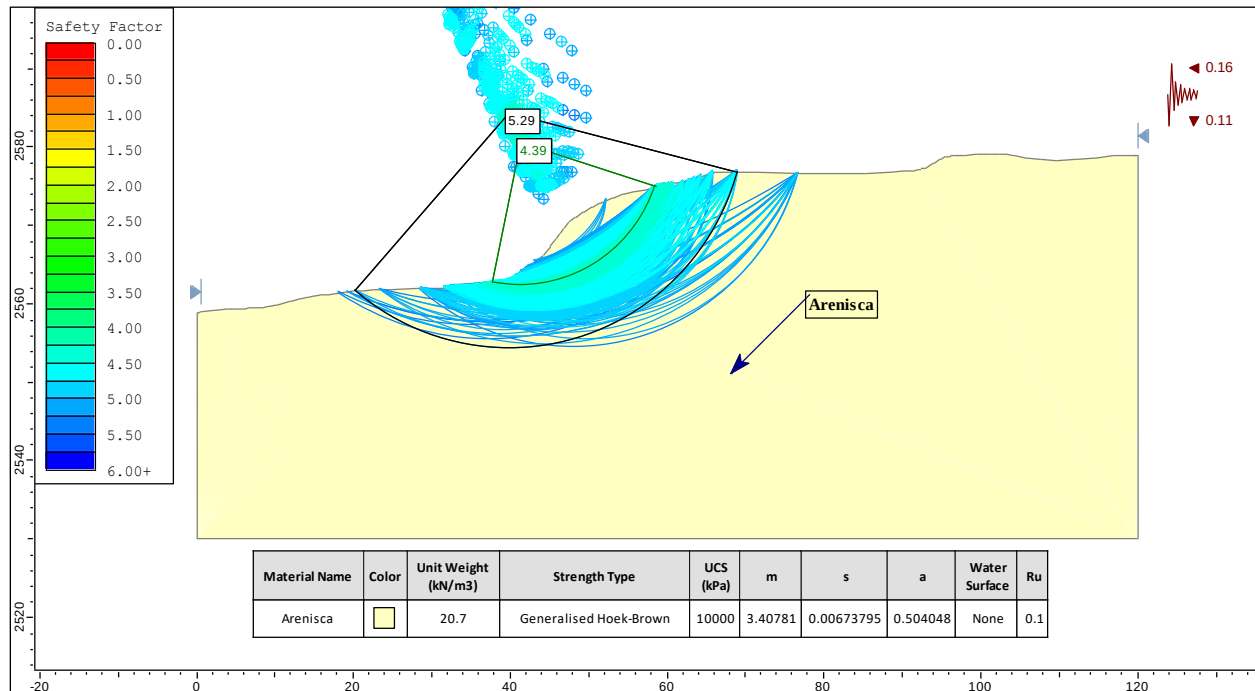


Figura 21. Análisis de estabilidad del talud general, condición actual, análisis pseudoestático.

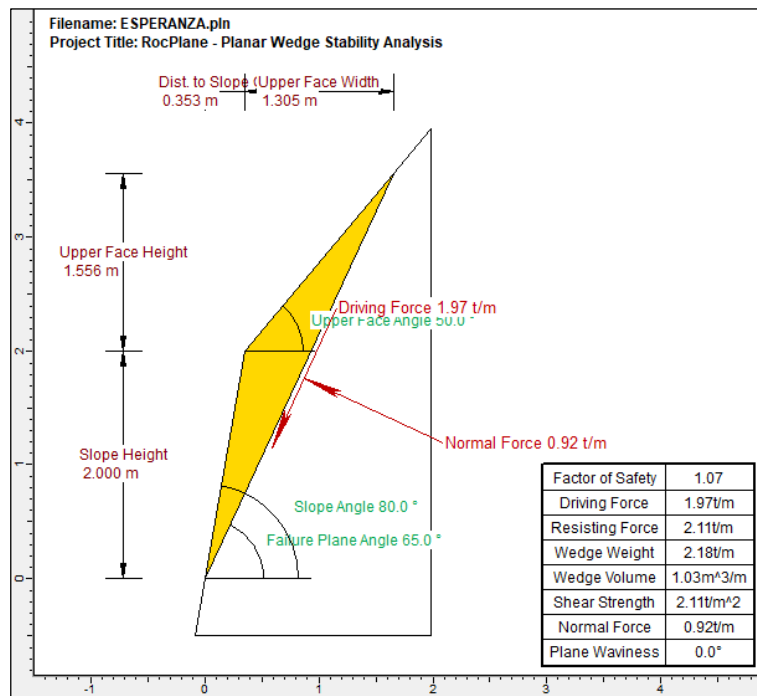


Figura 22. Análisis de estabilidad de bloques por deslizamiento Planar (planos críticos) bajo condiciones estáticas.

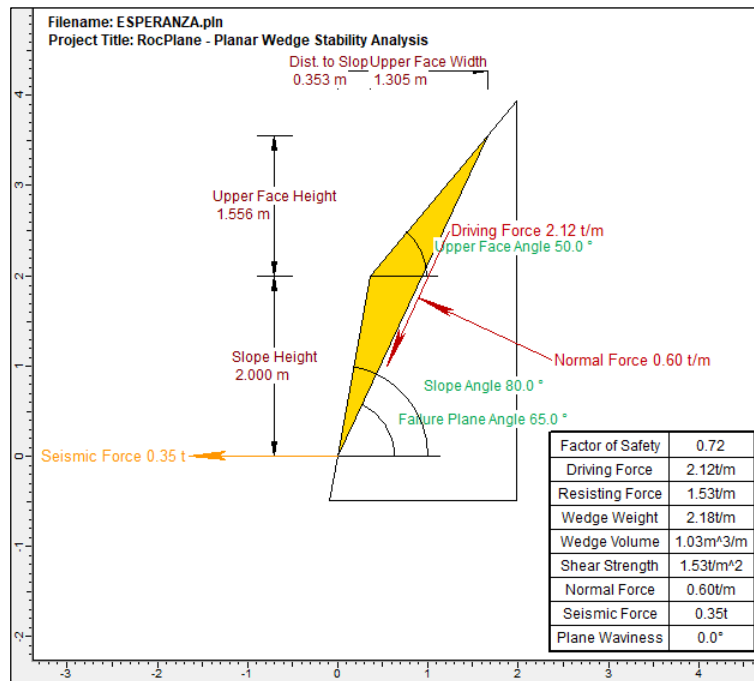


Figura 23. Análisis de estabilidad de bloques por deslizamiento planar (Planos críticos) bajo condiciones sísmicas (análisis pseudoestático).

Conforme al análisis anterior, se obtuvieron factores de seguridad que cumplen con las exigencias de la norma sismo resistente NSR 10 para el caso del talud general de la ladera. Esto quiere decir que no se pueden presentar grandes movimientos de masa. En el caso de los bloques formados por la dinámica del macizo rocoso y su composición, los cuales son susceptibles a presentar deslizamiento o falla planar, se obtuvieron valores que no cumplen con las exigencias de la NSR 10. Es por esta razón, que estos bloques van cayendo por gravedad y ruedan para situarse en el pie del talud, generando así, daños a bienes materiales de la zona en estado de vulnerabilidad.

3.3. ANÁLISIS CINEMÁTICO

Con base en lo anterior, tanto en el análisis de estabilidad para bloques como en la clasificación del macizo rocoso SMR; se pudo observar que el macizo presenta caídas de bloques por deslizamiento planar y volcamiento de cuñas. Se realiza entonces el análisis cinemático con el fin de identificar específicamente potenciales deslizamientos producidos por las fracturas y discontinuidades del macizo rocoso, y relacionados con condiciones locales inmediatas. Evaluando 4 escenarios a saber:

- Deslizamiento planar
- Deslizamiento de cuñas
- Volcamiento directo
- Volcamiento por flexión

3.3.1. DESLIZAMIENTO POR FALLA PLANAR

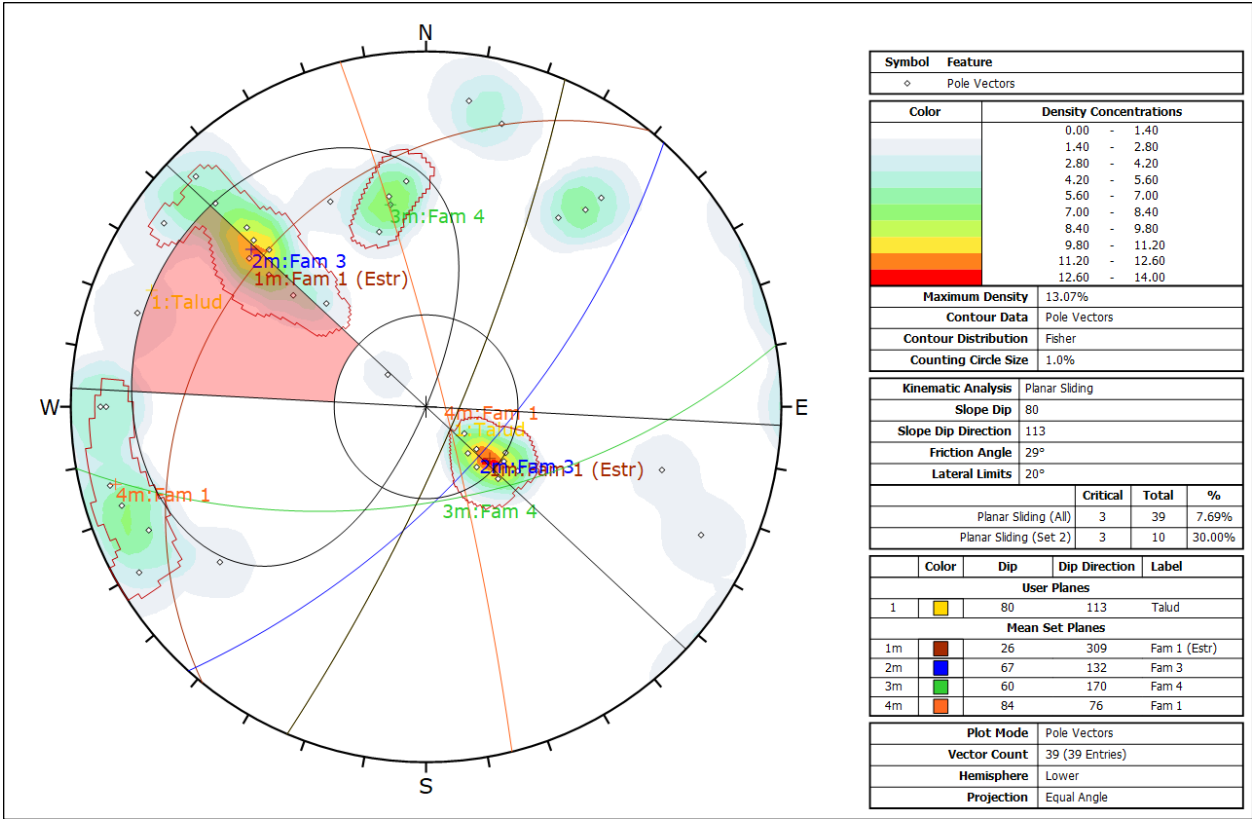


Figura 24. Análisis cinemático, deslizamiento por falla planar.

3.3.2. DESLIZAMIENTO POR CUÑAS

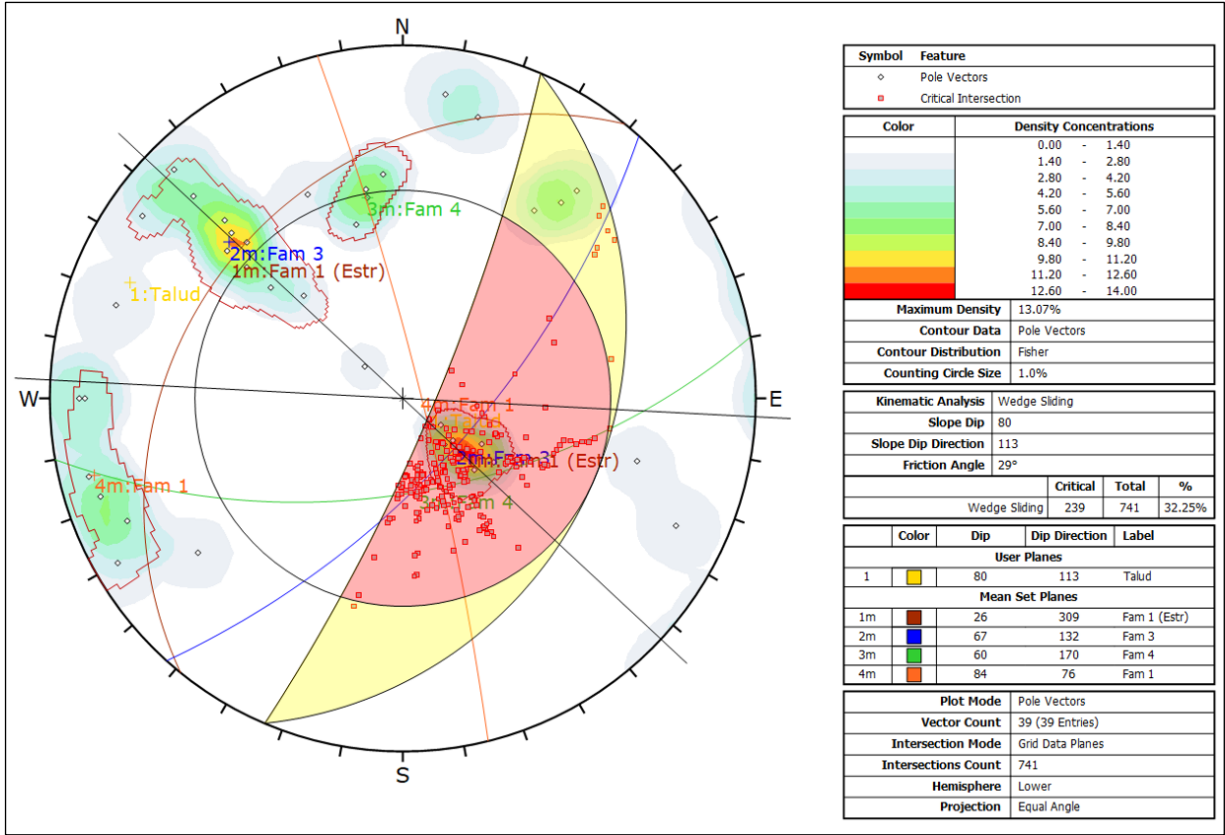


Figura 25. Análisis cinemático, deslizamiento por cuñas.

3.3.3. VOLCAMIENTO DIRECTO

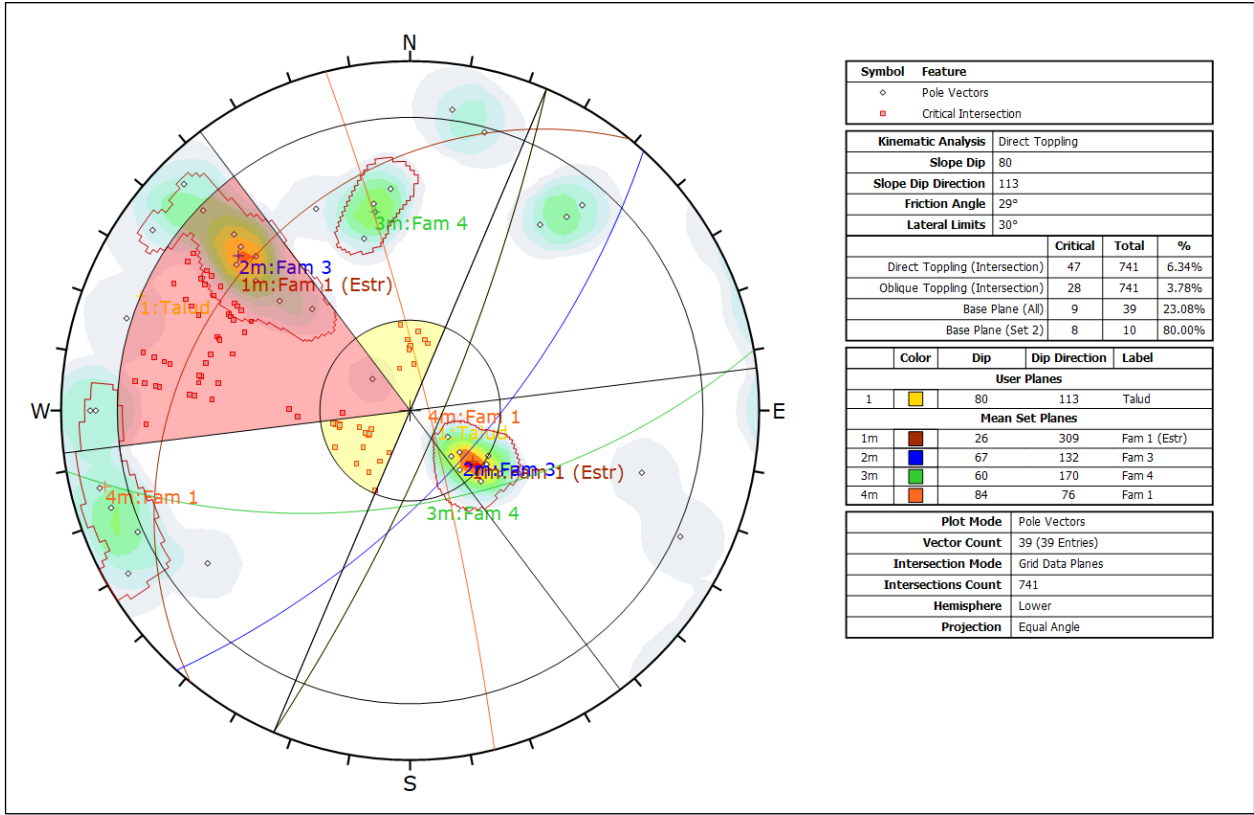


Figura 26. Análisis cinemático, deslizamiento por volcamiento directo.

3.3.4. VOLCAMIENTO POR FLEXURA

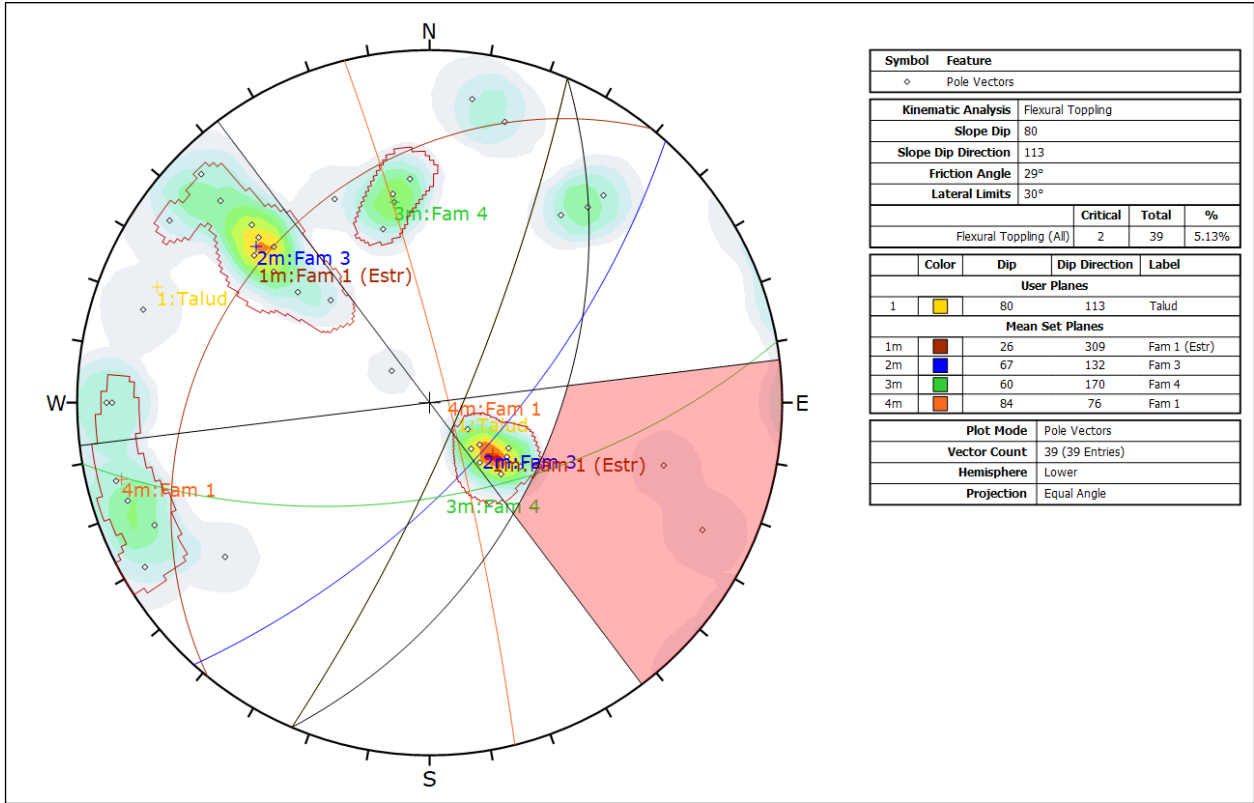


Figura 27. Análisis cinemático, deslizamiento por volcamiento flexural.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Producto de los resultados del estudio e investigación realizada, dentro del alcance integral y de cada uno de los componentes, se extraen las siguientes conclusiones:

-. Se obtuvieron factores de seguridad que cumplen con las exigencias de la norma sismo resistente NSR 10 para la estabilidad del talud a nivel general. En conclusión, no se pueden presentar movimientos de grandes volúmenes que puedan generar daños. El problema de caídas de rocas radica en el comportamiento cinemático del macizo y está influenciado en mayor medida por la familia de discontinuidades 3 “Fam 3”.

-. La alteración superficial del macizo rocoso se ve influenciada por su exposición a los procesos de meteorización que afectan a los materiales rocosos. Las discontinuidades y los componentes mineralógicos presentes en el talud facilitan la entrada de aguas de escorrentía, lo que resulta en el deterioro de los materiales. Estos factores son cruciales para entender el comportamiento y la estabilidad del talud a lo largo del tiempo, tanto a corto como a largo plazo.

-. El talud presenta deslizamientos cinemáticos de cuñas o deslizamiento planar y volcamientos directo de bloques superficiales. Un factor a favor es el hecho de que el buzamiento de los estratos está en contra de la pendiente de la cara del talud; sin embargo, las caídas y movimientos presentes se dan debido a que los bloques competentes del macizo rocoso (bloques de areniscas), quedan sobresaliendo en voladizo por la erosión presente en los estratos de arcillolitas, por efecto de la gravedad, estos bloques caen. De manera analítica y con todo lo observado y descrito en este informe, se concluye que la situación presenta un riesgo medio; los bloques que se desprendan, ruedan y pueden caer en el pie del talud ocasionando posibles daños en las viviendas, persona y/o animales.

Sogamoso, diciembre de 2.023



Ing. PEDRO ANTONIO IBÁÑEZ GÓMEZ
Esp. en Geotecnia - Esp. en Gerencia y Construcción de Obras Civiles
Esp. QA – QC en obras civiles
T.P. No 15223-42978 COPNIA

LISTA DE ANEXOS

ANEXO No 1: EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

ANEXO No 2: CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA – ENSAYOS DE LABORATORIO

ANEXO No 3: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

ANEXO No 1
EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

ANEXO No 2

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA – ENSAYOS DE LABORATORIO

ANEXO No 3

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD



S.I. SERINCO LTDA.

SERVICIOS INTEGRALES DE INGENIERÍA, GEOTECNIA Y CONSTRUCCIÓN LIMITADA

MAS DE 30 AÑOS CIMENTANDO EL DESARROLLO DE LOS PROYECTOS Y OBRAS DE INGENIERIA
SOLUCIONES GEOTECNICAS Y DE INGENIERIA CONFIABLES

**INFORME DE AVANCE No 2: COMPONENTES EXPLORACIÓN, CARACTERIZACIÓN,
MODELO GEOLÓGICO- GEOTÉCNICO Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD- SECTOR LA
FUENTE**

**PROYECTO
ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA REALIZAR OBRAS DE MITIGACIÓN DE
DESLIZAMIENTOS UBICADOS EN: LA URBANIZACIÓN MIRADOR DE LA ESPERANZA,
EL SECTOR LA FUENTE Y QUEBRADA BECERRAS KILÓMETRO 4 VIA DUITAMA
CHARALÁ - MUNICIPIO DE DUITAMA**

DICIEMBRE DE 2023

PROYECTO
INFORME DE AVANCE No 2: COMPONENTES EXPLORACIÓN, CARACTERIZACIÓN,
MODELO GEOLÓGICO- GEOTÉCNICO Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD- SECTOR LA
FUENTE

ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA REALIZAR OBRAS DE MITIGACIÓN DE
DESLIZAMIENTOS UBICADOS EN: LA URBANIZACIÓN MIRADOR DE LA ESPERANZA,
EL SECTOR LA FUENTE Y QUEBRADA DE BECERRAS KILÓMETRO 4 VIA DUITAMA
CHARALÁ DEL MUNICIPIO DE DUITAMA

S.I. SERINCO LTDA
SERVICIOS INTEGRALES DE INGENIERÍA, GEOTECNIA Y CONSTRUCCIÓN LIMITADA
ÁREA: GEOTECNIA E INGENIERIA
SOLUCIONES GEOTECNICAS Y DE INGENIERIA CONFIABLES
MAS DE 30 AÑOS CIMENTANDO EL DESARROLLO DE LOS PROYECTOS Y OBRAS DE INGENIERIA

CLIENTE SOLICITANTE: ALCALDÍA MUNICIPAL DE DUITAMA

DUITAMA - BOYACÁ

DICIEMBRE DE 2023

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	6
1. EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.....	7
1.1. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DETALLADAS PARA EL ÁREA.....	7
1.2. EXPLORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO MEDIANTE PERFORACIONES	10
1.3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO MEDIANTE ENSAYOS EN LABORATORIO 14	
1.4. RESULTADOS DE LA EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL PERFIL DEL área DEL PROYECTO.	15
1.4.1. DESCRIPCIÓN DEL PERFIL DEL MACIZO ROCOSO DEL ÁREA DEL PROYECTO	15
1.5. NIVEL PIEZOMÉTRICO Y DE AGUAS FREÁTICAS EN EL AREA DE FUNDACION DEL PROYECTO ..	15
1.6. ESTUDIO GEO-MECÁNICO DEL MACIZO ROCOSO.....	15
1.6.1. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MATRIZ ROCOSA.....	16
1.6.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MATRIZ ROCOSA.....	16
Ensayo de compresión simple	17
Ensayos de índice manual de resistencia de roca en campo (ISRM, 1981):.....	17
Ensayo de carga puntual	19
Martillo de Schmidt.....	21
1.6.3. CARACTERIZACIÓN DE DISCONTINUIDADES.....	23
1.6.4. CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO SMR.....	32
Clasificación geomecánica RMR.....	35
SMR y factores (f_1 , f_2 , f_3 y f_4) – Análisis para perfil A -A'	37
1.6.5. GSI (GEOLOGICAL STRENGTH ÍNDEX) ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA, HOEK ET AL (1995). 38	
1.7. PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO	39
2. MODELO GEOLÓGICO - GEOTÉCNICO.....	40
3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD	42
3.1. CRITERIOS PARA EVALUAR LA ESTABILIDAD GENERAL DEL TALUD.....	42
3.1.1. CONSIDERACIONES SOBRE EL NIVEL FREÁTICO O TABLA DE AGUA.....	44
3.1.2. PARÁMETROS SÍSMICOS:.....	45
3.2. MODELAMIENTO EN SOFTWARE.....	46
3.2.1. MODELAMIENTO DEL ESTADO ACTUAL DEL TALUD	46
3.3. ANÁLISIS CINEMÁTICO.....	48
3.3.1. DESLIZAMIENTO POR FALLA PLANAR.....	49
3.3.2. DESLIZAMIENTO POR CUÑAS.....	50
3.3.3. VOLCAMIENTO DIRECTO	51
3.3.4. VOLCAMIENTO POR FLEXURA.....	52
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de los apiques de exploración geotécnica en el área del proyecto.	11
Figura 2. Correlación estratigráfica de apiques realizados en campo.	14
Figura 3. Perfil promedio del macizo rocoso ubicado en el sector La fuente.	14
Figura 4. Martillo Schmidt o esclerómetro, empleado para toma de datos de resistencia a la compresión. .	22
Figura 5. Resultados gráficos de ensayo con martillo de Schmidt en labores de campo.	23
Figura 6. Tipos de rugosidades en discontinuidades.	25
Figura 7. Representación de datos en software Dips. Distribución de concentración de polos.	28
Figura 8. Familias de discontinuidades identificadas.	29
Figura 9. Identificación en campo de propiedades físicas de las discontinuidades.	30
Figura 10. Rugosidad de las discontinuidades analizadas, valor promedio de JRC = 11.	31
Figura 11. Parámetros de resistencia de juntas para análisis de deslizamiento Planar (planos de estratificación) Realizado en el software RocPlane de Rocscience.	32
Figura 12. Clases de estabilidad mediante la metodología SMR. Tomado de Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.	34
Figura 13. Relación de índice SMR con el tipo de falla para taludes. Tomado de Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.	34
Figura 14. Corte para el análisis cinemático del talud y clasificación SMR del macizo.	35
Figura 15. Clasificación del macizo rocoso GSI.	39
Figura 16. Mapa de planta del modelo geológico geotécnico del sector “La Fuente”.	40
Figura 17. Corte A – A’. Perfil del Modelo geológico geotécnico del sector “La Fuente”.	41
Figura 18. Vista en planta del talud en su condición actual.	43
Figura 19. Perfil geológico - geotécnico del talud en su condición actual.	44
Figura 20. Análisis de estabilidad del talud general, condición actual, análisis estático.	46
Figura 21. Análisis de estabilidad del talud general, condición actual, análisis pseudoestático.	47
Figura 22. Análisis de estabilidad de bloques por deslizamiento Planar (planos críticos) bajo condiciones estáticas.	47
Figura 23. Análisis de estabilidad de bloques por deslizamiento planar (Planos críticos) bajo condiciones sísmicas (análisis pseudoestático).	48
Figura 24. Análisis cinemático, deslizamiento por falla planar.	49
Figura 25. Análisis cinemático, deslizamiento por cuñas.	50
Figura 26. Análisis cinemático, deslizamiento por volcamiento directo.	51
Figura 27. Análisis cinemático, deslizamiento por volcamiento flexural.	52

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

Fotografías 1, 2. Zona con presencia de caída de bloques debido a meteorización biológica generada por raíces de árboles de especie eucalyptus.	8
Fotografías 3 y 4. Evidencia de meteorización biológica y fracturación del macizo por raíces.	9
Fotografías 5 y 6. Deslizamiento, caída de rocas y daños producidos por el movimiento.	9
Fotografías 6 y 7. A la izquierda, exploración y reconocimiento de zona donde se presentó caída de bloques, a la derecha, pie del talud que presenta humedad media.	10
Fotografías 8, 9, 10, 11. Registro fotográfico de pruebas de exploración del macizo rocoso utilizando equipo por el método de percusión en el área del proyecto.	12
Fotografía 12, 13, 14 y 15. Fotografías de las muestras del macizo rocoso y ensayo de resistencia a la compresión simple.	17
Fotografías 16 y 17. Fotografías de caracterización manual de muestras para determinar rango de resistencia de la roca en campo.	19
Fotografía 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 y 26. Ensayo de carga por punta en muestras de roca.	21
Fotografía 27 y 28. Toma de datos de resistencia a la compresión en campo, empleando martillo de Schmidt o esclerómetro.	22

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Resultado de laboratorio. Ensayo de propiedades físicas compresión simple.	16
Tabla 2. Resultado de laboratorio. Ensayo de compresión simple.	17
Tabla 3. Valores de resistencia para Ensayos de Índice manual de resistencia de roca en campo (ISRM, 1981)	18
Tabla 4. Valores de resistencia de las muestras, de acuerdo a la caracterización manual (ISRM, 1981).....	18
Tabla 5. Relación de resultados de resistencia de la roca.	23
Tabla 6. Valores para clasificación de discontinuidades según el espaciado.	24
Tabla 7. Valores de longitud de discontinuidades para clasificación en RMR.	24
Tabla 8. Descripción de las filtraciones en las discontinuidades.	25
Tabla 9. Parámetros de caracterización de las diaclasas.	26
Tabla 10. Datos tomados en campo. Características de discontinuidades.	27
Tabla 11. Factor de ajuste de clasificación SMR (Romana, 1985).	33
Tabla 12. Clasificación del macizo rocoso RMR.	35
Tabla 13. Clasificación de macizo rocoso RMR, parámetros mecánicos sugeridos.	37
Tabla 14. Consolidado para determinar el SMR de la ladera representada por el perfil A – A'. (El SMR se hace para las condiciones de falla planar y falla por volcamiento).....	38
Tabla 15. Clases de estabilidad SMR (Romana, 1985).	38
Tabla 16. Clases de estabilidad SMR (Romana, 1985).	38
Tabla 17. Determinación de los parámetros de resistencia del macizo rocoso.	39
Tabla 27. Parámetros geomecánicos del talud.	44
Tabla 28. Factores de seguridad básicos mínimos para estabilidad de taludes.	44
Tabla 29. Parámetros Sísmicos y nivel de amenaza Tr 475años (NSR – 10).	45
Tabla 30. Clasificación del tipo de suelo y obras civiles según NSR 10.	45
Tabla 31. Parámetros sísmicos calculados para análisis pseudo estático del talud.	45
Tabla 32. Resultados del análisis de equilibrio límite para los perfiles analizados.	46

INTRODUCCIÓN

En el presente estudio se determinan las condiciones de estabilidad del sector La Fuente en el municipio de Duitama, a partir de lo cual se expone el avance N°2 del proyecto “*ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA REALIZAR OBRAS DE MITIGACIÓN DEL DESLIZAMIENTO UBICADO EN EL SECTOR LA FUENTE*” en el municipio de Duitama.

De manera inicial fue realizado un diagnóstico geotécnico preliminar con base en la información de campo y secundaria. Este diagnóstico permitió definir la unidad geológica en la que se emplaza la zona en cuestión y caracterizar sus componentes geotécnicos.

En el presente informe se incluye lo acordado para el segundo documento técnico de avance que contiene los componentes: Exploración del subsuelo, ensayos de laboratorio (Caracterización), modelos geológicos geotécnicos y el análisis de estabilidad y cinemático del talud en su estado actual. Se anexan los apartados necesarios que soportan todos los componentes.

La exploración y caracterización comprende varias actividades realizadas en campo y laboratorio para identificar las propiedades físicas y mecánicas del subsuelo. Para este caso, las actividades fueron enfocadas con base en el material del talud que corresponde a roca; por lo tanto, la exploración se llevó a cabo en el ámbito de la cinemática y por ello se tienen perforaciones de baja profundidad con muestreo superficial y subsuperficial y el levantamiento y estudio de las discontinuidades para el entendimiento general del macizo rocoso. Se reconoce como esencial llevar a cabo una exploración y descripción adecuada de los materiales para poder realizar un modelo geológico - geotécnico del lugar del proyecto y con ello poder comprender y simular el comportamiento del mismo y la respuesta de los materiales de manera precisa. A partir de lo obtenido en la exploración y caracterización se puede generar el modelo geológico - geotécnico del área a estudiar para posteriormente realizar el análisis de estabilidad del talud.

El estudio se realizó a solicitud de la *ALCALDÍA MUNICIPAL DE DUITAMA*.

1. EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

El perfil del macizo rocoso de construcción del proyecto se caracterizó con base en los tres pilares de investigación en geotecnia; mediante la exploración directa con apiques o perforaciones, la experimentación o caracterización a través de pruebas o ensayos en campo y laboratorio y el análisis de los resultados obtenidos; para establecer el modelo geológico – geotécnico del macizo rocoso.

1.1. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DETALLADAS PARA EL ÁREA

Aspectos generales			
Topografía:	Inclinada escarpada.	Formación geológica/Suelos	Churuvita (Ksch)
Cobertura:	Pastos, arbustos enanos y árboles de considerable altura.		
Descripción Suelo o roca:	Arenisca de grano medio con coloraciones amarillas y naranjas crema, de resistencia media y permeabilidad baja. También se presentan estratos de bajo espesor de roca menos competente de arcillolitas en estado de fracturamiento.	Descripción del macizo rocoso:	Competente.
Drenaje			
Drenajes permanentes cercanos	--	Distancia/Posición	--
Drenajes intermitentes cercanos	--	Distancia/Posición	--
Observaciones	Por la zona de estudio no se presentan drenajes o quebradas que puedan generar un impacto en la estabilidad o el comportamiento geomecánico del talud.		
Inconvenientes geotécnicos existentes en el área			
Fenómenos erosivos o de meteorización	Se evidencia meteorización de bloques y juntas superficiales del macizo rocoso. En algunas partes, en específico hacia la parte suroeste del talud, se presenta meteorización biológica debido a las raíces de los árboles. Ver Fotografías 1 y 2	Estado / Ubicación	Los procesos erosivos y de meteorización que se identificaron, presentan condición activa con severidad media en superficie.
Movimientos en masa	Caída de bloques, deslizamiento de	Estado / Ubicación	Los movimientos que se identificaron, presentan

	material poco competente.		condición activa con severidad alta.
<i>Taludes o cortes</i>	Talud antrópico con inclinación promedio de aproximadamente 50° a excepción de la parte de los movimientos más activos en donde se presentan inclinaciones de 80° – 90° e incluso contrapendientes.	<i>Distancia/Posición</i>	General.

Hacia la parte suroeste del talud, se presenta meteorización biológica debido a las raíces de los árboles. Ver. Fotografías 3 y 4. Estas raíces han aumentado el diaclasamiento y fracturamiento del macizo rocoso y muchos de estos bloques han caído en predios causando daños físicos a bienes materiales de los habitantes del sector. Otra problemática que se evidenció en la zona, es el crecimiento de los árboles de género eucalyptus que tienden a alcanzar grandes alturas y son proclives a caer por volcamiento, riesgo que debe ser tratado con la mayor celeridad posible.



Fotografías 1, 2. Zona con presencia de caída de bloques debido a meteorización biológica generada por raíces de árboles de especie eucalyptus.



Fotografías 3 y 4. Evidencia de meteorización biológica y fracturación del macizo por raíces.



Fotografías 5 y 6. Deslizamiento, caída de rocas y daños producidos por el movimiento.

Durante la exploración, se observó el talud a contrapendiente que se encuentra en la zona donde una gran cuña de material rocoso se desprendió y causó grandes daños a bienes materiales de habitantes del sector; la altura que presenta el talud en esta zona es de aproximadamente 8 metros. Por otro lado, tanto por exploración de campo como por testimonio de residentes de la zona, se evidenció que, hacia el pie del talud del lado suroeste del mismo, llegan las aguas captadas superficialmente del macizo por escorrentía moderada y el material rocoso presenta humedad media a diferencia del resto del macizo (ver Fotografías 7 y 7) A la par, hubo testimonio por parte de habitantes sobre medianos bloques que rodaron desde zonas más altas del talud y que llegaron a la parte más baja del mismo.



Fotografías 7 y 8. A la izquierda, exploración y reconocimiento de zona donde se presentó caída de bloques, a la derecha, pie del talud que presenta humedad media.

1.2. EXPLORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO MEDIANTE PERFORACIONES

Los criterios establecidos para definir el número y profundidad de los apiques de exploración del macizo fueron la tipología y estructura del proyecto, los lineamientos dados en el *título H* de la norma *NSR-10* y la experiencia del consultor. Se efectuaron simultáneamente los ensayos de resistencia a la penetración dinámica en campo tipo DCPT. En la figura No. 8 se presenta la ubicación de los apiques de exploración sobre la planta topográfica del área de proyecto.

Figura 1. Ubicación de los apiques de exploración geotécnica en el área del proyecto.



Fotografías 9, 10, 11, 12. Registro fotográfico de pruebas de exploración del macizo rocoso utilizando equipo por el método de percusión en el área del proyecto.

En la tabla siguiente se resume el programa de exploración y ensayos dinámicos de campo ejecutados:

Numero de sondeos	0.0 (Cero)	Profundidad promedio de investigación	2.0 m
Numero de apiques	4.0 (Cuatro)		
Método de perforación	Percusión con ensayos de penetración dinámica	Equipo	Mecánico combinado
Ensayo SPT	No	Ensayo DCPT	Sí

<i>Recuperación de muestras alteradas</i>	No	<i>Recuperación de muestras inalteradas o testigos de roca, (núcleos) y rocas superficiales</i>	Sí
<i>Recuperación de muestras semi - alteradas con Split Spoon</i>	No	<i>Motivo del fin de la perforación o exploración en profundidad</i>	Rechazo a la penetración dinámica DCPT en el macizo rocoso.

Con base en la exploración realizada fue posible conocer las características estratigráficas y composicionales detalladas del perfil del macizo, además se ejecutaron ensayos directos de resistencia del macizo en campo y se realizó un muestreo representativo del mismo, el cual permitió conocer las propiedades índices, de resistencia al corte y parámetros geomecánicos mediante ensayos de caracterización geotécnica en laboratorio.

Cada uno de los registros estratigráficos tomados en las perforaciones de exploración realizadas, se correlacionaron teniendo en cuenta las características litológicas y de propiedades geomecánicas.

En la Figura 3 se presenta el perfil promedio obtenido a partir de la correlación estratigráfica de los registros de los apiques 1 a 4. La figura sintetiza y resume la información extractada mediante ensayos en campo y laboratorio para cada uno de los apiques de exploración realizados y las capas estratigráficas determinadas o diferenciadas. Esta figura muestra de forma general, en escala, los valores de la resistencia a la compresión simple, a carga por punta, el peso unitario y la resistencia a la penetración dinámica en campo tipo DCPT; escalas que están relacionadas contra la profundidad de exploración. Las figuras 1 a 4 del *anexo No 1* muestran los registros detallados de las perforaciones individuales para cada uno de los apiques de exploración.

El nivel de referencia para la elaboración de los perfiles descritos, corresponde al nivel superficial de la topografía actual del terreno, en cada uno de los sitios puntuales de perforación.

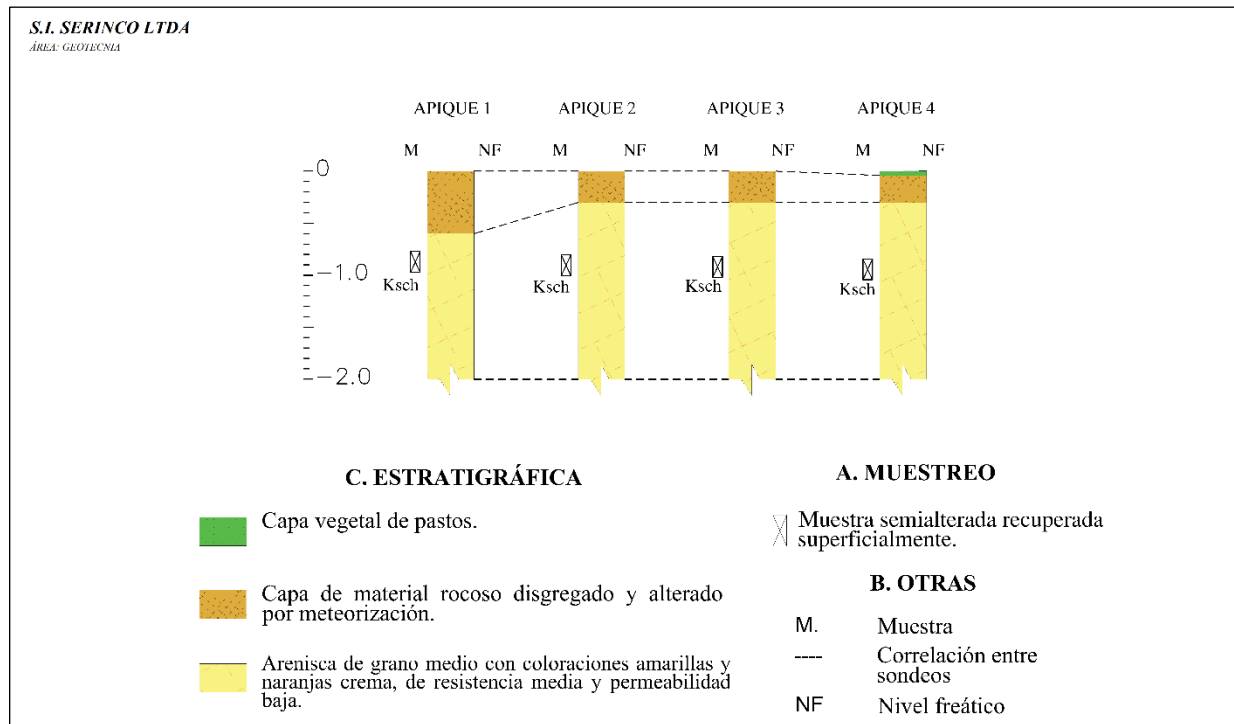
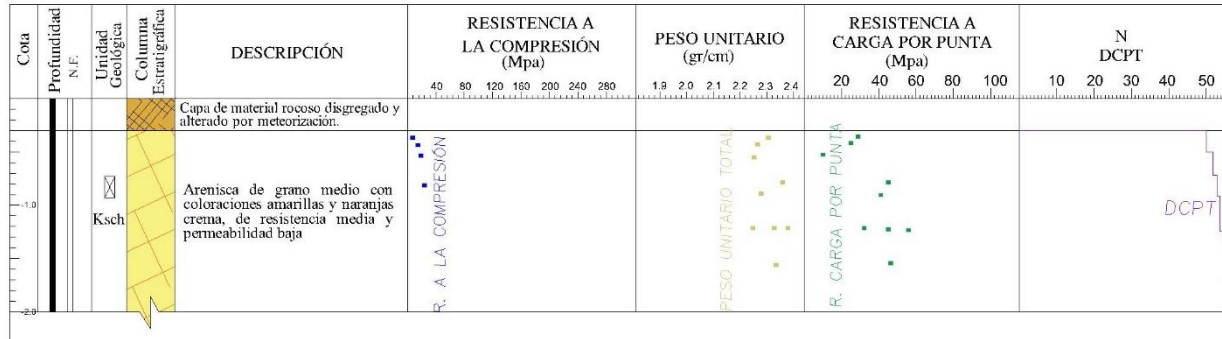


Figura 2. Correlación estratigráfica de apiques realizados en campo.



1.3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO MEDIANTE ENSAYOS EN LABORATORIO

Sobre el muestreo representativo de las capas del macizo rocoso, se practicó el programa de ensayos para la caracterización geotécnica que se describe en la siguiente tabla.

Programa de ensayos de laboratorio			
Humedad Natural	Sí	Peso Unitario	Sí
Carga por punta	Sí	Tilt Test	Sí
Resistencia a la compresión	Sí	Otros	--

En el *anexo No. 2* del presente informe, se muestran los resultados detallados de los ensayos de caracterización en laboratorio para las muestras recuperadas en campo durante la exploración del perfil del macizo rocoso en el área del proyecto.

1.4. RESULTADOS DE LA EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL PERFIL DEL ÁREA DEL PROYECTO.

1.4.1. DESCRIPCIÓN DEL PERFIL DEL MACIZO ROCOSO DEL ÁREA DEL PROYECTO

El perfil del macizo rocoso está constituido por rocas areniscas con coloraciones amarillo y naranja crema de cementación alta, y meteorización alta para bloques superficiales; roca poco compresible y con potencial expansivo muy bajo, de resistencia alta y densidad alta hacia profundidad; manifestando incluso rechazo a los ensayos de penetración dinámica DCPT.

<i>Grado de variabilidad estratigráfica horizontal</i>	<i>Grado de variabilidad estratigráfica vertical</i>
<i>Muy baja:</i> El perfil identificado es homogéneo en macizo rocoso sin cambios en litología y tendencias estructurales o cinemáticas en toda la extensión del predio.	<i>Baja:</i> El perfil identificado está compuesto de un macizo rocoso con cambios de litología hacia la parte inferior del talud con una capa de considerable espesor de arcillolitas fragmentadas.
<i>Variabilidad en la coloración</i>	<i>Variabilidad en la clasificación (ISRM)</i>
<i>Baja:</i> El perfil de suelo presenta coloración amarilla y naranja crema para las areniscas y tonalidades grises para las intercalaciones de arcillolitas, a la vista no hay un cambio fuerte de tonalidades. El material más superficial presenta tonalidades grisáceas y negras.	<i>Baja:</i> La totalidad de las muestras del macizo rocoso se clasifican como areniscas que presentan una resistencia de tipo R2.
<i>Observaciones: --</i>	

1.5. NIVEL PIEZOMÉTRICO Y DE AGUAS FREÁTICAS EN EL AREA DE FUNDACION DEL PROYECTO

Se identificó presencia de Nivel Freático	No	Presenta Distribución uniforme en el predio	N.A
Presenta tabla de agua estática	No	Profundidad del Agua Freática	N.A
Presenta tabla de agua confinada	No	Pérdida de Confinamiento	No
		Nivel Libre de aguas freáticas	No
Observaciones: Durante la exploración geotécnica no se identificó la presencia de aguas freáticas en ninguno los apiques ejecutados. Debido a la composición arenosa del macizo rocoso y su densa cobertura vegetal, su estratificación a contrapendiente y el grado de fracturamiento de las rocas que lo componen; no se presentan niveles libres de aguas freáticas.			

1.6. ESTUDIO GEO-MECÁNICO DEL MACIZO ROCOSO

Los estudios geotécnicos, en este caso, la caracterización geo mecánica, se realiza con el fin de determinar las propiedades físicas y mecánicas del macizo rocoso, su comportamiento ante los incrementos de esfuerzos aplicados sobre éste en un momento dado, ya sea por el apoyo de obras civiles o el desconfinamiento y conformación de taludes artificiales.

Se realiza un detallado reconocimiento geológico, en el cual se efectúan pruebas de campo y mediciones de las características del macizo, tanto en la matriz rocosa como en las discontinuidades que conforman el macizo, y se complementa con ensayos de laboratorio a las muestras tomadas del área estudiada. El objetivo de esta caracterización es para la evaluación de la estabilidad del macizo, en estado actual y su comportamiento ante cortes y excavaciones, cuantificándola mediante factores de seguridad.

El compendio de pruebas de campo y laboratorio para materiales del macizo rocoso se presentan en el *anexo No. 2*.

1.6.1. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MATRIZ ROCOSA

Se realizó la recolección de muestras del macizo rocoso, con el fin de realizar los ensayos de laboratorio requeridos para la identificación y cálculo de las propiedades físicas. Los resultados de estos ensayos pueden apreciarse en el *anexo No.2*.

Tabla 1. Resultado de laboratorio. Ensayo de propiedades físicas compresión simple.

MUESTRA	ALTURA (cm)	LONGITUD DESPUES DEL REFRENTADO (cm)	LONGITUD DE LADOS (cm)		RELACIÓN H/D	PESO (g)	DENSIDAD O PESO UNITARIO (g/cm3)
			L1	L2			
MUESTRA DE ARENISCA #1	11.70	11.70	5.5	5.6	2.10	832.6	2.29
MUESTRA DE ARENISCA #2	12.20	12.20	6.3	5.7	2.04	1003.2	2.31
MUESTRA DE ARENISCA #3	9.86	9.86	5.6	5.5	1.78	654.8	2.16
MUESTRA DE ARENISCA #4	11.40	11.40	5.4	5.3	2.12	719.6	2.18

1.6.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MATRIZ ROCOSA

La estabilidad de los taludes artificiales y laderas adyacentes, depende de las condiciones estructurales en que se encuentre el macizo rocoso y de la relación que existe entre los esfuerzos generados en la roca y su resistencia

Ensayo de compresión simple

Uno de los parámetros fundamentales en la caracterización mecánica del macizo rocoso es la resistencia a la compresión simple, ya que permite estimar la curva envolvente de resistencia de la roca intacta, así como asociar la capacidad de la matriz rocosa a la hora de asumir esfuerzos. Este parámetro se vuelve aún más indispensable en el contexto de macizos cuya matriz rocosa es significativamente blanda, ya que la falla ante esfuerzos inducidos puede darse a través de dicha matriz pese que las condiciones cinemáticas puedan ser favorables. En el caso del área estudiada, las rocas de arenisca aflorantes son maduras y duras debido a la buena cementación que presentan; por tanto, son prioritarias para dicho ensayo.



Fotografía 13, 14, 15 y 16. Fotografías de las muestras del macizo rocoso y ensayo de resistencia a la compresión simple.

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos de compresión simple realizados

Tabla 2. Resultado de laboratorio. Ensayo de compresión simple.

Muestra	Carga absorbida (kg)	Resistencia a la compresión	
		kg/cm ²	MPa
Arenisca M1	7242	235.0	23.5
Arenisca M2	7839	220.7	22.1
Arenisca M3	5080	162.6	16.3
Arenisca M4	3771	131.7	13.2

Ensayos de índice manual de resistencia de roca en campo (ISRM, 1981):

Los ensayos manuales en campo son pruebas auxiliares, que permiten complementar y enriquecer los datos obtenidos en laboratorio, se trata de pruebas manuales con herramientas de uso común en trabajo de campo, que permiten aproximar el rango de resistencias que la matriz rocosa presenta en el lugar, y por su practicidad

es posible levantar una buena base de datos del lugar estudiado, con el fin de complementar los ensayos de laboratorio.

A continuación, se presenta la tabla utilizada para la caracterización geotécnica de rocas por medio del ensayo de índice manual de resistencia de roca en campo (ISRM, 1981) y el resumen de resistencia de cada una de las muestras.

Tabla 3. Valores de resistencia para Ensayos de Índice manual de resistencia de roca en campo (ISRM, 1981)

Clase	Descripción	Identificación del campo	Valor aproximado de la resistencia a compresión simple	
			Mpa	Kg/cm²
R₀	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña	0.25 – 1.0	2.5 - 10
R₁	Roca muy blanda	Deleznable bajo golpes del martillo de geólogo, puede rayarse con una navaja. Se talla fácilmente con una navaja	1.0-5.0	10-50
R₂	Roca blanda	Puede rayarse con dificultad con la navaja, se pueden hacer marcas poco profundas golpeando fuertemente con la punta del martillo	5.0-25	50-250
R₃	Roca moderadamente dura	No se puede rayar con una navaja la muestra en mano, se puede romper con un golpe firme del martillo de geólogo, al impacto la punta del martillo indenta hasta 5 mm.	25-50	250-500
R₄	Roca dura	Se necesita más de un golpe con el martillo de geólogo para romper la muestra, especímenes sostenidos en la mano se rompe con un simple golpe de martillo	50-100	500-1000
R₅	Roca muy dura	Se necesita muchos golpes con el martillo de geólogo para romper la muestra.	100-250	1000-2500
R₆	Roca extremadamente dura	El martillo produce solamente descarrillado de la muestra, sonido metálico de golpe. Solo saltan esquirlas de roca.	> 250	> 2500

Tabla 4. Valores de resistencia de las muestras, de acuerdo a la caracterización manual (ISRM, 1981)

Descripción	Resistencia ISRM 1981	Resistencia Mpa
Muestras 1	R3	25 a 50
Muestras 2	R2	5 a 25
Muestras 3	R2	5 a 25
Muestras 4	R2	5 a 25

Muestras 5	R3	25 a 50
Muestras 6	R2	5 a 25
Muestras 7	R2	5 a 25
Muestras 8	R2	5 a 25
Muestras 9	R2	5 a 25



Fotografías 17 y 18. Fotografías de caracterización manual de muestras para determinar rango de resistencia de la roca en campo.

Ensayo de carga puntual

Otro ensayo complementario a la compresión simple, es el de carga por punta, que permite estimar de forma indirecta la resistencia a la compresión simple; es un ensayo de fácil implementación, por tal motivo, es una buena opción para complementar la información de laboratorio y para mejorar el entendimiento del comportamiento del macizo. A continuación, se presentan los resultados de los ensayos:





Fotografía 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 y 27. Ensayo de carga por punta en muestras de roca.

Tabla No 1. Resultados ensayos de carga por punta en muestras de roca.

Muestra - localización	W Prom.	D Prom.	WD	(De)2	Is	Is 50	σ_{cl}	σ_{cl}
	mm	mm	mm2	mm2	MPa	MPa	MPa	Kgf/cm2
Muestra 1: Arenisca	72.0	63.75	4590.00	5844.17	1.494	1.808	43.4	434.0
Muestra 2: Arenisca	61.0	61.00	3721.00	4737.72	1.173	1.355	32.5	325.2
Muestra 3: Arenisca	56.3	56.00	3150.00	4010.70	1.781	1.981	47.6	475.5
Muestra 4: Arenisca	60.0	57.50	3450.00	4392.68	1.121	1.273	30.5	305.5
Muestra 5: Arenisca	72.3	54.50	3937.63	5013.54	2.184	2.554	61.3	613.0
Muestra 6: Arenisca	67.5	68.75	4640.63	5908.63	0.351	0.425	10.2	102.1
Muestra 7: Arenisca	52.3	55.25	2886.81	3675.60	0.909	0.991	23.8	237.8
Muestra 8: Arenisca	54.8	57.25	3134.44	3990.89	1.520	1.689	40.5	405.3
Muestra 9: Arenisca	53.3	47.50	2529.38	3220.50	1.825	1.932	46.4	463.6

Martillo de Schmidt

El martillo de Schmidt o también llamado esclerómetro originalmente se aplica a hormigones para conocer su resistencia, pero también se ha extendido su uso a macizos rocosos para determinar de forma indirecta, la resistencia a compresión axial de una roca. Es muy práctico y útil ya que, de forma rápida, se puede tener una aproximación de la resistencia de una roca “in situ”. El martillo de Schmidt, es un instrumento que permite estimar aproximadamente la resistencia a compresión simple de una roca, ya sea en un talud, túnel, testigo de roca o discontinuidad mediante el rebote que produce el muelle que se aloja en su interior, después de un impacto sobre una superficie rocosa.



Figura 4. Martillo Schmidt o esclerómetro, empleado para toma de datos de resistencia a la compresión.



Fotografía 28 y 29. Toma de datos de resistencia a la compresión en campo, empleando martillo de Schmidt o esclerómetro.

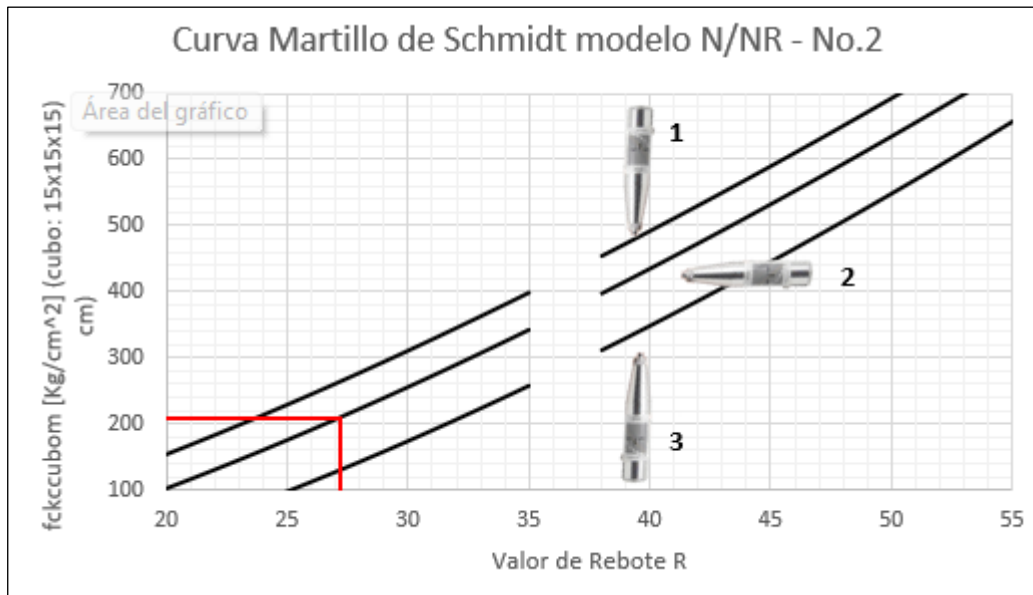


Figura 5. Resultados gráficos de ensayo con martillo de Schmidt en labores de campo.

Tabla 5. Relación de resultados de resistencia de la roca.

Resultados de Martillo Schmidt			
Conjunto de prueba	Valor Promedio Rebote	Modo	σ_{ci} (Mpa)
1	27	A (2)	20.43

1.6.3. CARACTERIZACIÓN DE DISCONTINUIDADES

Un macizo rocoso se constituye generalmente de un conjunto comprendido por la matriz rocosa y las discontinuidades presentes en dicha matriz, en el caso de que existan planos de estratificación, fallas o diaclasas; comúnmente las agrupaciones de estas reciben el nombre de familias, las cuales rigen el comportamiento cinemático del macizo rocoso, comprendido como una agrupación de rocas, organizadas en bloques separados entre sí por vacíos y fracturas propias de la evolución tectónica de dichas capas rocosas.

El estudio de la orientación de las discontinuidades y su influencia en la estabilidad de las laderas se lleva a cabo mediante el empleo de la técnica conocida como proyección estereográfica. Con esta herramienta es posible analizar la estructura del macizo rocoso, y determinar si la orientación de las discontinuidades y su rugosidad hacen que se cumplan los requisitos cinemáticos que puedan dar lugar a una inestabilidad por efecto de las excavaciones proyectadas.

Superficies de discontinuidad: Una discontinuidad es una superficie de fractura o de interface entre materiales de distinto comportamiento en el macizo rocoso, que tiene baja o nula resistencia a la tracción; como planos de estratificación, diaclasas, espejos de fallas, estructuras sedimentarias y metamórficas, etc.

Una superficie de discontinuidad está abierta o puede abrirse fácilmente a causa de las tensiones introducidas por un esfuerzo superficial.

Orientación: Para definir un plano de discontinuidad, la forma más sencilla es por medio de la magnitud de dos datos; el primero es la dirección de la mayor pendiente del plano respecto al norte geográfico de la tierra, y se conoce como dirección azimutal del buzamiento, y la segunda magnitud es el valor del buzamiento del plano, es decir, la magnitud de la inclinación máxima que presenta el plano; ambas medidas en degradantes (sistema sexagesimal) se obtiene por medio de la brújula análoga o digital.

Espaciado: Describe la distancia entre las discontinuidades, y por lo tanto el tamaño de los bloques de roca intacta, que están delimitados por las discontinuidades.

Tabla 6. Valores para clasificación de discontinuidades según el espaciado.

Descripción	Espaciado (m)
Extremadamente Pequeño	0.02
Muy Pequeño	0.02-0.06
Pequeño	0.06-0.2
Moderado	0.2-0.6
Grande	0.6-2
Muy Grande	2-6
Extremadamente Grande	6

Continuidad de discontinuidades: Indica la extensión de la discontinuidad (longitud en un sentido (Rumbo o buzamiento), esta se puede clasificar de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 7. Valores de longitud de discontinuidades para clasificación en RMR.

Descripción	Dimensión (m)
Continuidad muy pequeña	1
Continuidad pequeña	1-3
Continuidad Media	3-10
Continuidad Alta	10-20
Continuidad muy alta	20

Rugosidad: Indica la irregularidad de la superficie de discontinuidad, es una medida cualitativa y se determina con la observación directa en campo.

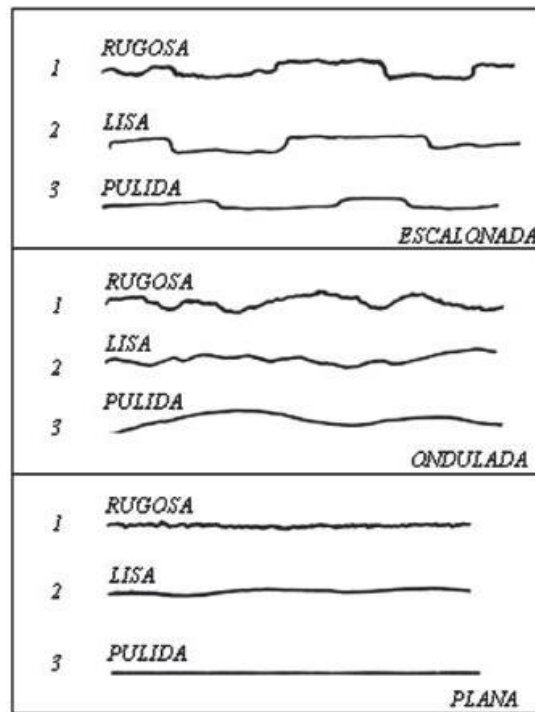


Figura 6. Tipos de rugosidades en discontinuidades.

Resistencia de las juntas de discontinuidades: Se expresa en función de la rugosidad de las juntas y la resistencia de la matriz rocosa superficial inmediata a la discontinuidad en el caso de que la abertura de la discontinuidad sea muy pequeña y no esté ocupada por materiales de relleno.

Abertura: Distancia que separa las paredes adyacentes de una discontinuidad abierta, en la que el espacio intermedio tiene agua, aire o material de relleno.

Relleno: Se refiere al material que ocupa el espacio de abertura de una discontinuidad. El relleno cobra importancia cuando tiene el espesor suficiente para controlar el comportamiento mecánico y la resistencia al corte en las discontinuidades.

Circulación de agua: El grado de filtración de agua en discontinuidades individuales o en familias específicas expuestas en un afloramiento puede ser descrito según la siguiente tabla, esta describe el grado de permeabilidad primaria y secundaria del macizo rocoso, así como las presiones de poros y alteraciones minerales en las caras de las discontinuidades.

Tabla 8. Descripción de las filtraciones en las discontinuidades.

Clase	Discontinuidades sin relleno	Discontinuidades con relleno
I	Junta muy plana y cerrada. Aparece seca y no parece posible que circule agua	Relleno muy consolidado y seco, no es posible el flujo de agua
II	Junta seca sin evidencia de flujo de agua	Relleno húmedo, pero sin agua libre
III	Junta seca, pero con evidencia de haber circulado agua	Relleno mojado con goteo ocasional

IV	Junta húmeda, pero sin agua libre	Relleno que muestra señales de lavado, flujo de agua continuo (estimar caudal en l/min)
V	Junta con rezume, ocasionalmente goteo, pero sin flujo continuo	Relleno localmente lavado, flujo considerable según canales preferentes (estimar presión y caudal)
VI	Junta con flujo continuo de agua (estimar el caudal en l/min y la presión)	Rellenos completamente lavados, presiones de agua elevadas.

Medidas de discontinuidades: En la siguiente tabla se resumen los datos preponderantes de familias de diaclasas proveniente del estudio estadístico de los datos tomados en campo para este estudio La tabla 9, muestra los datos recolectados en campo. Los análisis estadísticos para cada familia se encuentran en el *anexo digital No 2*.

Tabla 9. Parámetros de caracterización de las diaclasas.

Tipo	Separación (m)	Continuidad (m)	Abertura (mm)	Rugosidad	Relleno	Alteración	Agua
0. Diaclasa Fam. 1	0,06 - 2,0	< 1	10 - 100	Ondulada – Rugosa	Baja	Medianamente alterada	Húmedo
1. Diaclasa Fam. 2	0,06 - 2,0	1 - 3	10 - 100	Escalonada - Rugosa	Baja	Medianamente alterada	Húmedo
2. Diaclasa Fam. 3	0,06 - 2,0	< 1	100 - 1000	Ondulada - Rugosa.	Media	Medianamente alterada	Húmedo
3. Estratificación Fam. 4	0,06 - 2,0	1 - 3	10 - 100	Escalonada rugosa.	Baja	Medianamente alterada	Húmedo

Para tener una visión gráfica de los datos estructurales medidos en el macizo rocoso y tomados durante las visitas de campo, se hizo uso del software *DIPS* 7.0, el cual permite analizar y visualizar este tipo de información; a partir del cual se obtienen la distribución de polos, en proyección estereográfica equiareal. Se parte de un total de 38 datos estructurales compuestos por azimuth y buzamiento, a partir de los cuales se obtienen las gráficas antes mencionadas que se muestran a continuación con su respectiva descripción.

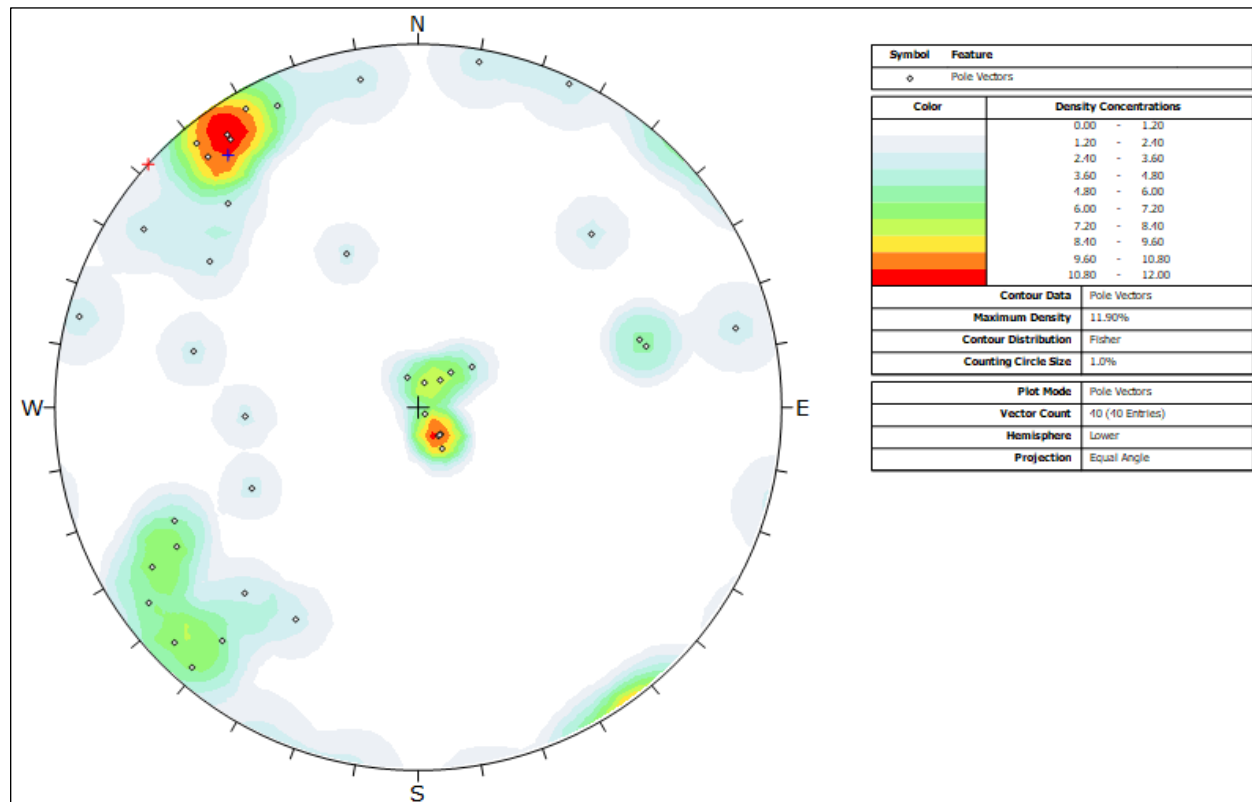


Figura 7. Representación de datos en software Dips. Distribución de concentración de polos.

A partir de un total de 39 datos estructurales ingresados al software, se obtuvo la representación gráfica mostrada, en la cual se observa la distribución de polos sobre la falsilla, y a partir de la cual se identifican tendencias de familias.

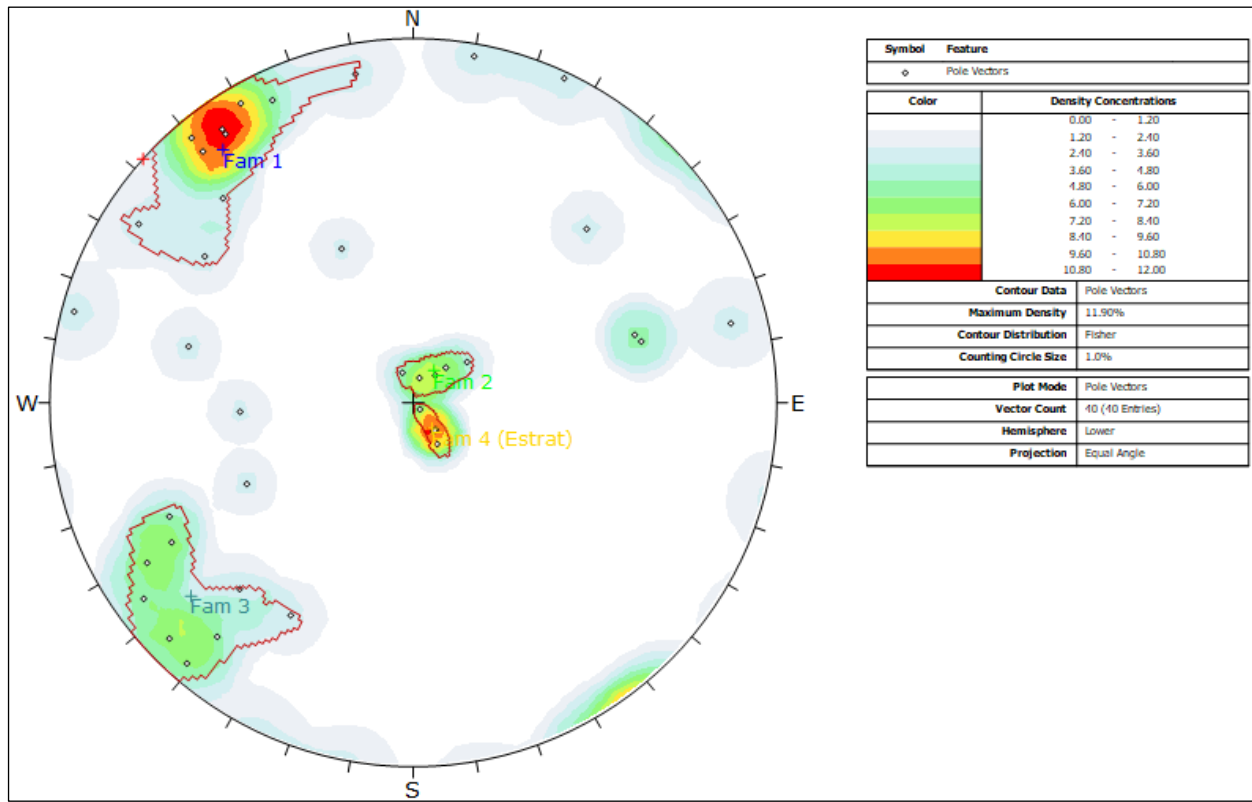


Figura 8. Familias de discontinuidades identificadas.

Dichas concentraciones se organizaron en cuatro grupos representados por tres planos o familias relacionados con diaclasas, y el cuarto, la estratificación. Se presentan las orientaciones promedio de cada familia definidas mediante dato azimutal y buzamiento:

Familia diaclasas F1: 143/82.
 Familia diaclasas F2: 213/12.
 Familia diaclasas F3: 49/78.
 Estratificación: Azimut 324/10.

Condiciones mecánicas de las discontinuidades

Con base en las observaciones realizadas en campo, se identificó y caracterizó el grupo de discontinuidades relacionadas con la estratificación, que resultan proclives a presentar deslizamientos planares en la superficie del talud. Su parametrización se realizó siguiendo los criterios de Barton – Bandis, basados en las características geométricas de las superficies de las discontinuidades, la resistencia de la matriz rocosa y el coeficiente de fricción de la superficie.

A nivel general del macizo se trata de discontinuidades poco espaciadas, sin rellenos, significativamente escalonadas - onduladas y rugosas, por lo tanto, se asume que la resistencia de la discontinuidad depende de las características de las rocas en contacto y la geometría de la discontinuidad, salvo en casos puntuales donde existirá un control del relleno en la resistencia de la discontinuidad. Se obtuvo un coeficiente de fricción

básico de 28° grados en las superficies rocosas, mediante ensayos de Tilt - test en campo y un valor residual de 18°.



Figura 9. Identificación en campo de propiedades físicas de las discontinuidades.

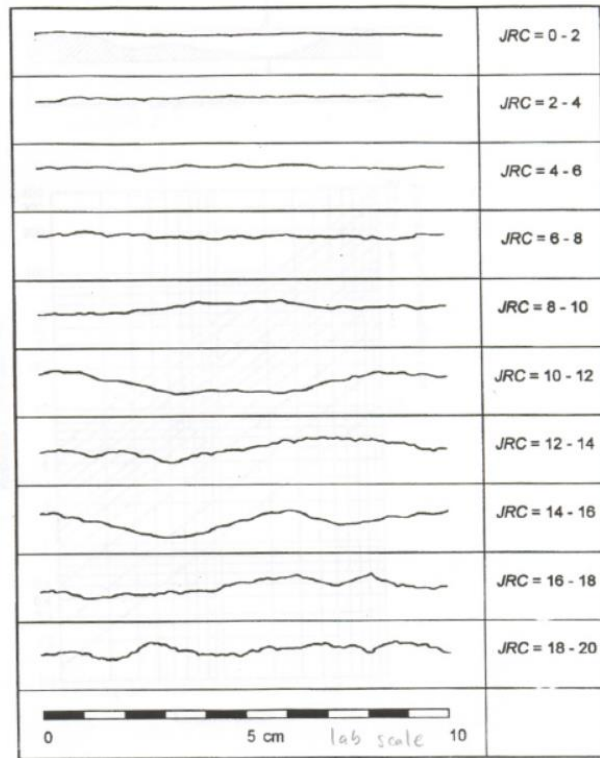


Figura 10. Rugosidad de las discontinuidades analizadas, valor promedio de JRC = 11

Figura 11. Parámetros de resistencia de juntas para análisis de deslizamiento Planar (planos de estratificación) Realizado en el software RocPlane de Rocscience.

1.6.4. CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO SMR

De acuerdo a la exploración y caracterización de la zona, se pudo observar que se presenta una homogeneidad en cuanto al tipo de roca y por ende, no hay diferencias significativas en sus propiedades físicas y mecánicas. Se caracteriza a la roca del macizo como una roca de resistencia intermedia de arenisca (Ria) según nomenclatura UGI (Unidades de Geología para Ingeniería).

Romana (1985) propone la clasificación de la estabilidad de taludes en roca en función del SMR (Slope Mass Rating), definido como una modificación del sistema RMR (Rock Mass Rating) propuesto por Bieniawski (1973). El SMR está dado por la ecuación:

$$SMR = RMR + (F1 \times F2 \times F3) + F4$$

Donde

F1 depende del paralelismo entre el rumbo de las discontinuidades y la cara del talud y se define como:

$$F1 = (1 - \sin(\alpha_j - \alpha_s))$$

Donde

α_j es dirección de discontinuidad.

α_s es dirección del talud

Los valores que puede obtener este parámetro se encuentran entre (0,15-1,0).

F2 depende del buzamiento de la discontinuidad en la rotura plana y se define como, analíticamente se obtiene por la expresión:

$$F2 = \tan^2(\beta_j)$$

Donde

β_j es buzamiento de la discontinuidad. Los valores que puede obtener este parámetro se encuentran entre 0,15 y 1,0.

F3 representa la relación entre los buzamientos de la discontinuidad y del talud, dada por los valores propuestos por Bieniawski (1973)

F4 representa el factor de ajuste según el método de excavación.

De manera resumida, la siguiente tabla muestra el proceso para obtener estos factores.

Tabla 11. Factor de ajuste de clasificación SMR (Romana, 1985).

Factores de ajuste de las juntas. F1, F2 y F3.	Muy Favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
Planar: $\alpha_j - \alpha_s$	> 30°	30° - 20°	20° - 10°	10° - 5°	< 5°
Vuelco: $\alpha_j - \alpha_s - 180^\circ$	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
Analítico:	$F_1 = [1 - \sin(\alpha_j - \alpha_s)]^2$				
[β_j]	< 20°	20° - 30°	30° - 35°	35° - 45°	> 45°
Valores Planar	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
Valores Vuelco	1.00				
Ajuste analítico:	$F_2 = [\tan(\beta_j)]^2$				
Planar [$\beta_j - \beta_s$]	> 10°	10° - 0°	0°	0° - (-10°)	< -10°
Vuelco [$\beta_j + \beta_s$]	< 110°	110° - 120°	> 120°	-	-
Valores:	0	-6	-25	-50	-60
Ajuste analítico:	F3= Se mantienen los valores propuestos por Bieniawski (1976 – 1979).				
Factor de ajuste por el método de excavación.	F4= Valores empíricos establecidos para cada método de excavación.				
	Talud natural	Pre corte	Voladura Suave	Voladura o mecánico	Voladura deficiente
	+15	+10	+8	0	-8

Esta metodología permite estimar de manera cualitativa la posibilidad cinemática de un talud, a partir de parámetros que definen la calidad del macizo, como se observa en la siguiente tabla:

CLASE SMR	I 110-81	II 80-61	III 60-41	IV 40-21	V 20-0
Descripción	Muy buena	Buena	Normal	Mala	Muy mala
Estabilidad	Totalmente estable	Estable	Parcialmente estable	Inestable	Totalmente inestable. Grandes roturas por planos continuos o por la masa. Reexcavación
Roturas	Ninguna	Algunos bloques	Algunas juntas o muchas cuñas	Juntas o grandes cuñas	
Tratamiento	Ninguno	Ocasional	Sistemático	Corrección	

Figura 12. Clases de estabilidad mediante la metodología SMR. Tomado de Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.

MECANISMO DE FALLA	FALLA PLANAR		FALLA DE CUÑA		FALLA POR VOLTEO	
Relación	SMR > 60	Ninguna	SMR > 75	Muy pocas	SMR > 65	Ninguna
	60 > SMR > 40	Importantes	75 > SMR > 40	Algunas	65 > SMR > 50	Menores
	40 > SMR > 15	Muy grandes	40 > SMR > 75	Muchas	50 > SMR > 30	Muy grandes

Figura 13. Relación de índice SMR con el tipo de falla para taludes. Tomado de Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.

Para el actual proyecto se realizó el análisis de SMR para la zona del talud más crítica que ha presentado inestabilidad y caída de bloques. El corte se puede observar en la siguiente figura:



Figura 14. Corte para el análisis cinemático del talud y clasificación SMR del macizo.

Clasificación geomecánica RMR

La clasificación geomecánica RMR permite obtener un índice de calidad del macizo rocoso a partir de 5 parámetros:

1. Resistencia de la roca intacta.
2. Índice de calidad de la roca.
3. Espaciamiento de las discontinuidades
4. Condición de las discontinuidades.
5. Presencia de agua.

Cada parámetro tiene un puntaje y unas subclasificaciones asignadas y se van sumando (Ver tabla 17).

Tabla 12. Clasificación del macizo rocoso RMR.

Parámetro: Resistencia de la matriz rocosa (MPa)							
Ensayos de carga puntual	>10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)		
Compresión simple	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	1<

Puntuación	15	12	7	4	2	1	0
RQD	90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%		<25%	
Puntuación	20	17	13	6		3	
Separación entre discontinuidades		>2m	0.6-2m	0.2-0.6m	0.06-0.2m	<0.06m	
Puntuación		20	15	10	8	5	
Parámetro: Estado de las discontinuidades							
Longitud de la discontinuidad	<1m	1-3m	3-10m		10-20m	>20m	
Puntuación	6	4	2		1	0	
Abertura	Nada	<0.1mm	0.1-1mm		1-5mm	>5mm	
Puntuación	6	5	3		1	0	
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa		Ondulada	Suave	
Puntuación	6	5	3		1	0	
Relleno	Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm		Relleno blando <5mm	Relleno blando >5mm	
Puntuación	6	4	2		2	0	
Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada		Muy alterada	Descompuesta	
Puntuación	6	5	3		1	0	
Caudal por 10m del túnel NA	Nulo	10 litros/minuto	10-25 litros/minuto	25-125 litros/minuto		>125 litros/minuto	
Relación: Presión de agua/tensión principal mayor	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5		>0.5	
Estado general	Seco	Ligeramente seco	Húmedo	Goteando		Agua fluyendo	
Puntuación	15	10	7	4		0	

Corrección por la orientación de las discontinuidades						
Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60
Clasificación						
Clase	I	II	III	IV	V	
Calidad	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala	
Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	<20	

RMR BÁSICO = 43

De acuerdo a los resultados obtenidos a partir de las tablas anteriores se clasifica el macizo rocoso según la siguiente tabla:

Tabla 13. Clasificación de macizo rocoso RMR, parámetros mecánicos sugeridos.

Índice RMR: calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR				
Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión	Ángulo de rozamiento
I	Muy buena	100-81	> 4 kg/cm ²	>45°
II	Buena	80-61	3-4 kg/cm ²	35°-45°
III	Media	60-41	2-3 kg/cm ²	25°-35°
IV	Mala	40-21	1-2 kg/cm ²	15°-25°
V	Muy mala	< 20	< 1 kg/cm ²	< 15°

El índice RMR va desde 0 hasta 100 puntos a partir de los cuales el macizo rocoso puede clasificarse en 5 categorías.

Muy buena: 100 – 81

Buena: 80 – 61

Media: 60 – 41

Mala: 40 – 21

Muy mala: <20

El RMR general que se obtuvo para el macizo rocoso fue de 43.

	Resistencia de la roca	RQD	Espaciamiento discontinuidades	Condición discontinuidades	Agua
Valoración	10 (Mpa)	58	0,06 – 0,2 (m)	Ondulada rugosa, abertura 10 – 100 (mm), bordes débiles.	Húmedo
Puntaje	3.5	8	7	14	10

SMR y factores (f1, f2, f3 y f4) – Análisis para perfil A -A'

De acuerdo a la metodología anteriormente descrita se obtuvieron los siguientes resultados para el análisis del talud que se inclina en dirección sureste, identificada con el corte transversal A -A'. El factor de ajuste según método de excavación (F4) corresponde a 0.

Tabla 14. Consolidado para determinar el SMR de la ladera representada por el perfil A – A'. (El SMR se hace para las condiciones de falla planar y falla por volcamiento)

FAMILIA	BUZAMIENTO	AZIMUT DEL BUZAMIENTO	FAMILIA	RMR (CORREGIDO)	P	F1	F2	P PARA F3	F3	SMR P	T PARA F1	F1	F2	T PARA F3	F3	SMR T	SMR MÁS BAJO POR FAMILIA
TALUD	90	132	TALUD														
1	82	143	DIACLASA 1	42.50	11	0.7	1.00	-8	-50	7.5	169	0.15	1	172	-25	38.75	7.5
2	12	213	DIACLASA 2	42.50	81	0.15	0.15	-78	-60	41.15	99	0.15	1	102	0	42.5	41.15
3	78	49	DIACLASA 3	42.50	83	0.15	1.00	-12	-60	33.5	263	0.15	1	168	-25	38.75	33.5
4	10	324	PLANO DE ESTRATIFICACIÓN	42.50	192	0.15	0.15	-80	-60	41.15	12	0.7	1	100	0	42.5	41.15

Tabla 15. Clases de estabilidad SMR (Romana, 1985).

Tipo de Rotura	Intervalos SMR	Frecuencia
Planas	SMR > 60 60 > SMR > 40 40 > SMR > 15	Ninguna Importantes Muy grandes
Por vuelco	SMR > 65 65 > SMR > 50 50 > SMR > 30	Ninguna Menores Importantes

Tabla 16. Clases de estabilidad SMR (Romana, 1985).

Descripción de las clases SMR										
Clase N°	Vb	Va	IVb	IVa	IIIb	IIIa	IIb	IIa	Ib	Ia
Descripción	Muy mala		Mala		Normal		Buena		Muy buena	
Estabilidad	Totalmente inestable		Inestable		Parcialmente inestable		Estable		Totalmente estable	
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por la matriz		Grandes juntas y/o grandes cuñas		Algunas juntas o muchas cuñas		Algunos bloques		Ninguna	
Sostenimientos	re excavación		Importantes		Sistemáticos		ocasionales		Ninguna	

1.6.5. GSI (GEOLOGICAL STRENGTH INDEX) ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA, HOEK ET AL (1995).

La determinación de los parámetros del GSI se basa en las descripciones de la calidad del macizo rocoso en lugar de formular datos de entrada cuantitativos como en los sistemas RMR, Q y RMI. El GSI es utilizado para la estimación de los parámetros de entrada para el cálculo de la resistencia, solo es una relación empírica y los procesos asociados a las clasificaciones de la ingeniería de rocas.

Bajo estas consideraciones y con las características propias del macizo rocoso y las unidades geo mecánicas definidas se obtuvo un valor de GSI. Desde el punto de vista mecánico las rocas aflorantes son blandas a intermedias, y las condiciones de las discontinuidades en cuanto a espaciamiento, aberturas, rellenos de estas discontinuidades y rugosidad resultan desfavorables.

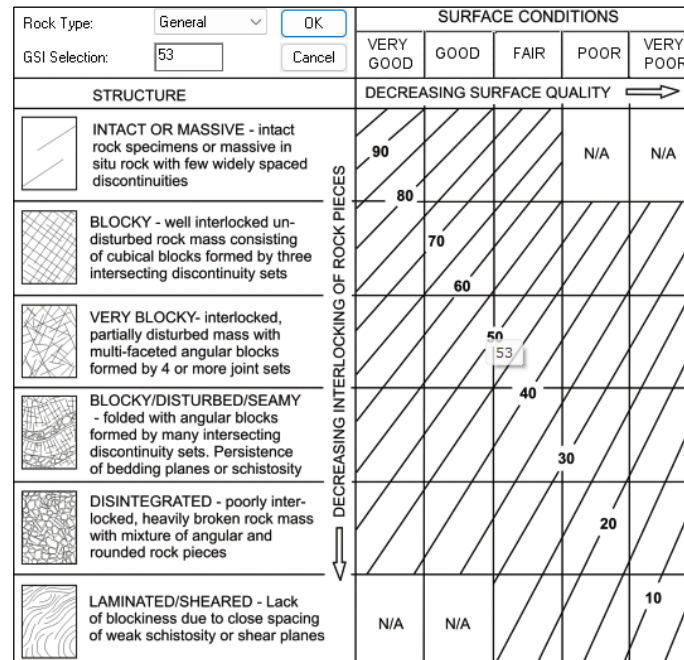


Figura 15. Clasificación del macizo rocoso GSI.

1.7. PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO

El criterio de rotura usado fue el criterio de rotura generalizado de Hoek-Brown. Los parámetros de entrada son los obtenidos de los ensayos de roca, así como correlaciones y valores de literatura de forma complementaria. el criterio de Hoek Brown – utiliza el sigci (compresión simple), mi (estimado mediante el ensayo de compresión simple y el ensayo de tracción indirecta), y los valores cualitativos del GSI y D a partir de observaciones y comparaciones relativas.

Con los anteriores datos se calcula la Cohesión, el ángulo de fricción interna de la roca (ϕ), el módulo de deformación, el esfuerzo a la compresión global del macizo rocoso y demás parámetros necesarios para el estudio del macizo.

El factor D, identifica el grado de perturbación del macizo rocoso teniendo en cuenta los métodos de excavación y la relajación de esfuerzos. Debido a que se no contemplan métodos muy agresivos para la excavación. El valor estimado para el factor D es de 0.

Los datos de entrada y resultados de la aplicación se encuentran relacionados en la siguiente tabla.

Tabla 17. Determinación de los parámetros de resistencia del macizo rocoso.

DATOS DE ENTRADA ROCLAB		DATOS DE SALIDA ROCLAB	
Sigci	20 Mpa	Mb	3.173
GSI	53	S	0.0054
Mi	17	a	0,505
D	0	C (Mpa)	0.322

H Talud	30 m	Ø (°)	53°
Tipo de roca	Arenisca	Em (Mpa)	2013.38 Mpa
		σc (Mpa)	1434 Mpa

2. MODELO GEOLÓGICO - GEOTÉCNICO

Con base en la exploración y caracterización realizada y expuesta anteriormente, se pudo obtener el modelo geológico geotécnico del área a estudiar. Este tipo de modelo integra información geológica con propiedades geotécnicas para proporcionar una representación detallada del subsuelo y sus características. A partir del modelo resultante, se permite analizar la estabilidad de talud y en función de los resultados de la evaluación, se diseñan las medidas más óptimas para prevenir o mitigar los problemas geotécnicos presentes.

A continuación, se presenta el modelo geológico geotécnico desde planta y perfil, obtenido del área del proyecto y las características de los materiales del mismo.

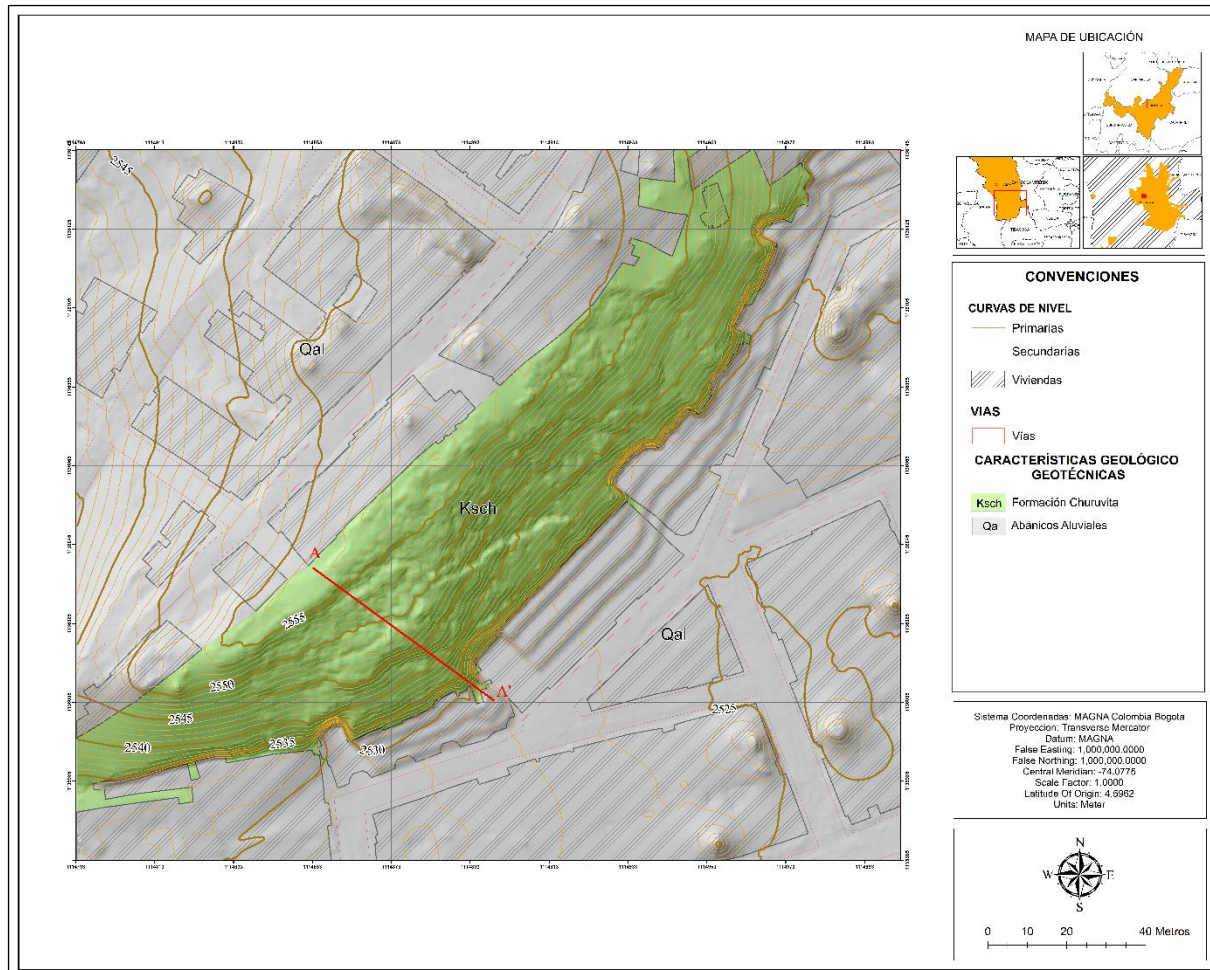


Figura 16. Mapa de planta del modelo geológico geotécnico del sector “La Fuente”.

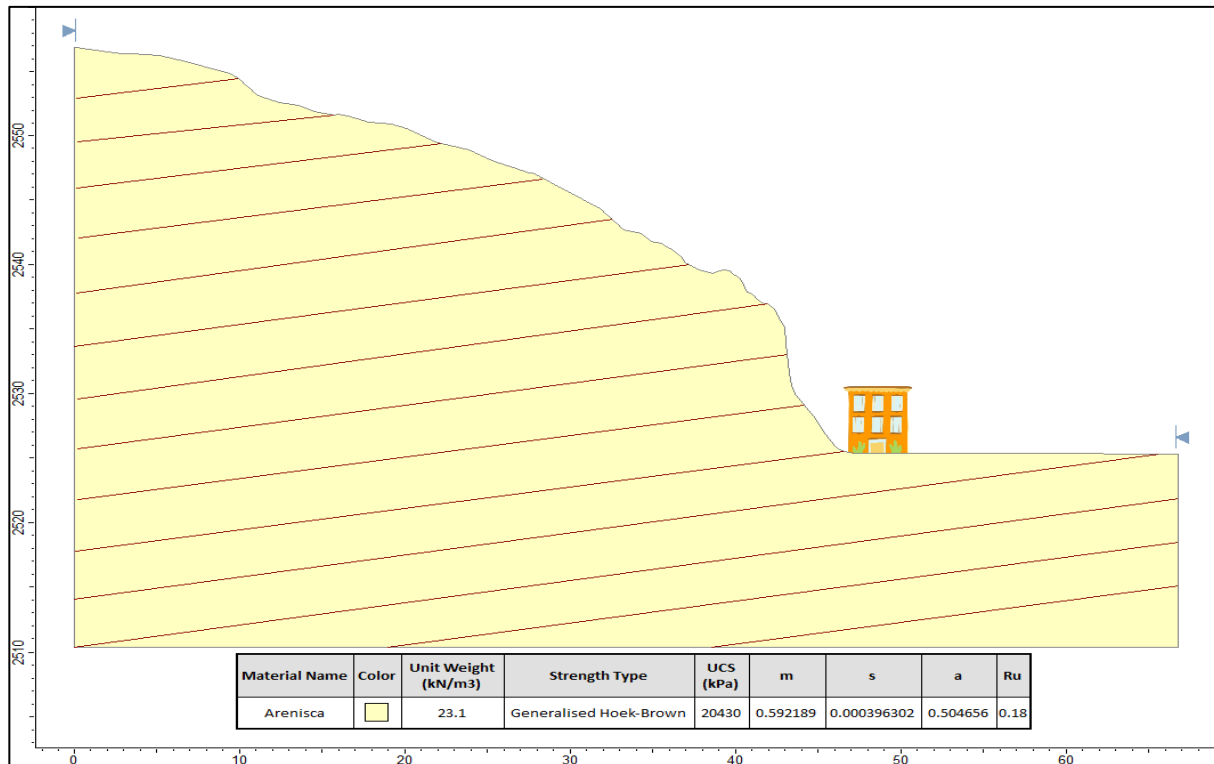


Figura 17. Corte A – A'. Perfil del Modelo geológico geotécnico del sector “La Fuente”.

El área del proyecto se compone de dos materiales litológicos. Por un lado, hacia la parte de la corona y el pie del talud, se presenta un depósito de abanico aluvial; por el otro, el macizo rocoso del talud está compuesto de arenisca de la formación Churuvita (Ksch). La inestabilidad y la problemática que se presenta en el área, específicamente involucra a la parte de las areniscas; dentro del depósito no se encuentran problemas de tipo geotécnico, el depósito no se ubica dentro del área inestable y tampoco se evidencian efectos sobre el mismo.

La arenisca del macizo rocoso es una roca con resistencia media – baja superficialmente, de índice de resistencia geológica entre 50 y 60. En cuanto a parámetros geotécnicos de roca y del macizo, se presentan los observados en la siguiente tabla.

Areniscas R2 (ISMR)	
PARÁMETRO	VALOR
γ	2.39 tn/m ³
σ_{CI}	20 MPa
GSI	55
m_i	17
D	0
mb	3.173
s	0.0054
a	0.505
C' (Cohesión)	322 KPa
Φ' (Ángulo de fricción)	53°

Módulo de deformación	2013.38 MPa
------------------------------	-------------

El macizo rocoso no presenta nivel freático; en general se encuentran 4 familias de discontinuidades que controlan el comportamiento geomecánico del talud. Los deslizamientos y caídas de rocas son principalmente influenciados por la familia de discontinuidades con un azimuth de 143° y una inclinación de 82°, su interacción con las demás familias, el estado de las propiedades físico mecánicas de las mismas (expuesto y analizado anteriormente). El talud presenta una baja variabilidad en cuanto a su composición. Sin embargo, el macizo rocoso es de baja calidad superficialmente, más o menos a una profundidad de 0.4 - 0.5 m, pero hacia su interior mejoran las propiedades geomecánicas, se concluye, entonces, que la mayor parte del macizo es de buena calidad.

3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD

3.1. CRITERIOS PARA EVALUAR LA ESTABILIDAD GENERAL DEL TALUD

Para el análisis de estabilidad del talud, así como la estabilidad de los bloques o paquetes rocosos superficiales del mismo susceptibles a deslizamiento planar se consideran los siguientes escenarios:

- Estado actual de la ladera; considerando condiciones estáticas sin efecto sísmico y con efecto sísmico (Análisis pseudo estático).
- Análisis de bloques colgantes sobre el talud y corte proyectado ante deslizamientos planares sobre las discontinuidades correspondientes a familia de diaclasas 1, siendo la condición más crítica; considerando condiciones estáticas sin efecto sísmico y con efecto sísmico (Análisis pseudo estático), condiciones críticas de saturación en el caso de que esta condición sea realista.

Las consideraciones respectivas para los análisis, son las establecidas en la norma sismo resistente NSR 10, Título H, capítulo H.5.2, así como lo establecido en el numeral A.2 del título de esta misma norma en cuanto a los parámetros sísmicos para el análisis pseudo - estático de estabilidad de taludes.

La posición y orientación del perfil para el análisis, se escogió para un modelo promedio de las características geométricas de la ladera y la zona más crítica y adicionalmente la tendencia de las pendientes y el corte proyectado. Posteriormente con la información de exploración y caracterización geo mecánica, se extractaron los parámetros mecánicos del material. A continuación, se presenta la ubicación en planta y la representación en perfil con las unidades geotécnicas encontrados en forma general del macizo rocoso.



Figura 18. Vista en planta del talud en su condición actual.

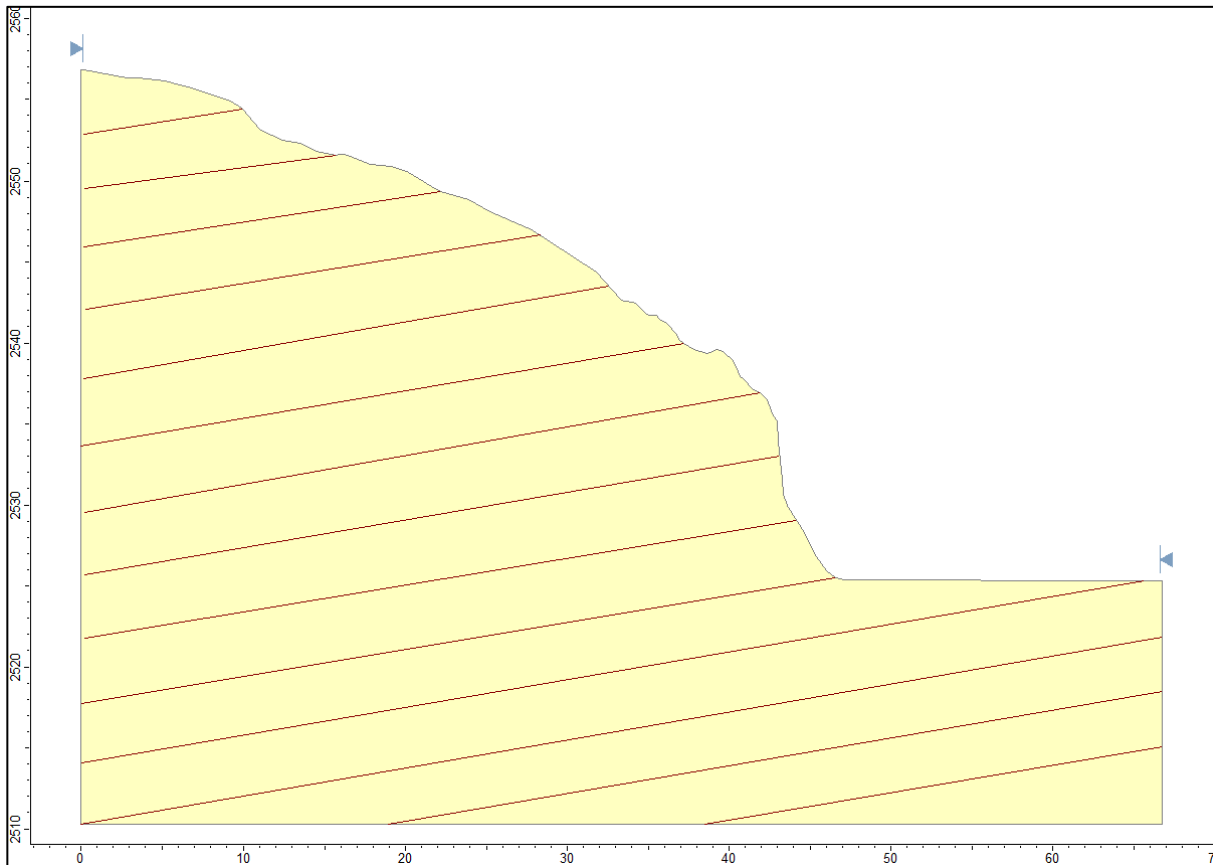


Figura 19. Perfil geológico - geotécnico del talud en su condición actual.

Tabla 18. Parámetros geomecánicos del talud.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	UCS (kPa)	m	s	a	Ru
Arenisca		23.1	Generalised Hoek-Brown	20430	0.592189	0.000396302	0.504656	0.18

La metodología planteada para la evaluación de amenaza consiste en la aplicación de los criterios establecidos en la tabla H.2.4-1 de la NSR-10 que se resume en lo siguiente:

Tabla 19. Factores de seguridad básicos mínimos para estabilidad de taludes.

Condición	Diseño	Construcción
Taludes-condición estática y agua subterránea normal	1,50	1,25
Taludes condición Pseudo estática con agua subterránea normal y coeficiente sísmico de diseño.	1,05	1,00

3.1.1. CONSIDERACIONES SOBRE EL NIVEL FREÁTICO O TABLA DE AGUA

En el talud no se encontró nivel freático alguno y las condiciones de las juntas denotaban el estado predominante del talud. La misma condición del macizo rocoso en cuanto a las direcciones y buzamientos de las discontinuidades, el estado de las mismas, y la composición de la matriz rocosa, no permite la captación o almacenamiento de agua. Las rocas de la formación geológica encontrada y relacionada directamente con la ladera, en su mayoría corresponden a rocas de alta permeabilidad primaria y secundaria, lo cual limita la capacidad de retención de agua en las partes altas de las laderas, esta última fluye rápidamente hacia partes más bajas en el interior del macizo rocoso.

De lo anterior no se estima nivel freático incluso en escenarios críticos, descartando la hipótesis de saturación total del talud, pues no es un escenario realista en este caso.

3.1.2. PARÁMETROS SÍSMICOS:

La clasificación del perfil del suelo corresponde con Tipo A, según NSR-10. El periodo de retorno para el cual se obtiene dicha aceleración corresponde a 475 años.

Del estudio general de amenaza sísmica de Colombia (2009) se extraen las aceleraciones sísmicas en función del periodo de retorno sísmico para Duitama.

Tabla 20. Parámetros Sísmicos y nivel de amenaza Tr 475años (NSR – 10).

Zona de amenaza sísmica	Alta
Aa Coef. De aceleración pico efectiva (g)	0.16

Tabla 21. Clasificación del tipo de suelo y obras civiles según NSR 10.

Perfil Tipo	B
Aa	0.20
Av	0.25
A. Sísmica	Alta
Fa	0.8
Coef impor I	I

El coeficiente de importancia de la estructura fue definido por el tipo del proyecto; en conformidad con la tipología de las obras y lo establecido en la NSR- 10.

Para el cálculo del coeficiente sísmico de diseño para análisis pseudo estático de taludes KST o conocido como Kh se ha seguido lo estipulado en el numeral H.5.2.5 de NSR-10, como se muestra a continuación, encontrando que $K_h = 0,16$.

Tabla 22. Parámetros sísmicos calculados para análisis pseudo estático del talud.

a_{max}	Aceleración máxima del terreno ($S_a=Aa*Fa*I$)	0.16
K_{ST}/a_{max}	Mínimo para análisis pseudoestático de taludes	1.00
K_{ST}	Coef. Sísmico de diseño para análisis pseudoestático (K_h)	0.16
K_v	Coef. Aceleración Vertical definido como $2/3K_h$	0.11

3.2. MODELAMIENTO EN SOFTWARE

3.2.1. MODELAMIENTO DEL ESTADO ACTUAL DEL TALUD

Para el análisis de estabilidad se considera apropiado el método de equilibrio límite en el software Slide V6 con la metodología de Jambú Corregido ya que, de los métodos disponibles en el software, este asume un factor de ajuste por las simplificaciones en las que se basa. Se obtuvieron los siguientes factores de seguridad:

Tabla 23. Resultados del análisis de equilibrio límite para los perfiles analizados.

<i>Perfil</i>	<i>Condición estática Fs.</i>	<i>Condición sísmica pseudo estática Fs.</i>	<i>Cumplimiento NSR 10 título H</i>
Talud general	1.53	1.07	Si
Bloques superficiales por deslizamiento Planar por familia 1 de discontinuidades.	1.00	0.42	No

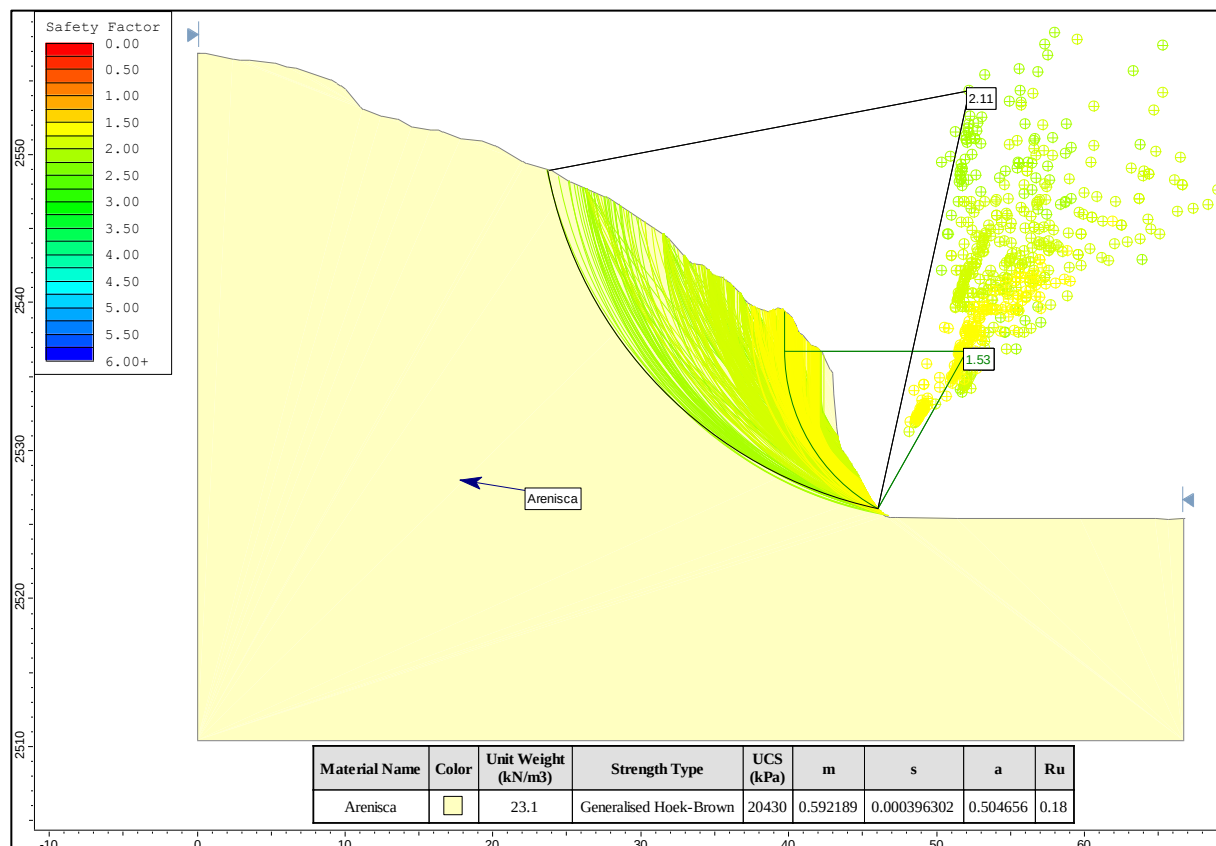


Figura 20. Análisis de estabilidad del talud general, condición actual, análisis estático.

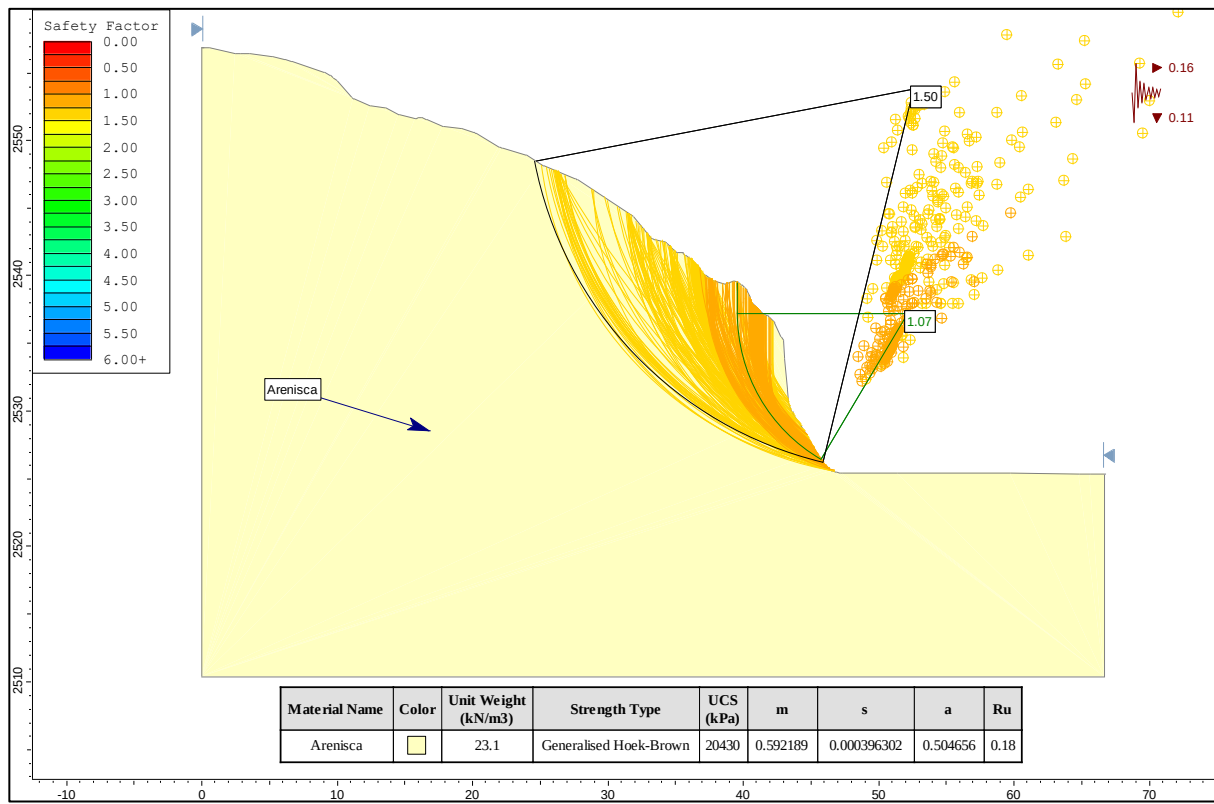


Figura 21. Análisis de estabilidad del talud general, condición actual, análisis pseudoestático.

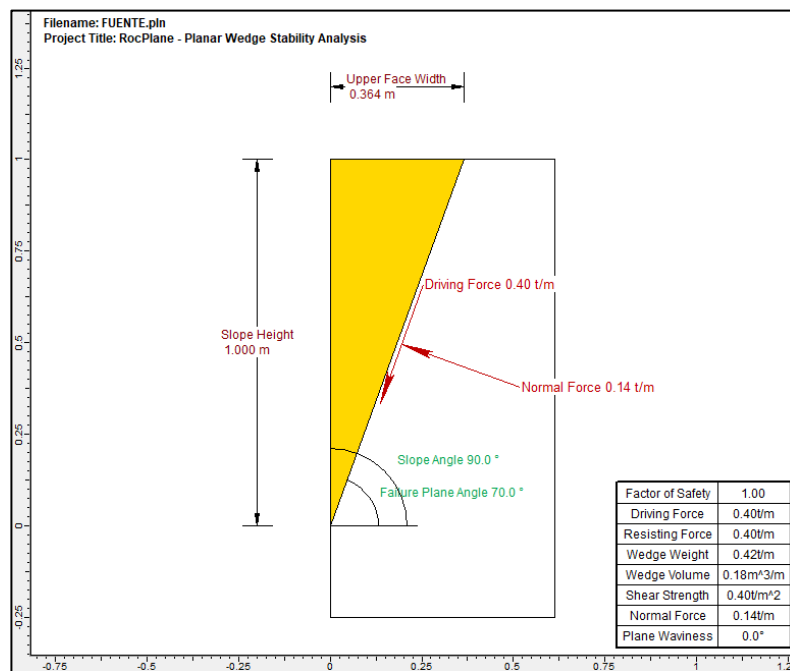


Figura 22. Análisis de estabilidad de bloques por deslizamiento Planar (planos críticos) bajo condiciones estáticas.

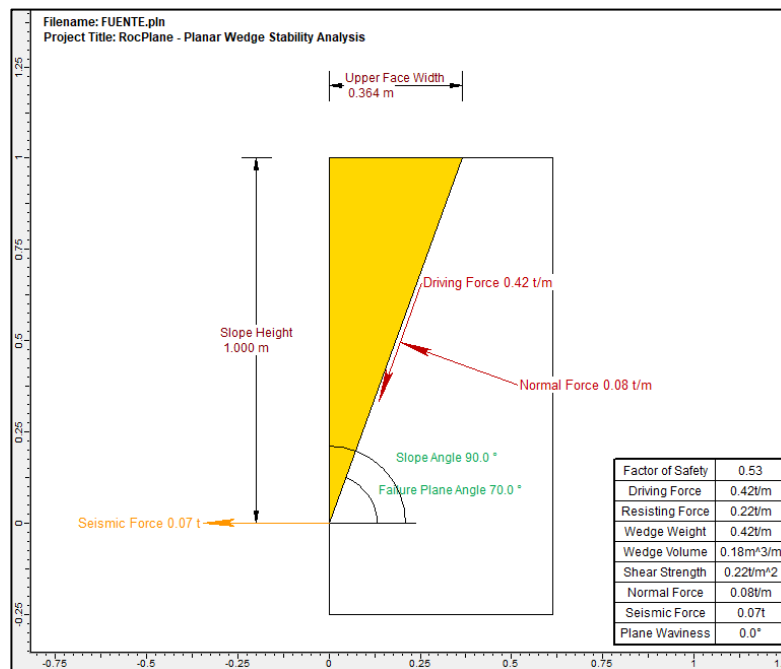


Figura 23. Análisis de estabilidad de bloques por deslizamiento planar (Planos críticos) bajo condiciones sísmicas (análisis pseudoestático).

Conforme al análisis anterior, se obtuvieron factores de seguridad en estado estático y pseudoestático encontrándose en cumplimiento con las exigencias de la norma sismo resistente NSR 10 para el caso del talud general de la ladera. Esto quiere decir que no se pueden presentar grandes movimientos de masa en movimiento. En el caso de los bloques presentes en la ladera, los cuales son susceptibles a presentar deslizamiento o falla Planar, se obtuvieron valores que no cumplen con las exigencias de la NSR 10. Es por ello, que estos bloques van cayendo por gravedad al pie del talud.

3.3. ANÁLISIS CINEMÁTICO

Con base en lo anterior, tanto en el análisis de estabilidad para bloques como en la clasificación del macizo rocoso SMR, se pudo obtener que el macizo presenta caídas de bloques por deslizamiento planar. Se realiza entonces, el análisis cinemático con el fin de identificar específicamente potenciales deslizamientos producidos por las fracturas y discontinuidades del macizo rocoso, y relacionados con condiciones locales inmediatas la excavación de conformación proyectada. evaluando 4 escenarios a saber:

- . Deslizamiento planar
- . Deslizamiento de cuñas
- . Volcamiento directo
- . Volcamiento por flexión

3.3.1. DESLIZAMIENTO POR FALLA PLANAR

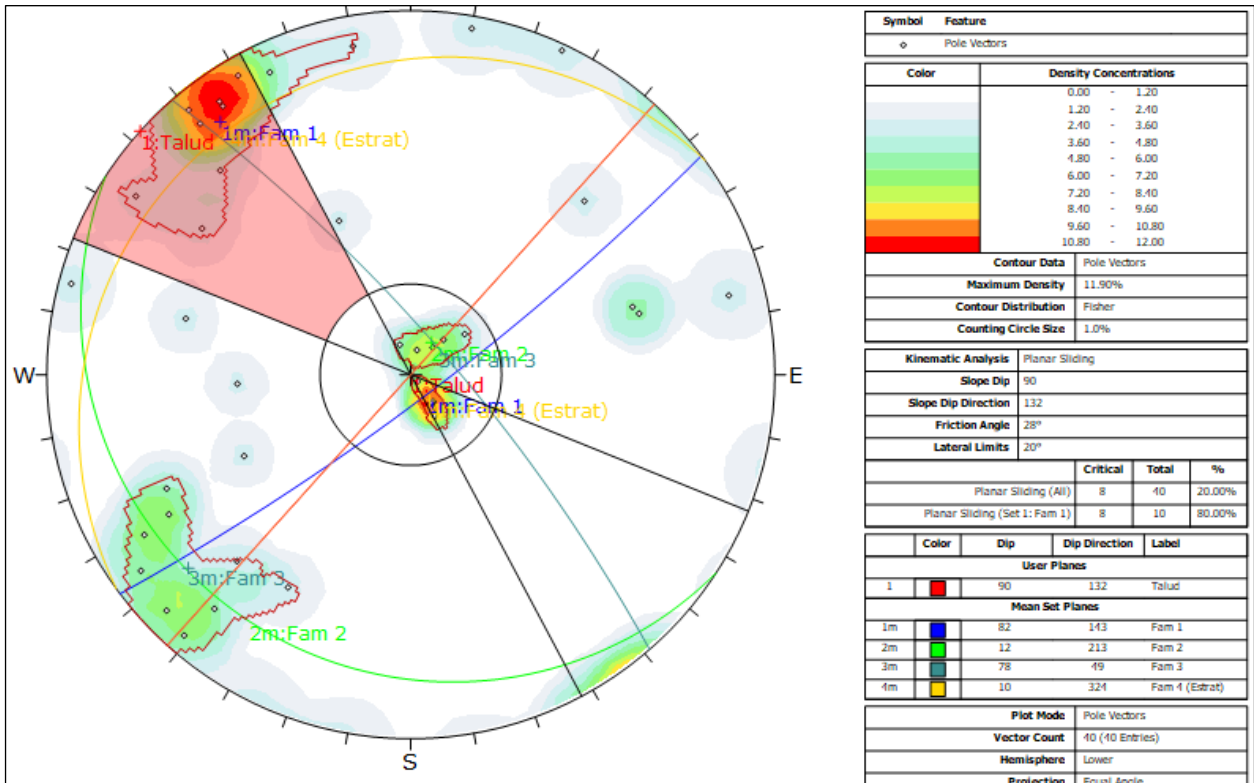


Figura 24. Análisis cinemático, deslizamiento por falla planar.

3.3.2. DESLIZAMIENTO POR CUÑAS

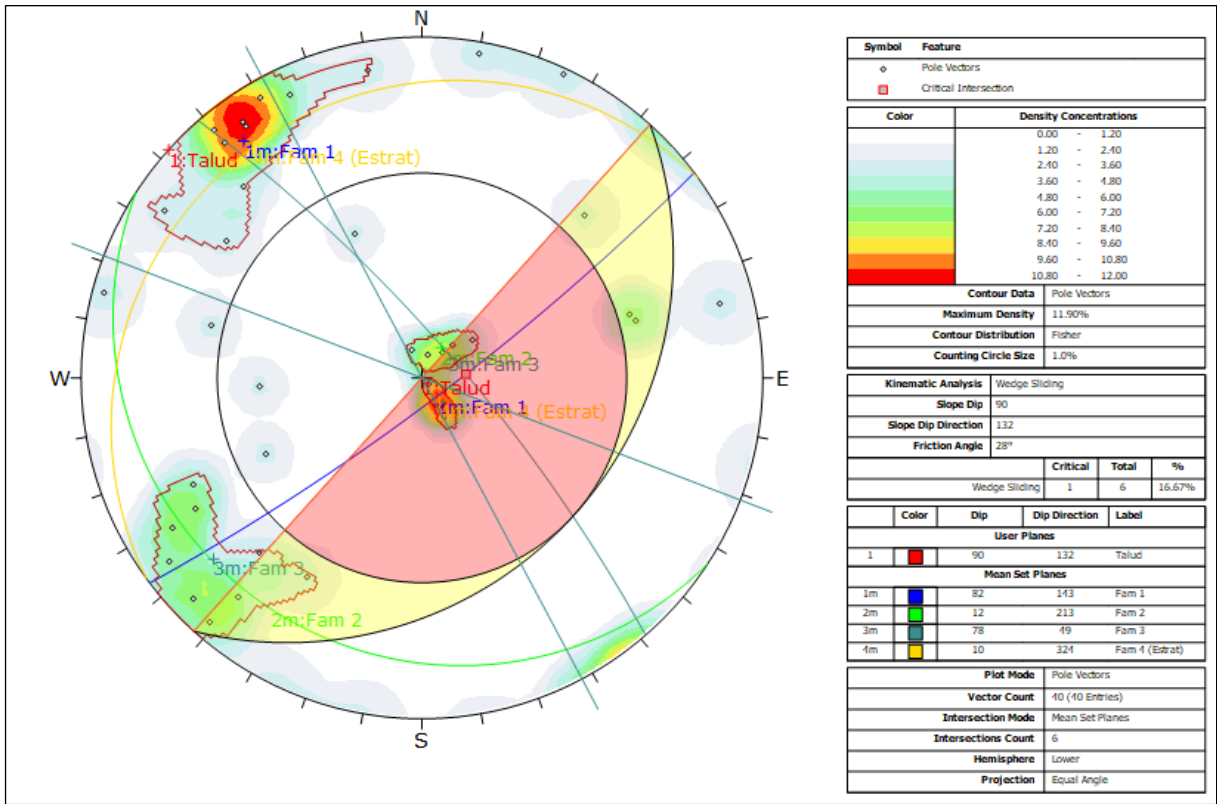


Figura 25. Análisis cinemático, deslizamiento por cuñas.

3.3.3. VOLCAMIENTO DIRECTO

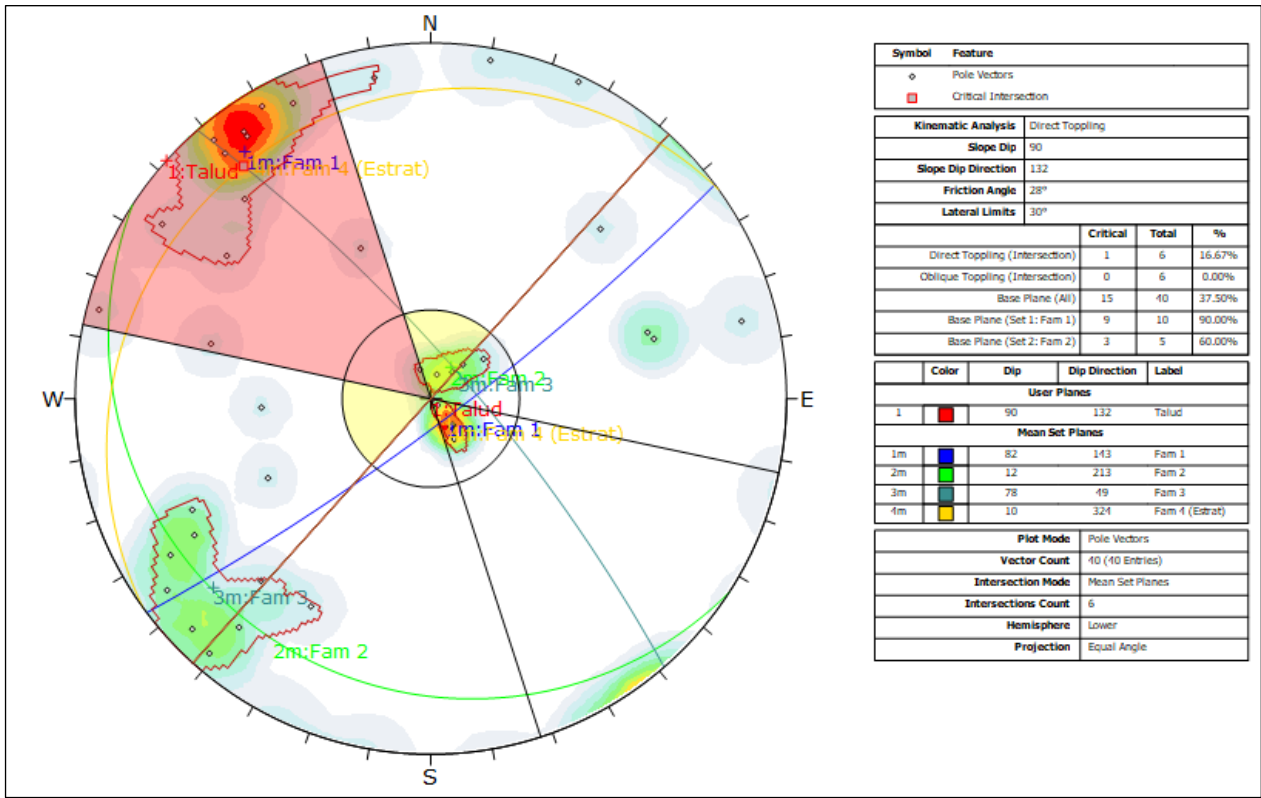


Figura 26. Análisis cinemático, deslizamiento por volcamiento directo.

3.3.4. VOLCAMIENTO POR FLEXURA

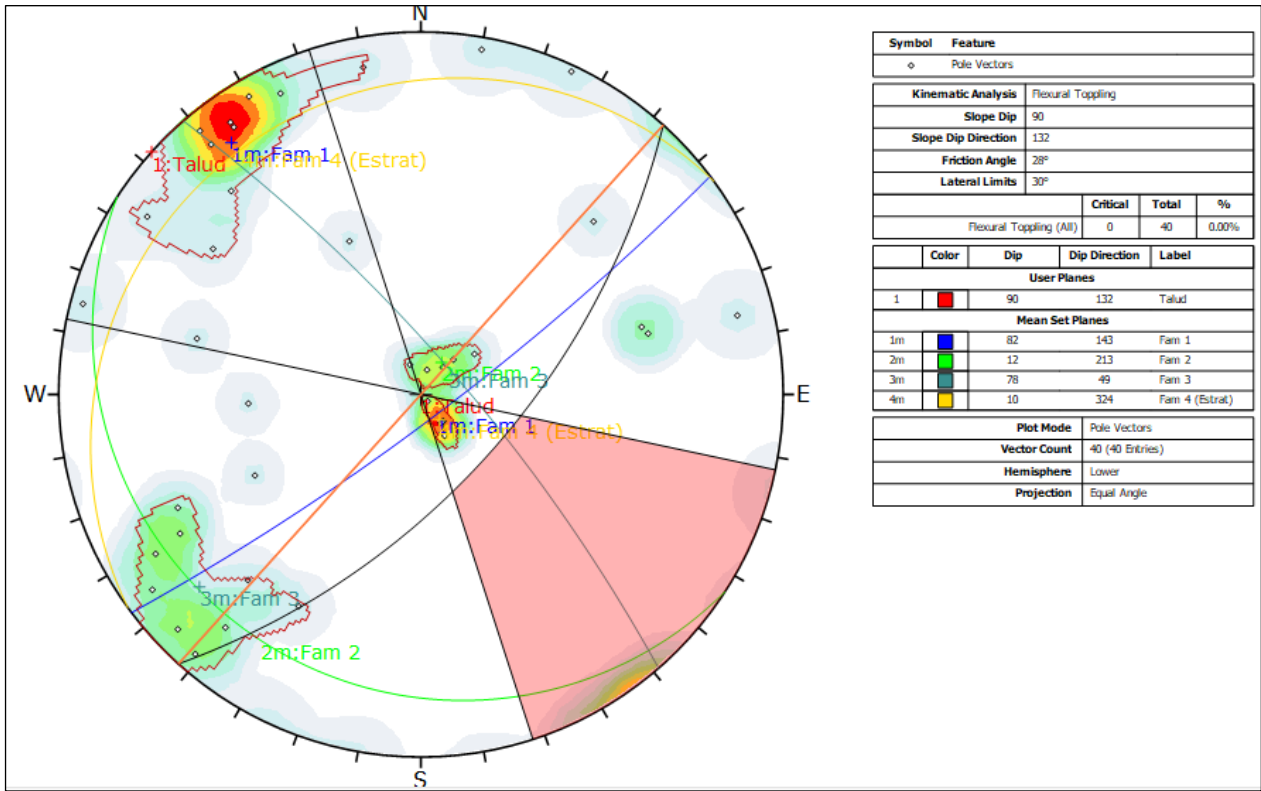


Figura 27. Análisis cinemático, deslizamiento por volcamiento flexural.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Producto de los resultados del estudio e investigación realizada, dentro del alcance integral y de cada uno de los componentes, se extraen las siguientes conclusiones:

- Se obtuvieron factores de seguridad que cumplen con las exigencias de la norma sismo resistente NSR 10 para la estabilidad del talud a nivel general. En conclusión, no se pueden presentar movimientos de grandes volúmenes que puedan generar daños. Sin embargo, queda en evidencia un problema de caídas de rocas que radica en el comportamiento cinemático del macizo y está influenciado en mayor medida por la familia de discontinuidades 1 “Fam 1”.

- La degradación superficial del macizo rocoso se encuentra influenciada por su exposición a la meteorización que presentan los materiales rocosos cuyas discontinuidades y componentes mineralógicos que conforman el talud, facilitan la infiltración de aguas de escorrentía que deterioran los materiales constituyéndose en factores relevantes en el comportamiento y estabilidad de este, en función del tiempo, a mediano y largo plazo. Hacia el sector occidental de la zona se evidencian algunos estratos de arcillolitas presentes en intercalaciones en la estratificación de la cara del talud, estos resultan ser altamente frágiles y vulnerables a los agentes meteóricos y erosivos, en comparación con las capas o estratos compuestos por rocas tipo areniscas. Esta característica es la razón por la cual los estratos conformados por las rocas más duras pierden el soporte o apoyo de los estratos que se ejercen en las rocas duras.

- El talud presenta deslizamientos cinemáticos de cuñas o deslizamiento planar de bloques superficiales. Un factor a favor es el hecho de que el buzamiento de los estratos está en contra de la pendiente de la cara del talud; sin embargo, las caídas y movimientos presentes se dan debido a que los bloques del macizo, quedan sueltos al exponerse a procesos de meteorización y por efecto de la gravedad, estos bloques caen. De manera analítica y con todo lo observado y descrito en este informe, se concluye que la situación es crítica; los bloques que se desprenden ruedan y caen al pie del talud y de las viviendas ocasionando daños considerables en los bienes de las personas.

Finalmente, se tiene en consideración que los resultados del análisis de la estabilidad del Sector La Fuente son fundamentales, dada la cercanía de las viviendas al talud, su evidente degradación y el grado de afectación a la comunidad que según los antecedentes se pueden presentar.

Sogamoso, diciembre de 2.023



Ing. PEDRO ANTONIO IBÁÑEZ GÓMEZ

Esp. en Geotecnia - Esp. en Gerencia y Construcción de Obras Civiles

Esp. QA – QC en obras civiles

T.P. No 15223-42978 COPNIA

LISTA DE ANEXOS

ANEXO No 1. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

ANEXO No 2. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA – ENSAYOS DE LABORATORIO

ANEXO No 3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

ANEXO No 1

EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

ANEXO No 2

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA – ENSAYOS DE LABORATORIO

ANEXO No 3

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD



S.I. SERINCO LTDA.

SERVICIOS INTEGRALES DE INGENIERÍA, GEOTECNIA Y CONSTRUCCIÓN LIMITADA

***MAS DE 30 AÑOS CIMENTANDO EL DESARROLLO DE LOS PROYECTOS Y OBRAS DE INGENIERIA
SOLUCIONES GEOTECNICAS Y DE INGENIERIA CONFIABLES***

***INFORME DE AVANCE No 2: COMPONENTES EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN
GEOTÉCNICA, MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO
SECTOR QUEBRADA BECERRAS KILÓMETRO 4 VIA DUITAMA CHARALÁ***

***PROYECTO
ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA REALIZAR OBRAS DE MITIGACIÓN DE
DESLIZAMIENTOS UBICADOS EN: LA URBANIZACIÓN MIRADOR DE LA ESPERANZA,
EL SECTOR LA FUENTE Y QUEBRADA BECERRAS KILÓMETRO 4 VIA DUITAMA -
CHARALÁ***

DICIEMBRE DE 2023

PROYECTO

**INFORME DE AVANCE No 2: COMPONENTES EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN
GEOTÉCNICA, MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO
SECTOR QUEBRADA BECERRAS KILÓMETRO 4 VIA DUITAMA CHARALÁ**

**ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA REALIZAR OBRAS DE MITIGACIÓN DE
DESLIZAMIENTOS UBICADOS EN: LA URBANIZACIÓN MIRADOR DE LA ESPERANZA,
EL SECTOR LA FUENTE Y QUEBRADA DE BECERRAS KILÓMETRO 4 VIA DUITAMA -
CHARALÁ DEL MUNICIPIO DE DUITAMA**

S.I. SERINCO LTDA

SERVICIOS INTEGRALES DE INGENIERÍA, GEOTECNIA Y CONSTRUCCIÓN LIMITADA

ÁREA: GEOTECNIA Y CIMENTACIONES

SOLUCIONES GEOTECNICAS CONFIABLES

MAS DE 30 AÑOS CIMENTANDO EL DESARROLLO DE LOS PROYECTOS Y OBRAS DE INGENIERIA

CLIENTE SOLICITANTE: ALCALDÍA MUNICIPAL DE DUITAMA

DUITAMA - BOYACÁ

DICIEMBRE DE 2023

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	6
1. EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.....	7
1.1. EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO.....	7
1.1.1. EXPLORACIÓN GENERAL DEL ÁREA.....	7
1.1.2. EXPLORACIÓN DEL PERFIL DEL SUELO MEDIANTE PERFORACIONES.....	9
1.1.3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO MEDIANTE ENSAYOS EN LABORATORIO	12
1.2. RESULTADOS DE LA EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO	14
1.2.1. DESCRIPCIÓN DEL PERFIL DEL SUELO	14
1.2.2. NIVEL PIEZOMÉTRICO Y DE AGUAS FREÁTICAS	18
1.2.3. PROPIEDADES GEOMECÁNICAS E ÍNDICE DEL SUELO DE FUNDACIÓN	19
1.2.4. PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE DEL SUELO RESIDUAL.	20
1.2.5. PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL SUELO Y DEL MACIZO ROCOSO	21
1.3. ENSAYOS DE PERCOLACIÓN - CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN DEL SUELO	22
1.3.1. PERCOLACIÓN EN EL SUELO NATURAL	22
2. ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN - INFILTRACIÓN	26
2.1. CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LOS TERRENOS PARA EVALUACIÓN DE ABSTRACCIONES E INFILTRACIÓN.	26
2.1.1. ESTIMACIÓN DE LA INFILTRACIÓN	27
3. ESTABILIDAD DE LADERAS Y TALUDES.....	32
3.1. CRITERIOS PARA EVALUAR LA ESTABILIDAD	32
3.2. CONSIDERACIONES SOBRE NIVEL FREÁTICO O TABLA DE AGUA (LLUVIAS – INFILTRACIÓN - RED DE FLUJO)	35
3.3. PARÁMETROS SÍSMICOS	36
3.4. PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL SUELO Y MACIZO ROCOSO	37
3.5. MODELAMIENTO EN SOFTWARE.....	38

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de localización de los sondeos, perforaciones y apiques de exploración del perfil del suelo, sobre la planta topográfica del área del proyecto, incluyendo la ubicación de las pruebas de percolación infiltración.	11
Figura 2 Registro fotográfico de muestras recuperadas para la caracterización física y mecánica del perfil del suelo.	13
Figura 5. Correlación estratigráfica de los registros de los sondeos o perforaciones de exploración del 3-4-9	15
Figura 6. Correlación estratigráfica de los registros de los sondeos o perforaciones de exploración de los apiques del 1-5.....	16
Figura 3: Perfil estratigráfico promedio de propiedades y la resistencia a la penetración dinámica, tomando los resultados de los sondeos 1,2,5, y 6 de los ensayos realizados en campo y laboratorio para el suelo residual.	16
Figura 4. Perfil estratigráfico promedio de propiedades y la resistencia a la penetración dinámica, tomando todos los resultados de los apiques del No. 1-5, de los ensayos realizados en campo y laboratorio.....	17
Figura 7: Perfil estratigráfico promedio general de propiedades índice, basado en los sondeos 1,2,5 y 6 de los ensayos realizados en campo y laboratorio para el suelo residual.	17
Figura 8. Perfil estratigráfico promedio general de propiedades índice, basado en los apiques del 1 al 5, de los ensayos realizados en campo y laboratorio para el suelo residual.	18
Figura 9. Perfil del movimiento con la ubicación con fines ilustrativos de las correlaciones estratigráficas a partir de los datos de las perforaciones.....	18
Figura 10: Ubicación de las pruebas de infiltración realizadas en campo, método de Porchet para determinación de la conductividad hidráulica k.....	22
Figura 11: Pruebas de infiltración en campo, método de Porchet para determinación de la conductividad hidráulica k y capacidad de infiltración.	23
Figura 12. Perfil geológico – geotécnico A_A', con las respectivas capas promediadas y diferenciadas encontradas en la exploración geotécnica, en la condición natural actual.	33
Figura 13. Perfil geológico – geotécnico A_A', con las respectivas capas promediadas y diferenciadas encontradas en la exploración geotécnica, con intervención futura de abatimiento de nivel freático.	33
Figura 14. Perfil geológico – geotécnico A_A', con las respectivas capas promediadas y diferenciadas encontradas en la exploración geotécnica, con intervención futura de abatimiento de nivel freático y reconformación con movimiento de tierras.	34
Figura 15 Ubicación del trazado del perfil geológico- geotécnico perfil A – A' en planta.	34
Figura 16 Perfil geológico – geotécnico A_A', con las respectivas capas promediadas y diferenciadas encontradas en la exploración geotécnica., modelo de infiltración mensual y variación de la red de flujo.....	35
Figura 17: Suelo Tipo D, Espectro de aceleraciones de diseño como fracción de g.....	36
Figura 18 Factor de seguridad Perfil A-A'. Condición normal- actual. Escenarios estático y sísmico.	39
Figura 19. Factor de seguridad Perfil A-A'. Abatimiento de nivel freático. Escenario estático y sísmico.	40
Figura 20. Factor de seguridad Perfil A-A'. Cortes de reconformación del terreno y abatimiento del nivel freático. Escenario estático y sísmico.....	41

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1, 2 y 3. Cunetas de la vía que conecta los municipios de Duitama y Charalá.	7
Fotografía 4 y 5. Agentes antrópicos; reservorio y actividades de ganadería.	8
Fotografía 6. Marcas que el ganado y la intervención antrópica producen en el terreno.	8
Fotografía 8 y 9. Deslizamiento sobre la vía, por el corte del talud.	9
Fotografías 10, 11, 12 y 13: Registro fotográfico de exploración geotécnica,	9

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades mecánicas de los materiales.	20
Tabla 2 Parámetros del macizo rocoso para análisis de estabilidad.	21
Tabla 3: Resultados de Conductividad hidráulica ensayo de percolación prueba No. 1	24
Tabla 4: Resultados de Conductividad hidráulica ensayo de percolación prueba No. 2	24
Tabla 5: Resultados de Conductividad hidráulica ensayo de percolación prueba No. 3	24
Tabla 6: Resumen de Resultados de Conductividad hidráulica suelo.	25
Tabla 7: Descripción de uso y cobertura de suelos en el área de captación.	26
Tabla 8: Coeficiente de retención por follaje.	27
Tabla 9: Coeficiente de infiltración por textura del suelo Tipo C suelo natural y Tipo B estéril en retro llenado.	28
Tabla 10: Conductividades hidráulicas estimadas.	28
Tabla 11: Coeficiente de infiltración por pendiente.	29
Tabla 12: Coeficiente de infiltración por vegetación.	29
Tabla 13: Infiltraciones mensuales promedio con un escenario extremo a de precipitación mensual a TR 10 Y 50 años.	30
Tabla 14: Infiltraciones potenciales vs lluvia para eventos de tormentas rápidas, diarias, a 5 días y mensuales con escenarios extremos a periodo de retorno TR 100 años.	30
Tabla 15 Factores de seguridad básicos mínimos para estabilidad de taludes.	32
Tabla 16 Parámetros Sísmicos y nivel de amenaza Tr 475años (NSR – 10).	36
Tabla 17 Clasificación del suelo y obras civiles según NSR 10.	36
Tabla 18. Parámetros sísmicos calculados para análisis pseudo estático de taludes.	37
Tabla 19 Parámetros del macizo rocoso para análisis de estabilidad.	37
Tabla 20 Propiedades mecánicas de los materiales de los suelos.	37
Tabla 21 Resultados del análisis de estabilidad para los perfiles analizados (TR 475).	38

INTRODUCCIÓN

Este informe contiene el avance N°2 del proyecto “*ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA REALIZAR OBRAS DE MITIGACIÓN DEL DESLIZAMIENTO UBICADO EN EL SECTOR QUEBRADA BECERRAS KM 4 VIA DUITAMA - CHARALÁ*” en el municipio de Duitama.

En el presente informe se incluye lo acordado para el segundo documento técnico de avance que contiene los siguientes componentes: Exploración del subsuelo, ensayos de laboratorio (Caracterización), modelo geológico geotécnico. Adicionalmente, se incluye el avance a nivel de análisis de estabilidad del talud. Se anexa todo lo requerido para el sustento de los diferentes componentes.

La exploración y caracterización comprende varias actividades realizadas en campo y laboratorio para identificar las propiedades físicas y mecánicas del subsuelo. La exploración y caracterización geotécnica es esencial para poder determinar e identificar el comportamiento geo mecánico de los materiales involucrados en la masa deslizada y consecuentemente poder establecer el modelo geológico - geotécnico de la masa deslizada en lugar del proyecto.

En este contexto, la planificación y ejecución de las actividades se realizaron con un enfoque específico en el material del talud, que se identificó como suelo residual. Este enfoque se tradujo en la implementación de diversas técnicas y métodos para obtener el perfil general de la masa deslizada, se realizaron perforaciones a diferentes profundidades, combinadas con apiques para el muestreo superficial y subsuperficial de los diferentes materiales que conforman la masa de suelo, e igualmente y en forma complementaria para la exploración de la masa de suelo deslizada, se realizaron 2 sondeos eléctricos verticales (SEV); para el posterior análisis y determinación de las propiedades físicas y geomecánicas mediante los ensayos respectivos de caracterización en el laboratorio.

El estudio se realizó a solicitud de la *ALCALDÍA MUNICIPAL DE DUITAMA*.

1. EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

1.1. EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO

El perfil del suelo de fundación del proyecto se caracterizó con base en los tres pilares de investigación en geotecnia; mediante la exploración con sondeos o perforaciones, la experimentación o caracterización a través de pruebas o ensayos en campo y laboratorio y el análisis de los resultados obtenidos; para establecer el modelo geológico – geotécnico del suelo.

1.1.1. EXPLORACIÓN GENERAL DEL ÁREA

La zona por intervenir presenta características desfavorables a raíz de la intervención antrópica, los aspectos más relevantes se presentan a continuación.

El área del proyecto y donde se presenta el deslizamiento se sitúa adyacente a la vía que conecta a los municipios de Duitama y Charalá; debido a que las cunetas de drenaje de la carretera se encuentran colmatadas por sedimentos y troncos, las aguas de escorrentía superficial tienden a desviarse hacia los terrenos adyacentes. (ver fotografía 1, 2 y 3) Parte de estas aguas son dirigidas hacia las alcantarillas y, posteriormente, descargadas directamente en el suelo sin llevar el tratamiento adecuado que evite la generación de problemas geotécnicos.



Fotografía 1, 2 y 3. Cunetas de la vía que conecta los municipios de Duitama y Charalá.

El reservorio ubicado en la parte superior de la vía, hacia la zona noreste de donde se presenta el deslizamiento, carece de impermeabilización y contiene una cantidad considerable de agua; esta situación es desfavorable debido a que facilita la infiltración cuesta abajo hacia la zona inestable. (Fotografías 4 y 5). Por otro lado, se evidencia el impacto de los cultivos y la presencia de ganado, que generan pequeñas depresiones y terrazas en la ladera, provocando hundimientos y agrietamientos que aumentan la tasa de infiltración del fluido. (Ver fotografía 6 y 7)



Fotografía 4 y 5. Agentes antrópicos; reservorio y actividades de ganadería.



Fotografía 6. Marcas que el ganado y la intervención antrópica producen en el terreno.

Un factor detonante del deslizamiento fue la construcción de la vía terciaria ubicada en el pie del talud que involucró el corte de la ladera, generando desconfinamiento del suelo y exponiendo los materiales a la meteorización. En la misma zona, se realizaron cortes de árboles de eucalipto de gran tamaño que podrían haber absorbido parte del agua subterránea, manteniendo el talud en condiciones adecuadas de saturación para garantizar su estabilidad. (Ver fotografía 8 y 9)



Fotografía 7 y 8. Deslizamiento sobre la vía, por el corte del talud.

1.1.2. EXPLORACIÓN DEL PERFIL DEL SUELO MEDIANTE PERFORACIONES

Los criterios establecidos para definir el número y profundidad de los sondeos de exploración del suelo fueron, la extensión del predio, más específicamente el talud en donde se presentó el deslizamiento a tratar, las condiciones topográficas, la geología local del área del proyecto y la experiencia del autor. Con base en las características estratigráficas del perfil de suelo encontradas al momento de la exploración, se determinó como suficiente y óptimo el programa de exploración preestablecido. Las fotografías siguientes ilustran parte del proceso de exploración.



Fotografías 9, 10, 11 y 12: Registro fotográfico de exploración geotécnica,

En la tabla siguiente se resume el programa de exploración y ensayos dinámicos de campo ejecutados.

<i>Numero de sondeos y apiques</i>	14 (Catorce)	<i>Profundidad promedio de investigación</i>	5.0 m – 6.0 m
<i>Numero de sondeos</i>	9.0 (Nueve)	<i>Número de sondeos</i>	5.0 (Cinco)
<i>Método de perforación</i>	Percusión con ensayos de penetración dinámica	<i>Equipo</i>	Mecánico combinado
<i>Ensayo SPT</i>	Sí	<i>Ensayo DCPT</i>	Sí
<i>Recuperación de muestras alteradas</i>	No	<i>Recuperación de muestras inalteradas con tubo de pared delgada</i>	Sí
<i>Recuperación de muestras semi-alteradas con Split Spoon</i>	Sí	<i>Motivo del fin de la perforación en profundidad</i>	Criterio geotécnico, permitiendo identificar la composición del movimiento hasta identificar materiales más competentes, zona por debajo de falla y transición a material más competente.

Con base en la exploración realizada fue posible conocer las características estratigráficas detalladas del perfil del suelo, el comportamiento de las aguas freáticas; también se ejecutaron ensayos directos de resistencia del suelo en campo y se realizó un muestreo representativo del perfil, con lo anterior se permitió conocer las propiedades índices, de resistencia al corte y deformabilidad mediante ensayos de caracterización geotécnica en laboratorio. En la figura siguiente se muestra el esquema de distribución de los sondeos de exploración sobre el levantamiento topográfico realizado para el proyecto, se incluye la ubicación de las pruebas de percolación para la determinación de la permeabilidad del suelo.

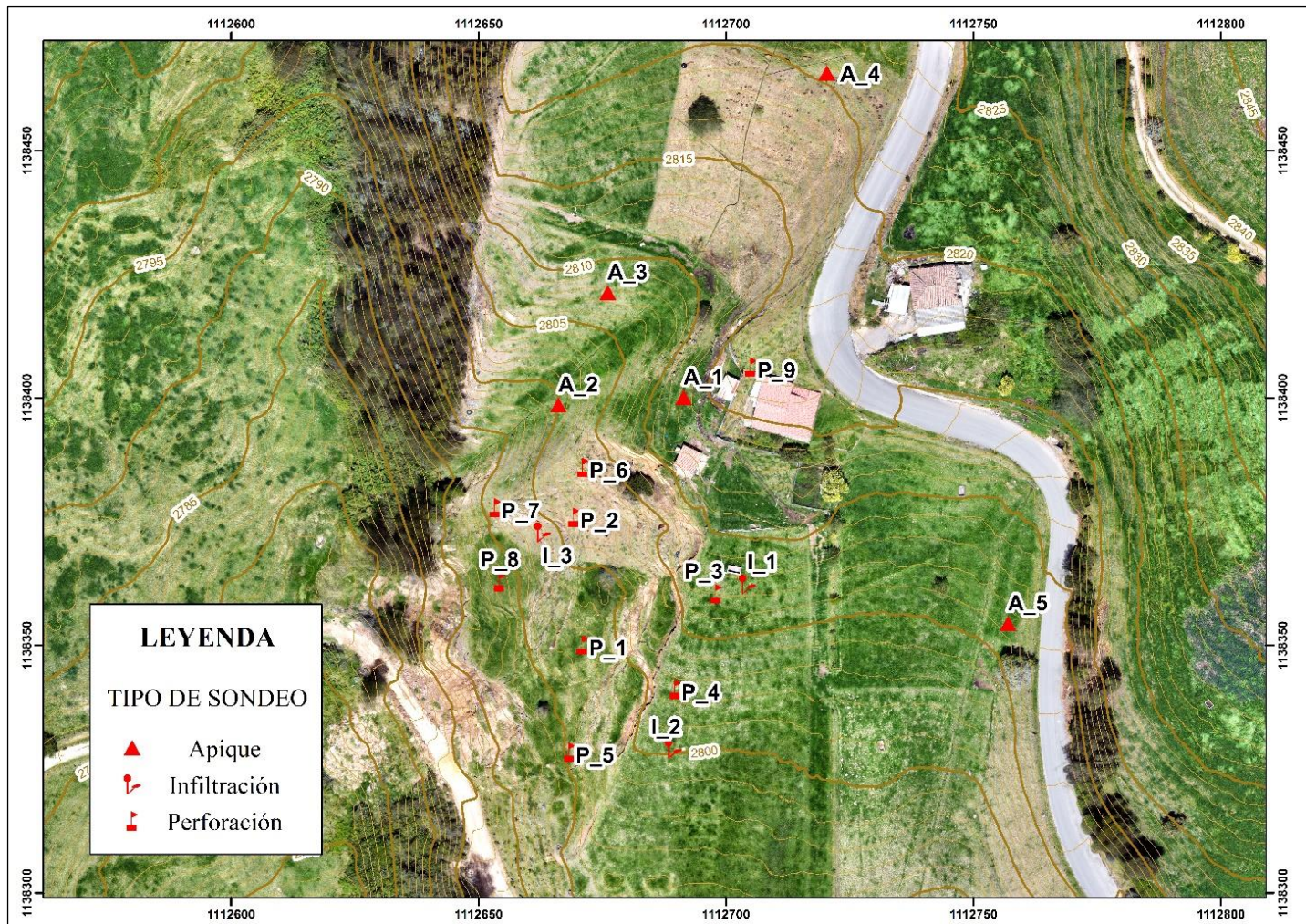


Figura 1. Esquema de localización de los sondeos, perforaciones y apiques de exploración del perfil del suelo, sobre la planta topográfica del área del proyecto, incluyendo la ubicación de las pruebas de percolación infiltración.

1.1.3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO MEDIANTE ENSAYOS EN LABORATORIO

Sobre el muestreo de las capas representativas del perfil del suelo de la masa deslizada, ilustrado parcialmente en las fotografías siguientes, se practicó el programa de ensayos para la caracterización geotécnica que se describe en la tabla inferior.





Figura 2 Registro fotográfico de muestras recuperadas para la caracterización física y mecánica del perfil del suelo.

Programa de ensayos de caracterización geotécnica del suelo en laboratorio			
Humedad Natural	Sí	Peso Unitario	Sí
Gravedad Especifica	Sí	Consolidación	No
Resistencia a la compresión	Sí	Límites de Atterberg	Sí
Granulometría	Sí	Otros	Corte Directo

En el Anexo No 2 se presentan los resultados detallados de los ensayos de caracterización en laboratorio para las muestras recuperadas en campo, durante la exploración geotécnica del perfil del suelo en la ladera.

1.2. RESULTADOS DE LA EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO

De acuerdo con los resultados obtenidos en la exploración y caracterización, se determinaron las características estratigráficas del perfil de suelo, su variabilidad lateral y vertical, el comportamiento de los niveles de aguas freáticas, las propiedades geomecánicas e índice, la resistencia al corte y la deformabilidad o compresibilidad.

1.2.1. DESCRIPCIÓN DEL PERFIL DEL SUELO

La homogenización y descripción del perfil del suelo se desarrolla a partir de la disposición lateral y vertical de las capas o estratos, identificada mediante el programa de exploración, la cual fue definida en los siguientes términos:

<i>Grado de variabilidad estratigráfica horizontal</i>	<i>Grado de variabilidad estratigráfica vertical</i>
<i>Moderada:</i> El perfil identificado es homogéneo con cambios de resistencia asociados a la variabilidad en la depositación y presencia de relictos de Arcillolitas estratificadas con presencia de Gravas.	<i>Moderada:</i> El muestreo realizado permitió establecer con claridad el comportamiento del suelo a profundidad.
<i>Variabilidad en la coloración</i>	<i>Variabilidad en la clasificación (Sistema de Clasificación USC)</i>
<i>Moderada:</i> El perfil de suelo presenta estratificación a base de coloraciones grises y eventualmente intercalaciones de tonalidades habano.	<i>Alta:</i> las muestras se clasifican desde composición arenosa, hasta arcillas y limos (CL-ML), hacia la parte baja se presenta Gravas (GM – GM) de areniscas de formas y tamaños variables, dentro de matriz limo arcillosa.
<i>Resistencia al corte</i>	<i>Compresibilidad</i>
<i>Baja a alta:</i> A partir de la caracterización mediante ensayos de laboratorio se identifica resistencia mecánica baja en el material de relleno y alta en las muestras de los materiales de la ladera natural.	El suelo del relleno de fundación del proyecto presenta condiciones de deformabilidad y expansión volumétrica bajas asociadas a la condición de humedad y plasticidad baja de los materiales predominantemente arenosos.

Se procedió a la correlación estratigráfica de los resultados obtenidos en las perforaciones de exploración, tomando en consideración las características litológicas y las propiedades índice. Esta correlación abarca los registros de los sondeos o perforaciones de exploración No 1 al 9 y los apiques del 1 al 5, indicando la disposición estratigráfica en concordancia con el perfil longitudinal del talud.

Se presenta en la Figura 3 el perfil promedio obtenido a partir de la correlación estratigráfica del resumen de las perforaciones 1,2,5, y 6. En la Figura 4 de los apiques del 1 al 5. Estas figuras sintetizan la información extraída de ensayos en campo y de laboratorio para cada uno de los sondeos de exploración, así como las capas estratigráficas determinadas. En una escala general, la figura muestra los valores de la humedad natural,

el peso unitario y la resistencia a la penetración dinámica en campo (tipo SPT y DCPT), relacionados con la profundidad de exploración.

Las figuras 5 y 6, reflejan la correlación estratigráfica del terreno basados en las perforaciones y apiques que están ubicadas en la misma zona del deslizamiento (Superior, medio y bajo).

En el Anexo No 1, las Figuras 1.0 a 1.14 detallan los registros de las perforaciones individuales para cada sondeo de exploración. Estos registros incluyen información detallada sobre la disposición del muestreo, la clasificación USC por muestras y capas, los resultados de los ensayos de penetración dinámica, así como las propiedades índices y de caracterización geotécnica, presentadas en una escala gráfica.

Es importante destacar que el nivel de referencia utilizado para elaborar estos perfiles corresponde al nivel superficial de la topografía actual del terreno en cada sitio específico de perforación.

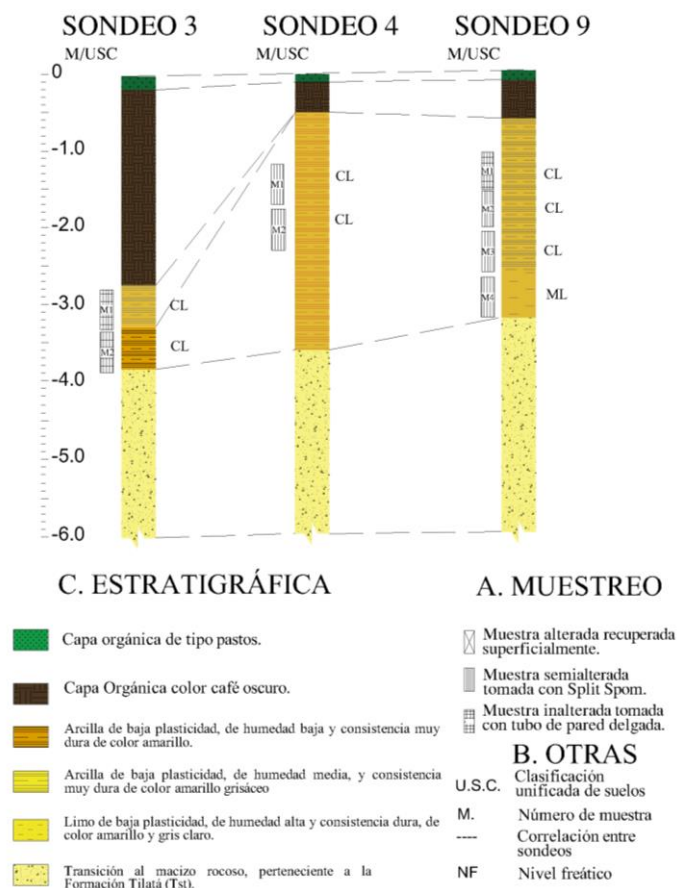


Figura 3. Correlación estratigráfica de los registros de los sondeos o perforaciones de exploración del 3-4-9

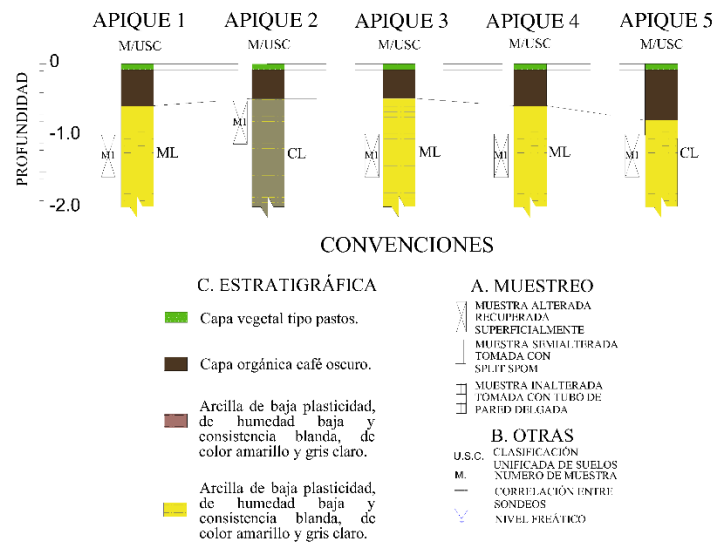


Figura 4. Correlación estratigráfica de los registros de los sondeos o perforaciones de exploración de los apiques del 1-5.

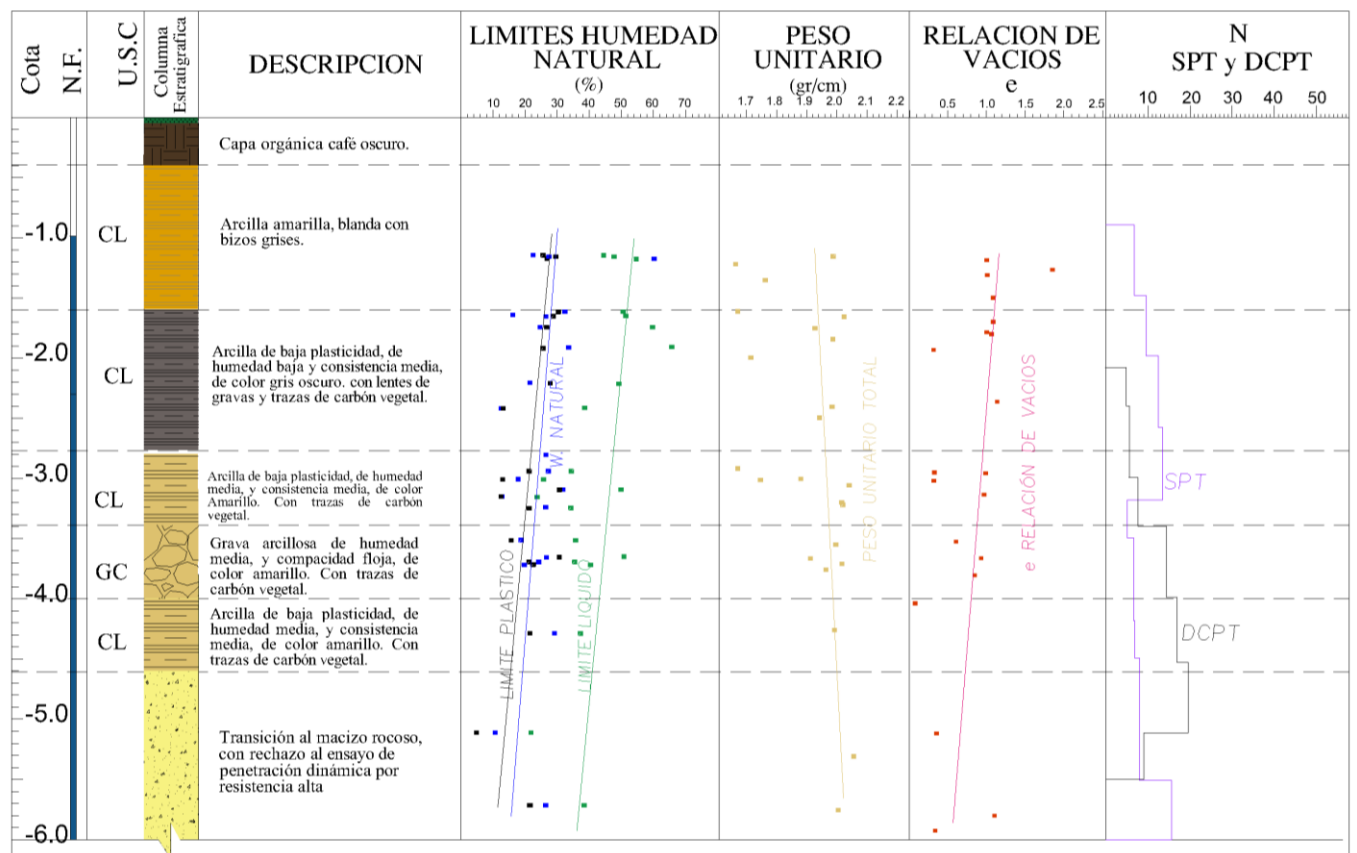


Figura 5: Perfil estratigráfico promedio de propiedades y la resistencia a la penetración dinámica, tomando los resultados de los sondeos 1,2,5, y 6 de los ensayos realizados en campo y laboratorio para el suelo residual.

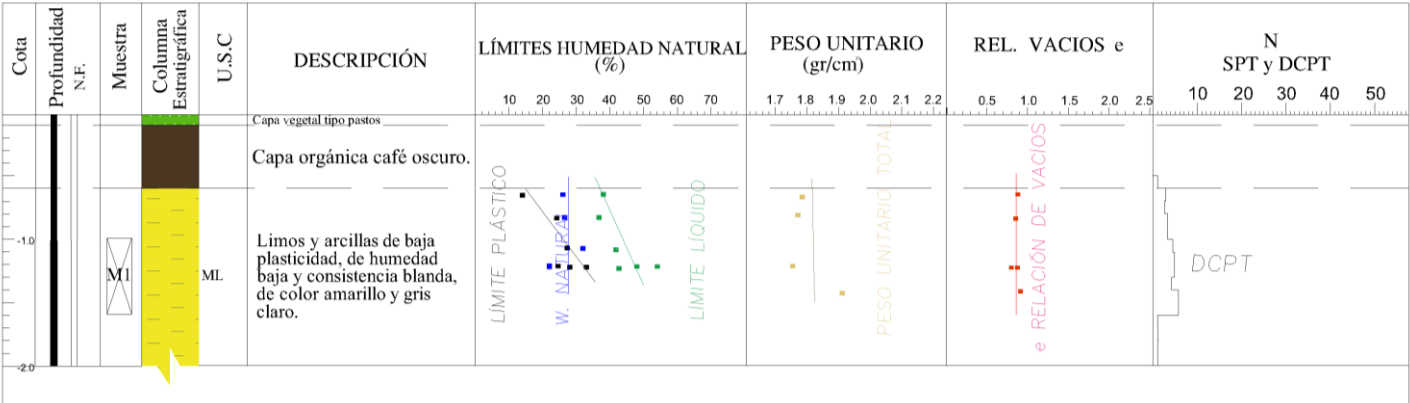


Figura 6. Perfil estratigráfico promedio de propiedades y la resistencia a la penetración dinámica, tomando todos los resultados de los apiques del No. 1-5, de los ensayos realizados en campo y laboratorio.

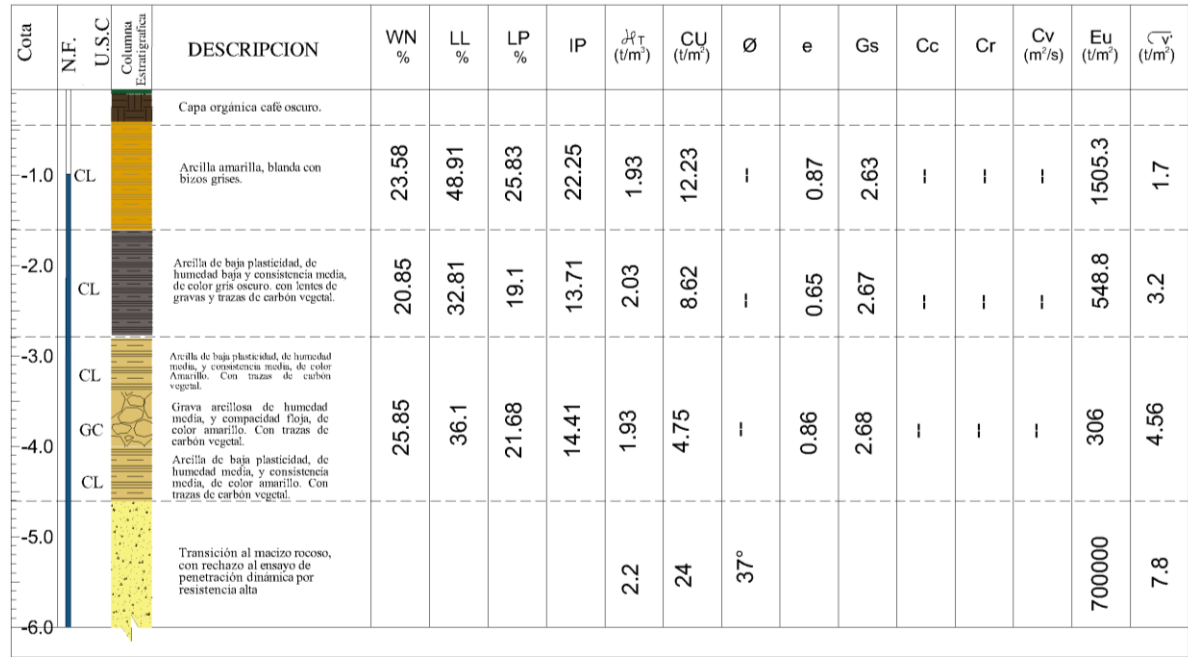


Figura 7: Perfil estratigráfico promedio general de propiedades índice, basado en los sondeos 1,2,5 y 6 de los ensayos realizados en campo y laboratorio para el suelo residual.

Cota	N.F.	U.S.C	Columa Estratigrafica	DESCRIPCION	WN %	LL %	LP %	IP	γ_T (t/m ³)	CU (t/m ²)	ϕ	e	Gs	Cc	Cr	Cv (m ² /s)	Eu (t/m ²)	γ_v (t/m ²)
-1.0				Capa vegetal tipo pastos y capa orgánica café oscuro.														
-2.0				Limos y arcillas de baja plasticidad, de humedad baja y consistencia blanda, de color amarillo y gris claro.	25.58	45.11	27.38	17.73	1.77	-	-	0.88	2.66	-	-	-	600	1.23

Figura 8. Perfil estratigráfico promedio general de propiedades índice, basado en los apiques del 1 al 5, de los ensayos realizados en campo y laboratorio para el suelo residual.

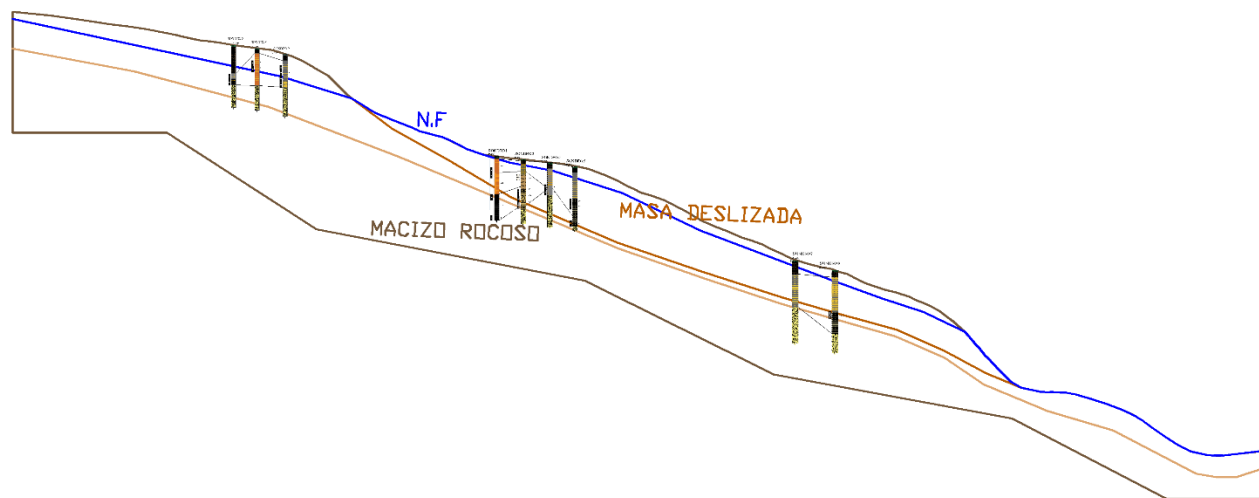


Figura 9. Perfil del movimiento con la ubicación con fines ilustrativos de las correlaciones estratigráficas a partir de los datos de las perforaciones.

1.2.2. NIVEL PIEZOMÉTRICO Y DE AGUAS FREÁTICAS

Se identificó presencia de Nivel Freático	Sí	Presenta Distribución uniforme en el predio	Sí
Presenta tabla de agua estática	No	Profundidad del Agua Freática (promedio)	1.5 m
Presenta tabla de agua confinada	No	Pérdida de Confinamiento	--
		Nivel Libre de aguas freáticas	--
Observaciones:			
Humedad	Media a alta	Saturación	Alta

1.2.3. PROPIEDADES GEOMECÁNICAS E ÍNDICE DEL SUELO DE FUNDACIÓN

A partir de la evaluación en campo, registros de resistencia y ensayos de laboratorio se desarrolla la caracterización, homogenización y definición de las propiedades índice del suelo.

Zona macizo rocoso y suelo residual incipiente:

Origen del suelo	Residual.		
Cobertura	Cobertura vegetal tipo pastos y arbustos		
Rellenos	No		
Capa Orgánica	Superficial de 0.5m en promedio.		
Resumen descriptivo de las propiedades físicas y mecánicas de la Capa No 1. Suelo residual.			
Profundidad	0.5 m a 5.0 m	Tipo de suelo	Suelo residual remoldeado en el cuerpo del deslizamiento e intacto en la corona y áreas adyacentes
Composición	Predominantemente arcilloso, con algunos niveles limosos y zonas gravosas.	Coloración	Predominantemente color beige y anaranjado con intercalaciones grises
Plasticidad	Media a alta.	Humedad	Media a alta
Clasificación USC	CL CH ML GC	Resistencia al corte	Baja a media.
Compresibilidad	Media	Expansividad	Media.
Resumen descriptivo de las propiedades físicas y mecánicas de la Capa No 2. Macizo rocoso formación Tiltatá.			
Profundidad	5.0 m en adelante	Tipo de suelo	Saprolito de transición al macizo rocoso o roca madre.
Composición	Macizo Rocosos compuesto de areniscas, conglomerados y arcillolitas inmaduras con bajo grado de fracturamiento.	Coloración	Predominantemente color beige con intercalaciones grises, y óxidos.
Plasticidad	---	Humedad	Baja
Clasificación USC	--	Resistencia al corte	Alta
Compresibilidad	Baja.	Expansividad	Baja.
Observaciones: Las condiciones geo-mecánicas de la estabilidad de la ladera del proyecto presentan condiciones desfavorables en cuanto a propiedades mecánicas, lo que se evidencia por los procesos de inestabilidad presentados; se trata de suelos blandos, saturados en estado de remoldeo, y casi que en			

condición de equilibrio limite, a nivel superficial los primeros 5 metros del perfil, lo que los convierte en suelos de baja resistencia al corte, y por ende genera una condición de latencia en cuanto a movimientos en masa.

Bajo el perfil de material meteorizado se trata de un suelo competente y macizo rocoso de resistencia moderada que no implica problemas para la estabilidad general de la ladera, lo que garantiza estabilidad hacia profundidad y descarta que el movimiento en masa se extienda hacia la vía Duitama - Charalá.

1.2.4. PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE DEL SUELO RESIDUAL.

De la caracterización geotécnica se toman los resultados de los ensayos de cortes directos y propiedades físicas de los suelos que determinan el comportamiento del suelo.

Tabla 1 Propiedades mecánicas de los materiales.

Muestra	Descripción	Densidad Tn/m ³	Modalidad de ensayo	Angulo de fricción (°)	Cohesión	
					kg/cm ²	tn/m ²
P2-M1	Limo de color ocre, con trazas de carbón, humedad baja.	1.66	CU	18.6	0.75	7.5
P3-M1	Arcilla de color amarillo grisáceo, de humedad media.	1.77	CU	40.7	0	0
P5-M1	Arcilla de color amarillo con bizos grises de humedad media.	1.78	CU	16.7	0.5	5.0
P6-M1	Arcilla de color gris amarillento, de humedad media.	1.99	CU	35.8	0.07	0.7
P9-M1	Arcilla de color amarillo y gris claro, de humedad baja.	1.77	CU	36.2	0.12	1.2
P9-M4	Limo de color amarillo y gris claro de humedad alta.	1.88	CU	21.2	0.27	2.7
A2-M1	Arcilla de color amarillo y gris claro. De humedad media.	1.77	CU	30.0	0.1	1.0

1.2.5. PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL SUELO Y DEL MACIZO ROCOSO

Del estudio geotécnico detallado se toman los resultados de los ensayos de cortes directos y propiedades físicas de los suelos que determinan el comportamiento del suelo, En el caso del macizo rocoso, es una caracterización básica, con las observaciones en campo y parámetros a partir de pruebas de campo básicas durante la exploración geotécnica en campo, así como el grado de fracturamiento evidenciado, ya que el macizo rocoso no aflora en área del deslizamiento a nivel superficial, y se entiende que el mecanismo de falla que se puede presentar estará relacionado con el suelo residual suprayacente al macizo, siendo los estratos más débiles del suelo.

Tabla 2 Parámetros del macizo rocoso para análisis de estabilidad

Parámetro	Valor
γ_d	2.20 tn/m ³
σ_{CI}	10MPa
GSI	75
m_i	17
D	0
mb	6.96
s	0.06
a	0.5
C'	500KPa 50tn/m ²
Φ'	50°

1.3. ENSAYOS DE PERCOLACIÓN - CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN DEL SUELO

1.3.1. PERCOLACIÓN EN EL SUELO NATURAL

Para determinar la conductividad hidráulica se realizaron tres pruebas de percolación aplicando el método de Porchet en campo, la ubicación de los puntos donde se realizó la medición se presenta a continuación:

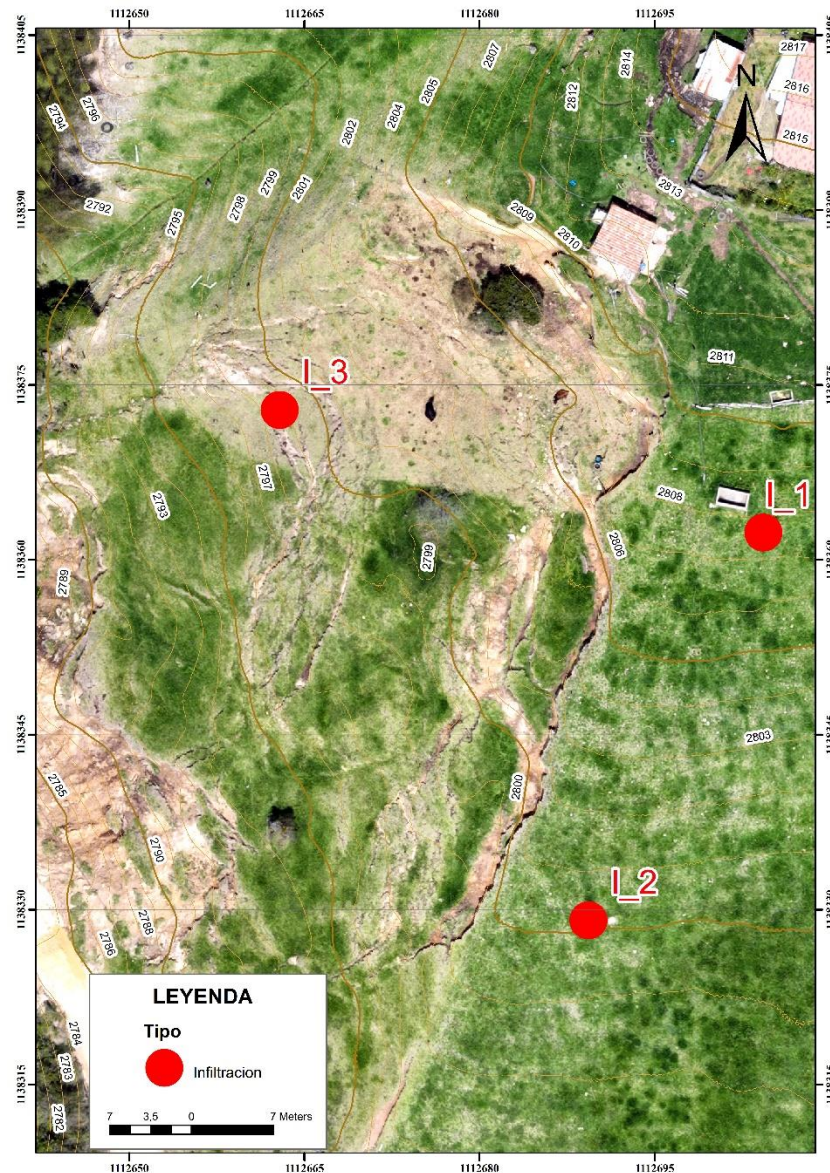


Figura 10: Ubicación de las pruebas de infiltración realizadas en campo, método de Porchet para determinación de la conductividad hidráulica k .



Figura 11: Pruebas de infiltración en campo, método de Porchet para determinación de la conductividad hidráulica k y capacidad de infiltración.

La expresión que permite la estimación de la conductividad hidráulica mediante el método de Porchet es:

$$K = r * \frac{\ln\left(\frac{r + 2h_1}{r + 2h_2}\right)}{2(t_2 - t_1)}$$

Donde:

r es el radio del agujero.

h_1 y h_2 : alturas del nivel de agua respecto al fondo del agujero, para un intervalo de tiempo dado, correspondiente al tramo de la curva de infiltración donde se vuelve constante la velocidad de infiltración.

t_1 y t_2 : tiempo en segundos, para el intervalo de análisis de infiltración (infiltración a velocidad constante).

Para determinar la infiltración acumulada de acude a lo propuesto por Phillip y Horton, que relacionan expresiones matemáticas para modelar el comportamiento de la tasa de infiltración en función del tiempo y del nivel de saturación del material o humedad antecedente:

Horton:

$$I_f = I_{fc} + (I_{f0} - I_{fc})e^{-kt}$$

Phillip:

$$I_f = bt^{-\frac{1}{2}} + a$$

Los parámetros para cada expresión se obtienen iterando, respecto a la curva de conductividad aparente, en función de la tasa de infiltración del ensayo de percolación – método Porchet o con la medida directa de tasa de infiltración de ensayos de doble anillo. O el determinado con el método de Porchet.

Posteriormente, se pueden emplear dichas expresiones para estimar la infiltración acumulada, básicamente integrando las funciones respecto al tiempo para un intervalo dado, de esta forma se estima la infiltración máxima que puede tener el terreno ante eventos de precipitaciones de variada duración; el método permite estimar la infiltración básica del suelo, las abstracciones iniciales, así como los coeficientes de escorrentía empleados en el método racional para diseño de drenaje superficial.

Para la condición de encharcamiento, que resulta ser la más crítica, se acude al Kabs, o coeficiente de infiltración básica, y se multiplica por el periodo de tiempo en el que quiero evaluar la infiltración:

Tabla 3: Resultados de Conductividad hidráulica ensayo de percolación prueba No. 1

Porchet	
r (cm)	15
T1 (s)	16200
T2 (s)	23400
H1 (cm)	25.00
H2 (cm)	22.00
K (cm/s)	1.01E-04

Tabla 4: Resultados de Conductividad hidráulica ensayo de percolación prueba No. 2

Porchet	
r (cm)	13.5
T1 (s)	14400
T2 (s)	21600
H1 (cm)	12.00
H2 (cm)	11.50
K (cm/s)	2.53E-05

Tabla 5: Resultados de Conductividad hidráulica ensayo de percolación prueba No. 3

Porchet	
r (cm)	13.5
T1 (s)	1800
T2 (s)	2400
H1 (cm)	37.70
H2 (cm)	35.20
K (cm/s)	6.51E-04

Tabla 6: Resumen de Resultados de Conductividad hidráulica suelo.

PORCHET			
ENSAYO	x	y	K (cm/s)
1	1112704	1138362	1.01E-04
2	1112689	1138329	2.53E-05
3	1112662	1138372	6.54E-04
media geo			1.19E-04
PROMEDIO			2.60E-04

2. ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN - INFILTRACIÓN

2.1. CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LOS TERRENOS PARA EVALUACIÓN DE ABSTRACCIONES E INFILTRACIÓN.

La caracterización hidrológica de los terrenos que conforman el área de captación se realizó siguiendo el método propuesto por (Freeze, 1972), para el cálculo de la infiltración, dicho método consiste en la clasificación de los suelos y las coberturas presentes de acuerdo con los grupos hidrológicos propuestos por el método para la estimación del Número de Curva de escorrentía que será posteriormente acoplado al modelo hidráulico de precipitación escorrentía (abstracciones). El tipo de suelo y la cobertura o uso del suelo se determinaron a partir de la identificación Geológica geotécnica y cobertura de Suelos con la información levantada en campo durante la etapa de campo, los ensayos de percolación cumplen un papel primordial pues ofrecen una medida directa del comportamiento del suelo, y permiten identificar el grupo hidrológico del suelo de forma directa y cuantitativa:

Tabla 7: Descripción de uso y cobertura de suelos en el área de captación.

USO Y COBERTURA DEL SUELO	
1	Vegetación arbustiva en laderas naturales

La capa de textura de suelos se clasifica según los grupos hidrológicos definidos por (Freeze, 1972) como sigue:

A. (Bajo potencial de escorrentía). Suelos que tienen alta tasa de infiltración incluso cuando estén muy húmedos. Consisten en arenas o gravas profundas, bien a excesivamente drenadas. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.

B. (Moderadamente bajo potencial de escorrentía). Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderadas.

C. (Moderadamente alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten en suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo; suelos de texturas moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o álcalis o suelos con niveles freáticos moderados. Esos suelos pueden ser pobremente drenados o bien a moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50-100 cm).

D. (Alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten en suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a sales o álcalis y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua muy lenta.

Para los suelos hallados en el área de interés, se identificaron como pertenecientes al grupo B en promedio, de permeabilidad moderada, compuestos suelos mixtos principalmente arcillosos.

2.1.1. ESTIMACIÓN DE LA INFILTRACIÓN

El balance hídrico del suelo permite estimar la recarga total promedio o infiltración eficaz que se genera sobre el área de estudio, dicha estimación se logra al aplicar el principio de conservación de masa a la cuantificación de todas las entradas y salidas del recurso hídrico que se dan en el suelo. De la precipitación neta disponible para cada punto dentro del terreno, se debe considerar en primer lugar que existe una cantidad de lluvia que es retenida directamente por la cobertura vegetal, esta última no alcanza a interactuar con el terreno y por lo tanto debe ser sustraída de la precipitación total para cada mes. Se considera que la precipitación restante interactúa directamente con el terreno y por tanto hace parte activa de los procesos de escorrentía directa e infiltración potencial los cuales están condicionados por el tipo, la textura y el espesor de los suelos, el tipo de cobertura en la superficie y por último la pendiente del terreno.

Se consideran dos escenarios básicamente:

- En el primer caso se evalúa el comportamiento promedio de la precipitación estimando una infiltración total promedio mensual.
- Para el caso de eventos extremos, se consideran las infiltraciones que dan lugar durante eventos de altas precipitaciones de forma mensual, y de forma diaria, teniendo en cuenta un antecedente de humedad e infiltración de 5 días.

A continuación, se describe en forma breve la metodología aplicada para la estimación mensual de infiltración en condiciones normales de lluvias, o condiciones de lluvias mensuales extremas:

- Fracción de lluvia interceptada por el follaje

De acuerdo con la metodología de (Schosinsky & Losilla, 2000), el follaje retiene como mínimo en un mes, una profundidad de precipitación de 5 mm, por lo tanto, si en un mes cualquiera caen menos de 5 mm de precipitación, no ocurrirá infiltración pues toda la precipitación disponible será retenida por la vegetación. Por otra parte, dependiendo de la densidad del follaje existente en una zona, la retención total puede variar entre un 12% y un 20% de la precipitación total mensual según (BUTLER, 1957) (Linsley, Kohler, & Paulus, 1958) y respectivamente. Para calcular la distribución espacial de retención potencial en el follaje se le asignó un coeficiente de retención Cfo a cada una de las coberturas vegetales existentes en la cuenca a partir del mapa de cobertura vegetal, en la Tabla 8 se presentan los valores de Cfo asignados a cada una de las coberturas presentes en el interior de la cuenca:

Tabla 8: Coeficiente de retención por follaje.
COEFICIENTE DE RETENCION POR FOLLAJE

DESCRIPCION DE LA COBERTURA	Cfo
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	0.12
2.3.1. Pastos limpios	0.12
2.3.3. Pastos enmalezados	0.12
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	0.12
3.1.1. Bosque denso	0.20
3.1.3. Bosque fragmentado	0.20
3.2.2. Arbustal	0.12
Sin cobertura vegetal o muy escasa	0

Para el predio de implantación, así como las áreas aferentes la tipología predominante de la cobertura es de pastos y arbustos pequeños, por lo que corresponde a un $C_{fo}=0.12$. Dicho valor será empleado para descontar del volumen de precipitación mensual, la cuantía retenida por el follaje de la vegetación; es decir $P_i=P_t(1-C_{fo})$, P_i entonces es la precipitación que realmente llega al suelo y se convierte en escorrentía, se evapora o se infiltra.

- Estimación de la infiltración pluvial.

De acuerdo con la metodología propuesta por (Schosinsky & Losilla, 2000) existen tres factores que determinan la cantidad de lluvia mensual que tendrá potencial de infiltrarse: el primer factor es el coeficiente de infiltración por textura del suelo el cual se relaciona con las propiedades hidráulicas de conductividad de los suelos en superficie, reflejadas en la constante de infiltración básica del suelo f_c (mm/día), dicho parámetro se obtiene mediante pruebas de infiltración en campo o mediante correlación con la clasificación del grupo hidrológico al que pertenece el suelo de acuerdo con la metodología del SCS (Freeze, 1972).

Si f_c es mayor a 1568 mm/día se asume un valor de la unidad para el coeficiente de infiltración por textura, Si f_c es menor a 16 mm/día se estima el valor del coeficiente de infiltración por textura, mediante la siguiente formula:

$$K_{fc} = 0.0148f_c/16$$

Por último, si el valor de f_c se encuentra en el rango entre los límites inferior y superior, la estimación se lleva a cabo mediante la siguiente ecuación:

$$K_{fc} = 0.267 \ln f_c - 0.000154f_c - 0.723$$

En la Tabla 9 se presentan los valores estimados para el coeficiente de infiltración por textura del suelo para cada uno de los grupos hidrológicos.

Tabla 9: Coeficiente de infiltración por textura del suelo Tipo C suelo natural y Tipo B estéril en retro llenado.

GRUPO HID	f_{cmin} (mm/h)	f_{cmax} (mm/h)	f_{cprom} (mm/h)	f_{cprom} (mm/día)	K_{fc}
A	11.43	7.62	9.525	228.6	0.69213259
B	7.62	3.81	5.715	137.16	0.56982391
C	3.81	1.27	2.54	60.96	0.36504034
D	1.27	0	0.635	15.24	0.014097

Para el caso del terreno. Se obtuvieron valores de f_c de 4.9 mm/h para los terrenos naturales, lo que evidencia la permeabilidad moderada del suelo.

Tabla 10: Conductividades hidráulicas estimadas.

Porchet	
	K cm/s
Suelo	1.2E-04

Otro de los factores a tener en cuenta en el cálculo de la infiltración potencial tiene que ver con la pendiente del terreno debido a que esta limita bastante el tiempo de permanencia de la lámina de agua precipitada sobre el terreno, pendientes altas hacen que se active casi de forma inmediata los procesos de escorrentía directa, drenando rápidamente la lámina de agua precipitada sobre el terreno, lo cual no da mucho tiempo para que

la infiltración ocurra de forma efectiva. en el lado opuesto altas permeabilidades absorben toda la precipitación. En la Tabla 11 se muestran los rangos de clasificación de pendiente en porcentaje y el respectivo valor para el coeficiente de infiltración por pendiente según la metodología propuesta por (Schosinsky & Losilla, 2000):

Tabla 11: Coeficiente de infiltración por pendiente.

COEFICIENTE DE INFILTRACION POR PENDIENTE		
PENDIENTE	%	Kp
MUY PLANA	0.00 - 0.06	0.3
PLANA	0.06 - 1.00	0.2
ALGO PLANA	1.00 - 2.00	0.15
PROMEDIO	2.00 - 7.00	0.1
FUERTE	> 7.00	0.06

Las condiciones de pendientes en el terreno en general superan el 7.0 %, por lo que se define un coeficiente por pendiente $K_p=0.06$.

El último factor está relacionado con las coberturas vegetales ya que la presencia de coberturas vegetales densas facilita la retención y acumulación de la humedad producida por la lluvia precipitada sobre el terreno por tiempos prolongados, lo que limita la cantidad de lluvia que se transforma en escorrentía y permite que se infiltre un mayor porcentaje de la lluvia precipitada., se realizó la asignación del coeficiente de infiltración para cada cobertura siguiendo la metodología de (Schosinsky & Losilla, 2000), en la Tabla 12 se muestran los valores de referencia para distintas coberturas.

Tabla 12: Coeficiente de infiltración por vegetación.

COEFICIENTE DE INFILTRACION POR VEGETACION	
DESCRIPCION DE LA COBERTURA	Kv
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	0.09
2.3.1. Pastos limpios	0.18
2.3.3. Pastos enmalezados	0.21
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	0.10
3.1.1. Bosque denso	0.20
3.1.3. Bosque fragmentado	0.20
3.2.2. Arbustal	0.09
Suelo descubierto vegetación muy escasa	0

Para el predio y áreas perimetrales la cobertura predominante corresponde a pastos limpios para el que corresponde un valor de $K_v=0.18$.

Con estos valores se procede a estimar los valores de infiltración mensuales en condiciones promedio y valores extremos:

Tabla 13: Infiltraciones mensuales promedio con un escenario extremo a de precipitación mensual a TR 10 Y 50 años.

MES	Precipitación total P (mm/mes)	Subtracción por follaje	Precipitación en terreno Pi (mm/mes)	cont inf básica del suelo (mm/día)	coef de inf textura del suelo	Pendiente %	Kp	Kv	Ci	Ci Ajust	Infiltración mensual (mm/mes)
Enero	28.2	0.12	24.8	103.7	0.50	>7.0	0.06	0.18	0.74	0.74	18.4
Febrero	40.4	0.12	35.5	103.7	0.50	>7.0	0.06	0.18	0.74	0.74	26.3
Marzo	84.7	0.12	74.5	103.7	0.50	>7.0	0.06	0.18	0.74	0.74	55.2
Abril	128.8	0.12	113.3	103.7	0.50	>7.0	0.06	0.18	0.74	0.74	83.9
Mayo	116.7	0.12	102.7	103.7	0.50	>7.0	0.06	0.18	0.74	0.74	76.0
Junio	61.7	0.12	54.3	103.7	0.50	>7.0	0.06	0.18	0.74	0.74	40.2
Julio	53.3	0.12	46.9	103.7	0.50	>7.0	0.06	0.18	0.74	0.74	34.7
Agosto	57.1	0.12	50.2	103.7	0.50	>7.0	0.06	0.18	0.74	0.74	37.2
Septiembre	72.4	0.12	63.7	103.7	0.50	>7.0	0.06	0.18	0.74	0.74	47.2
Octubre	128.0	0.12	112.6	103.7	0.50	>7.0	0.06	0.18	0.74	0.74	83.4
Noviembre	99.3	0.12	87.4	103.7	0.50	>7.0	0.06	0.18	0.74	0.74	64.7
Diciembre	58.3	0.12	51.3	103.7	0.50	>7.0	0.06	0.18	0.74	0.74	38.0

MAX MES TR 10	263.5	0	263.5	103.7	0.50	>7.0	0.15	0.1	0.75	0.75	197.7
MAX MES TR 50	339.8	0	339.8	103.7	0.50	>7.0	0.15	0.1	0.75	0.75	254.9
MAX MES TR 100	372.6	0	372.6	103.7	0.50	>7.0	0.15	0.1	0.75	0.75	279.5
MAX MES TR 500	449	0	449.0	103.7	0.50	>7.0	0.15	0.1	0.75	0.75	336.9

Para la estimación de infiltración para eventos extremos de precipitación de corta duración (inferiores a un día) se establece el valor de infiltración básica como referente, empleando las pruebas de infiltración:

Tabla 14: Infiltraciones potenciales vs lluvia para eventos de tormentas rápidas, diarias, a 5 días y mensuales con escenarios extremos a periodo de retorno TR 100 años.

Infiltración máx 10 min (m)	0.001	Lluvia 10 min TR 100 Años (m)	0.03
Infiltración máx día (m)	0.10	Lluvia 24h TR 100 Años (m)	0.07
Infiltración máx 5 días (m)	0.48	Lluvia 5 días TR 100 Años (m)	0.15

Infiltración máx mensual (m)	2.85	Lluvia mensual TR 100 Años (m)	0.37
------------------------------	------	--------------------------------	------

Con base en estos resultados se establece el rango de valores de infiltración con los que se procede a hacer el análisis de probabilidad para escenario de red de flujo y aguas infiltradas.

Es de notar que los eventos de precipitaciones a los que resulta sensible la ladera, es decir para los que el suelo absorbe un alto porcentaje de la lluvia caída, son los eventos de varios días, mensuales, dada la magnitud de agua que se precipita comparada con la cantidad de agua que se puede infiltrar. Para los eventos diarios la cantidad de agua infiltrada no supone un cambio importante en la capa freática, sin embargo, mensualmente si se pueden presentar variaciones del orden de metros en la napa por lo que resultan ser los escenarios más delicados.

Pese a todo, estos escenarios no son tan graves como permitir el encharcamiento de la ladera con depresiones topográficas con reservorios, o fugas que existan en redes hidrosanitarias o alcantarillas mal manejadas en la extensión de la ladera pues esto perpetua los tiempos de infiltración y genera cambios muy fuertes en el comportamiento hidrológico. Por lo que debe revisarse minuciosamente si en algún lugar del área se presentan dichos eventos. También en una zona de inestabilidad geotécnica donde se han presentado movimientos en masa, como en la actual ladera, se presentan agrietamientos por los que las aguas lluvias son capturadas de forma más efectiva, e infiltradas, lo que puede generar una saturación casi total del perfil del terreno, llevándolo a condiciones críticas.

3. ESTABILIDAD DE LADERAS Y TALUDES

3.1. CRITERIOS PARA EVALUAR LA ESTABILIDAD

En el análisis de la estabilidad del talud o ladera superior al canal de la bocatoma, así como en la evaluación de los escenarios durante la etapa constructiva y el diseño final, se toman en cuenta los siguientes casos:

- **Estado actual:** se analiza las condiciones actuales de geometría, y condiciones de resistencia del suelo remodelado para la masa inestabilizada, y con las condiciones de red de flujo encontradas al momento de la exploración, así como una evaluación del comportamiento de la red de flujo del talud en la actualidad.

- **Estado Futuro con Obras Instaladas y Operativas:** Se consideran intervenciones para garantizar la seguridad, ponderando la importancia de las estructuras, las condiciones locales de amplificación sísmica y otros parámetros; así mismo se realiza un análisis tanto sin efecto sísmico como con efecto sísmico mediante el análisis pseudoestático.

Las consideraciones pertinentes para estos análisis se rigen por las normativas de la NSR 10, específicamente en el Título H, Capítulo H.5.2, y en el numeral A.2 de dicho título, que establece los parámetros sísmicos para el análisis pseudoestático de la estabilidad de taludes.

La selección de la posición y orientación del perfil para el análisis se llevó a cabo con el objetivo de proporcionar un modelo representativo de las características geométricas de las laderas, incluyendo la tendencia de las pendientes. Posteriormente, utilizando información de exploración y caracterización geomecánica, se correlacionaron los perfiles de exploración geotécnicos-estratigráficos con la información de campo representativa, considerando la disposición geométrica de los macizos rocosos y suelos residuales, extrayendo así los parámetros mecánicos de cada material.

La metodología planteada para el diseño y los análisis de las condiciones de estabilidad tanto de taludes a conformar, como el área de implantación y zonas perimetrales, consisten en la aplicación de los criterios establecidos en la tabla H.2.4-1 de la NSR-10 que se resume en lo siguiente:

Tabla 15 Factores de seguridad básicos mínimos para estabilidad de taludes.

Condición	Diseño	Construcción
Taludes-condición estática y agua subterránea normal	1,50	1,25
Taludes condición Pseudo estático con agua subterránea normal y coeficiente sísmico de diseño.	1,05	1,00

Con lo anterior se establece los respectivos análisis para una sección o perfil del talud, expuestos a continuación:

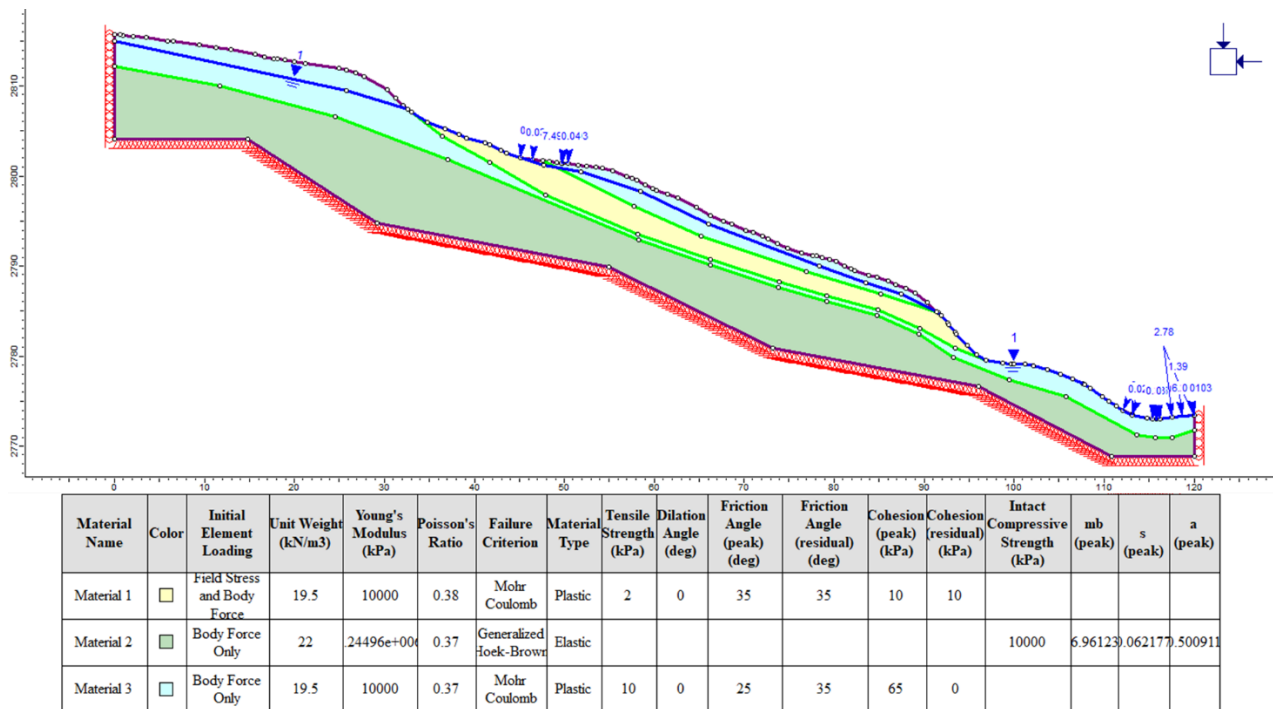


Figura 12. Perfil geológico – geotécnico A_A', con las respectivas capas promediadas y diferenciadas encontradas en la exploración geotécnica, en la condición natural actual.

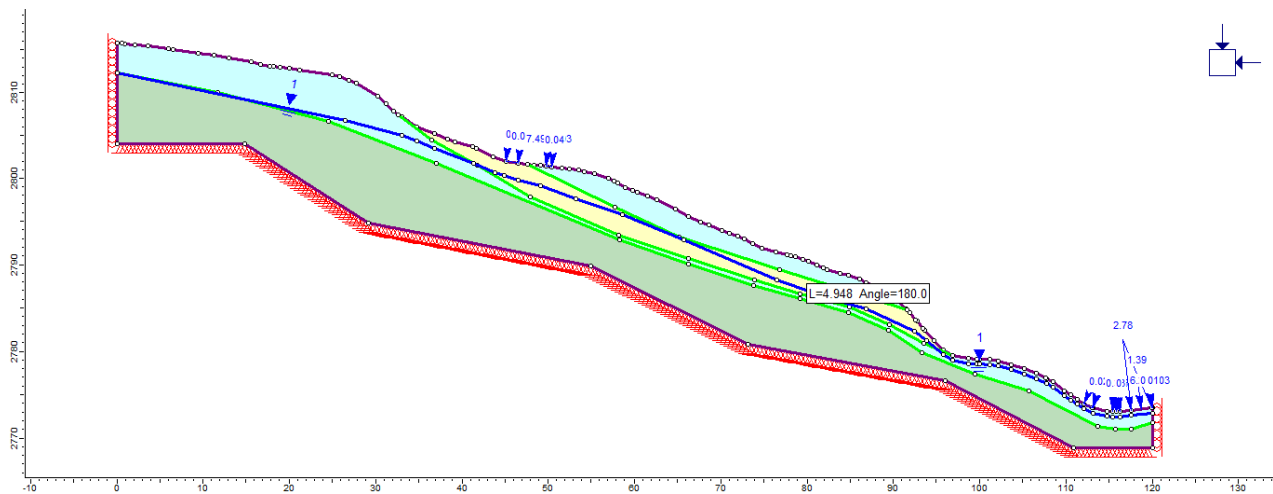


Figura 13. Perfil geológico – geotécnico A_A', con las respectivas capas promediadas y diferenciadas encontradas en la exploración geotécnica, con intervención futura de abatimiento de nivel freático.

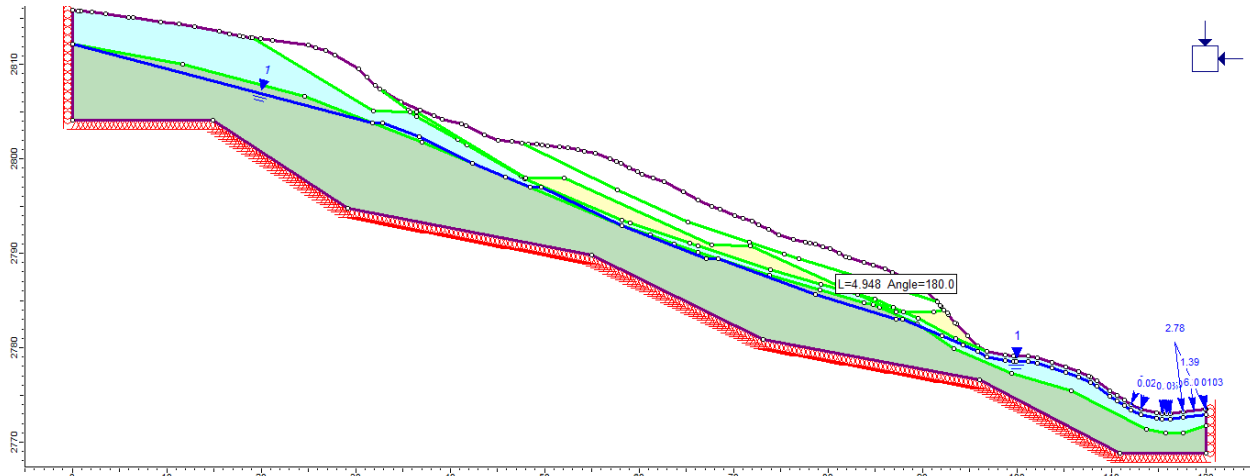


Figura 14. Perfil geológico – geotécnico A_A', con las respectivas capas promediadas y diferenciadas encontradas en la exploración geotécnica, con intervención futura de abatimiento de nivel freático y reconformación con movimiento de tierras.

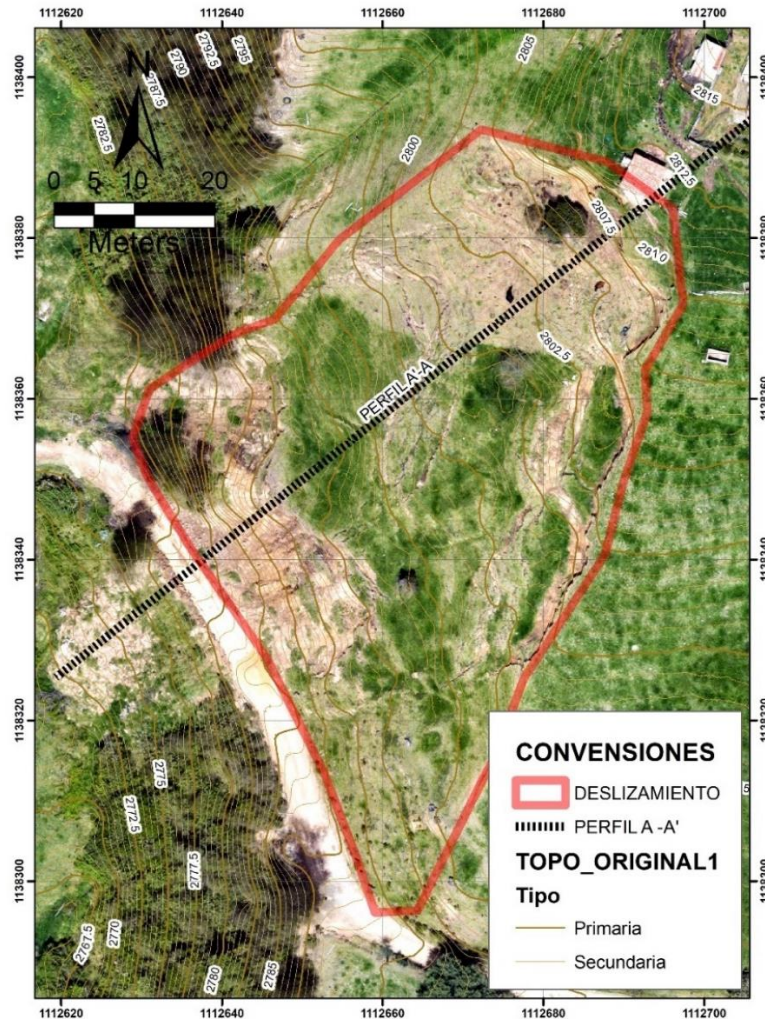


Figura 15 Ubicación del trazado del perfil geológico- geotécnico perfil A – A' en planta.

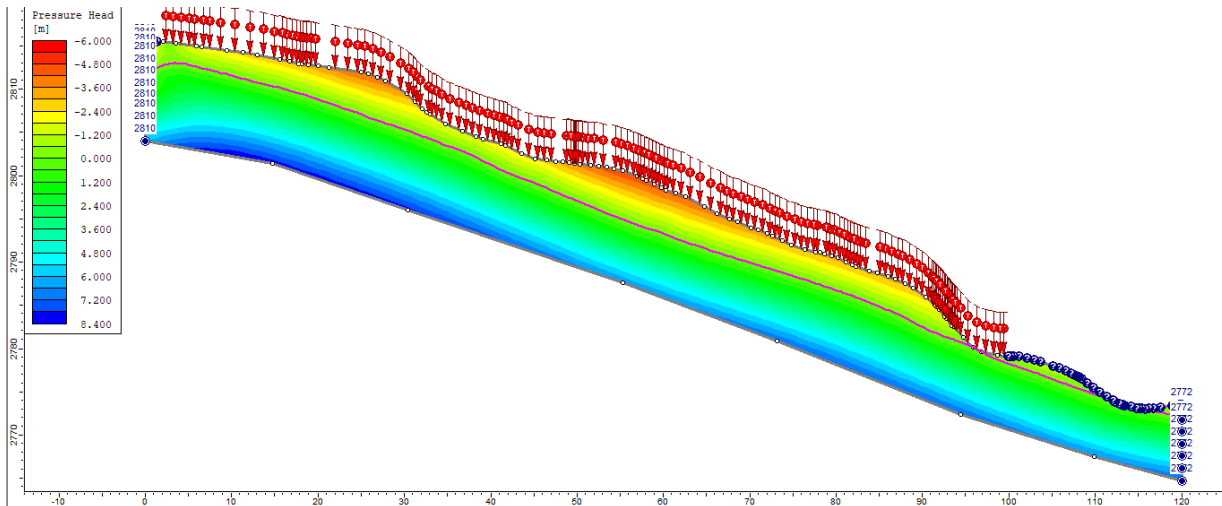
3.2. CONSIDERACIONES SOBRE NIVEL FREÁTICO O TABLA DE AGUA (LLUVIAS – INFILTRACIÓN - RED DE FLUJO)

Los escenarios planteados para evaluar la condición futura de estabilidad de la ladera natural consideran los siguientes aspectos:

Teniendo en cuenta el comportamiento hidrológico de los suelos, el régimen de lluvias y las condiciones de aguas freáticas encontradas se realizaron simulaciones de las condiciones generales del comportamiento de la red de flujo en el suelo.

Se identificó el escenario de precipitaciones mensuales como el más representativo, en cuanto a la cantidad de agua que se infiltra en el talud y la variación del nivel del agua, comparado con la cantidad de agua que llueve, se incluyó en la simulación un mes de precipitaciones extremas correspondiente a un evento con un periodo de retorno de 10 años donde caerían 263mm de agua.

Figura 16 Perfil geológico – geotécnico A_A', con las respectivas capas promediadas y diferenciadas encontradas en la exploración geotécnica., modelo de infiltración mensual y variación de la red de flujo.



- En la simulación se presentan niveles freáticos incluso menores a los encontrados en la etapa de campo lo que indica una condición adicional de aporte de aguas infiltradas, posiblemente con estratos permeables de acuíferos confinados que descargan directamente a la ladera analizada, lo que incrementa el nivel de la red de flujo, por lo que la mayor influencia en este son las aguas que se puedan infiltrar desde el respaldo del talud. Como la condición crítica se puede considerar saturación en prácticamente toda la masa deslizada y es un escenario de probabilidad anual muy alta, cercana al 0.5. por lo tanto, el escenario de análisis es el talud totalmente saturado.
 - Como sea la situación más crítica que se escoge como parámetro de diseño de subdrenaje es la condición de saturación de los terrenos pues implica una infiltración constante de agua en el terreno y esta debe evacuarse, ya que es una situación que tiene alta probabilidad de presentarse.
- La intervención final consistente en cortes de conformación y sistemas de subdrenaje, abate de forma eficiente el nivel de aguas y descarga la mayoría de los materiales remoldeados, mejorando las condiciones de estabilidad.

3.3. PARÁMETROS SÍSMICOS

La clasificación del perfil del suelo corresponde con Tipo D, según NSR-10. En la Figura 17 se muestra el espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de la gravedad, correspondiente los materiales encontrados en el área y calculado de acuerdo con el numeral A.2 de NSR-10. El periodo de retorno para el cual se obtiene dicha aceleración corresponde a 475 años.

Del estudio general de amenaza sísmica de Colombia (2009) se extraen las aceleraciones sísmicas en función del periodo de retorno sísmico para el municipio de Duitama.

Tabla 16 Parámetros Sísmicos y nivel de amenaza Tr 475años (NSR – 10).

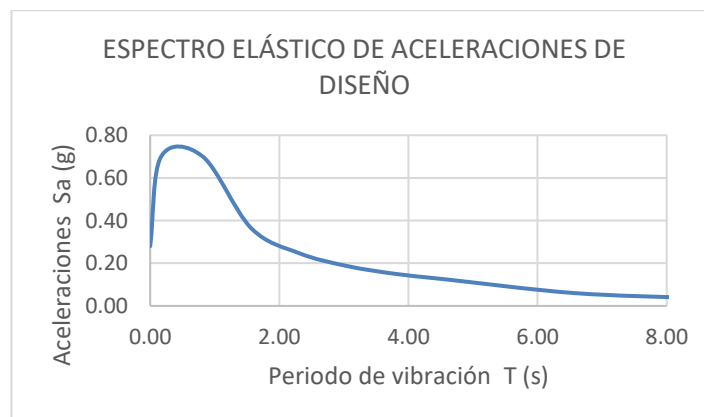
Zona de amenaza sísmica	Intermedia
Aa Coef. De aceleración pico efectiva (g)	0.20
Av Coef. De velocidad pico efectiva	0.25
Ae Aceleración pico reducida seguridad limitada (g)	0.14
Ad Aceleración pico efectiva al nivel de Umbral de daño (g)	0.07

Tabla 17 Clasificación del suelo y obras civiles según NSR 10.

Perfil Tipo	D
Aa	0.20
Av	0.25
A. Sísmica	Alta
Fa	1.4
Fv	1.9
Grupo Uso	I
Coef impor I	1.0

El coeficiente de importancia de la estructura fue definido por el consultor; en conformidad con la tipología de las obras y lo establecido en la NSR- 10.

Figura 17: Suelo Tipo D, Espectro de aceleraciones de diseño como fracción de g.



Para el cálculo del coeficiente sísmico de diseño para análisis pseudo estático de taludes KST o conocido como Kh se ha seguido lo estipulado en el numeral H.5.2.5 de NSR-10, como se muestra a continuación, encontrando que $K_h = 0,22$.

Tabla 18. Parámetros sísmicos calculados para análisis pseudo estático de taludes.

a_{max}	Aceleración máxima del terreno ($S_a = A_a * F_a * I$)	0.28
K_{ST}/a_{max}	Mínimo para análisis pseudoestático de taludes	0.8
K_{ST}	Coef. Sísmico de diseño para análisis pseudoestático (K_h)	0.22
K_v	Coef. Aceleración Vertical definido como $2/3K_h$	0.15

3.4. PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL SUELO Y MACIZO ROCOSO

Del estudio geotécnico detallado se toman los resultados de los ensayos de cortes directos y propiedades físicas de los suelos que determinan el comportamiento del suelo, En el caso del macizo rocoso, es una caracterización básica, con las observaciones en campo y parámetros a partir de pruebas de laboratorio sobre núcleos tomados durante la exploración geotécnica en campo, así como el grado de fracturamiento evidenciado, ya que el macizo rocoso no aflora en área del deslizamiento a nivel superficial, y se entiende que el mecanismo de falla que se puede presentar estará relacionado con el suelo residual suprayacente al macizo, siendo los estratos más débiles del suelo estando en estado remoldeado incluso en el cuerpo del deslizamiento.

Tabla 19 Parámetros del macizo rocoso para análisis de estabilidad.

Parámetro	Valor
γ_d	2.20 tn/m ³
σ_{CI}	10MPa
GSI	75
m_i	17
D	0
mb	6.96
s	0.06
a	0.5
C'	500KPa 50tn/m ²
Φ'	50°

Tabla 20 Propiedades mecánicas de los materiales de los suelos.

Descripción	Densidad Tn/m ³	Modalidad de ensayo	Angulo de fricción (°)	Cohesión	
				kg/cm ²	tn/m ²
Suelos mixtos predominantemente arcillosos de coloraciones grises y amarillas, no remoldeados.	1.87	CU	25	0.65	6.5

Suelos mixtos predominantemente arcillosos de coloraciones grises y amarillas, remoldeados por efecto del movimiento en masa manifestado.	1.75	CU	35	0.10	1.0
---	------	----	----	------	-----

3.5. MODELAMIENTO EN SOFTWARE

Para el análisis de estabilidad se considera apropiado el método de elementos finitos con el software Phase²:

Tabla 21 Resultados del análisis de estabilidad para los perfiles analizados (TR 475).

Perfil	Condición estática Fs.	Condición sísmica seudo estática Fs.	Cumplimiento NSR 10 título H
Perfil A-A'. condición natural- actual.	1.02	0.42	No
Perfil A-A'. con abatimiento del nivel freático.	1.30	0.73	No
Perfil A-A'. con los cortes de conformación y abatimiento de nivel freático.	2.01	1.36	Sí

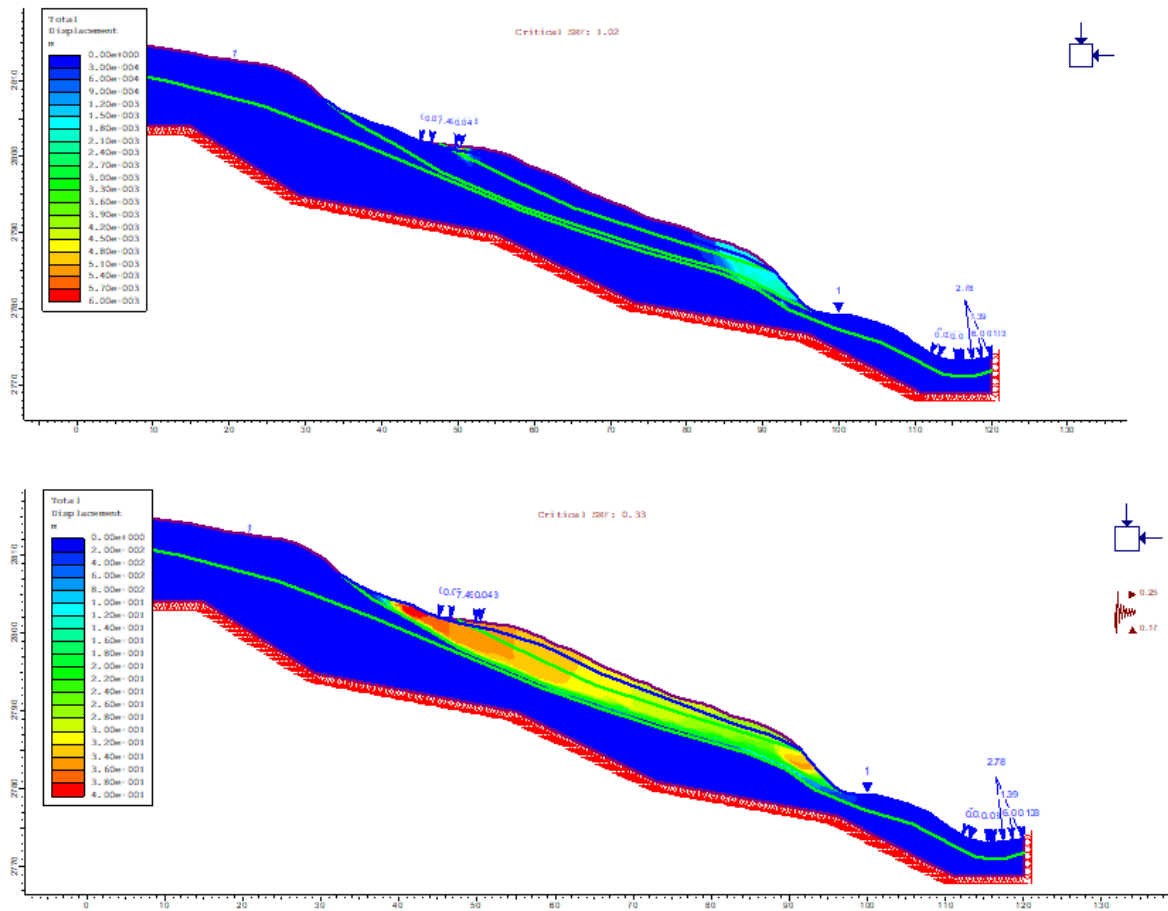


Figura 18 Factor de seguridad Perfil A-A'. Condición normal- actual. Escenarios estático y sísmico.

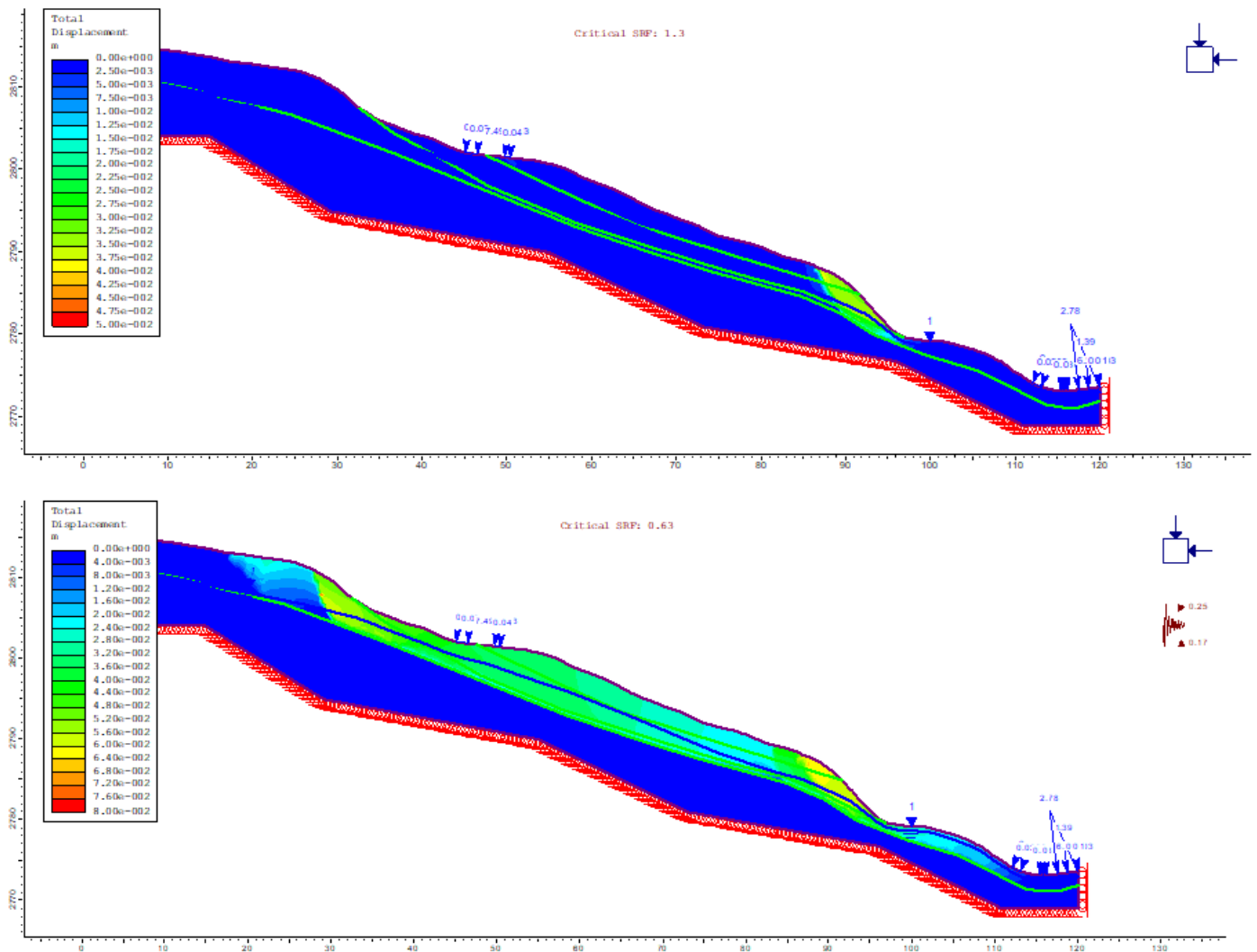


Figura 19. Factor de seguridad Perfil A-A'. Abatimiento de nivel freático. Escenario estático y sísmico.

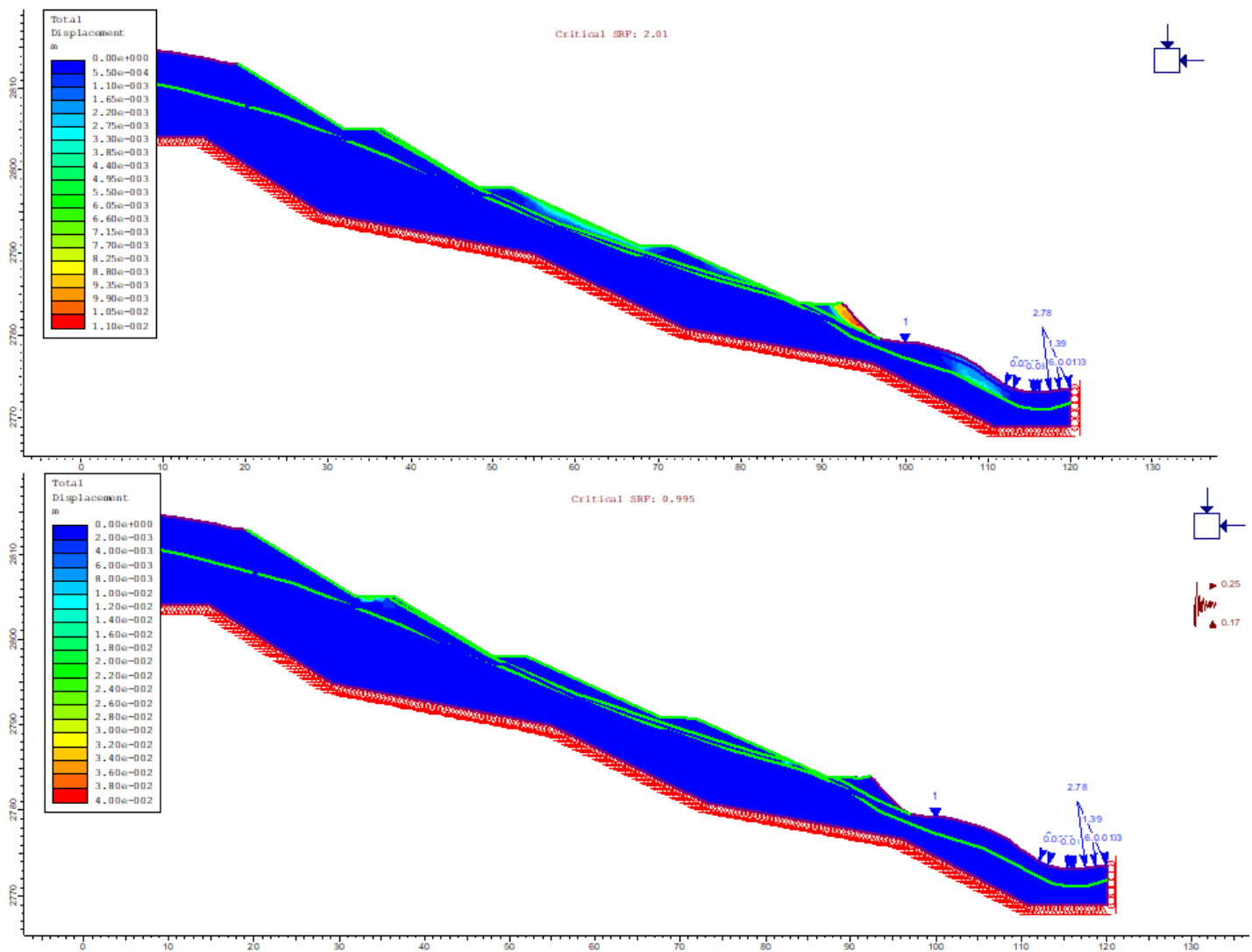


Figura 20. Factor de seguridad Perfil A-A'. Cortes de reconformación del terreno y abatimiento del nivel freático. Escenario estático y sísmico.

Se obtuvieron factores de seguridad que cumplen con las exigencias de la norma sismo resistente NSR 10 para el escenario de intervención con cortes de conformación y abatimiento del nivel freático manejados de forma simultánea. Para los escenarios de condición natural y abatimiento de nivel freático los factores de seguridad son muy bajos y no cumplen las normativas, por lo que finalmente la intervención que debe plantearse implica reconformación, manejo de aguas superficiales y subsuperficiales, con sistemas de drenaje y subdrenaje.

Para los cortes de conformación que se proponen y cuyos detalles se presentan más adelante en el capítulo de intervenciones, los factores de seguridad cumplen con los requerimientos de la norma sismo resistente. Los resultados se presentan detalladamente en el Anexo No. 4.

Sogamoso, diciembre de 2.023

Ing. PEDRO ANTONIO IBAÑEZ GOMEZ

*Esp. en Geotecnia - Esp. en Gerencia de Empresas Constructoras
Esp. QA – QC en Obras Civiles
T.P. No 15223-42978 COPNIA
Director consultoría*

Ing. OCTAVIANO SALCEDO RODRIGUEZ

*Profesional Universitario de la Secretaria de Infraestructura
Supervisor de contrato*

LISTA DE ANEXOS

ANEXO No. 1: *EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA*

ANEXO No. 2: *CARACTERIZACIÓN GEOTECNICA MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO*

ANEXO No. 3: *EXPLORACIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV)*

ANEXO No. 4: *ANÁLISIS DE ESTABILIDAD*

ANEXO No. 1
EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

ANEXO No. 2

CARACTERIZACIÓN GEOTECNICA MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO

ANEXO No. 3
EXPLORACIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV)

ANEXO No. 4

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD