

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERIA

MAESTRÍA EN GEOTÉCNIA APLICADA



TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A OBTENER EL TÍTULO DE MÁSTER EN
GEOTENECIA APLICADA

TEMA:

ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN EL SECTOR
PROPUESTO PARA LA ESCOMBRERA DEL PROYECTO MINERO
CANGREJOS

AUTOR:

MARÍA VICTORIA ROBALINO ROBALINO

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

ING. JORGE ALBUJA, MS.C. PhD.

MAYO DE 2026

QUITO DM – ECUADOR

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Quien suscribe, **María Victoria Robalino Robalino**, con el número de cédula de ciudadanía No. 175143279-8, declaro que los resultados presentados en esta investigación, consignados en el presente informe final para optar al título de Magíster en Geotecnia Aplicada, son fruto de mi trabajo personal. En tal sentido, manifiesto que el contenido del documento, las conclusiones expuestas y las implicaciones académicas y legales derivadas del mismo son y serán de mi única y exclusiva responsabilidad, tanto legal como académica.

Firma: 

María Victoria Robalino Robalino

Ci: 1751432798

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Ph.D. Jorge David Albuja Sánchez

Director del Trabajo de Titulación

En mi calidad de Director del Trabajo de Titulación, certifico haber revisado el presente manuscrito de investigación, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, cumpliendo la Normativa del Trabajo de Titulación; en consecuencia, es apto para su presentación y sustentación.

F. _____

Ph.D. Jorge David Albuja Sánchez

Agradecimientos

Agradezco profundamente a Dios por brindarme la fortaleza, la constancia y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi formación profesional.

Expreso mi sincero agradecimiento a mi familia, por su apoyo incondicional, su comprensión y por ser mi principal motivación a lo largo de este proceso. Su confianza en mí ha sido fundamental para alcanzar este logro.

De manera especial, agradezco a mis docentes y asesores, quienes con su conocimiento, orientación y dedicación contribuyeron significativamente al desarrollo de esta investigación.

Asimismo, agradezco a la empresa y a todas las personas que formaron parte del desarrollo de este proyecto, por facilitar la información y brindar el apoyo necesario para la realización de este trabajo.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra forma, contribuyeron en este camino y hicieron posible la culminación de esta meta.

INDICE DE CONTENIDOS

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Justificación	2
1.2	Objetivos.....	3
2	REVISIÓN LITERARIA	4
2.1	Localización.....	4
2.2	Geología.....	6
2.2.1	Geología Regional.....	6
2.2.2	Geología local	10
2.3	Hidrogeología regional.....	12
2.3.1	Configuración Climática e Hidrológica	14
2.3.2	Unidades hidroestratigráficas	15
2.4	Sismicidad	16
2.5	Escombrera	18
2.6	Normativas aplicables al diseño de escombreras y análisis de estabilidad	19
2.6.1	Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-GEO)	19
2.6.2	Guías del ICMM (International Council on Mining and Metals)	20
2.6.3	Guías del Banco Mundial / IFC.....	21
2.7	Tipos de deslizamientos.....	22
2.7.1	Falla por Deslizamiento Rotacional	22
2.7.2	Falla por Deslizamiento Traslacional:.....	23
2.7.3	Falla por Deslizamiento compuestos de Traslación y Rotación	24
1.1	Talud.....	26
2.7.4	Partes de Talud	26
2.7.5	Cohesión (c)	28
2.7.6	Ángulo de Fricción Interna (ϕ)	29
2.7.7	Densidad.....	29
2.8	Criterio de Falla	30
2.8.1	CRITERIO DE MOHR-COULOMB – SUELOS.....	31
2.9	Metodologías para el análisis de la estabilidad	31
2.9.1	Métodos límite de equilibrio	33
2.9.2	Factores de influencia en la estabilidad de un talud.....	35
2.9.3	Análisis de límite de equilibrio	35
2.9.4	Factor de seguridad (FS)	36
2.9.5	Concepto de superficie de falla	37

2.9.6	Variables geotécnicas empleadas en métodos de equilibrio límite	38
2.9.7	Estabilidad a corto y a largo plazo	41
2.9.8	Limitaciones de los métodos de límite de equilibrio.....	41
2.10	Normativa nacional e internacional para el diseño geotécnico de escombreras	43
3	Metodología	45
3.1	Caracterización Geotécnica del terreno	47
3.1.1	Calicatas	48
3.1.2	Caracterización de materiales.....	52
3.1.3	Manejo de la incertidumbre en los parámetros geotécnicos obtenidos	53
3.2	Rocscience – Slide 2.....	55
3.2.1	Métodos Bishop Simplificado	57
4	Resultados	59
4.1	Caracterización de suelos	60
4.2	Caracterización de macizo Rocoso.....	63
4.3	Perfiles – Slide 2.....	66
5	Análisis de los resultados	74
5.1	Análisis del muestreo para la caracterización del suelo	74
5.2	Análisis de la caracterización del macizo rocoso	75
5.3	Análisis de los perfiles -Slide	75
5.3.1	Factor de seguridad (FOS): 4.318	77
5.3.2	Análisis de sensibilidad de parámetros geotécnicos	78
5.4	Comparación con estudios similares y directrices internacionales	80
5.5	Diseño y Criterios Geotécnicos para el Almacenamiento de Roca Estéril.....	81
5.5.1	Almacenamiento de roca estéril	82
5.6	Medidas de mitigación geotécnica para la escombrera	84
5.6.1	Gestión y control del nivel freático	85
5.6.2	Optimización del diseño de taludes.....	85
5.6.3	Manejo adecuado del material de descarga.....	86
5.6.4	Monitoreo geotécnico permanente	86
5.6.5	Plan de contingencia y rehabilitación progresiva.....	87
6	Conclusiones y recomendaciones:	88
6.1	Conclusiones:.....	88
6.2	RECOMENDACIONES:	90
7	Bibliografía.....	92
8	Anexos:.....	95

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Aceleración Máxima del suelo (cm/s^2)	17
Tabla 2.- Métodos de análisis de estabilidad.....	34
Tabla 3.- Ubicación de las calicatas en la área de la escombrera.....	49
Tabla 4.- Ventajas del Método Bishop.....	57
Tabla 5.- Resultados de ensayo de Carga puntual.....	65
Tabla 6.- Resumen de los parámetros tomados para el análisis de talud	67
Tabla 7.- Resumen de los Factores de seguridad en diferentes escenarios	78
Tabla 8.- Valores del perfil 1 para el modelamiento.....	78
Tabla 9.- Combinaciones realizadas para diferentes escenarios	79
Tabla 10.- Parametros tomados en el perfil 2.....	79
Tabla 11.-Combinaciones realizadas para diferentes escenarios	80
Tabla 12.- Tabla resumen aplicando el Método Monte Carlo.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Ubicación del Proyecto; Fuente: Lumina, 2017.	5
Figura 2.- Proyecto Cangrejos en relación con el área local; Fuente OdinMining 2024	6
Figura 3.- Plano Geológico Regional. Fuente: OdinMining 2024	10
Figura 4.- Mapa Geológico Local Generado a partir de las perforaciones, Fuente:OdinMining 2024	12
Figura 5.- Unidades de Litopermeabilidad en el área de Machala. La zona del proyecto Cangrejos en rojo.	14
Figura 6.- Mapa de ubicación y distribución de las áreas del proyecto Cangrejos	15
Figura 7.- Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z. Fuente NEC-2015.....	17
Figura 8.-.- Labores mineras que originan estériles y sistemas de deposición , Tomado de ((CANMET, 1979)	18
Figura 9.-Desplazamiento de rotación en una ladera o talud Fuente: Jaime Suarez.....	23
Figura 10.- Deslizamiento de traslación.....	24
Figura 11.- Esquema de una extensión lateral.....	25
Figura 12.- Desplazamientos rotacionales simples y múltiples. Fuente (Suarez)	26
Figura 13.- Partes generales de un talud o ladera. Fuente Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.	27
Figura 14.- Métodos de análisis de estabilidad de taludes	32
Figura 15.- Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante. Fuente (Suarez) ..	37
Figura 16.- Formas de la superficie de falla (Suarez)	38
Figura 17.- Esquema de una grieta de tensión para análisis de límite de equilibrio.	38
Figura 18.- Pruebas de Pala y monitoreo Arqueológico	48
Figura 19.- Procedimiento de preparación del terreno para excavar calicatas a mano.	49

Figura 20.- Muestreo en las calicatas realizadas.	49
Figura 21.- Máquina de perforación y muestras de Shelby.	51
Figura 22.- Mapa de ubicación de calitas y pozos.	52
Figura 23.- Mapa de ubicación las calicatas y perforaciones, además de los perfiles realizados.....	59
Figura 24.- Límites de Atterberg de las muestras de saprolita del area de estudio. Fuente: Ausenco	62
Figura 25.- Perfil 1 en condiciones drenadas y no drenadas	68
Figura 26.- Perfil 2 en condiciones drenadas y no drenado	69
Figura 27.- Perfil 3 calicatas no drenado.....	70
Figura 28.- Perfil 1 y Perfil 2 modelado pseudoestática	71
Figura 29.- Plano de las facilidades para el proyecto minero (WRSF - Escombrera) Fuente: IMC 2023	84

RESUMEN

La presente investigación evalúa la estabilidad de taludes en un área designada a la escombrera minera proyectada para una operación a cielo abierto de oro y cobre, ubicada en Ecuador en la provincia de El Oro. Con ese fin, se procedió a realizar una caracterización geotécnica exhaustiva basada en datos obtenidos de perforaciones y en ensayos realizados en laboratorio (SPT, corte directo, compresión triaxial, carga puntual) y clasificación de materiales. A continuación, se generaron tres perfiles representativos utilizando el software Slide, incorporando condiciones de drenaje, la influencia del nivel freático y un análisis pseudoestático con un coeficiente sísmico horizontal de ($k_h = 0.15$). Los datos obtenidos muestran factores de seguridad que varían entre 4.5 y 1.37, dependiendo del perfil y de las condiciones modeladas, siendo el nivel freático el factor más crítico en la reducción de la estabilidad. Se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar la incertidumbre en los parámetros geotécnicos y su impacto en la estabilidad. Finalmente, se proponen medidas de mitigación, monitoreo y diseño basadas en los resultados obtenidos, alineadas con normativas nacionales (NEC) e internacionales (ICMM, IFC). Esta investigación aporta un enfoque técnico integral para garantizar la seguridad y sostenibilidad en el manejo de residuos mineros a largo plazo.

ABSTRACT

This research evaluates slope stability in the area designated for the waste rock dump of a projected open-pit gold and copper mining operation located in El Oro Province, Ecuador. To this end, a comprehensive geotechnical characterization was carried out based on drilling data and laboratory testing, including Standard Penetration Tests (SPT), direct shear tests, triaxial compression tests, point load tests, and material classification.

Subsequently, three representative cross-sections were modeled using Slide software, incorporating drained conditions, groundwater level influence, and a pseudo-static seismic analysis with a horizontal seismic coefficient ($k_h = 0.15$). The results indicate factors of safety ranging from 4.5 to 1.37, depending on the analyzed profile and modeled conditions, with groundwater presence identified as the most critical factor reducing stability.

A sensitivity analysis was conducted to assess the uncertainty associated with geotechnical parameters and its impact on slope stability. Finally, mitigation, monitoring, and design measures are proposed based on the obtained results, aligned with national (NEC) and international standards (ICMM, IFC). This study provides a comprehensive technical approach to ensure long-term safety and sustainability in the management of mining waste.

1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la minería a gran escala en Ecuador ha impulsado la necesidad de incorporar herramientas técnicas avanzadas para diseñar y evaluar infraestructuras críticas como las escombreras. En este contexto, el Proyecto Minero Cangrejos, ubicado en la provincia de El Oro. Se trata de una operación minera a cielo abierto para la extracción de oro y cobre, la cual implicará el manejo y disposición de grandes cantidades de material estéril. Para ello, se ha definido un sector específico donde se proyecta la construcción de una escombrera, cuya estabilidad geotécnica debe ser evaluada con rigurosidad técnica y conforme a estándares internacionales.

Las escombreras representan estructuras masivas, conformadas por materiales heterogéneos y frecuentemente dispuestos sobre terrenos naturales de características variables. Su comportamiento a largo plazo depende de múltiples factores: las características mecánicas de los suelos y rocas subyacentes, la interacción entre los materiales de descarga, las condiciones hidráulicas, la respuesta sísmica del terreno y los métodos constructivos. En este sentido, la estabilidad de los taludes del área proyectada para la escombrera es determinante para la seguridad operativa, ambiental y social del proyecto minero.

Esta investigación se enmarca en la línea de Geotecnia Computacional, y utiliza herramientas como el software Slide para aplicar métodos de equilibrio límite, integrando la información proveniente de ensayos realizados tanto en campo como en laboratorio durante la campaña geotécnica de 2022 en el área de interés. Se plantea una revisión exhaustiva, estandarización y selección de los ensayos geotécnicos más relevantes (SPT, corte directo, triaxial, carga puntual, entre otros), con el fin de definir parámetros representativos y realizar simulaciones bajo distintos escenarios operativos: condiciones drenadas, saturadas y pseudoestáticas.

- ¿Cuáles son las propiedades físicas, geológicas y geotécnicas del terreno natural sobre el que se construirá la escombrera?
- ¿Qué parámetros de resistencia al corte (cohesión y fricción) se obtienen a partir de los ensayos disponibles, y cómo varían frente a diferentes condiciones de saturación o carga sísmica?
- ¿Cómo varía la estabilidad de los perfiles modelados en el área proyectada para la escombrera, bajo condiciones drenadas, no drenadas y pseudoestáticas?
- ¿Qué nivel de incertidumbre presentan los parámetros geotécnicos utilizados y cómo impactan en el factor de seguridad?
- ¿Qué medidas de diseño, drenaje o monitoreo pueden proponerse a partir de los resultados obtenidos para garantizar una operación segura y sostenible?

1.1 Justificación

El crecimiento de la minería a gran escala en la provincia de El Oro, Ecuador, contribuye de manera significativa al fortalecimiento económico y al avance social del entorno regional. En particular, los proyectos que se dedican a la extracción de minerales valiosos como el oro a cielo abierto han generado un importante dinamismo productivo, pero también plantean retos técnicos y ambientales que requieren una planificación adecuada para garantizar operaciones seguras y sostenibles.

Uno de los retos técnicos más relevantes en este tipo de desarrollos destaca en este tipo de proyectos es el diseño y manejo de escombreras, estructuras destinadas a almacenar grandes volúmenes de material estéril generado en el proceso de extracción. El comportamiento estable de los taludes que conforman estas estructuras constituye un aspecto fundamental desde el punto de vista geotécnico, ya que una falla podría comprometer no solo la seguridad del personal y de las comunidades aledañas, sino también generar impactos ambientales severos.

Considerando la realidad ecuatoriana, donde la minería a gran escala se encuentra aún en una fase de desarrollo y consolidación, estudios técnicos como el presente son fundamentales para promover prácticas responsables y fortalecer las capacidades locales en el ámbito geotécnico. En el caso

específico de la provincia de El Oro, existen condiciones geológicas y climáticas particulares — como suelos heterogéneos, pendientes naturales pronunciadas y alta pluviosidad— que elevan el riesgo de inestabilidad en taludes si no se realiza un análisis adecuado.

Por ello, este estudio se enfoca en la evaluación geotécnica del área destinada a la escombrera del Proyecto Minero Cangrejos, integrando datos de campo y laboratorio con herramientas de modelación numérica (Slide), bajo escenarios estáticos y sísmicos. Esta investigación no solo busca garantizar la seguridad del diseño, sino también aportar a la sostenibilidad operativa, el cumplimiento normativo (nacional e internacional) y la aceptación social del proyecto.

Los resultados obtenidos podrán ser aplicables como referencia técnica para futuros proyectos mineros en Ecuador, contribuyendo al fortalecimiento del conocimiento en estabilidad de taludes, al desarrollo de metodologías más robustas de diseño, y a una minería moderna más segura, eficiente y sostenible.

1.2 Objetivos

Objetivo General

Evaluar la estabilidad de taludes en el sector destinado a la construcción de la escombrera del Proyecto Minero Cangrejos, mediante el análisis de parámetros geotécnicos obtenidos en campo y laboratorio, y su integración en modelos numéricos de simulación.

Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos y rocas presentes en el área destinada a la escombrera, a partir de ensayos geotécnicos realizados in situ y en laboratorio.
- Analizar los parámetros de resistencia al corte y su sensibilidad frente a variaciones hidráulicas y sísmicas, evaluando su impacto en la estabilidad de los taludes proyectados.
- Aplicar métodos de equilibrio límite mediante software especializado (Slide) para simular distintos escenarios operativos (condiciones drenadas, no drenadas y pseudoestáticas), y determinar los factores de seguridad correspondientes.

2 REVISIÓN LITERARIA

En geotecnia, la terminología empleada para describir los distintos tipos de movimientos en masa se basa principalmente en los sistemas de clasificación desarrollados por Hutchinson (1968) y Varnes (1958, 1978). Posteriormente, la propuesta de Varnes fue revisada y ampliada por Cruden y Varnes, siendo publicada en el Special Report 247 del Transportation Research Board (TRB) en 1996. Esta actualización consolidó una nomenclatura estandarizada que continúa siendo ampliamente utilizada en estudios de estabilidad de taludes y análisis de deslizamientos, convirtiéndose en la referencia más empleada a nivel mundial. Aunque a esta clasificación se añadieron elementos importantes, los principios fundamentales del sistema original del TRB se mantuvieron, incorporando términos adicionales para complementar y actualizar la terminología inicial.

2.1 Localización

El Proyecto Cangrejos está localizado en la región suroccidental del Ecuador, dentro de la provincia de El Oro. El área del proyecto se sitúa aproximadamente a 223 kilómetros de la ciudad de Guayaquil y a cerca de 30 kilómetros al sureste de Machala, capital provincial, a $3^{\circ} 28' 58''$ de latitud sur, $79^{\circ} 49' 3''$ de latitud oeste, como se muestra en la Figura 1. El Proyecto se encuentra principalmente dentro de los cantones de Santa Rosa y Atahualpa. El Proyecto se encuentra en la Zona del Cinturón Metamórfico de El Oro de la Cordillera Real, en terreno escarpado y de alto relieve cerca del borde noreste de una antigua caldera en el borde oriental de la planicie costera. Las elevaciones del proyecto oscilan aproximadamente entre los 100 y los 1.370 msnm.

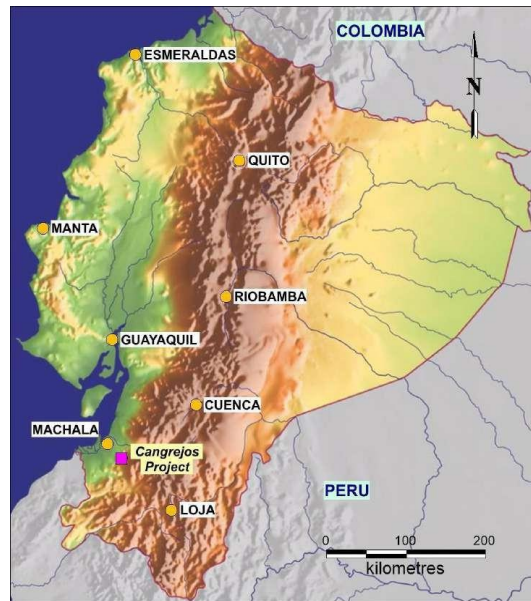


Figura 1.- Ubicación del Proyecto; Fuente: Lumina, 2017.

La Figura 2 presenta la distribución espacial y ubicación relativa de los principales centros poblados del área de influencia y el sitio del Proyecto Cangrejos. Machala (población aproximada de 230.000 habitantes según el Censo de 2010) está a 58 km por carretera del Proyecto y es la ciudad principal más cercana; también es la capital del El Oro. A 24 km de distancia, se encuentra Santa Rosa que es el área urbana más cercana al Proyecto. Santa Rosa tiene una población de aproximadamente 50.000 habitantes y alberga el Aeropuerto Regional Santa Rosa.

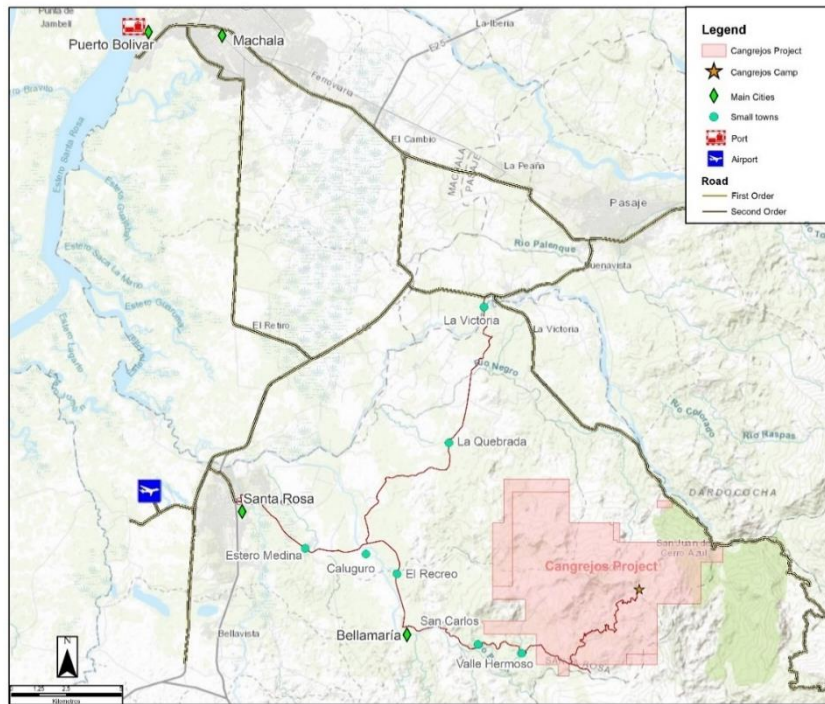


Figura 2.- Proyecto Cangrejos en relación con el área local; Fuente OdinMining 2024

El acceso al Proyecto se realiza por carreteras pavimentadas hasta el poblado de Valle Hermoso. La Compañía reconstruyó un camino abandonado desde Valle Hermoso hasta el área del proyecto y el campamento de exploración en 2019. El tiempo de conducción desde Machala hasta Cangrejos es aproximadamente de 75 minutos, y desde Santa Rosa hasta el mismo punto es de aproximadamente 35 minutos. El camino de acceso al sitio desde Santa Rosa a Valle Hermoso pasa por cuatro pequeños pueblos: Estero Medina, El Recreo, Bellamaría y San Carlos.

Al proyecto se accede por un camino privado de grava hacia el Este desde Valle Hermoso hasta una garita de seguridad con aparcamiento para visitantes.

2.2 Geología

2.2.1 Geología Regional

El sector correspondiente a Los Cangrejos forma parte del área de influencia de la Deflexión de Huancabamba, una región donde la Cordillera de los Andes cambia su dirección de noroeste —tendencia con la que se extiende desde Perú— hacia noreste, atravesando

Ecuador y continuando hasta Colombia. El límite norte de esta zona de influencia suele ubicarse en la Falla de Jubones.

A nivel continental, dicha configuración geológica se ha interpretado como un sector de debilidad estructural en la corteza, lo que facilita la circulación de magmas y fluidos hidrotermales. Como resultado, este fenómeno favorece una mayor concentración de prospectos mineralizados, especialmente en los puntos donde se produce un cambio en la orientación de grandes cadenas montañosas.

El área del Proyecto Los Cangrejos se emplaza sobre un intrusivo de composición cuarzo-diorítica a granodiorítica (GGd), cuya edad corresponde al Cretácico Superior (Campaniano), con una datación de 79.09 ± 0.67 Ma (Odin Mining del Ecuador, 2018). Este cuerpo granodiorítico (GGD) intruye una secuencia espesa de meta-sedimentos finos pertenecientes a la División Mélange Palenque, descrita por (Aspden JA, 1995). como parte del Complejo Metamórfico de El Oro, particularmente hacia los sectores norte, oeste y sureste del área de estudio. Asimismo, en los flancos occidental y sureste se identifican afloramientos de rocas volcánicas y volcanoclásticas del Grupo Saraguro, asignadas al Mioceno tardío (9.6 ± 0.5 Ma), según (Pratt WT, 1997).

Las rocas del denominado Complejo Metamórfico de El Oro, están expuestas al Sur de la “Falla de Jubones” (CODIGEM/BGS, 1997). Entre las fallas de Jubones y Portovelo, estas rocas están dominadas por metasedimentos clásticos de grano fino débilmente metamorfizados de la División Melange Palenque, que está constituida por filitas esquistas, pizarras, cuarcitas, esquistos cuarzo feldespáticos, cuarzo sericíticos y cuarzo clorítico, cherts, meta-grauvacas, en ocasiones brecheadas y silicificadas. Se han realizado varios intentos directos para datar la edad de la Unidad Palenque, con resultados negativos;

sin embargo, y en base a consideraciones geológicas regionales, se interpreta de edad Jurásica tardía a Cretácica temprana (Aspden JA, 1995)

Al Noreste del área del proyecto esta Unidad contiene algunos emplazamientos tectónicos de serpentinita conocida como “Ofiolita de Pasaje”, ésta se correlaciona con el Conjunto Ofiolítico Raspas que contiene serpentinitas, esquistos verdes y gabros. Al sur de la falla de Portovelo, el Complejo Metamórfico de El Oro está constituido por una asociación litológica heterogénea que incluye esquistos pelíticos, esquistos verdes y glaucofánicos, además de anfíbolitas de composición básica y cuerpos de granito con textura gnéica a migmatitas y eclogitas de la formación Raspas de edad Cretácica.

El basamento metamórfico fue intruido durante el Cretácico tardío por una serie de stocks y plutones calcoalcalinos que varían entre dioritas hasta granodioritas. Estos intrusivos muestran texturas equigranulares hasta fuertemente foliadas, sectores de pocos metros a decímetros con textura milonítica donde el incremento progresivo de la deformación provoca un proceso de evolución textural progresiva, donde granitoides porfídicos de grano grueso son transformados en milonitas porfidoclásticas con marcada foliación y lineación, concentradas en el núcleo de la zona de fractura. En términos mineralógicos, este fenómeno se caracteriza por una intensa fragmentación mecánica y alteración de los minerales originales, evidenciando un grado avanzado de deformación. De acuerdo con dataciones de U/Pb en circones realizadas en muestras de núcleos de perforación este intrusivo pertenece al Cretácico tardío, Campaniano, 79.09 ± 0.6 Ma (Odin Mining del Ecuador, 2018).

Posteriormente, durante el Mioceno temprano se produjo la intrusión de cuerpos ígneos con textura porfídica y brechas magmáticas-hidrotermales, las cuales están directamente relacionadas a la mineralización de los depósitos Cangrejos, Gran Bestia y numerosos prospectos en el área circundante. Dataciones de U/Pb realizadas en testigos de sondajes de la roca intrusiva que alberga la mineralización de Los Cangrejos, indican una edad de 21.22

Ma); es decir, corresponden a la base del Mioceno Temprano (Odin Mining del Ecuador, 2018).

El volcanismo Mio-Pleistocénico del grupo Saraguro está sobre yaciendo discordantemente o en contacto fallado a la unidad Pallatanga y rocas metamórficas (Complejo Metamórfico de El Oro). Predominan composiciones andesíticas a dacíticas. Asociadas a este volcanismo se hallan una serie de plutones de granitos de grano medio a grueso (16.89 a 19.92 Ma) en la zona de Paccha.

En la Figura 8 se muestra la geología regional del sur de Ecuador. Existen varios dominios de rocas volcánicas y sedimentarias con dirección norte-sur que se adhirieron al Cratón Amazónico desde el Jurásico Tardío hasta el Eoceno. Estas áreas están cortadas por intrusiones magmáticas más jóvenes que albergan localmente pórfidos de cobre/oro y depósitos epitermales de oro (mostrados como estrellas negras en la Figura 3).

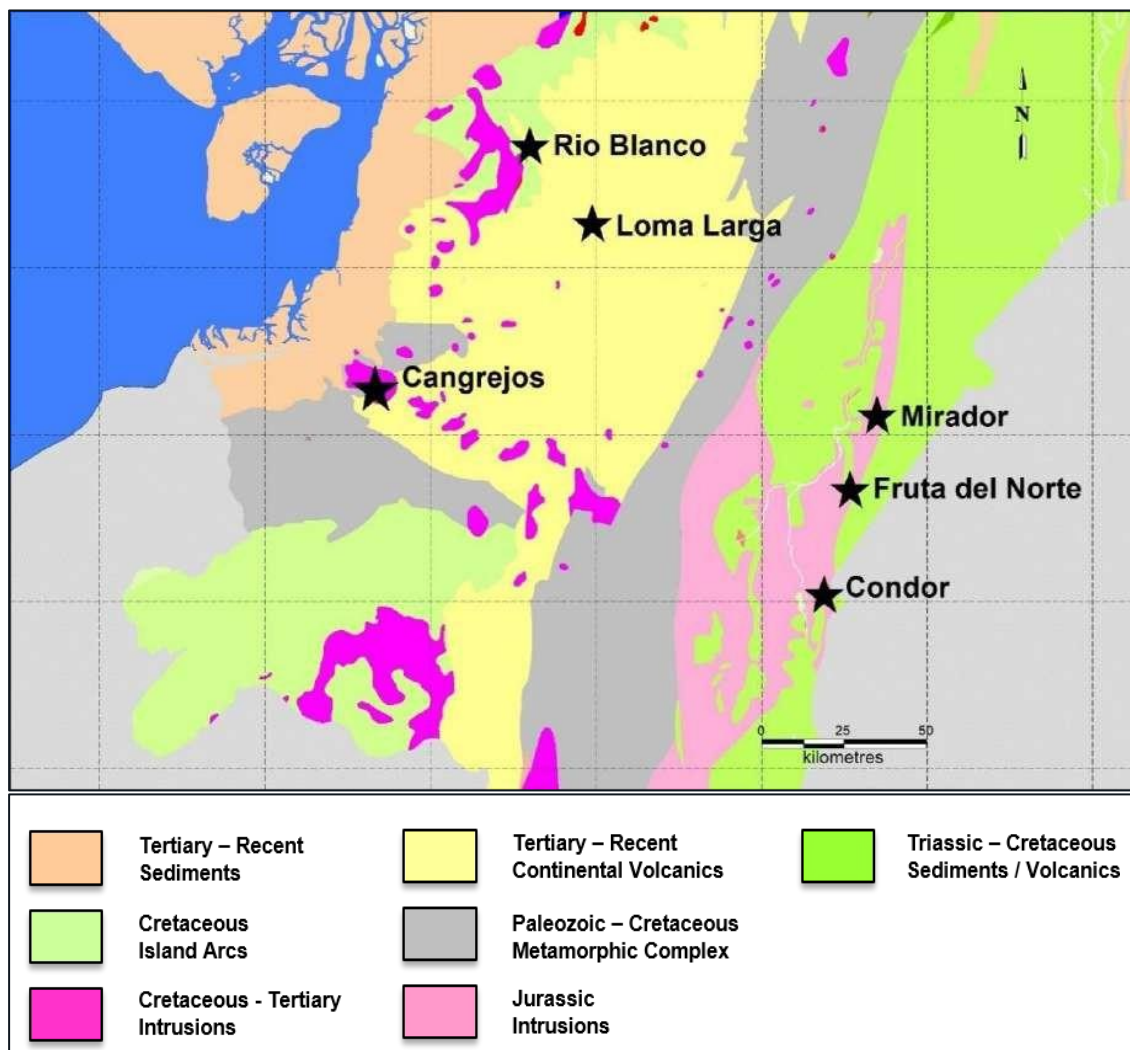


Figura 3.- Plano Geológico Regional. Fuente: OdinMining 2024

2.2.2 Geología local

La mayor parte del área del proyecto Los Cangrejos (más del 90%) está ubicada sobre el batolito de rocas intrusivas de composición Cuarzo Diorítica a Tonalítica de textura equigranular, que corresponden a varias fases o eventos de actividad magmática; la más antigua identificada como el “Complejo Ígneo Antiguo” caracterizado por una débil foliación, aunque localmente es posible encontrar afloramientos con elevada foliación, conformando texturas miloníticas. Esta litología está conformada por cristales de mayor tamaño de hornblenda, plagioclasas, biotita y subordinadamente cuarzo. La matriz de la roca es muy fina compuesta de cristales de plagioclasas y cuarzo. De acuerdo con dataciones de U/Pb en circones magmáticos realizadas en muestras de núcleos de perforación este intrusivo es Cretácico tardío (Campaniano) Las edades radiométricas varían entre 79.09 ± 0.6

Ma (Odin Mining del Ecuador, 2018). Esta litología mesozoica es la roca de caja de los intrusivos, alteración y mineralización de Cangrejos y Gran Bestia. En el sector Oeste y Noroeste afloran rocas metamórficas, esquistos, metacuarcitas y filitas, las cuales han sido asignadas a la División Melange Palenque de posible edad Jurásica. Estas litologías se caracterizan por una esquistosidad marcada por los abundantes filosilicatos.

Los intrusivos terciarios se caracterizan por limitados cuerpos de Pórfido dacítico-cuarzo diorítico. Estos pórfidos están caracterizados por fenocristales euhedrales a subeuhedrales de plagioclasa-biotita>cuarzo, estos fenocristales están incluidos en una matriz fina rica en cuarzo. Las dataciones de U/Pb realizadas en testigos de sondajes de la roca intrusiva indican una edad entre 21.2 ± 0.9 Ma; que corresponde al Mioceno temprano (Odin Mining del Ecuador, 2018). Durante la descripción geológica de los testigos de perforación se han identificado cuatro fases de pórfidos diferentes. Esta discriminación está basada en las relaciones de corte entre los diferentes pórfidos, cantidad de vetillas, textura y alteración hidrotermal. Al menos tres fases de estos intrusivos son posteriores a la formación de las brechas. La fase intrusiva temprana solo es observada como clastos en las brechas, asumiendo que el volumen de esta fase es mínimo, característica típica de estos sistemas hidrotermales.

Estos intrusivos están asociados temporalmente con varios cuerpos de brechas magmático-hidrotermal. Las brechas son mayoritariamente clasto-soportadas, los clastos angulares a subangulares provienen de la roca ígnea de caja y subordinadamente de los intrusivos terciarios. La matriz de las brechas se compone de roca triturada y minerales hidrotermales (biotita, actinolita, sulfuros y cuarzo). Los cuerpos de las brechas son subverticales y tienen formas irregulares con tendencia NNE-SSW.

Tanto los cuerpos intrusivos como las brechas hidrotermales asociadas presentan características similares en Gran Bestia y Cangrejos, si bien ambos depósitos son considerados independientes, comparten características geológicas similares.

Durante el Cuaternario se desarrolló una cobertura de depósitos sedimentarios que cubren más del 95% del área del Proyecto. Estos depósitos están conformados por flujos coluviales irregularmente distribuidos. El horizonte de meteorización está incipientemente desarrollado en el área. Espesores entre 1 y 10 metros de saprolita se ubican sobre el saprock. La saprolita está caracterizada por material de textura muy fina (arcilla) compuesta de óxido de aluminio, hierro y cuarzo. La topografía abrupta condicionó el normal desarrollo del perfil saprolítico produciendo frecuentes deslizamientos y fenómenos de remoción en masa en las laderas del Proyecto.

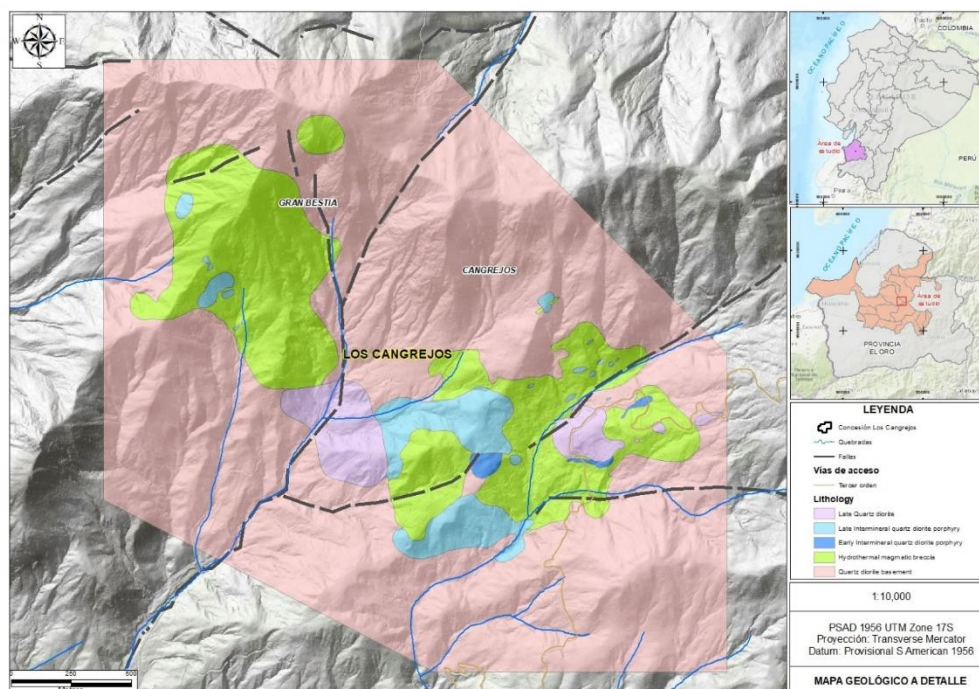


Figura 4.- Mapa geológico del área de influencia Generado a partir de os estudios realizados, Fuente:OdinMining 2024

2.3 Hidrogeología regional

El Mapa Hidrogeológico Básico describe de manera general la distribución y ocurrencia de aguas subterráneas en el territorio ecuatoriano, clasificando las formaciones geológicas en

tres grupos principales según sus características litológicas y su comportamiento hidrogeológico. Esta categorización permite establecer una jerarquización de su potencial acuífero, indicando que las rocas con porosidad primaria y aquellas con sistemas de fracturamiento bien desarrollados presentan mayor relevancia desde el punto de vista hidrogeológico. En contraste, las unidades litológicas correspondientes al tercer grupo exhiben una menor capacidad de almacenamiento y transmisión de agua subterránea.

El área correspondiente al Proyecto Cangrejos y su entorno inmediato se encuentra dentro de la denominada Unidad de Machala, ubicada en el extremo suroccidental del Ecuador y comprendida en su totalidad dentro de la provincia de El Oro. Entre los principales centros urbanos asociados a esta unidad se destacan Machala, Santa Rosa, Pasaje, Arenillas y Huaquillas. Desde el punto de vista geomorfológico, la región se caracteriza por presentar relieves predominantemente planos a suavemente ondulados, los cuales forman parte de la llanura costera.

En términos hidrológicos, la red de drenaje está conformada por los ríos Jubones (en su curso inferior), Arenillas, Santa Rosa, Zapotillo y Zarumilla. La cuenca del río Santa Rosa constituye el principal sistema de evacuación de la escorrentía superficial proveniente del área del proyecto. Los depósitos aluviales y coluviales, junto con sedimentos cuaternarios indiferenciados que ocupan los valles fluviales, dan lugar a extensas planicies de inundación. Estas unidades sedimentarias, debido a su considerable espesor y elevada permeabilidad, presentan condiciones favorables desde el punto de vista hidrogeológico. (Minas, 1983)

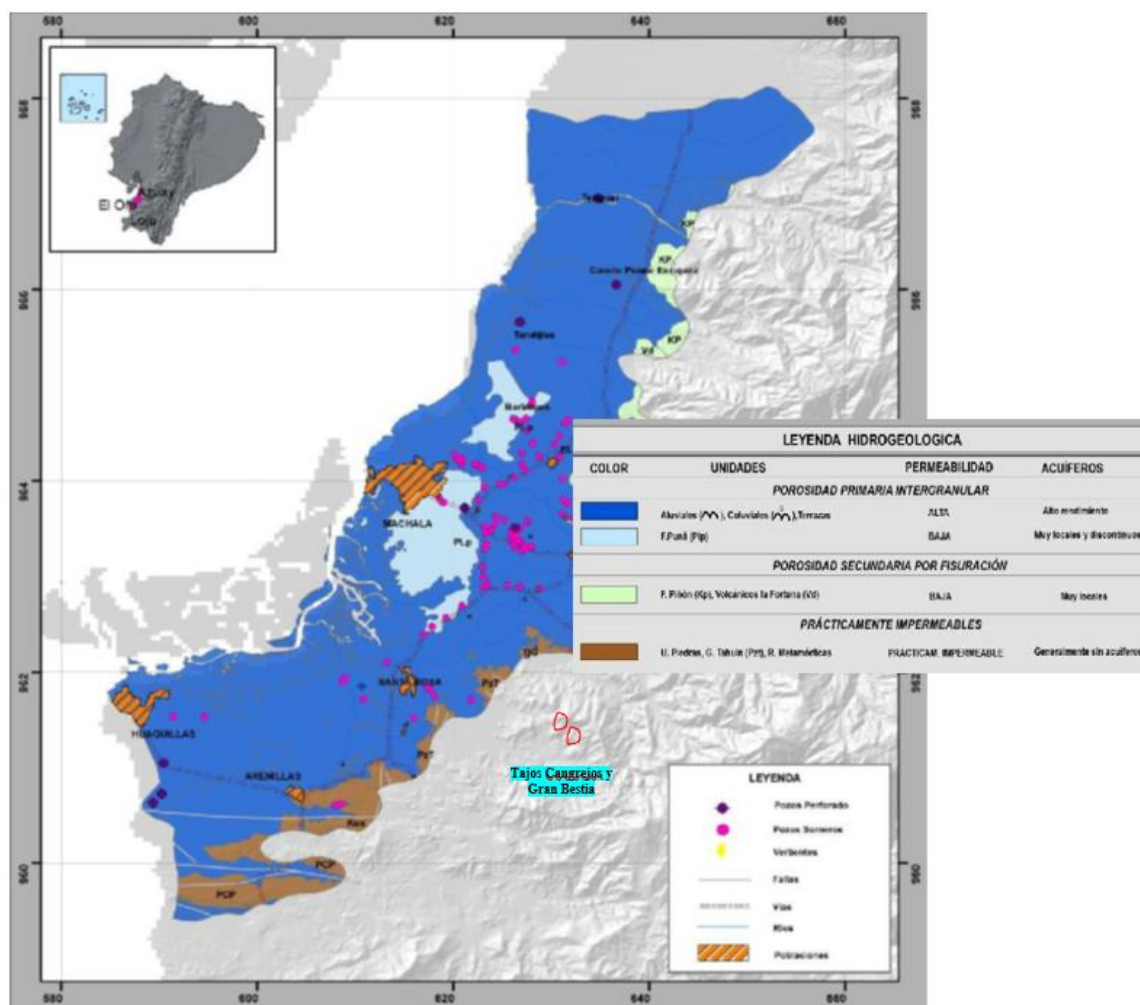


Figura 5.- Unidades de Litopermeabilidad en el área de Machala. La zona del proyecto Cangrejos en rojo.

De acuerdo con la bibliografía del área de estudio del Proyecto Cangrejos se establece que estos depósitos se localizan en unidades geológicas de carácter impermeable. y señalando que los horizontes de saprolita y saprock, a escala regional, no son considerados como unidades con capacidades de reserva de agua subterráneas y, por lo tanto, son clasificadas como litologías impermeables.

2.3.1 Configuración Climática e Hidrológica

El área del proyecto experimenta una temporada de lluvias, típicamente desde aproximadamente enero hasta mayo, y una temporada seca que dura desde junio hasta diciembre. La precipitación anual promedio para el proyecto varía considerablemente según la elevación, el mes y el año. Los datos de las estaciones meteorológicas del proyecto y los

datos satelitales se combinaron para desarrollar conjuntos de datos de precipitación en cuadrícula para la región. La precipitación mensual promedio en las estaciones meteorológicas del proyecto varía entre un mínimo de 12 mm por mes en la estación Noblecilla en septiembre y un máximo de 644 mm por mes en la estación superior en marzo. Las temperaturas son relativamente constantes, oscilando entre 18°C y 22°C. Las cuencas hidrográficas del proyecto están drenadas por una red de arroyos perennes y efímeros. Estos arroyos desembocan en arroyos más grandes de la región, incluyendo el Río Byron, Río Chico y Río Las Cañas hacia el sur y oeste, y Posa Negra, Zapata y Río Negro hacia el norte y oeste. Las mediciones realizadas en algunos de los arroyos muestran que las tasas de flujo exhiben un alto grado de variabilidad estacional.

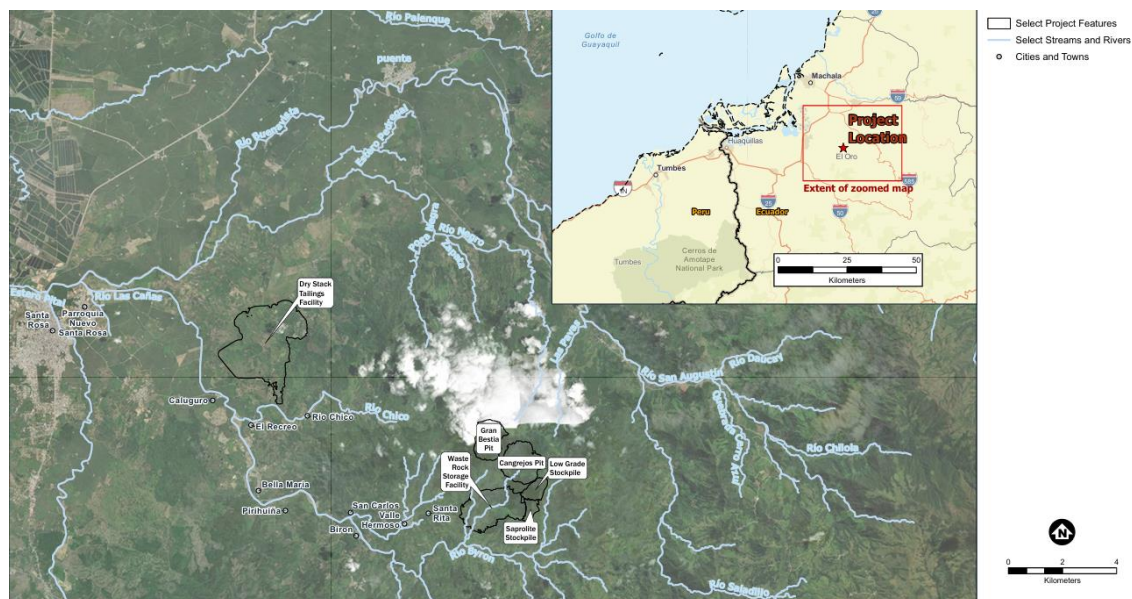


Figura 6.- Mapa de ubicación y distribución de las áreas del proyecto Cangrejos

2.3.2 Unidades hidroestratigráficas

Un mapa de geología superficial del Área del Proyecto este mapa proporciona una compilación de datos disponibles públicamente y cartografía basada en datos del Proyecto. Además de la cartografía basada en datos del Proyecto, se asumió que los sedimentos aluviales estaban presentes alrededor de los arroyos. Las principales unidades

hidroestratigráficas cerca del Proyecto consisten en depósitos no consolidados, un saprolito de menor permeabilidad, pero de capacidad y roca cristalina de baja permeabilidad. Los depósitos no consolidados consisten principalmente en depósitos aluviales, depósitos coluviales-aluviales y sedimentos marinos.

- Los depósitos aluviales se encuentran principalmente en bandas estrechas a lo largo de los arroyos y más extensamente al oeste del área del Proyecto. Este depósito típicamente consiste en materiales finos y gruesos.
- Los depósitos coluviales-aluviales se localizan en los cauces de los arroyos y en terrenos con pendientes bajas a moderadas. Este depósito consiste en arcillas y limos con arena y grava con bolos y rocas subángulos a subredondeados.
- Los sedimentos marinos se encuentran a elevaciones más bajas al oeste del Proyecto en la Terraza Litoral del Pacífico.

2.4 Sismicidad

En el sur del Ecuador, la sismicidad se asocia principalmente al proceso de convergencia tectónica entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana, proceso que ha dado lugar a la formación de los Andes y la Fosa Colombia-ecuatoriana. Esta actividad tectónica ha configurado un relieve compuesto por diferentes cordilleras, separadas por valles y depresiones montañosas, influenciado por la presencia de sistemas de fallas activas que controlan la morfología del terreno.

El municipio de Santa Rosa está clasificado con un nivel de peligrosidad sísmica media, según el Mapa Sísmico Nacional del Ecuador. Las aceleraciones máximas probabilísticas del terreno en la superficie del bedrock (según la clasificación del Código Internacional de Construcción, "CIB", Sitio Clase B) para distintos periodos de retorno se presentan en la Tabla 1. Sin embargo, el material del bedrock en el área del proyecto no es homogéneo, por

lo que se han aplicado factores de amplificación sísmica para infraestructuras localizadas sobre suelo tipo C (roca blanda/suelo rígido).

Tabla 1.- Aceleración Máxima del suelo (cm/s^2)

Periodo de retorno				
100	475	2475	5000	10000
0.207	0.38	0.700	0.895	1.120

De acuerdo con los criterios de diseño sísmico de NEC-SE-DS, para un evento sísmico con un período de recurrencia de 475 años, se establece una aceleración máxima del suelo de 0.35 g como se muestra en la tabla que está en una caracterización del peligro sísmico de zona sísmica IV. No obstante, siguiendo la recomendación de los consultores, con el propósito de incorporar un criterio de diseño conservador, se adoptó una aceleración máxima del terreno de 0.38 g para el mismo período de retorno.

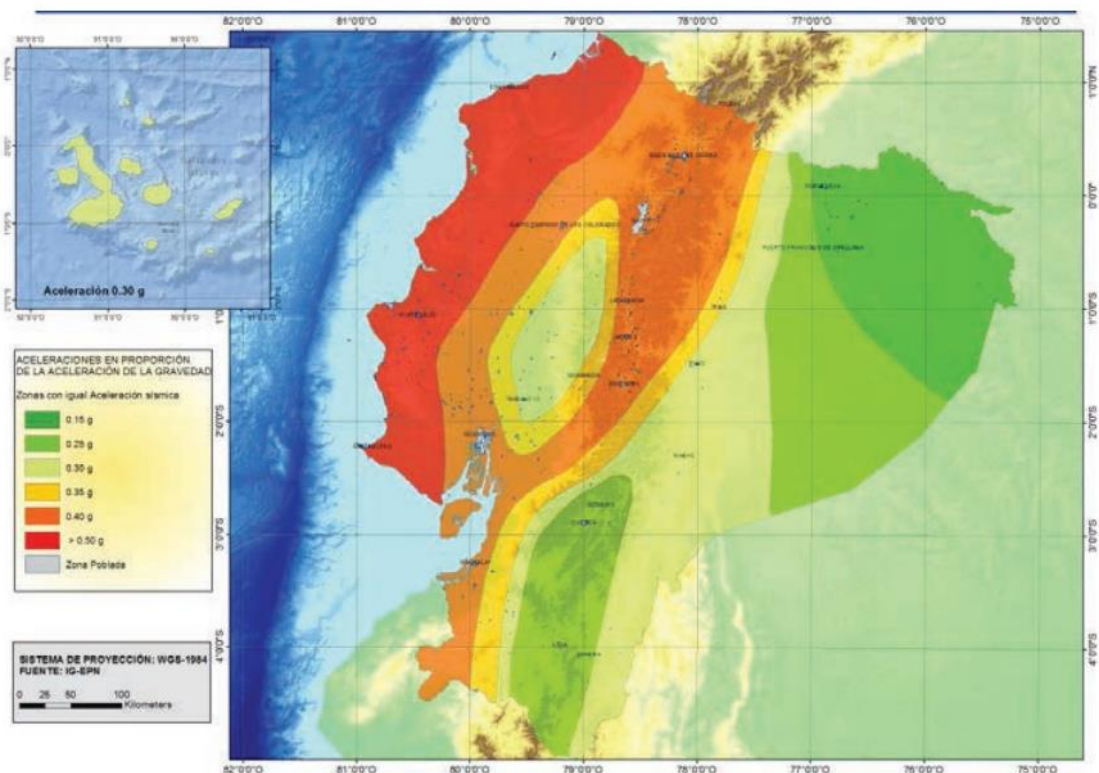


Figura 7.- Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z. Fuente NEC-2015

2.5 Escombrera

Se entiende por escombrera la acumulación controlada de materiales sólidos de granulometría heterogénea generados por actividades antrópicas, especialmente como resultado de operaciones mineras, industriales o urbanas. En el ámbito minero, estos materiales corresponden principalmente a estériles rocosos provenientes de la excavación de galerías, el retiro de sobrecarga en explotaciones a cielo abierto, los procesos de separación del mineral y los residuos derivados de etapas de lavado o mejora de la calidad del producto

Figura 8. La disposición de estos materiales responde, en la mayoría de los casos, a su falta de valor económico inmediato, a la inviabilidad técnica de su reutilización o a la necesidad de confinarlos bajo condiciones controladas debido a sus características físicas o química.

((IGME), 2007)

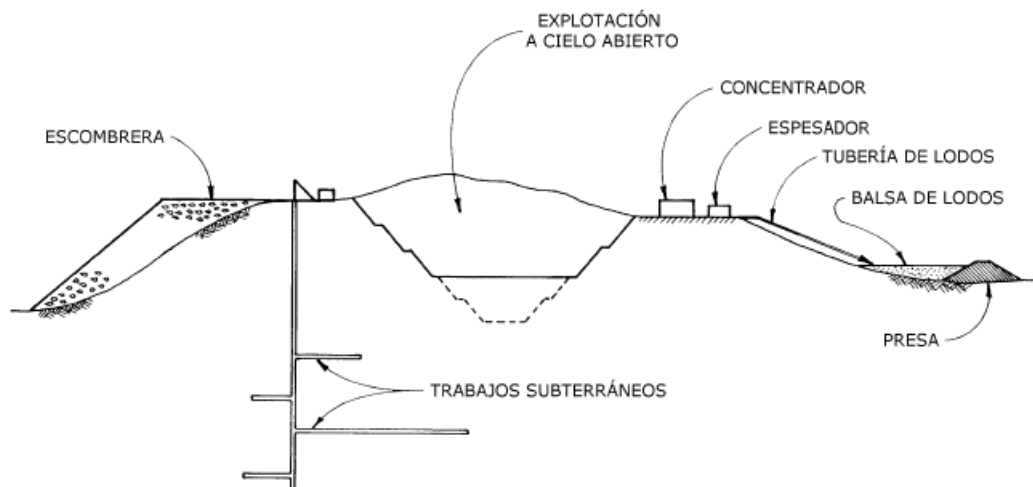


Figura 8.- Fases de la explotación minera que producen estériles y los esquemas utilizados para su disposición final, Tomado de (CANMET, 1979)

El análisis geotécnico tiene como objetivo evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales de la escombrera y del terreno de fundación para garantizar que la estructura pueda soportar su propio peso y las condiciones ambientales sin fallar.

2.6 Normativas aplicables al diseño de escombreras y análisis de estabilidad

La evaluación de la estabilidad de los taludes en la escombrera del proyecto se llevó a cabo mediante un enfoque metodológico alineado con estándares técnicos reconocidos tanto a nivel nacional como internacional. Estas normativas respaldan la selección de ensayos geotécnicos, la caracterización de materiales, la definición de condiciones de carga, y los criterios de seguridad adoptados en la modelación numérica.

2.6.1 Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-GEO)

La Norma Ecuatoriana de la Construcción, en su capítulo correspondiente a Estudios Geotécnicos (NEC-SE-GEO), emitida por el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI), representa el instrumento técnico de cumplimiento obligatorio en el país para el desarrollo de investigaciones geotécnicas aplicadas a proyectos de infraestructura civil y minera. Este cuerpo normativo define los lineamientos mínimos para la programación y ejecución de trabajos de campo y ensayos de laboratorio, así como para la caracterización y clasificación de suelos y macizos rocosos. Además, establece criterios técnicos orientados al diseño y verificación de la estabilidad de taludes y otras estructuras de tierra.

En el contexto de este estudio, se han adoptado los lineamientos de la NEC-SE-GEO para:

- Definir el número y profundidad de sondeos en función del tipo de estructura (en este caso, una escombrera con taludes de gran extensión).
- Realizar la clasificación del material según el SUCS, empleando datos provenientes de límites de consistencia, distribución granulométrica y ensayos mecánicos.
- Aplicar factores de seguridad mínimos recomendados para taludes ($FOS \geq 1.3$ en condiciones estáticas).

Esta normativa también recomienda considerar condiciones drenadas y no drenadas, así como realizar análisis con diferentes modelos de resistencia (Mohr-Coulomb, Hoek-Brown, etc.), lo cual fue cumplido al modelar múltiples perfiles en Slide con distintos escenarios hidráulicos.

2.6.2 Guías del ICMM (International Council on Mining and Metals)

El Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM), en colaboración con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) y la iniciativa de Principios para la Inversión Responsable (PRI), impulsó el desarrollo del Estándar Global para la Gestión de Relaves (GISTM). Este marco normativo establece lineamientos aplicables a las infraestructuras destinadas al almacenamiento de residuos mineros, abarcando no solo depósitos de relaves, sino también escombreras y otras instalaciones para material estéril.

Este estándar internacional establece principios y requisitos detallados que abarcan desde la identificación de peligros geotécnicos, hasta la verificación independiente de diseño, pasando por el monitoreo continuo, control de drenaje y planificación del cierre. A pesar de estar inicialmente orientado a relaves, su aplicación es directamente extrapolable a escombreras por su énfasis en la estabilidad física y en el manejo integral del riesgo.

En este estudio, se adoptaron prácticas consistentes con el ICMM al:

- Implementar una metodología de análisis multiescenario (drenado y no drenado, con presencia y ausencia del nivel freático).
- Evaluar índices de estabilidad conforme a criterios de desempeño estructural y no solo resistencia última.

- Proponer medidas de mitigación estructurales, operativas y de monitoreo, alineadas con la gestión del ciclo de vida del depósito, en consonancia con los Principios 4, 7 y 11 del GISTM.

2.6.3 Guías del Banco Mundial / IFC

Las Directrices de Medio Ambiente, Salud y Seguridad (EHS) aplicables al sector minero, elaboradas por la International Finance Corporation (IFC), parte del Grupo Banco Mundial, constituyen un marco de referencia clave para la gestión ambiental y geotécnica de instalaciones mineras, incluyendo escombreras. Estas guías no son vinculantes legalmente, pero se consideran un estándar de buenas prácticas internacionales para proyectos financiados o supervisados por entidades multilaterales.

En relación con los depósitos de material estéril, las guías recomiendan:

- Aplicar índices de estabilidad diferenciados: $FOS \geq 1.5$ para condiciones estáticas y $FOS \geq 1.2$ para condiciones sísmicas.
- Implementar medidas de control de infiltración, sistemas de drenaje eficientes y programas de monitoreo estructural.
- Integrar el diseño geotécnico con consideraciones ambientales, como la prevención de erosión y estabilidad post-cierre.

Durante el desarrollo del presente estudio, se consideraron estas guías al:

- Definir escenarios con y sin presión de poros para evaluar el impacto hidráulico.
- Proponer medidas de monitoreo geotécnico (piezometría, control de deformaciones) y drenaje superficial e interno.
- Recomendar un plan de rehabilitación progresiva y de contingencia estructural, acorde con una operación de 26 años.

2.7 Tipos de deslizamientos

Todos estos tipos de falla o de deslizamientos pueden estar condicionados por diversos factores, como las características geotécnicas del lugar, la inclinación del talud, la presencia de agua, las propiedades del material y las cargas externas ya sean de origen natural o provocadas.

El deslizamiento en masa se define como un desplazamiento predominantemente por corte que ocurre a lo largo de una o varias superficies, las cuales pueden identificarse con relativa facilidad o estar contenidas dentro de una zona de espesor limitado. Estos deslizamientos pueden involucrar una única masa coherente que se desplaza como un bloque unificado o constituir un conjunto de mecanismos. El desplazamiento puede presentarse de forma progresiva, es decir, no ocurre simultáneamente en toda la superficie potencial de falla, sino que se inicia y propaga de manera gradual. La superficie de falla, por su parte, representa una zona de espesor definido en la que ocurren transformaciones volumétricas y desplazamientos asociados al esfuerzo cortante, reflejando los procesos de deformación y rotura de los materiales implicados por lo tanto tenemos las fallas más comunes:

2.7.1 Falla por Deslizamiento Rotacional

En la superficie de falla presenta una forma cóncava hacia arriba, y el movimiento asociado es de tipo rotacional, desarrollándose alrededor de un eje paralelo a la superficie del talud y transversal al plano de deslizamiento. El eje de rotación se ubica por encima del centro de gravedad del material que experimenta el desplazamiento. En vista en planta, este tipo de deslizamiento se caracteriza por la aparición de un sistema de grietas concéntricas y con forma cóncava y orientadas en la misma dirección del deslizamiento. Este fenómeno de remoción genera una zona superior de subsidencia y una zona inferior

de acumulación, donde frecuentemente se observa la movilización de material que rebasa la zona basal del talud.

En los deslizamientos de tipo rotacional, plano potencial de inestabilidad suele presentar una forma curva bien definida, conocida comúnmente como círculo de falla. Esta geometría se desarrolla principalmente en materiales de composición uniforme, tanto de origen natural como en materiales colocados artificialmente. Debido a su comportamiento relativamente predecible y a la facilidad con la que puede modelarse mediante métodos de equilibrio límite, este tipo de deslizamiento ha sido ampliamente estudiado en la ingeniería geotécnica. Generalmente, la superficie de rotura adopta una configuración cóncava similar a una “cuchara”, tal como se muestra en la Figura 9. Según Skempton y Hutchinson (1969), estos desplazamientos suelen presentar una relación entre la profundidad (D_r) y la longitud (L_r) del deslizamiento que varía entre 0.15 y 0.33, dependiendo de las condiciones específicas del material y del talud.

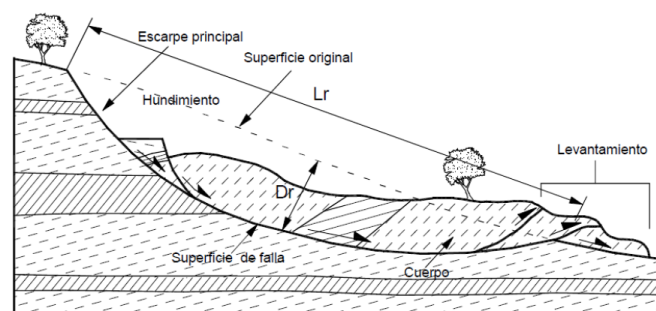


Figura 9.-Movimiento rotacional de una pendiente o talud Fuente: Jaime Suárez

2.7.2 Falla por Deslizamiento Traslacional:

La masa de material se desplaza hacia el exterior o hacia abajo a lo largo de una superficie que es predominantemente plana o ligeramente ondulada, presentando un

movimiento mínimo o nulo de rotación o volteo, Figura 10. Este tipo de deslizamiento suele presentar una relación entre la profundidad (D_r) y la longitud (L_r) inferior a 0.1. En muchos casos, la masa desplazada experimenta deformaciones o fracturas y puede transformarse en flujo, particularmente en áreas con pendientes pronunciadas. Los deslizamientos traslacionales ocurren cuando una capa de suelo o roca pierde estabilidad y se desliza de manera predominantemente horizontal, generalmente siguiendo una discontinuidad estructural preexistente, como planos de estratificación, fallas, juntas, contactos entre materiales de propiedades contrastantes o superficies de baja resistencia.

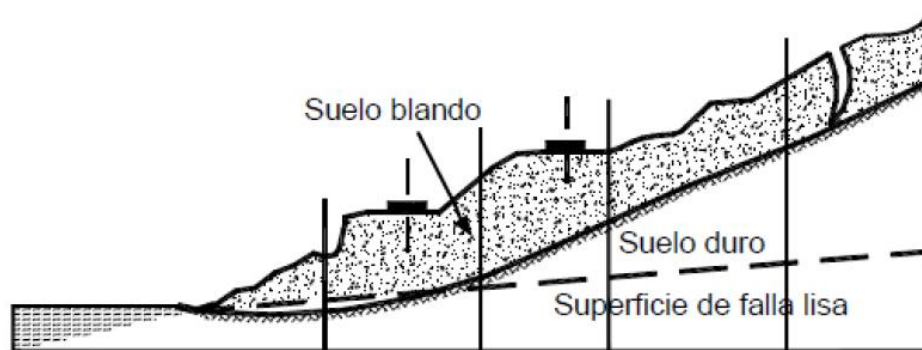


Figura 10.- Deslizamiento de traslación

2.7.3 Falla por Deslizamiento compuestos de Traslación y Rotación

En muchos casos, los patrones de desplazamiento incluyen una combinación de movimientos traslacionales y rotacionales, los cuales se denominan "movimientos compuestos". Este tipo de desplazamientos también puede incluir hundimientos o extensiones laterales que se presentan de manera conjunta. Aunque los movimientos suelen involucrar múltiples mecanismos, generalmente uno de ellos predomina sobre los demás.

Extensión Lateral: Corresponde a movimientos con un componente predominantemente horizontal que ocurren en pendientes de escasa inclinación. En estos casos, el modo de desplazamiento dominante es la extensión lateral, que se acomoda mediante fracturas de corte y tensión, ya sea en roca o en suelos plásticos. Este tipo de movimiento es

característico de masas de roca o suelos plásticos y finos, como arcillas y limos sensitivos, que disminuyen considerablemente su capacidad resistente tras ser perturbados o reestructurados. Las extensiones laterales pueden generar mecanismos de inestabilidad que integran desplazamientos rotacionales, movimientos traslacionales o flujos en suelos con comportamiento plástico. La configuración final del proceso está condicionada por la naturaleza del sustrato y por las propiedades físicas y mecánicas de los materiales involucrados. Figura 11.

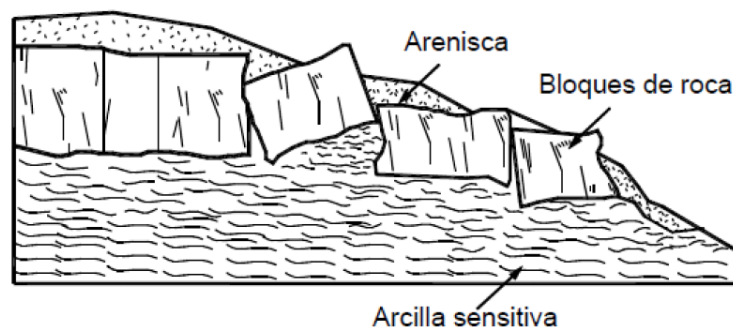


Figura 11.- Esquema de una extensión lateral.

En relación con el estilo de los deslizamientos, (Varnes, 1978) propuso una clasificación basada en la actividad y en la posible combinación de distintos tipos de movimiento que pueden manifestarse en un mismo evento. Esta categorización permite diferenciar los procesos según la complejidad de su comportamiento cinemático.

Un *deslizamiento sencillo* corresponde a aquel en el que se presenta un único tipo de movimiento. Por su parte, un *deslizamiento complejo* involucra al menos dos mecanismos distintos, como inclinación seguida de desplazamiento. El término compuesto se aplica cuando diferentes tipos de movimiento ocurren de manera simultánea en distintas zonas de la masa desplazada. Finalmente, se denomina al evento en el cual se repite el mismo tipo de movimiento en fases sucesivas,

generando comúnmente una ampliación progresiva de la superficie de rotura (Varnes, 1978).

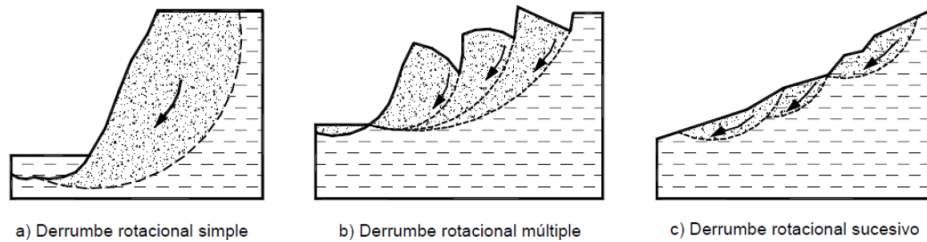


Figura 12.- Ilustraciones de los diferentes tipos de deslizamientos. Fuente (Suarez)

1.1 Talud

Un talud es una estructura inclinada que puede originarse de manera natural, como en el caso de colinas o acantilados, a través de procesos geológicos y climáticos, o ser construido por acción humana, como ocurre en escombreras, carreteras o excavaciones mineras. La estabilidad de un talud depende de múltiples variables, entre ellas las propiedades mecánicas de los materiales que lo constituyen, su configuración geométrica y las condiciones ambientales predominantes. Asimismo, puede verse afectada por acciones externas, como la presencia de agua, la actividad sísmica o la aplicación de cargas adicionales que modifiquen el equilibrio del sistema. (Hoek, E., & Bray, J. W., 1981)

2.7.4 Partes de Talud

El talud comprende una parte alta o superior convexa con una cabeza, cima, cresta o escarpe, donde se presentan procesos de denudación o erosión; una parte intermedia semi-recta y una parte baja o inferior cóncava con un pie, pata o base, en la cual ocurren principalmente procesos de depositación. Figura 13.

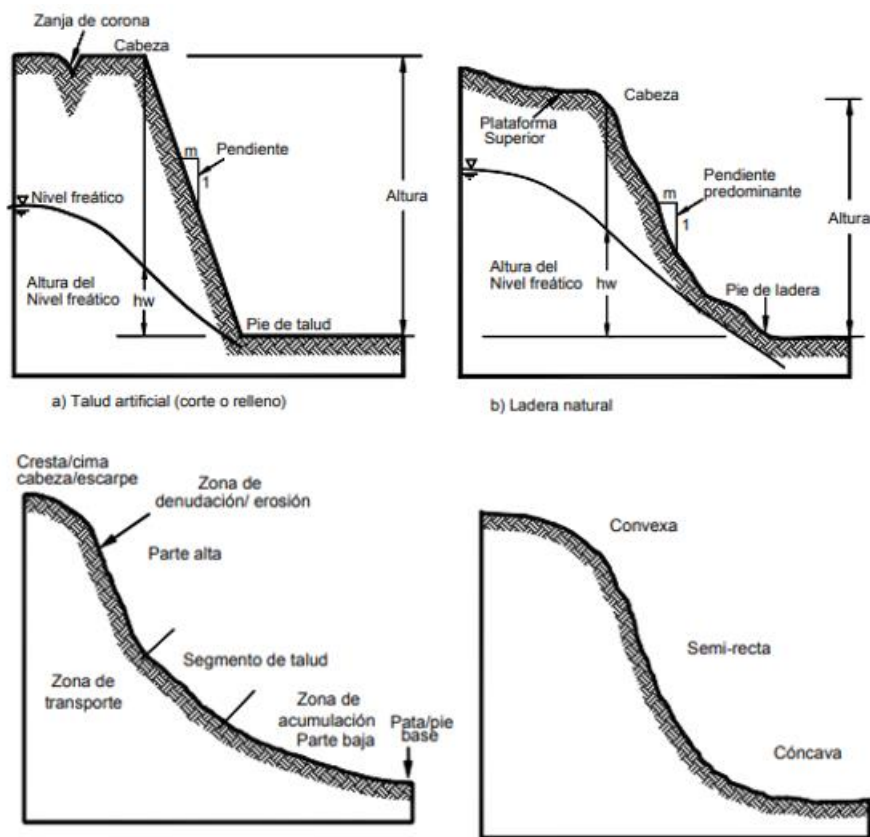


Figura 13.- Esquema general de las partes constitutivas de un talud. Fuente *Análisis Geotécnico*.

Cresta: Es el punto más alto del talud, donde la superficie inclinada se encuentra con la superficie horizontal superior. Es una zona crítica porque puede acumular agua y ser el origen de procesos erosivos o de inestabilidad.

Cara del Talud: Superficie inclinada que conecta la cresta con el pie. Representa la zona activa del talud y puede estar expuesta a erosión, saturación o procesos de deslizamiento.

Pie del Talud: Es la base del talud, donde la pendiente inclinada se encuentra con la superficie horizontal inferior. El pie es crucial para la estabilidad global, ya que soporta la mayor parte de las fuerzas actuantes.

Altura del Talud (H): Distancia vertical entre la cresta y el pie del talud. Una mayor altura puede incrementar el peso propio y las fuerzas desestabilizadoras.

Pendiente del Talud (β): La inclinación de la superficie del talud, medida en relación con la horizontal, influye directamente en su comportamiento estructural. A medida que el ángulo aumenta, se incrementa la componente tangencial del peso del material, lo que puede favorecer condiciones de inestabilidad.

Banco: En taludes escalonados, cada una de las superficies horizontales intermedias diseñadas para reducir la altura y pendiente general del talud. Estos bancos ayudan a mejorar la estabilidad y controlar la erosión.

Toe o Talón: Zona ubicada en la base del talud donde se concentran los desplazamientos del material y pueden generarse esfuerzos adicionales que influyen en su estabilidad. (Terzaghi, 1996).

La estabilidad de una pendiente resulta del equilibrio mecánico entre las fuerzas resistentes y aquellas que promueven el desplazamiento, como la resistencia interna del material, y aquellas que lo desestabilizan, como el peso propio, la presencia de agua o la acción de sismos.

- Factores que afectan la estabilidad de la pendiente: cohesión, ángulo de fricción, densidad, presencia de agua y condiciones de carga.
- Aplicación específica en escombreras.

2.7.5 Cohesión (c)

La cohesión constituye un parámetro mecánico que representa la capacidad de unión interna entre las partículas que conforman un suelo o una roca, permitiendo que el material conserve su integridad aun cuando no existan cargas externas actuando sobre él. Este componente forma parte fundamental de la resistencia al corte y desempeña un papel determinante en la estabilidad de estructuras geotécnicas tales como taludes, presas y escombreras. (Das, 2015).

En términos matemáticos, la cohesión es uno de los parámetros clave en la Ley de Resistencia al Corte de Mohr-Coulomb, expresada como:

$$\tau = c + \sigma' \tan(\phi)$$

Donde:

- τ : Resistencia al corte del material.
- c : Cohesión del material.
- σ' : Esfuerzo normal efectivo.
- ϕ : Ángulo de fricción interna.

La cohesión adquiere mayor relevancia en suelos de naturaleza cohesiva, como las arcillas, y su magnitud puede modificarse en función del contenido de humedad, la densidad y el estado de esfuerzos aplicado. (Das, 2015).

2.7.6 Ángulo de Fricción Interna (ϕ)

El ángulo de fricción interna (ϕ) es un parámetro mecánico que expresa la capacidad de un suelo o macizo rocoso para oponerse al deslizamiento relativo entre sus partículas o bloques cuando actúan esfuerzos tangenciales. Este valor constituye uno de los componentes esenciales del criterio de resistencia al corte de Mohr-Coulomb, junto con la cohesión (c), y permite cuantificar la contribución friccional del material frente a solicitaciones cortantes. (Terzaghi, 1996).

2.7.7 Densidad

La densidad (ρ) corresponde a la magnitud que relaciona la masa de un material con el espacio que ocupa. En términos geotécnicos, es un parámetro clave para caracterizar suelos y rocas, ya que influye directamente en las fuerzas gravitacionales y de presión que actúan sobre un talud o estructura geotécnica. (Das, 2015).

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde:

- ρ : Densidad (kg/m^3 o g/cm^3).
- m : Masa del material (kg o g).
- V : Volumen del material (m^3 o cm^3).

2.8 Criterio de Falla

Una condición de rotura corresponde a una formulación matemática que describe la respuesta de un material frente a la acción de esfuerzos, permitiendo estimar las condiciones bajo las cuales ocurre la pérdida de resistencia o ruptura.

Considerando que los materiales presentes en el área de estudio poseen características heterogéneas, en el presente análisis se emplean tanto criterios empíricos como modelos teóricos ampliamente reconocidos en la ingeniería geotécnica. Los enfoques empíricos se sustentan en la interpretación de resultados obtenidos a partir de numerosos ensayos de laboratorio y en la experiencia acumulada en el análisis de macizos rocosos. En contraste, los modelos matemáticos ofrecen una representación más formal del comportamiento mecánico del material, destacándose entre ellos el criterio de Mohr-Coulomb, uno de los más utilizados en la mecánica de suelos y rocas para evaluar la resistencia al corte.

Los criterios de falla generalmente se expresan en términos de esfuerzos, debido a la facilidad con la que estos pueden ser medidos y analizados.

Para el desarrollo de este estudio geotécnico de la escombrera del proyecto Cangrejos, se seleccionaron criterios de falla específicos en función de las características del material evaluado, asegurando así una representación adecuada de su comportamiento mecánico y su estabilidad estructural.

2.8.1 CRITERIO DE MOHR-COULOMB – SUELOS

Dicho modelo se ha consolidado como una herramienta fundamental en la mecánica de suelos y rocas, principalmente por su carácter simple y aplicable. La resistencia al corte del material a lo largo de un plano se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = c + \sigma_n * \tan \phi$$

Donde:

τ = esfuerzo cortante en un plano dado

σ_n = esfuerzo normal al plano analizado

c = Cohesión

ϕ = Ángulo de fricción

Si se considera para un ángulo $\theta = 45 + \frac{\phi}{2}$, el cual es considerado en la literatura como el plano de falla, este criterio puede expresarse en función de los esfuerzos principales

σ_1 y σ_3 , se da en la siguiente fórmula:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \left(\frac{1 + \sen \phi}{1 - \sen \phi} \right) + 2c \left(\frac{\cos \phi}{1 - \sen \phi} \right)$$

2.9 Metodologías para el análisis de la estabilidad

Las metodologías disponibles se encuentran los métodos de equilibrio límite, los métodos numéricos y los métodos dinámicos, utilizados para evaluar distintos tipos de fallas, como caídas de roca, flujos de suelo y otros movimientos en masa.

No obstante, los métodos de equilibrio límite se caracterizan por su relativa simplicidad de aplicación y su efectividad en el análisis de distintos mecanismos de inestabilidad, tales como deslizamientos traslacionales, rotacionales, fallas por volcamiento (*toppling*) y rupturas en cuña. Adicionalmente, estos enfoques pueden complementarse con técnicas probabilísticas, lo que permite incorporar la variabilidad de los parámetros geotécnicos y

evaluar el efecto de la incertidumbre en los resultados del análisis (Stead, 2000, págs. 133-147).

En contextos donde se presentan mecanismos de inestabilidad de carácter complejo, resulta aconsejable aplicar metodologías de modelación que integren la interacción de los distintos factores involucrados en el proceso de deslizamiento. Si bien la representación de estos factores puede resultar desafiante debido a la complejidad del sistema, actualmente existen herramientas numéricas avanzadas que permiten abordarlos con mayor rigor.

Dentro de los métodos avanzados destacan aquellos que subdividen el dominio en mallas continuas, los que emplean aproximaciones diferenciales para resolver el campo de esfuerzos, los modelos que consideran interacciones entre partículas o bloques, y las simulaciones que incluyen efectos dinámicos. Estas herramientas facilitan una evaluación más completa del comportamiento geotécnico en escenarios de alta complejidad.

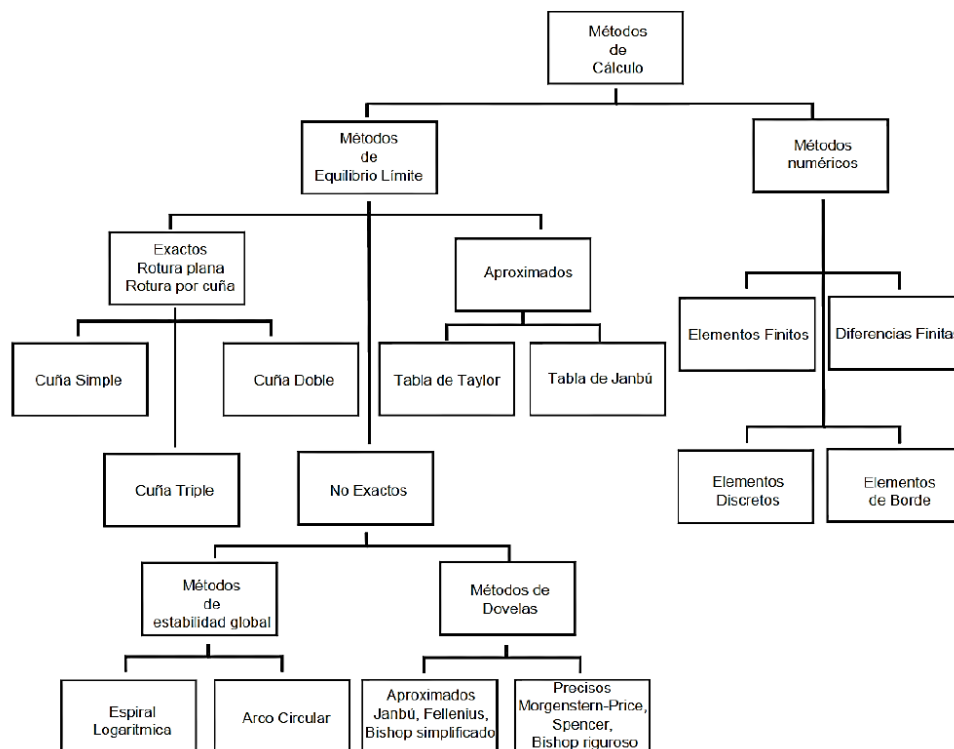


Figura 14.- Métodos de análisis de estabilidad de taludes

Diversas metodologías han sido desarrolladas para estudiar la estabilidad de taludes, pudiendo agruparse de forma general en dos categorías principales.

- **Métodos de cálculo en deformaciones:** tienen en cuenta las deformaciones del terreno, así como las leyes de la estática.
- **Métodos de equilibrio límite:** se sustentan en el análisis estático de fuerzas actuantes con el fin de determinar la condición de equilibrio de un cuerpo de terreno potencialmente inestable.

2.9.1 Métodos límite de equilibrio

Históricamente, el estudio de la estabilidad en taludes y laderas ha estado dominado por los métodos de equilibrio límite. Este enfoque parte del supuesto de que, en el instante de la rotura, las fuerzas que inducen el movimiento y las que proporcionan resistencia se encuentran en equilibrio a lo largo del plano crítico de deslizamiento, lo que implica un valor unitario del coeficiente de seguridad. El análisis puede abordarse considerando la masa potencialmente inestable como un bloque único o mediante su subdivisión en segmentos verticales, comúnmente denominados dovelas.

Los procedimientos basados en la discretización en dovelas, cuyos fundamentos fueron establecidos por Petterson y posteriormente formalizados por (Fellenius W. , 1936), han experimentado múltiples mejoras a lo largo del tiempo. Estas evoluciones metodológicas han dado lugar a formulaciones con distintos niveles de rigurosidad, que van desde esquemas simplificados hasta modelos más completos en términos de equilibrio de fuerzas y momentos. Los métodos desarrollados por (Bishop, 1955) y (Janbu, 1954) han constituido referentes fundamentales en el análisis de estabilidad de taludes durante varias décadas, sirviendo como base para la evolución de procedimientos más avanzados. Con posterioridad, surgieron formulaciones de mayor rigor teórico, como las propuestas por (Morgenstern, 1965) y

(Spencer, 1967) , que incorporan un tratamiento más completo del equilibrio de fuerzas y momentos.

La implementación de estos enfoques se ha visto fortalecida con el desarrollo de herramientas computacionales especializadas, las cuales permiten efectuar análisis más detallados y sistemáticos. En términos generales, estos métodos se apoyan en esquemas iterativos de cálculo y ofrecen distintos niveles de exactitud en función de las simplificaciones asumidas. En la Tabla 2 se resumen algunos de los procedimientos más empleados en la evaluación del comportamiento estable del talud

Tabla 2.- Métodos de análisis de estabilidad

Método	Superficies de Falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	Fuerzas	Bloque delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie.
Bloques o cuñas	Cuñas con tramos rectos	Fuerzas	Cuñas simples, dobles o triples, analizando las fuerzas que actúan sobre cada cuña.
Espiral logarítmica (Frohlich, 1953)	Espiral logarítmica	Fuerzas y momentos	Superficie de falla en espiral logarítmica. El radio de la espiral varía con el ángulo de rotación.
Arco circular, (Fellenius, 1922)	Circulares	Momentos	Círculo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ($\phi = 0$).
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	Fuerzas	No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas, son cero.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas tienen la misma dirección que la superficie del terreno.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas están inclinadas en un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas.
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Las fuerzas entre dovelas, sea asume, que varían de acuerdo con una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla.

2.9.2 Factores de influencia en la estabilidad de un talud

La estabilidad de un talud está influenciada por diversos componentes, entre los que destacan los geométricos, geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos. Los factores geométricos, como la altura y la inclinación del talud, condicionan su estabilidad global. Los factores geológicos determinan la presencia de planos de debilidad, discontinuidades y anisotropía en la estructura del talud, influyendo en la dirección y el tipo de falla potencial. Por otro lado, los factores hidrogeológicos, relacionados con la presencia y circulación de agua, pueden alterar las condiciones de resistencia del material. Finalmente, los factores geotécnicos, vinculados a las propiedades mecánicas del suelo o del macizo rocoso, entre ellas la resistencia al corte y la capacidad de deformación, influyen de manera decisiva en el equilibrio del sistema.

La interacción de estos factores puede dar lugar a la generación de una o varias superficies de falla, facilitando el desplazamiento del suelo o roca. La probabilidad de ocurrencia de una falla y los modelos de inestabilidad asociados dependen en gran medida de las propiedades geológicas del terreno y de la disposición geométrica de la pendiente, las cuales determinan la cinemática del movimiento y los mecanismos de rotura predominantes.

2.9.3 Análisis de límite de equilibrio

Sirve calcular el FS (Factor de Seguridad) de un talud o a través de un análisis retrospectivo se pueden inferir los valores de resistencia al corte asociados al momento de rotura. Con la caracterización de los parámetros resistentes, las condiciones de presión intersticial y las variables geométricas del talud, se procede al cálculo del margen de estabilidad. Dicho procedimiento permite determinar si la resistencia disponible del terreno compensa adecuadamente las sollicitaciones cortantes que inducen el movimiento.

Basan en el balance entre las fuerzas o los momentos resistentes y los momentos solicitantes evaluados sobre el plano de rotura considerado. Las variaciones entre los métodos dependen principalmente de la configuración geométrica adoptada para esa superficie crítica. Estos

enfoques permiten adaptar el análisis a las características particulares de cada talud y las condiciones geotécnicas existentes.

2.9.4 Factor de seguridad (FS)

El coeficiente de seguridad es utilizado en ingeniería geotécnica para estimar el nivel de riesgo asociado a la inestabilidad de un talud bajo las condiciones más desfavorables consideradas en el diseño. (Fellenius W. , 1922) definió este parámetro como la relación entre la resistencia disponible al corte del material que conforma la pendiente y los esfuerzos cortantes movilizados que tienden a generar el deslizamiento, evaluados a lo largo de un plano potencial de rotura previamente asumido.

$$F.S = \frac{\text{Resistencia al cortante disponible}}{\text{Esfuerzo al cortante actuante}}$$

En configuraciones de rotura de tipo circular, donde se define un eje de rotación, se evalúan los momentos que favorecen la estabilidad y los que promueven la inestabilidad.

$$F.S = \frac{\text{Momento resistente disponible}}{\text{Momento Actuante}}$$

Tras calcular la sollicitación cortante actuante, esta se compara con la resistencia disponible del material, permitiendo establecer el margen de estabilidad del talud. Alternativamente, el análisis puede desarrollarse discretizando la masa en bloques o dovelas, evaluando el equilibrio de cada elemento y posteriormente integrando los resultados mediante el balance global de fuerzas y momentos.

$$F.S = \frac{\sum \text{Resistencias disponibles al corte}}{\sum \text{Esfuerzos al corte}}$$

$$F.S = \frac{\sum \text{Resistencias resistentes disponibles}}{\sum \text{Momentos actuantes}}$$

2.9.5 Concepto de superficie de falla

Corresponde a un plano potencial de inestabilidad sobre el cual podría producirse el desplazamiento del talud (Figura 15). Sin embargo, si el diseño cumple con los criterios de estabilidad establecidos, este mecanismo no se desarrolla. En el análisis mediante equilibrio límite se supone que el margen de estabilidad es uniforme a lo largo del plano crítico, representando un valor promedio de la resistencia movilizada. En una condición límite, los esfuerzos cortantes se igualarían en todos los puntos del plano de rotura.

Durante el proceso de evaluación se analizan diversas geometrías posibles de rotura, seleccionando aquella que genera la condición más desfavorable en términos de estabilidad, conocida como plano crítico. Esta es considerada la superficie con mayor probabilidad de deslizamiento. A pesar de identificar un plano crítico principal, es pertinente evaluar otras geometrías posibles de rotura que, aunque no representen la condición más desfavorable, contribuyen a una comprensión más completa del desempeño geotécnico del talud.

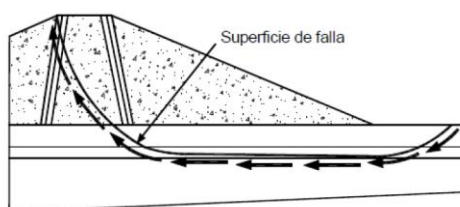


Figura 15.- Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante. Fuente (Suarez)

Formas de la superficie de falla: Los métodos de equilibrio límite se aplican principalmente en el análisis de deslizamientos de tipo traslacional o rotacional, considerando planos de rotura previamente definidos (Figura 16). Estas formulaciones permiten evaluar distintas configuraciones geométricas, tales como planos rectos, arcos circulares, curvas logarítmicas, trayectorias parabólicas o combinaciones de ellas.

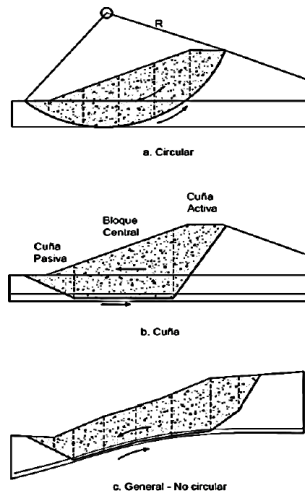


Figura 16.- Clasificación de las superficies de falla (Suarez)

Grietas de Tensión

La aparición de grietas de tensión aumenta de manera considerable la vulnerabilidad del suelo frente a procesos de inestabilidad (ver Figura 17). Estas discontinuidades disminuyen la longitud efectiva del plano potencial de deslizamiento que contribuye a la resistencia y, además, pueden saturarse con agua, lo que incrementa las presiones internas y reduce el margen de estabilidad.

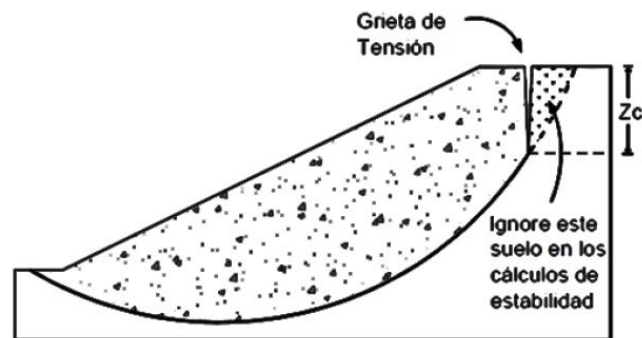


Figura 17.- Representación esquemática de una grieta de tensión en el análisis por equilibrio límite.

2.9.6 Variables geotécnicas empleadas en métodos de equilibrio límite

Los consideran los principales factores que influyen en la estabilidad de una pendiente. Entre ellos se incluyen la geometría del talud, las condiciones geológicas del terreno, la presencia

de grietas de tracción, las acciones sísmicas, el régimen de flujo de agua, así como las propiedades resistentes y el peso unitario de los materiales involucrados.

No obstante, no todas las variables que inciden en el comportamiento del talud pueden ser representadas de manera cuantitativa dentro de un esquema matemático simplificado. En consecuencia, existen escenarios en los que la aplicación exclusiva del método de equilibrio límite puede no reflejar adecuadamente la complejidad real del sistema y, por tanto, ofrecer resultados limitados o poco representativos.

- ***Pesos unitarios.***- es uno de los parámetros más fáciles de determinar en el análisis de estabilidad de pendientes y, generalmente, tiene menor influencia en el coeficiente de seguridad en comparación con los parámetros de resistencia. Sobre el nivel freático se emplea el peso unitario húmedo y, por debajo de este, el saturado. Si se utiliza el peso unitario sumergido, no es necesario considerar explícitamente el nivel freático. La densidad saturada puede estimarse a partir de la gravedad específica de los sólidos, comúnmente asumida como 2.68 para la mayoría de los suelos minerales (Cornforth, 2005).
- ***Resistencia al cortante.***- Los análisis puede determinarse mediante ensayos realizados tanto en laboratorio como en campo. Es fundamental definir si los parámetros corresponden a condiciones drenadas, no drenadas o a un estado parcialmente saturado, ya que esto influye directamente en su aplicación. Asimismo, los valores adoptados deben ser coherentes con los niveles de esfuerzo que actúan sobre el plano potencial de deslizamiento considerado. Es importante considerar la posible degradación de la resistencia del material a lo largo del tiempo, especialmente en condiciones de carga sostenida o cambios en el régimen hidráulico. En suelos

completamente saturados sometidos a condiciones no drenadas, el ángulo de fricción interna se asume igual a cero, dado que la resistencia depende exclusivamente de la cohesión no drenada. Este parámetro puede determinarse mediante ensayos triaxiales no consolidados–no drenados (UU), los cuales permiten estimar la resistencia no drenada del material.

Para estos materiales, la relación entre esfuerzo normal y resistencia al corte tiende a describirse mediante una envolvente curva. En consecuencia, es necesario que los niveles de confinamiento aplicados en laboratorio sean representativos de aquellos que actúan en el terreno, a fin de garantizar coherencia en la interpretación de los parámetros resistentes.

- ***Condiciones drenadas o no drenadas.-*** La inestabilidad de taludes puede desarrollarse bajo condiciones drenadas o no drenadas, dependiendo de la capacidad del suelo para disipar las presiones de poros generadas por cambios de carga. Cuando las variaciones de carga ocurren rápidamente —como en excavaciones en la base o sobrecargas en la coronación— y el material presenta baja permeabilidad, el drenaje es insuficiente y el comportamiento se considera no drenado.

En suelos con permeabilidades mayores a 10^{-4} cm/s, las presiones intersticiales tienden a disiparse en períodos de semanas o meses, permitiendo asumir condiciones drenadas. Por el contrario, materiales con permeabilidades inferiores a 10^{-7} cm/s se analizan como no drenados, mientras que valores intermedios corresponden a un régimen parcialmente drenado.

- ***Esfuerzos totales y efectivos.*** - El análisis de estabilidad de pendientes puede abordarse mediante enfoques basados en esfuerzos totales o en esfuerzos efectivos. Desde el punto de vista teórico, el uso de esfuerzos efectivos es siempre aplicable, dado que la resistencia del suelo depende de estos tanto en condiciones drenadas

como no drenadas. Sin embargo, en la práctica resulta complejo estimar con precisión los incrementos de presión de poros generados por cambios de carga, tales como excavaciones, sobrecargas o variaciones en el nivel freático.

Debido a esta dificultad, los análisis basados estrictamente en esfuerzos efectivos pueden presentar incertidumbre en escenarios no drenados. Aun así, la mayoría de los modelos de estabilidad se formulan en términos de presiones efectivas, evitando la necesidad de definir explícitamente los excesos de presión intersticial.

2.9.7 Estabilidad a corto y a largo plazo

En análisis de estabilidad a corto plazo, los suelos de baja permeabilidad pueden desarrollar presiones de poros significativas debido a cargas aplicadas sin tiempo suficiente para disipación, por lo que su comportamiento debe evaluarse bajo condiciones no drenadas. En contraste, en estudios de largo plazo se asume que el drenaje ha ocurrido y que el material responde bajo condiciones drenadas.

Para arcillas normalmente consolidadas y limos, el análisis a corto plazo suele abordarse mediante esfuerzos totales, ya que la estimación precisa de presiones intersticiales resulta compleja. En arcillas sobre-consolidadas, la variación rápida de la resistencia dificulta el modelamiento teórico, por lo que se recomienda apoyarse en experiencia local y criterios empíricos (Cornforth, 2005). En evaluaciones a largo plazo, el uso de esfuerzos efectivos es el enfoque más apropiado.

2.9.8 Limitaciones de los métodos de límite de equilibrio

Los métodos basados en equilibrio límite presentan ciertas restricciones que deben considerarse al interpretar los resultados:

- **Enfoque estrictamente estático:** Estos procedimientos se fundamentan en el equilibrio de fuerzas y momentos, sin incorporar explícitamente el análisis de

deformaciones ni la redistribución real de esfuerzos. Como consecuencia, las distribuciones internas obtenidas pueden no representar con total precisión el comportamiento real del terreno; sin embargo, estas simplificaciones no invalidan necesariamente el coeficiente de seguridad global.

- **Suposición de distribución uniforme de esfuerzos:** El modelo asume una distribución simplificada de tensiones a lo largo del plano potencial de deslizamiento, lo cual puede no ser representativo en presencia de concentraciones de esfuerzos asociadas a cambios geométricos o a la interacción suelo–estructura.
- **Representación simplificada del mecanismo de rotura:** La aplicación exclusiva de estos métodos puede resultar insuficiente cuando el proceso de inestabilidad involucra fenómenos complejos, tales como deformación progresiva, fluencia (creep), flujo plástico, comportamiento frágil, licuación u otros mecanismos de degradación del material.

Generalmente se asume el material como isotrópico. La mayoría de los trabajos que aparecen en la literatura sobre el tema, asumen que el suelo es un material isotrópico y han desarrollado métodos de análisis de superficies circulares o aproximadamente circulares. Sin embargo, el mecanismo de falla en los materiales residuales donde aparece el suelo, la roca meteorizada y la roca sana, así como las formaciones aluviales y coluviales no-isotrópicas, requiere de nuevos enfoques y del estudio de las superficies de falla no simétricas.

A pesar de las debilidades de un modelo específico, determinar el factor de seguridad asumiendo superficies probables de falla, permite al ingeniero tener una herramienta muy útil para la toma de decisiones. Los métodos de límite de equilibrio son una herramienta muy útil en la práctica y se recomienda tener cuidado de no abusar en la aplicación del método

para casos complejos donde la distribución de esfuerzos y las deformaciones juegan un papel importante en el comportamiento del talud (Krahn, 2004).

2.10 Normativa nacional e internacional para el diseño geotécnico de escombreras

El diseño, evaluación y operación de escombreras en proyectos mineros debe estar respaldado por normativas nacionales e internacionales que garanticen la seguridad geotécnica, la sostenibilidad ambiental y la gestión del riesgo a largo plazo. En esta investigación, se consideran los siguientes marcos normativos como referencia técnica para la interpretación de resultados y formulación de recomendaciones:

- **Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-GEO):** Establece los criterios mínimos para la ejecución de estudios geotécnicos en obras civiles y mineras. La sección específica sobre diseño sísmico y análisis de estabilidad proporciona lineamientos para la selección de coeficientes pseudoestáticos, interpretación de ensayos, y condiciones de drenaje.
- **ICMM – Global Industry Standard on Tailings Management (2020):** Aunque centrada en relaves, esta norma desarrollada por el Consejo Internacional de Minería y Metales promueve principios aplicables al diseño y monitoreo de cualquier estructura de almacenamiento masivo, incluyendo escombreras. Establece criterios sobre gestión del riesgo, niveles de seguridad, monitoreo geotécnico y participación de expertos independientes.
- **Guías del Banco Mundial – IFC Environmental, Health and Safety Guidelines for Mining (2019):** Estas directrices internacionales recomiendan medidas para prevenir la inestabilidad en estructuras de almacenamiento minero, incluyendo prácticas de diseño progresivo, control de agua, y gestión de residuos sólidos en condiciones operativas y post-cierre. Estas normativas han sido consideradas como

base metodológica para validar los escenarios analizados en el software Slide, definir criterios de aceptabilidad del coeficiente de seguridad (FOS) y proponer medidas de mitigación acordes con el período operativo estimado de 26 años para la escombrera del Proyecto Cangrejos.

3 Metodología

Este capítulo presenta el enfoque metodológico adoptado para ajustar la estabilidad de los taludes en el sitio destinada a la construcción de la escombrera del Proyecto Minero Cangrejos, ubicado en la provincia de El Oro. La metodología combina la recopilación y análisis de datos geotécnicos, la caracterización física y mecánica del terreno, y la simulación numérica de perfiles representativos mediante software especializado, con el objetivo de determinar los factores de seguridad y establecer criterios técnicos como base técnica para la planificación y control operativo de la escombrera.

La investigación sigue un enfoque cuantitativo y técnico-experimental, basado en el procesamiento de parámetros geotécnicos obtenidos con sustento en los datos recopilados mediante exploraciones de campo y ensayos geotécnicos efectuados en 2022. Se adopta un diseño descriptivo y explicativo, que permite interpretar el comportamiento del terreno ante distintas condiciones operativas, evaluar posibles mecanismos de falla y proponer medidas de mitigación basadas en evidencia.

Como parte del proceso metodológico, se considera fundamental llevar a cabo una serie de ensayos geotécnicos estandarizados, con el fin de analizar las características físicas y los parámetros resistentes de los materiales presentes, así como la incidencia de diversos factores como el nivel freático o la carga sísmica en la estabilidad de los taludes. Para ello, se eligieron y procesaron los siguientes estudios hechos en este proyecto.

- **Perforaciones y toma de muestras.-** Permitirá caracterizar el perfil geológico del sitio y proporcionan información sobre las propiedades físicas y mecánicas del material a diferentes profundidades, lo cual es esencial para modelar el comportamiento del talud y el comportamiento estable de la escombrera. Es importante conocer el prototipo de suelo, su capacidad de carga y su permeabilidad.

- **Ensayos SPT.-** Mediante la medición del número de golpes necesarios para la penetración controlada del equipo, lo que permite evaluar la resistencia relativa del terreno. Resulta útil para determinar la consistencia de suelos granulares y estimar su potencial de compactación y asentamiento ante la aplicación de cargas.
- **Ensayo de corte directo.-** El diseño geotécnico de taludes depende en gran medida de la resistencia al corte, ya que esta determina la capacidad del terreno para soportar esfuerzos cortantes sin perder estabilidad. Los resultados del ensayo proporcionan los parámetros c y ϕ , indispensables para el estudio del comportamiento estable de la pendiente.
- **Prueba de compresión no confinada.-** En suelos cohesivos, especialmente de baja plasticidad, la resistencia a compresión simple constituye un indicador clave para evaluar la capacidad de soporte del terreno en pendientes y estructuras de cimentación.
- **Ensayo triaxial.-** Proporciona información más detallada sobre la respuesta del suelo bajo condiciones de esfuerzo triaxial, lo cual resulta determinante en el análisis de estabilidad frente a diferentes condiciones de carga.
- **Prueba de compresión y consolidación.-** Es esencial para estudiar la deformación de los suelos bajo carga, especialmente en zonas donde los suelos tienen una alta capacidad de consolidación. Ayuda a predecir los asentamientos de la escombrera a largo plazo.

A continuación, se presenta una síntesis de los ensayos geotécnicos considerados en este estudio, indicando la norma técnica aplicada, los parámetros obtenidos y su aplicación específica dentro del modelo de análisis de estabilidad desarrollado en el software Slide:

Tabla 3.- Resumen de los ensayos geotécnicos aplicados en el área proyectada para la escombrera y su uso en el análisis de estabilidad

Ensayo	Norma / Referencia	Parámetros obtenidos	Aplicación en el modelo Slide
SPT (Standard Penetration Test)	ASTM D1586	Nº de golpes (N), resistencia relativa, clasificación de suelo	Estimación de compacidad y consistencia del terreno natural
Corte directo (CD)	ASTM D3080	Cohesión (c), ángulo de fricción (ϕ)	Parámetros de resistencia al corte (condición drenada)
Ensayo triaxial (CU)	ASTM D4767	c, ϕ , presión de poro, comportamiento esfuerzo-deformación	Evaluación de resistencia al corte con y sin drenaje
Carga puntual (PLT)	ISRM (1985)	Índice de resistencia a la carga puntual, σ_{ci} estimada	Estimación de resistencia de rocas para zonas con saprolita o roca débil
Análisis granulométrico	ASTM D422	Distribución de tamaño de partículas	Clasificación del suelo (ML, CL-ML)
Límites de Atterberg	ASTM D4318	LL, LP, IP (plasticidad)	Clasificación del suelo según plasticidad (CL, CL-ML)
Humedad natural y peso unitario	ASTM D2216, D7263	ω , γ húmedo / seco	Condiciones de campo y calibración de parámetros en Slide

Estos son los ensayos primordiales que se realizarán ya que proporcionan una visión integral del comportamiento del terreno, las cargas actuantes y los factores condicionantes del equilibrio de la escombrera, elementos clave para un diseño adecuado, una operación segura y un manejo sostenible de los residuos mineros.

3.1 Caracterización Geotécnica del terreno

Para realizar esta caracterización se escogió la superficie de estudio que se encuentra ubicada al Sur- Este de la concesión la cual se han realizado diferentes tipos de muestreo se seleccionaron los varios puntos distribuidos en la zona donde estará la escombrera del material estéril de la mina cielo abierto. Para esto se realizaron calicatas con profundidad máxima de 3 m, perforaciones con una profundidad máxima de 50m y realizaron sus respectivos ensayos, como se muestra en el mapa.

3.1.1 Calicatas

De acuerdo con la normativa de prevención de impactos al medio arqueológico y en cumplimiento de lo establecido en el artículo 70 de la Ley Orgánica de Cultura, durante el movimiento de suelos en las áreas intervenidas, como accesos y plataformas, se llevó a cabo un monitoreo arqueológico. Este incluyó la realización de pruebas de pala en superficie y la descripción detallada de los perfiles excavados. La actividad fue ejecutada por profesionales calificados y acreditados por el Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (INPC).



Figura 18.- Pruebas de Pala y monitoreo Arqueológico

Las calicatas se excavaron manualmente hasta alcanzar la superficie del bedrock, a profundidades que variaron desde 2.7m hasta los 3.1 metros bajo la superficie del terreno.

Los bancos se diseñarán con una pendiente mínima de 1:1, asegurando que la altura de cada banco o pared no exceda un metro. Además, se implementó el uso de cuerdas para facilitar el ascenso y descenso del personal de manera rápida y segura. Todos los horizontes del suelo fueron registrados conforme a la norma ASTM D2487-17, correspondiente al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS). Figura 19

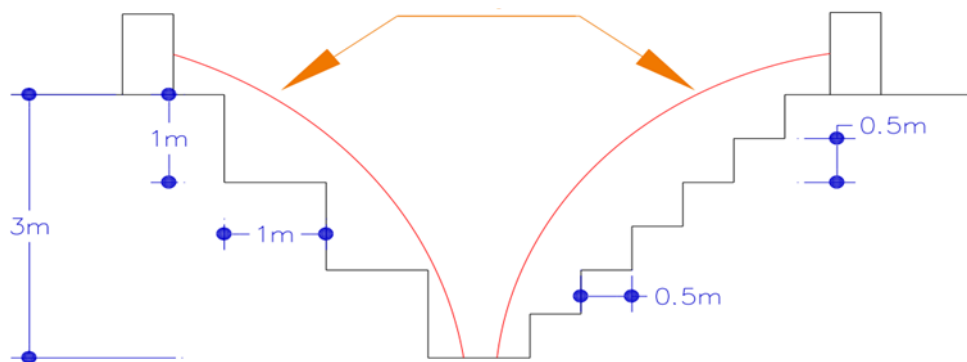


Figura 19.- Procedimiento de preparación del terreno para excavar calicatas a mano.

Se recolectarán muestras representativas perturbadas, con un volumen aproximado de 30 kg según cada estrato de suelo reconocido en el perfil. El material extraído será protegido en bolsas de plástico y transportado en baldes sellados hasta el laboratorio geotécnico. Para las muestras relativamente inalteradas, se utilizarán cuatro tubos muestreadores tipo Shelby, de 12 pulgadas de longitud y 3 pulgadas de diámetro, los cuales serán introducidos en cada horizonte de suelo cohesivo (de grano fino). Los extremos de los tubos se sellarán con tapas especiales para preservar la humedad del material, como se muestra en la Figura 20.



Figura 20.- Muestreo en las calicatas realizadas.

Se tomaron 3 muestras en las siguientes ubicaciones que se muestra en la tabla 3.

Tabla 4.- Ubicación de las calicatas en la área de la escombrera

Calicata	X	Y
TP-WRSF-02	631236	9612023
TP-WRSF-03	631893	9613372
TP-WRSF-04	631610	9612850

Con estas muestras se realizaron los siguientes ensayos:

- Granulometría ASTM -D6913
- Límites Atterberg ASTM- D4318
- Proctor Estándar ASTM -D698
- Gravedad Especifica de Sólidos ASTM C-127 & D-854
- Ensayo de consolidación ASTM-D-2435
- Ensayo de corte directo ASTM D3080
- Ensayo de densidad (Peso Unitario) en espécimen de suelo d7263
- Ensayo de compresión triaxial -Consolidado- No drenado (CU), ASTM-D4767
- Contenido de Humedad ASTM – D2216

El programa de perforación incluyó perforaciones verticales con pruebas de penetración estándar (SPT) realizadas en la capa superficial es decir en los horizontes de saprolita, saprock del pozo a intervalos predeterminados de 1.5 m hasta 5 m hasta que exista rechazo en el SPT ya que se ha llegado a roca fresca.

Además, se realizó un muestreo mediante tubos Shelby, con dimensiones de 0.050 m de diámetro y 1 m de longitud, para recolectar material y obtener muestras relativamente inalteradas. Las perforaciones alcanzaron profundidades de hasta 50 m, dependiendo de las condiciones del terreno, y se llevaron a cabo con diámetro HQ.



Figura 21.- Máquina de perforación y muestras de Shelby.

El material de testigo recuperado fue sometido a un logeo geotécnico y geológico detallado, seguido de su respectivo registro fotográfico para documentación.

Se realizaron 3 perforaciones en las siguientes ubicaciones como se muestra en la Tabla 4.

Perforación	X	Y
BH-WRSF-01A	631251	9611930
BH-WRSF-02	631335	9612195
BH-WRSF-03	630766	9612791

Durante estas perforaciones se obtuvieron muestras representativas y se ejecutaron ensayos in situ en boca de pozo; a continuación, se detallan las pruebas realizadas:

- Índice de resistencia a la carga puntual ASTM D-5731
- Compresión simple en Roca ASTM D7012
- Ensayo de penetración estándar (SPT), ASTM D-1586
- RQD

A continuación, el mapa presenta la ubicación de las calicatas y pozos ejecutados en el área de estudio, donde se ha designado el sitio para la ubicación de la escombrera del proyecto

minero Cangrejos. La litología predominante en la zona corresponde a una intrusión de un batolito de cuarzodiorita equigranular de edad cretácica, cubierto por una sobrecarga de saprolita con un espesor que varía entre 1 y 6 metros de profundidad.

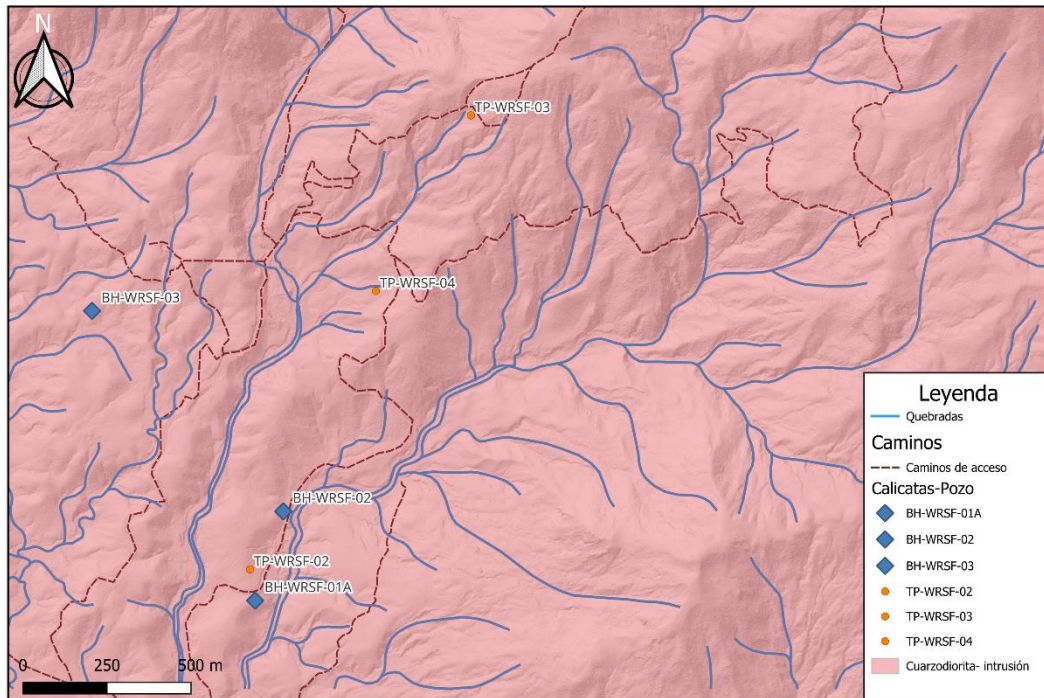


Figura 22.- Mapa de ubicación de calitas y pozos.

3.1.2 Caracterización de materiales.

El sitio destinado para el almacenamiento de roca estéril se encuentra en las proximidades del depósito, debido a los costos asociados al transporte del material. Esta área está ubicada directamente debajo de los tajos Gran Bestia y Cangrejos, y será utilizada para la disposición de diversos materiales, incluyendo sobrecarga (aluvión), saprolita, saprock, roca con oxidación transicional y roca fresca. Asimismo, se detallarán los mecanismos de falla considerados y los métodos de análisis empleados en la evaluación de la estabilidad del terreno.

Bajo el enfoque geológico, el sector de estudio presenta una capa de material aluvial-coluvial (depósitos cuaternarios) con un espesor significativo, que varía entre 10 y 25 metros. Estos depósitos se encuentran sobre un macizo rocoso compuesto por cuarzodiorita, cuya calidad varía de buena a muy buena.

En términos generales, aproximadamente el 95% del área de estudio está conformada por roca tipo cuarzodiorita de edad cretácica, caracterizada por un grado de metamorfismo muy bajo. En ciertos sectores, esta roca puede presentar una leve foliación de minerales oscuros, principalmente biotitas y anfíboles. El 5% restante corresponde a capas de arcilla de baja resistencia, lo que puede representar un factor de debilidad en la estabilidad del talud.

Finalmente, se debe considerar un material fundamental en este estudio: el estéril minero, que se genera como subproducto de la actividad minera y es almacenado en escombreras. El material exhibe una naturaleza heterogénea tanto en su granulometría como en su constitución, debido a la incorporación de múltiples componentes geológicos del sector. Debido a la importancia de este material en la estabilidad del área, se realizará un estudio geotécnico detallado en la zona destinada para la escombrera, con el objetivo de evaluar su comportamiento y definir estrategias para su disposición segura.

3.1.3 Manejo de la incertidumbre en los parámetros geotécnicos obtenidos

La caracterización geotécnica del terreno, especialmente en proyectos de infraestructura minera como una escombrera, requiere una base sólida de datos establecidos a partir de investigaciones de campo y análisis de laboratorio. Sin embargo, es necesario reconocer que todos los parámetros derivados de estos ensayos están sujetos a cierto grado de incertidumbre, la cual debe ser gestionada de forma adecuada para garantizar la confiabilidad

de los modelos numéricos, como los realizados en el software Slide para la evaluación de estabilidad de taludes.

- ***Variabilidad natural del terreno***

La naturaleza heterogénea y anisotrópica de los suelos y las rocas implica que los valores geotécnicos pueden cambiar significativamente a lo largo del sitio. Los ensayos puntuales, como las perforaciones o muestreos, representan solo una pequeña fracción del volumen total del terreno. Esto introduce incertidumbre espacial en las medidas como es cohesión, ángulo de fricción o la resistencia no drenada.

Estrategia de manejo: Se realizó una distribución de ensayos a distintas profundidades y ubicaciones, permitiendo definir zonas geotécnicamente homogéneas. Además, se aplicaron análisis estadísticos para calcular parámetros característicos (por ejemplo, percentiles conservadores) que minimicen el riesgo de sobreestimar la resistencia del terreno.

- ***Limitaciones propias de los ensayos***

Cada método de ensayo posee sus propias fuentes de error e incertidumbre. Por ejemplo: El ensayo SPT presenta dispersión asociada al tipo de equipo, energía aplicada y condiciones de ejecución.

El ensayo triaxial remoldeado puede no reflejar fielmente el comportamiento in situ de suelos estructurados.

El corte directo, aunque útil, impone condiciones de esfuerzo planas que no siempre son representativas del estado de esfuerzo real tridimensional.

Estrategia de manejo: Se validaron los resultados entre distintos tipos de ensayos para obtener correlaciones internas (por ejemplo, comparar S_u de triaxial con estimaciones basadas en N-SPT). Asimismo, se adoptaron márgenes de seguridad adecuados al tipo de material y ensayo empleado.

- ***Incertidumbre en la presión de poros***

La presencia de agua en el suelo, tanto en condiciones permanentes como transitorias (lluvias intensas, infiltración), puede modificar drásticamente la estabilidad de un talud.

La presión de poros no siempre puede ser conocida con precisión, especialmente si no se cuenta con datos instrumentales como piezómetros.

Se definió un nivel freático conservador basado en la información hidrogeológica disponible y se implementaron escenarios alternativos en los modelos de Slide para evaluar la sensibilidad de la estabilidad frente a cambios en la presión intersticial.

- ***Limitación en la cantidad de datos***

El número de ensayos siempre será limitado frente al tamaño del proyecto. Esta limitación puede conducir a interpretaciones parciales o poco representativas del comportamiento global del macizo.

Se aplicó una interpretación crítica de los resultados con base en la experiencia geotécnica y criterios normativos. Además, se desarrollaron múltiples escenarios de análisis (con parámetros mínimos, medios y máximos) para evaluar la influencia de la variabilidad en los factores de seguridad.

- ***Aplicación en modelación numérica***

En Slide, los parámetros geotécnicos se ingresan de forma determinística. No obstante, al incorporar la incertidumbre mediante escenarios alternativos, niveles freáticos conservadores, y validaciones cruzadas, se garantiza que el diseño cumpla con los factores de seguridad mínimos establecidos bajo condiciones diversas y potencialmente desfavorables.

3.2 Rocscience – Slide 2

Rocscience es una empresa líder en el desarrollo de software geotécnico, especializado en la evaluación del equilibrio de pendientes, el diseño de fundaciones y la modelación de obras

subterráneas. Su misión es proporcionar herramientas de análisis avanzadas para ingenieros geotécnicos, geólogos y profesionales del sector minero e ingenieros civiles, con el objetivo de mejorar la seguridad y la eficiencia de los proyectos de construcción e infraestructura. La empresa se enfoca en desarrollar software de alta calidad para resolver problemas geotécnicos complejos y permitir a los usuarios tomar decisiones informadas durante todas las etapas del período de vida de un proyecto.

Una herramienta es Slide2 es un módulo de Rocscience especializado en el análisis de estabilidad de taludes en 2D. Su principal objetivo es permitir a los profesionales geotécnicos evaluar la seguridad y la estabilidad de pendientes, como las que se encuentran en escombreras mineras, taludes de carreteras, excavaciones, represas y otras estructuras de ingeniería civil. Utilizando métodos avanzados de equilibrio límite, Slide2 calcula el factor de seguridad (FS) de un talud, ayudando a predecir posibles fallas o deslizamientos, además como principales objetivos de este módulo son:

- Análisis de estabilidad de taludes: Evaluar la estabilidad de los taludes bajo diversas condiciones, incluyendo la influencia de cargas externas, aguas subterráneas y variación geomecánica de los suelos y macizos rocosos.
- Simulación de superficies de deslizamiento: Calcular los planos críticos de deslizamiento con mayor probabilidad de inestabilidad, mediante la aplicación de distintos métodos de análisis, tales como Bishop, Spencer y Janbú.
- Evaluación de la resistencia y deformación del suelo: Integrar parámetros geotécnicos de los materiales de la capa superficial para calcular la capacidad del talud para resistir fuerzas externas sin colapsar.
- Análisis probabilístico: Permitir la modelización de incertidumbres geotécnicas y variabilidad de los materiales a través de simulaciones probabilísticas, como el método de Monte Carlo, para evaluar la probabilidad de fallos en el talud.

- Diseño de sistemas de soporte: Proporcionar herramientas para el diseño y análisis de soportes, como anclajes, muros de contención, geotextiles y pilotes, que pueden ser necesarios para mejorar la estabilidad de taludes críticos.

3.2.1 Métodos Bishop Simplificado

El método de Bishop Simplificado es un procedimiento de equilibrio límite que se maneja para deducir el factor de seguridad (FOS) de un talud frente a fallas circulares o casi circulares. Fue desarrollado por A.W. Bishop en 1955, y es ampliamente utilizado por su equilibrio preciso de momentos y su capacidad de manejar situaciones con presión de poros.

En Slide, este método se aplica como una de las opciones disponibles en el análisis de corte circular. Utiliza iteraciones numéricas para solventar el sistema de ecuaciones y encontrar el factor de seguridad global, es decir, la correlación entre la resistencia disponible y la solicitada a lo largo de la superficie de falla. Tabla 5

Tabla 5.- Ventajas del Método Bishop

Ventajas	Explicación
Alta precisión	Para fallas circulares, es más preciso que métodos como Fellenius (pendiente simple).
Incorpora presión de poros	Permite introducir niveles freáticos o redes de presión, fundamentales en análisis de taludes saturados.
Adecuado para materiales homogéneos	Funciona muy bien en suelos o saprolitas sin cambios drásticos de propiedades.
Eficiente computacionalmente	Es rápido de ejecutar y converge bien, ideal para análisis preliminares o masivos.

Compatible con variaciones de c' , ϕ' y γ	Soporta cambios de parámetros por profundidad o por material.
---	---

En el contexto del análisis de estabilidad de una escombrera minera, el método de Bishop Simplificado constituye una herramienta sumamente eficiente y confiable dentro del entorno de Slide. Su aplicación permite evaluar con precisión la estabilidad global del talud, especialmente en materiales relativamente homogéneos como saprolitas o rellenos compactados. Este método resulta particularmente útil al incorporar el efecto del nivel freático y las presiones de poros, elementos clave que influyen en la respuesta mecánica de depósitos con distintos grados de saturación. Además, su eficiencia computacional lo hace ideal para realizar análisis de sensibilidad y escenarios múltiples, permitiendo identificar superficies de falla críticas de manera rápida y precisa. Por estas razones, el método de Bishop Simplificado representa una opción técnica sólida para la etapa de diseño y evaluación de estabilidad a largo plazo en instalaciones de almacenamiento de material estéril.

4 Resultados

Con el propósito de caracterizar geotécnicamente el área de estudio, se desarrolló una campaña de caracterización y toma de muestras de suelo y rocas, que permitió obtener detalles sobre las condiciones físicas y geomecánicas de los materiales que conforman el subsuelo. Con estos datos, se elaboraron tres perfiles geotécnicos representativos, integrando los resultados de los ensayos realizados tanto en suelos como en el macizo rocoso. Estos perfiles sirvieron como base para el desarrollo de un análisis de estabilidad de taludes, mediante el cual se determinó el factor de seguridad en diferentes secciones críticas de la escombrera.



Figura 23.- Mapa de ubicación las calicatas y perforaciones, además de los perfiles realizados.

4.1 Caracterización de suelos

En esta sección se analiza el material aluvial-coluvial que conforma la saprolita sobre el intrusivo granodiorítico-cuarzodiorítico. Este material, de origen arcilloso, se encuentra intercalado con capas de arcilla limosa, presentando una plasticidad de baja a media dentro de la secuencia estratigráfica del intrusivo.

La sucesión estratigráfica de la zona presenta múltiples niveles con predominio de suelos arcillosos combinadas con arcilla limosa, lo que evidencia una composición heterogénea del subsuelo. Considerando su comportamiento plástico y sus parámetros resistentes, este material es considerado como un suelo estructuralmente diferenciado en el análisis geotécnico.

Las propiedades de este material fueron determinadas a partir de ensayos realizados en los laboratorios de AUSENCO, los cuales incluyeron:

- **Ensayos de Corte Directo** – Para valorar la resistencia al corte.
- **Límites de Atterberg** – Para determinar la plasticidad del material.
- **Ensayos de Humedad Natural** – Para evaluar su comportamiento en estado inalterado.

Para estimar las propiedades de resistencia al corte, se aplicó el enfoque de Mohr-Coulomb expuesto en apartados anteriores.

Los resultados de laboratorio permitieron establecer que la arcilla presente en el sector analizado se caracteriza por las siguientes propiedades:

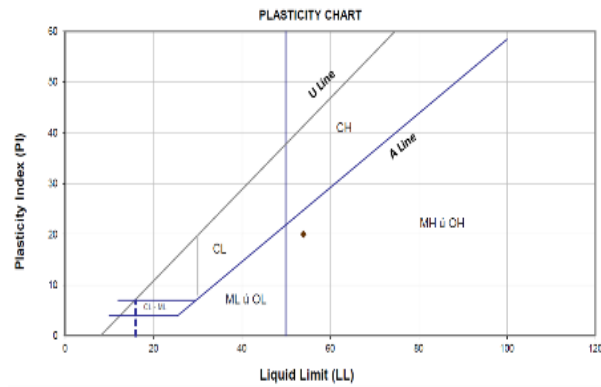
Peso unitario: Aproximadamente 17 kN/m³.

Límite líquido (LL): Entre 35% y 55%.

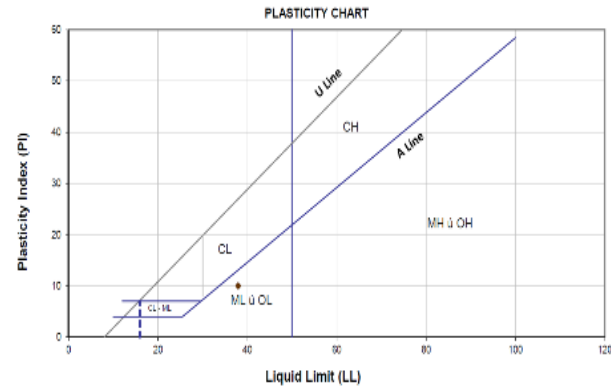
Límite plástico (PL): En un rango de 28% a 35%.

Según los valores obtenidos, el suelo corresponde a una arcilla de baja a media plasticidad (CL), asociada a niveles de arcilla limosa de baja plasticidad (CL-ML), como se muestra en la Figura 24.

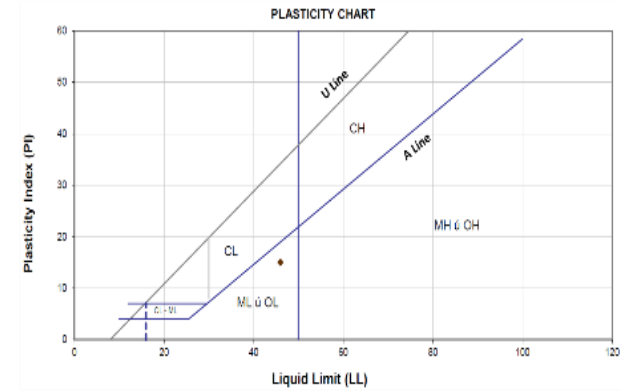
TP-WRSF-02 / M-02(1) / 0.30 - 3.00



TP-WRSF-03 / M-02(1) / 0.30 - 2.35



TP-WRSF-04 / M-01(1) / 0.30 - 2.70



TP-WRSF-03 / M-02(2) / 0.30 - 2.35

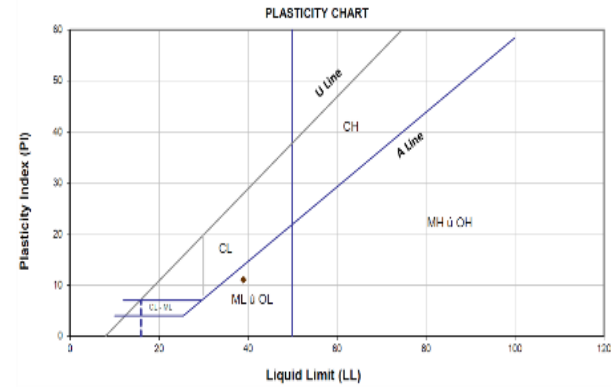
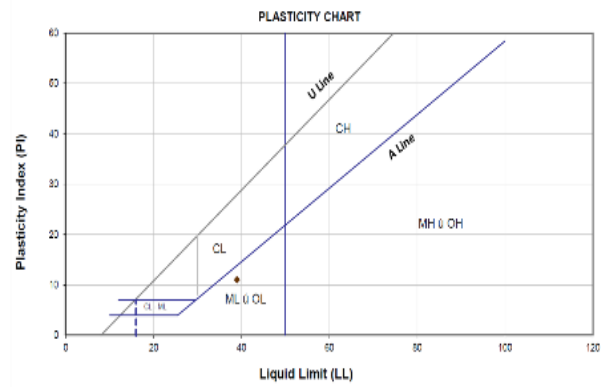


Figura 24.- Límites de Atterberg de las muestras de saprolita del area de estudio. Fuente: Ausenco

A partir de los ensayos de corte directo se determinaron los parámetros resistentes del material, evidenciando que el ángulo de fricción interna se sitúa en un rango de 17° a $23,8^{\circ}$, con un valor promedio de $20,15^{\circ}$. En cuanto a la cohesión efectiva, se observa una variación entre 9 kPa y 118 kPa, con un promedio de 37 kPa. La amplitud de estos rangos sugiere una marcada variabilidad geotécnica dentro del estrato analizado. Mientras los datos obtenidos en de cohesión es de 8Kpa y con ángulo de fricción de 28.3° . Los resultados obtenidos evidencian que el material presenta una cohesión relativamente reducida.

4.2 Caracterización de macizo Rocoso

El estudio geomecánico del macizo rocoso de naturaleza cuarzodiorítica se apoya en la cuantificación de sus propiedades resistentes, particularmente la resistencia a compresión simple (UCS) y el índice de carga puntual normalizado (I_{s50}), los cuales permiten estimar su comportamiento estructural frente a sollicitaciones mecánicas.

Los ensayos de compresión simple realizados en muestras de cuarzodiorita arrojaron valores de resistencia de 18.5 MPa y 60.5 MPa. Conforme a los criterios de clasificación de resistencia a compresión simple definidos por la ISRM, estos valores se interpretan de la siguiente manera:

- 18.5 MPa: Clasificada como Roca de Resistencia Media (R3), que abarca resistencias entre 12.5 MPa y 50 MPa.
- 60.5 MPa: Clasificada como Roca de Alta Resistencia (R4), correspondiente a resistencias entre 50 MPa y 100 MPa.

Estas clasificaciones indican que la cuarzodiorita del macizo presenta una resistencia que varía desde media hasta alta, lo cual es relevante para el diseño y la estabilidad de estructuras geotécnicas.

Los ensayos de carga puntual ejecutados en el macizo rocoso reportaron valores del índice de carga puntual corregido (I_{s50}) con resultados iguales o superiores a 3,76 MPa, con resistencias a la compresión uniaxial estimadas que oscilan entre 90 MPa y 275 MPa. Estas estimaciones se basan en correlaciones empíricas que relacionan el índice de carga puntual con la resistencia a la compresión uniaxial, siendo una práctica común en la mecánica de rocas para obtener una estimación una determinación inicial de la capacidad resistente del material, como se detalla en la Tabla 6.

Según la clasificación de la ISRM, las resistencias estimadas se distribuyen en las siguientes categorías:

- **90 MPa:** Clasificada como **Roca de Alta Resistencia (R4)**.
- **275 MPa:** Clasificada como **Roca de Resistencia Extremadamente Alta (R6)**, que incluye resistencias superiores a 250 MPa.

Esta variabilidad en la resistencia sugiere que, aunque la cuarzodiorita es predominantemente fuerte, existen zonas dentro del macizo con resistencias superiores, lo que podría influir en el comportamiento mecánico general del macizo.

Tabla 6.- Resultados de ensayo de Carga puntual

Muestra	Profundidad (m)	Índice de Carga Puntual IsI_sIs (MPa)	Índice Ajustado Is(50) (MPa)	Resistencia a la Compresión σ_{cc_csc} (MPa)	Clasificación ISRM
BH-WRSF- 02 M-1	12.70 - 12.88	8.68 - 9.53	10.11	231 - 254	R5 - R6 (Muy Fuerte - Extremadamente Fuerte)
BH-WRSF- 02 M-2	17.03 - 17.28	6.58 - 6.72	7.65	182 - 185	R5 (Muy Fuerte)
BH-WRSF- 02 M-4	19.20 - 19.56	7.60 - 10.26	9.92	203 - 274	R5 - R6 (Muy Fuerte - Extremadamente Fuerte)
BH-WRSF- 02 M-5	20.20 - 20.40	5.57 - 7.27	7.13	148 - 194	R5 (Muy Fuerte)
BH-WRSF- 02 M-6	20.95 - 21.21	8.03 - 9.33	9.64	214 - 249	R5 (Muy Fuerte)
BH-WRSF- 02 M-8	27.39 - 27.56	6.2	6.88	165	R5 (Muy Fuerte)
BH-WRSF- 02 M-8	28.85 - 29.19	3.41 - 7.04	5.81	91 - 188	R4 - R5 (Fuerte - Muy Fuerte)

Además se realizó el logueo geotécnico de los pozos geotécnicos haciendo la clasificación geomecánica como el Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski y el Q-System de Barton, que integran parámetros adicionales como:

- **Designación de la Calidad de la Roca (RQD):** Indica la calidad del macizo en función de la longitud de los testigos de perforación recuperados.
- **Espaciamiento y condiciones de las discontinuidades:** Incluye la evaluación de la separación, persistencia, rugosidad y relleno de las fracturas presentes en el macizo.

- **Condiciones del agua subterránea:** La presencia y presión del agua pueden afectar significativamente la estabilidad del macizo.

Nivel freático:

Durante la visita de campo no se identificaron niveles de agua subterránea visibles. Sin embargo, las mediciones realizadas durante las perforaciones revelaron variaciones significativas en la profundidad del nivel freático:

- **Pozo BH-WRSF-01:** Nivel freático a 21.90 m de profundidad.
- **Pozo BH-WRSF-02:** Nivel freático a 5.90 m de profundidad.
- **Pozo BH-WRSF-03:** Nivel freático a 1.90 m de profundidad.

Estas diferencias en las profundidades del nivel freático pueden atribuirse a la ubicación específica de cada pozo y a la morfología variable del terreno. Es importante destacar que la variabilidad del nivel freático puede influir en la estabilidad de las excavaciones y en el diseño de las estructuras de drenaje.

4.3 Perfiles – Slide 2

A partir de la información geotécnica recolectada y los perfiles definidos en el área de estudio, se procedió a modelar la estabilidad de los taludes mediante el software Slide de Rocscience. Para evaluar el comportamiento del terreno en distintos escenarios, se realizaron simulaciones considerando tanto **condiciones drenadas** (representativas del comportamiento a largo plazo en suelos parcialmente saturados o con buen drenaje) como **condiciones no drenadas** (correspondientes a situaciones críticas de corto plazo, como eventos de lluvia intensa o cambios rápidos de carga). En cada caso, se emplearon los valores de resistencia definidos mediante investigación de laboratorio y verificación en terreno. Los resultados del análisis permitieron determinar los factores de seguridad asociados a cada condición, los cuales se detallan a continuación.

Perfil 1

Se realizó con la perforación WRSF-02 y la calicata TP -02.

Perfil 2

Se realizo con la perforación BH-WRSF-01 y la calicata TP-02.

Perfil 3

Se realizo con las calicatas TP-03 y TP-04 .

Estos perfiles se realizaron con los datos resumidos en la tabla correspondiente para cada perfil.

Tabla 7.- Resumen de los medidas tomados para el análisis de talud

Perfil	Material	Cohesión (c')(kPa)	Fricción (ϕ')(°)	Peso unitario (γ)(kN/m ³)	Nivel freático
Perfil 1	ML (limo)	10	28	17.7	Sí
	Cuarzodiorita	620	40	25.0	No
Perfil 2	CL-ML (arcilla limosa)	10	28	17.7	Sí
	ML (limo)	128	34	20.0	Sí
	Cuarzodiorita	300	40	25.0	No
Perfil 3	ML (limo)	10	30	13.93	No

Para complementar el análisis de estabilidad en condiciones estáticas, se realizaron modelos adicionales en Slide incorporando el efecto de cargas sísmicas mediante el enfoque pseudoestático, utilizando un coeficiente sísmico horizontal (k_h) de 0.15, representativo de la aceleración de diseño en la zona del proyecto. Este valor fue aplicado a cada perfil geotécnico previamente definido, manteniendo los parámetros drenados. Las siguientes imágenes muestran las superficies de falla más críticas identificadas bajo esta condición sísmica para los perfiles 1, 2 y 3, junto con los factores de seguridad obtenidos.

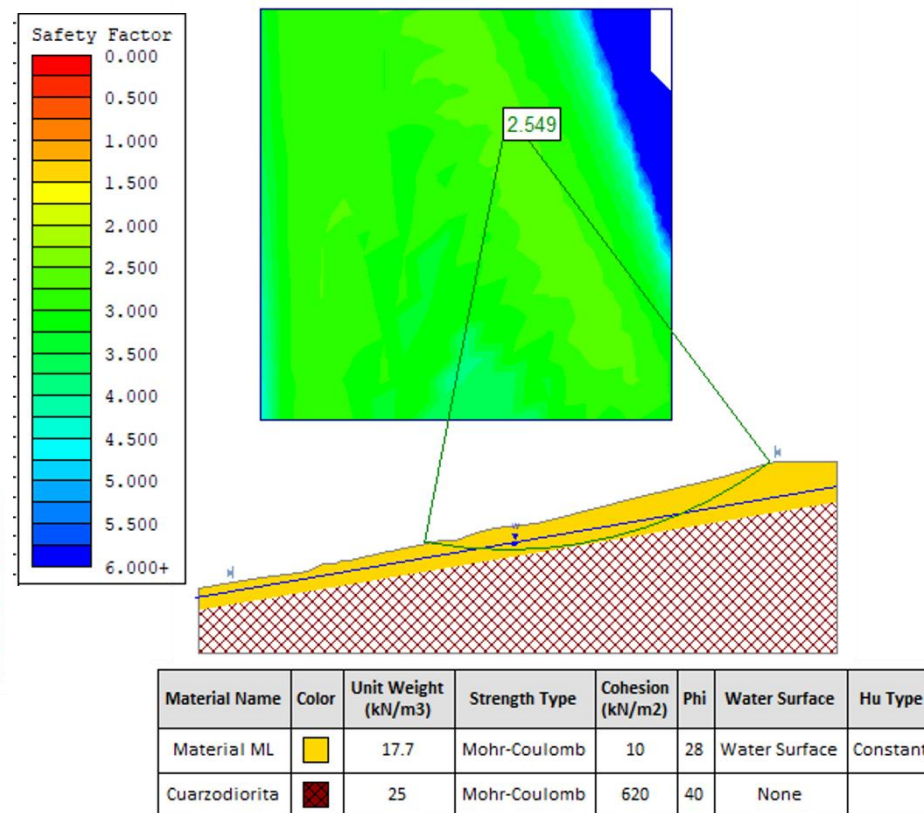
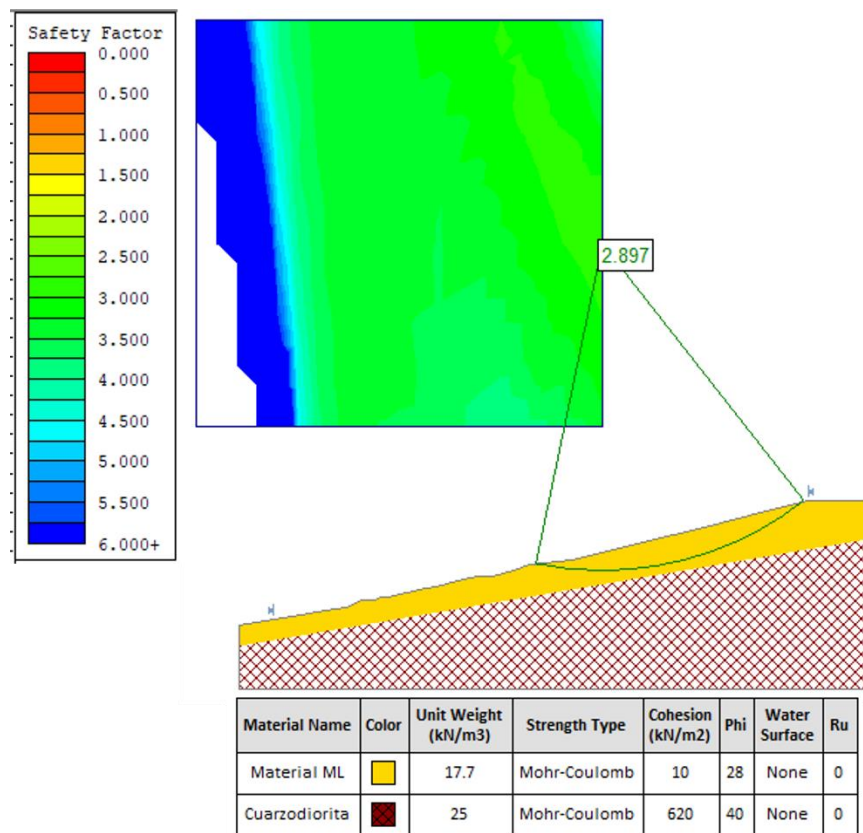


Figura 25.- Perfil 1 en condiciones drenadas y no drenadas

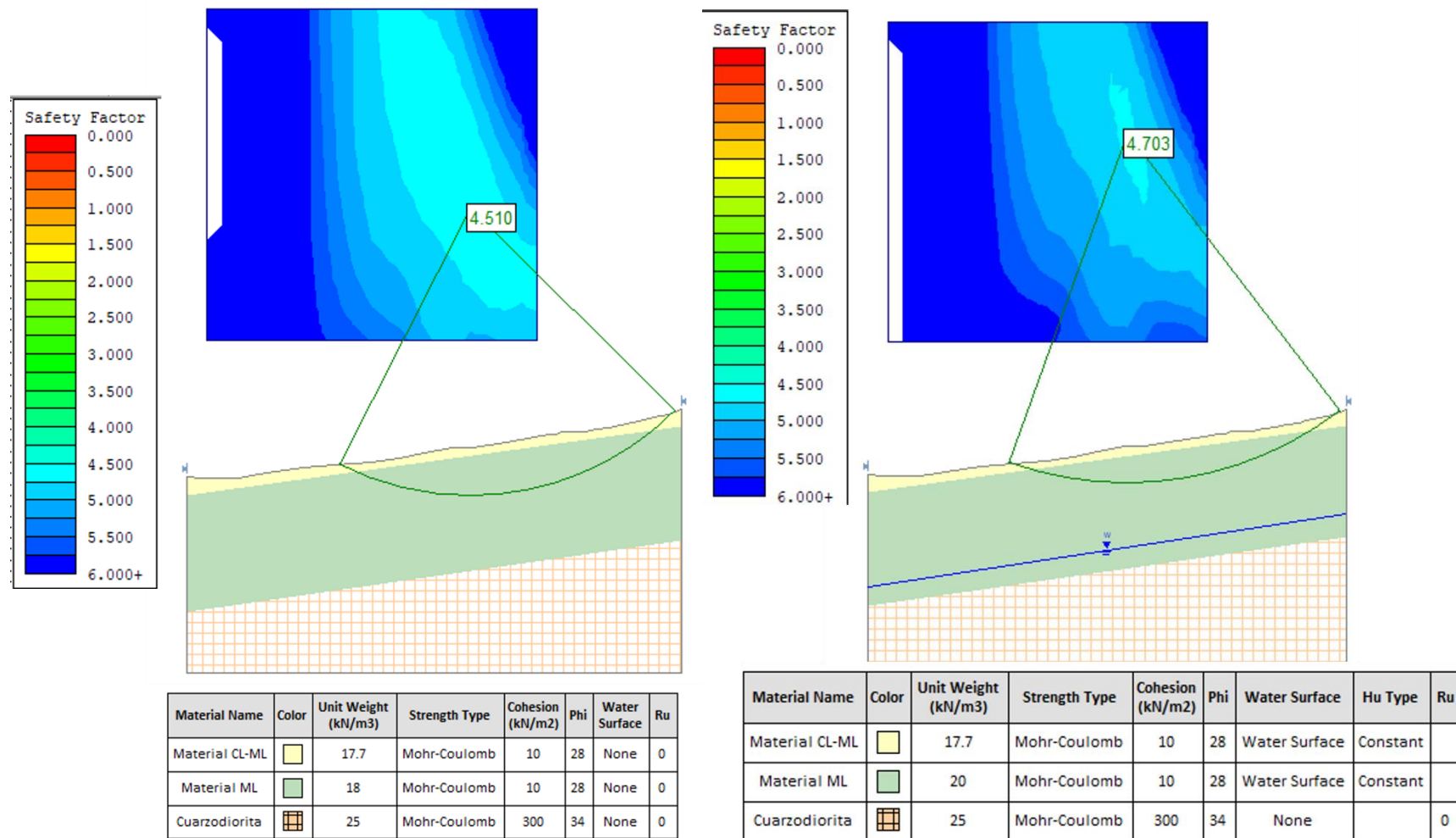


Figura 26.- Perfil 2 en condiciones drenadas y no drenado

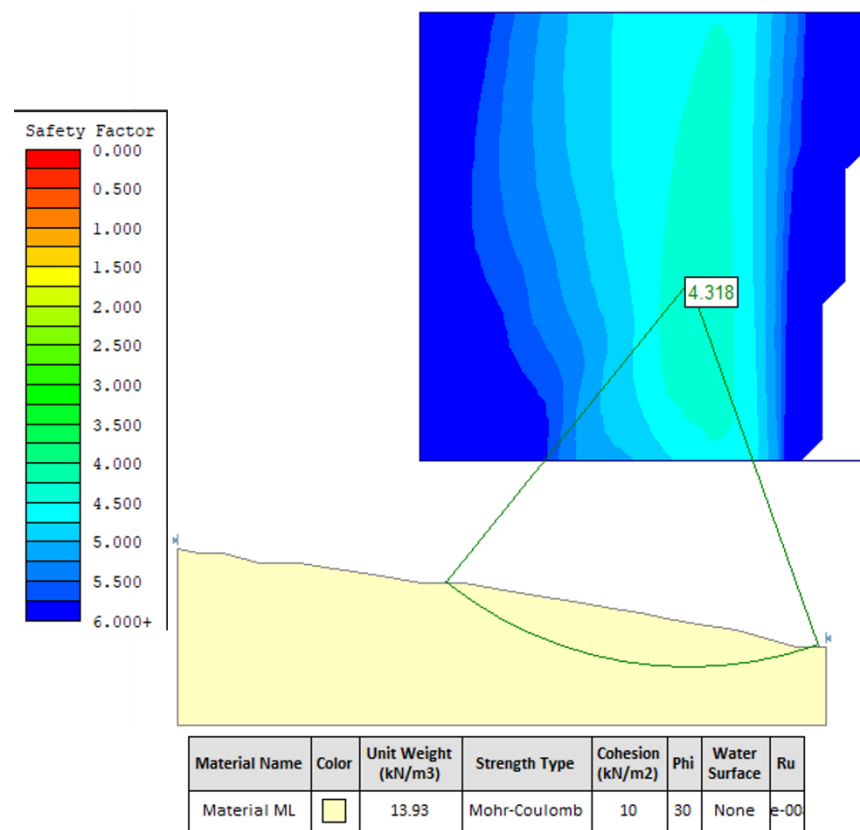


Figura 27.- Perfil 3 calicatas no drenado

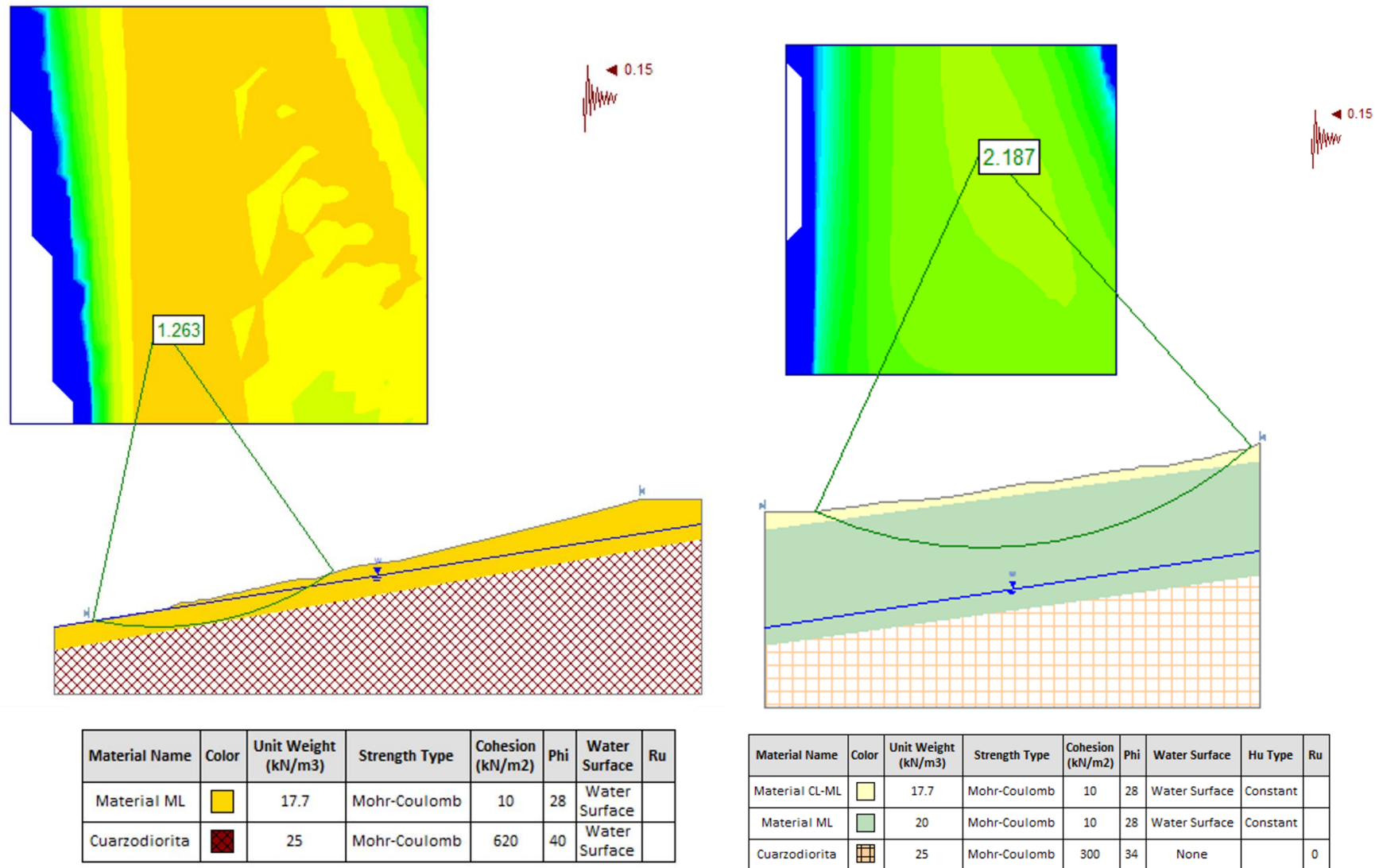


Figura 28.- Perfil 1 y Perfil 2 modelado pseudoestática

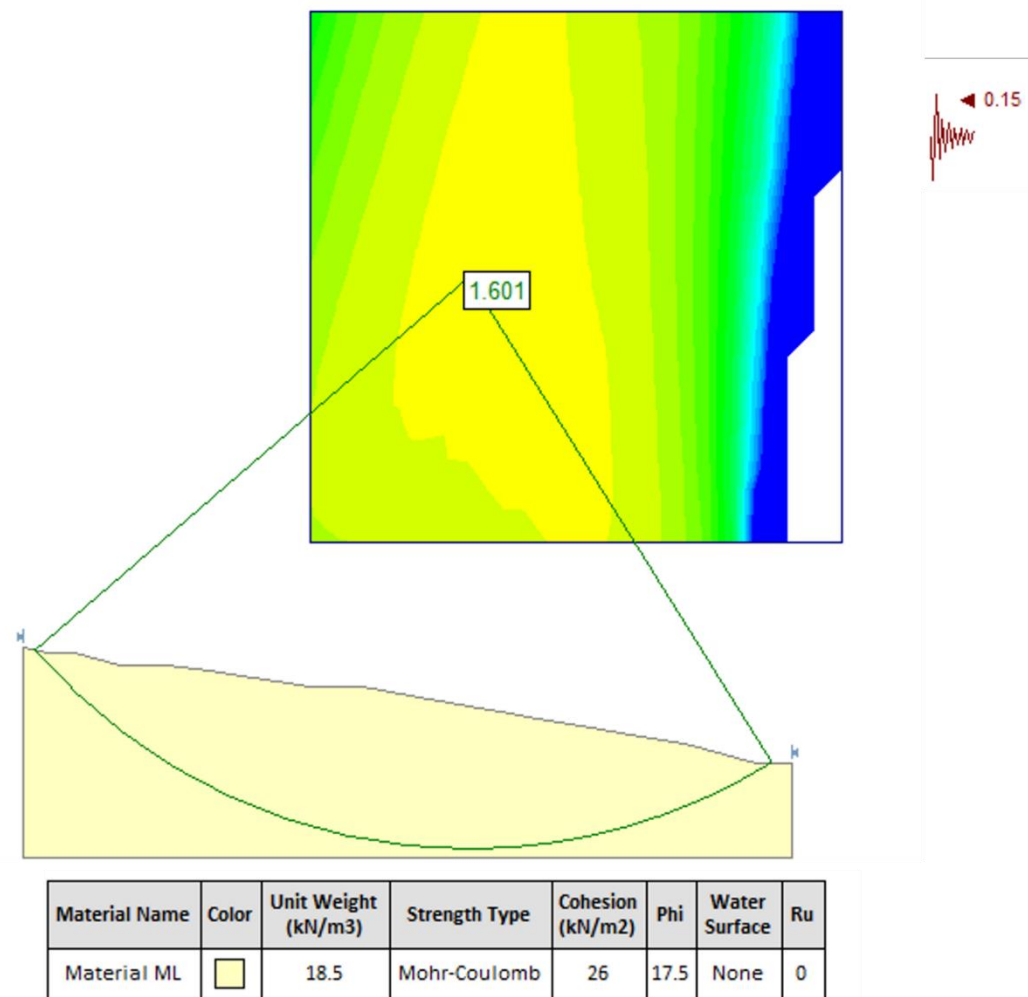


Figura 29.- Perfil 3 con el modelo pseudoestático

La tabla anterior permite evidenciar cómo el aumento de la saturación del terreno o la incorporación de cargas sísmicas reduce significativamente el factor de seguridad en todos los perfiles analizados. El Perfil 1 es el más sensible ante estos cambios, mientras que el Perfil 2 mantiene una estabilidad elevada incluso en escenarios críticos. Estos resultados refuerzan la importancia de considerar condiciones hidráulicas y sísmicas realistas durante la etapa de diseño y operación de la escombrera.

Tabla 8.-Comparación de factores de seguridad (FOS) por perfil y escenario en el área proyectada para la escombrera.

Perfil	Escenario	Factor de seguridad (FOS)
Perfil 1	Drenado estático	2.897
Perfil 1	Saturado (nivel freático)	2.549
Perfil 1	Pseudoestático ($kh = 0.15$)	1.371
Perfil 2	Drenado estático	4.553
Perfil 2	Saturado	4.186
Perfil 2	Pseudoestático	3.011
Perfil 3	Drenado estático	4.318
Perfil 3	Pseudoestático	2.611

5 Análisis de los resultados

5.1 Análisis del muestreo para la caracterización del suelo

Los estudios de los materiales aluviales-coluviales que conforman la saprolita sobre el intrusivo granodiorítico-cuarzodiorítico revela una estratigrafía compleja y heterogénea, dominada por la presencia de suelos de origen arcilloso intercalados con capas de arcilla limosa. Esta composición refleja procesos de meteorización y transporte que han generado depósitos con propiedades variables en cuanto a textura, plasticidad y resistencia, condicionando así el comportamiento geotécnico de los taludes en el área de estudio.

La caracterización geotécnica derivada de los ensayos de corte directo, límites de Atterberg y humedad natural permitió establecer la clasificación del material dentro del sistema SUCS como CL y CL-ML. Los valores medidos de límite líquido (35 %–55 %) y límite plástico (28 %–35 %) confirman el comportamiento plástico moderado del suelo y sustentan su asignación a estas categorías, los cuales indican una plasticidad que, si bien no es alta, puede influir en el desarrollo de deformaciones volumétricas y pérdida de resistencia en condiciones de saturación.

Bajo el modelo de resistencia de Mohr-Coulomb, los ensayos evidencian una marcada heterogeneidad en la cohesión efectiva, cuyos valores fluctúan entre 9 y 118 kPa, con un promedio de 37 kPa. El ángulo de fricción interna se sitúa en el intervalo de 17° a 23,8°, con una media de 20,15°. Asimismo, un subconjunto de datos presenta una combinación de baja cohesión (8 kPa) y mayor fricción (28,3°), lo que podría indicar cambios locales en la estructura del suelo o diferencias en el grado de consolidación y contenido de humedad. Esta discrepancia puede deberse a diferencias en la estructura del suelo, grado de alteración, o contenido de humedad durante el muestreo.

5.2 Análisis de la caracterización del macizo rocoso

Obteniendo los siguientes resultados teniendo los siguientes valores:

BH-WRSF-01A

La roca cuarzodiorítica presenta un RQD que varía entre el 23% y el 91%, dependiendo de la fragmentación observada en las muestras. La calidad de la roca disminuye en las zonas más fracturadas, pero en general se encuentra en un rango moderado a bueno.

BH-WRSF-02

El RQD para la roca cuarzodiorítica en este pozo oscila entre 0% y 86%, indicando un nivel de fracturación considerable. Las secciones con mayor fragmentación tienen un RQD bajo, mientras que las zonas más consolidadas muestran un RQD más alto.

BH-WRSF-03

En este pozo, los valores de RQD para la roca cuarzodiorítica son de 0% a 86%, similares a los observados en el pozo anterior, lo que indica una variabilidad en la calidad de la roca a lo largo de la perforación, con secciones más fracturadas y otras más sólidas.

5.3 Análisis de los perfiles -Slide

Perfil 1

La imagen presentada corresponde al análisis del Perfil 1 modelado en el software Slide, utilizando los parámetros geotécnicos obtenidos de ensayos de laboratorio. Se modelaron dos escenarios distintos para evaluar la influencia del nivel freático en la estabilidad del talud:

Escenario 1 – Condición sin nivel freático

Condición hidráulica: No se consideró presencia de agua (nivel freático ausente).

Este escenario representa condiciones secas o parcialmente drenadas, donde la matriz del suelo no está afectada por presión de poros. El FOS obtenido (2.897) indica una condición estable, con

un margen amplio de seguridad frente a la falla. Este resultado puede considerarse como el mejor caso o escenario óptimo para el diseño.

Escenario 2- Condicion con nivel freatico

Condición hidráulica: Se incluye un nivel freático definido, con presión de poros modelada como constante en el material ML.

Factor de seguridad (FOS): 2.549

La incorporación del nivel freático en el modelo evidencia una reducción de la resistencia efectiva del suelo debido al incremento de las presiones intersticiales, lo que se traduce en una disminución del coeficiente de seguridad hasta un valor de 2,549. Aunque este valor aún indica una condición estable, se observa una disminución del ~12% respecto al escenario seco, lo que confirma el efecto desfavorable de la presencia de agua en el equilibrio del talud. Este escenario representa una condición más realista durante la operación, especialmente en épocas de lluvia o saturación superficial.

Perfil 2

La imagen muestra el análisis del Perfil 2, modelado en Slide con tres unidades litológicas (CL-ML, ML y cuarzodiorita), evaluadas en dos escenarios: sin nivel freático y con nivel freático definido. Los dos modelos se estructuraron bajo el enfoque de Mohr-Coulomb, considerando parámetros resistentes derivados de pruebas controladas en laboratorio.

Escenario1

Este modelo representa condiciones completamente secas. El FOS elevado indica una alta estabilidad del talud, sin riesgo de deslizamiento bajo condiciones estáticas. La resistencia proviene principalmente de la roca base y del buen comportamiento friccional del material ML.

Escenario2

La introducción del nivel freático no afectó significativamente la estabilidad general del talud. El FOS incluso aumentó levemente respecto al modelo seco, lo cual puede explicarse por una mejora en los parámetros del material ML (mayor cohesión y fricción). Este resultado sugiere

que el talud mantiene una condición estable incluso bajo saturación, posiblemente debido a una mejor compactación del ML o una estructura favorable de drenaje interno.

Perfil 3

Perfil 3 en el software Slide, utilizando un modelo simplificado compuesto por un único material (clasificado como ML – limo de baja plasticidad), bajo la hipótesis de ausencia de nivel freático. El análisis se ejecutó con el método de resistencia Mohr-Coulomb y la búsqueda automática del plano de falla crítica.

5.3.1 Factor de seguridad (FOS): 4.318

Este valor representa una condición de alta estabilidad, correspondiente a un talud compuesto por suelo de baja densidad, moderada cohesión y buen comportamiento friccional. El modelo no considera presión de poros, por lo que se asume un estado seco o parcialmente drenado a largo plazo.

- El elevado FOS (4.318) indica que el talud, en su configuración actual y bajo condiciones secas, presenta una muy baja probabilidad de falla.
- El comportamiento resistente del material ML está dominado con un ángulo de fricción interna de 30°, valor coherente con el comportamiento típico de un material granular fino con adecuada capacidad resistente.
- La ausencia de presión intersticial maximiza la resistencia efectiva, lo que representa un escenario óptimo, útil como referencia base para comparación con escenarios más críticos (por ejemplo, con saturación).

Con el fin de evaluar la estabilidad general de la escombrera, se modelaron tres perfiles geotécnicos en el software Slide bajo diferentes condiciones: condición estática drenada sin presencia de nivel freático, condición estática drenada con incorporación de nivel freático y

escenario pseudoestático (sísmico) considerando un coeficiente sísmico horizontal $k_h=0.15$. Estos escenarios permitieron analizar el comportamiento del talud frente a variaciones hidráulicas y solicitaciones sísmicas. La tabla adjunta compila los factores de seguridad calculados para cada escenario analizado.

Tabla 9.- Resumen de los Factores de seguridad en diferentes escenarios

Perfil	Condición	k_h	Nivel freático	FOS obtenido
Perfil 1	Estático (drenado, sin agua)	0.00	No	2.897
	Estático (drenado, con agua)	0.00	Sí	2.549
	Pseudoestático (sísmico)	0.15	Sí	1.371
Perfil 2	Estático (drenado, con agua)	0.00	Sí	4.510
	Pseudoestático (sísmico)	0.15	Sí	3.037
Perfil 3	Estático (drenado, sin agua)	0.00	No	4.318
	Pseudoestático (sísmico)	0.15	No	2.611

5.3.2 Análisis de sensibilidad de parámetros geotécnicos

El objetivo de este análisis es cuantificar el impacto que tiene la variabilidad natural de las variables geomecánicas de resistencia al corte en el FS, permitiendo así evaluar la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante el enfoque determinístico convencional.

Se utilizó el modelo del Perfil 1 en condición drenada como base, aplicando el método de Bishop Simplificado aplicado a través del software especializado Slide, y se modificaron los parámetros geotécnicos del material ML en función de los rangos obtenidos en laboratorio:

Tabla 10.- Valores del perfil 1 para el modelamiento

Parámetro	Valor Base	Valor Mínimo	Valor Máximo
Cohesión (c')	10 kPa	8 kPa	37 kPa
Fricción (ϕ')	28°	17°	28.3°

Se evaluaron cinco combinaciones de parámetros dentro de estos rangos, simulando condiciones más conservadoras y más optimistas, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 11.- Combinaciones realizadas para diferentes escenarios

Caso	Cohesión (kPa)	Fricción (°)	FOS obtenido
Caso 1 (mín-mín)	8	17	1.315
Caso 2	10	20	1.654
Caso 3 (valor base)	10	28	2.549
Caso 4	20	28	2.832
Caso 5 (máx-máx)	37	28.3	3.419

El análisis demuestra que el factor de seguridad varía significativamente con pequeños cambios en los valores de cohesión y ángulo de fricción interna, lo que evidencia la alta sensibilidad del modelo frente a estos parámetros resistentes. El FOS puede pasar de un valor crítico (1.315) a uno altamente estable (>3.4) solo por efecto de la variabilidad natural de los suelos. Esto reafirma la necesidad de adoptar márgenes de seguridad adecuados y de implementar sistemas de monitoreo para validar en campo los valores asumidos en el diseño.

Para complementar el manejo de incertidumbre y evaluar la variabilidad en el comportamiento geotécnico del talud modelado en el Perfil 2, se realizó un análisis de sensibilidad paramétrica sobre el material ML, que es el que presenta mayor influencia en la estabilidad general de este perfil. A diferencia del Perfil 1, el Perfil 2 incorpora una estratigrafía más compleja (CL-ML, ML y cuarzodiorita), por lo que el análisis se focalizó en la unidad intermedia (ML), que determina la ubicación del plano potencial más desfavorable.

Se mantuvieron constantes los parámetros del material CL-ML y de la cuarzodiorita, y se variaron los parámetros del material ML dentro de los siguientes rangos obtenidos de laboratorio:

Tabla 12.- Parametros tomados en el perfil 2

Parámetro	Valor Base	Valor Mínimo	Valor Máximo
Cohesión (c')	128 kPa	100 kPa	160 kPa
Fricción (ϕ')	34°	30°	36°

Se utilizaron cinco combinaciones para representar distintos escenarios posibles, desde condiciones más conservadoras hasta condiciones óptimas, modelados bajo condición drenada y sin nivel freático.

Tabla 13.-Combinaciones realizadas para diferentes escenarios

Caso	Cohesión (kPa)	Fricción (°)	FOS obtenido
Caso 1 (mín-mín)	100	30	3.378
Caso 2	110	32	3.885
Caso 3 (valor base)	128	34	4.510
Caso 4	140	34	4.859
Caso 5 (máx-máx)	160	36	5.246

El análisis revela que el Perfil 2 es menos sensible que el Perfil 1 a la variación de parámetros geotécnicos. Incluso en el escenario más conservador ($c = 100$ kPa, $\phi = 30^\circ$), el FS se mantiene por encima de 3.3, lo que muestra una condición de alta estabilidad inherente al perfil, posiblemente debido a la calidad del material ML o a la geometría favorable del talud.

Sin embargo, esta estabilidad no debe interpretarse como garantía absoluta, ya que el comportamiento hidráulico (presión de poros, saturación localizada) podría modificar significativamente esta respuesta, tal como se evidenció en el análisis del nivel freático.

Tabla 14.- Tabla resumen aplicando el Método Monte Carlo

Caso	Perfil	Cohesión (c')(kPa)	Fricción (ϕ')(°)	FOS obtenido
1	Perfil 1	8	17	1.315
2	Perfil 1	10	20	1.654
3	Perfil 1	10	28	2.549 (<i>base</i>)
4	Perfil 1	20	28	2.832
5	Perfil 1	37	28.3	3.419
1	Perfil 2	100	30	3.378
2	Perfil 2	110	32	3.885
3	Perfil 2	128	34	4.510 (<i>base</i>)
4	Perfil 2	140	34	4.859
5	Perfil 2	160	36	5.246

5.4 Comparación con estudios similares y directrices internacionales

Los resultados obtenidos en los perfiles geotécnicos modelados para el área proyectada de la escombrera evidencian factores de seguridad satisfactorios en la mayoría de los escenarios evaluados. Sin embargo, la sensibilidad observada ante la presencia de nivel freático y condiciones sísmicas coincide con lo reportado en estudios internacionales que analizan el comportamiento de estructuras de almacenamiento masivo.

Según las directrices del ICMM (2020) y las Guías del IFC (2019), la estabilidad de escombreras debe evaluarse no solo en condición estática, sino también en escenarios críticos que incluyan saturación, lluvias intensas y cargas sísmicas. Estas recomendaciones coinciden con la metodología empleada en el presente estudio, donde se incorporaron análisis pseudoestáticos y simulaciones con diferentes condiciones hidráulicas.

Asimismo, estudios como los de Villavicencio et al. (2021) han mostrado que una reducción del FOS del 30 al 50 % bajo cargas sísmicas es común en estructuras de este tipo, lo que valida los resultados obtenidos en el Perfil 1, donde el FOS descendió de 2.897 a 1.371. Este comportamiento destaca la importancia de implementar sistemas de drenaje y monitoreo permanente como parte del diseño preventivo.

En cuanto a la aplicabilidad de las medidas de mitigación propuestas, estas se alinean con buenas prácticas internacionales que recomiendan:

- Control del nivel freático mediante drenaje superficial y subterráneo,
- Instrumentación geotécnica para monitoreo en tiempo real,
- Diseño progresivo de taludes con geometría controlada y cobertura vegetal post-operacional.

Estas acciones no solo mejoran la estabilidad durante la operación, sino que además permiten cumplir con los criterios de sostenibilidad, seguridad y cierre progresivo promovidos por los marcos regulatorios internacionales más recientes.

5.5 Diseño y Criterios Geotécnicos para el Almacenamiento de Roca

Estéril

Las instalaciones han sido diseñadas para garantizar un almacenamiento seguro y permanente de aproximadamente 843 Mt de roca estéril no económica, producida durante el período operativo

estimado de 26 años del proyecto minero. Este material estéril proviene principalmente de la roca caja, compuesta predominantemente por cuarzodiorita, un material de alta resistencia mecánica.

Es importante destacar que, tras el análisis geotécnico y geoquímico del material, se ha determinado que estas rocas no generan drenaje ácido, lo que minimiza los impactos ambientales y facilita su disposición a largo plazo.

Criterios Geotécnicos y de Diseño

- Factor de Seguridad (FOS) y Diseño Sísmico
- La estabilidad del depósito de roca estéril será garantizada cumpliendo con un Factor de Seguridad (FOS) mínimo apropiado.
- Se adoptó en el diseño un escenario sísmico correspondiente a un período de retorno de 475 años, conforme a las directrices geotécnicas y normativas aplicables.
- Manejo de Aguas Superficiales y de Contacto

Se han diseñado estructuras temporales y permanentes para el manejo eficiente del agua superficial y de contacto con el material estéril.

Los sistemas de drenaje han sido calculados para eventos de lluvia con períodos de retorno de 1 en 100 años para aguas sin contacto y 1 en 200 años para aguas de contacto con el estéril.

- **Disposición de la Roca Estéril**

La acumulación del material se realizará mediante un proceso de apilamiento progresivo de abajo hacia arriba, asegurando estabilidad estructural.

5.5.1 Almacenamiento de roca estéril

El material estéril, compuesto principalmente por roca dura, es transportado tanto a la escombrera ubicada al sur del Proyecto Cangrejos como a la trituradora primaria. Durante los primeros cinco años de operación, una parte significativa de la roca fresca es dispuesta en la escombrera. En el

primer año de preproducción, la relación entre roca fresca y saprock es de aproximadamente 4.5:1, aumentando progresivamente hasta alcanzar una proporción de 10:1 al final del quinto año, valor que se mantiene durante el resto del período operativo de la mina.

La construcción de la escombrera se planifica en cinco fases secuenciales. Las tres primeras etapas (Escombreras 1, 2 y 3) consisten en el desarrollo de diseños consecutivos destinados a formar una vía de acceso hacia la base de la instalación, ubicada a una cota aproximada de 300 metros, mediante el uso de material estéril compactado. La cuarta fase (Escombrera 4) se construye de forma ascendente, por tramos, a partir de dicha cota.

La etapa final (Escombrera 5), prevista a partir del sexto año de operación, albergará la mayor parte de los residuos generados durante el resto del ciclo minero. Para su desarrollo, se mantiene un camino de acceso por el frente de Escombrera 4, el cual permite transportar el material hasta las cotas comprendidas entre los 285 m y los 300 m.

En cuanto a su configuración geométrica, Escombrera 4 presenta un ángulo de talud intermedio de 37° (relación 1.3:1) entre bermas, mientras que el ángulo general, considerando el trazado en zigzag de la carretera, se reduce a aproximadamente 16° (relación 3.5:1). Por su parte, la geometría final proyectada para Escombrera 5 contempla un ángulo general de 18.4° (relación 3:1), garantizando así una configuración compatible con la estabilidad y la operatividad de largo plazo.

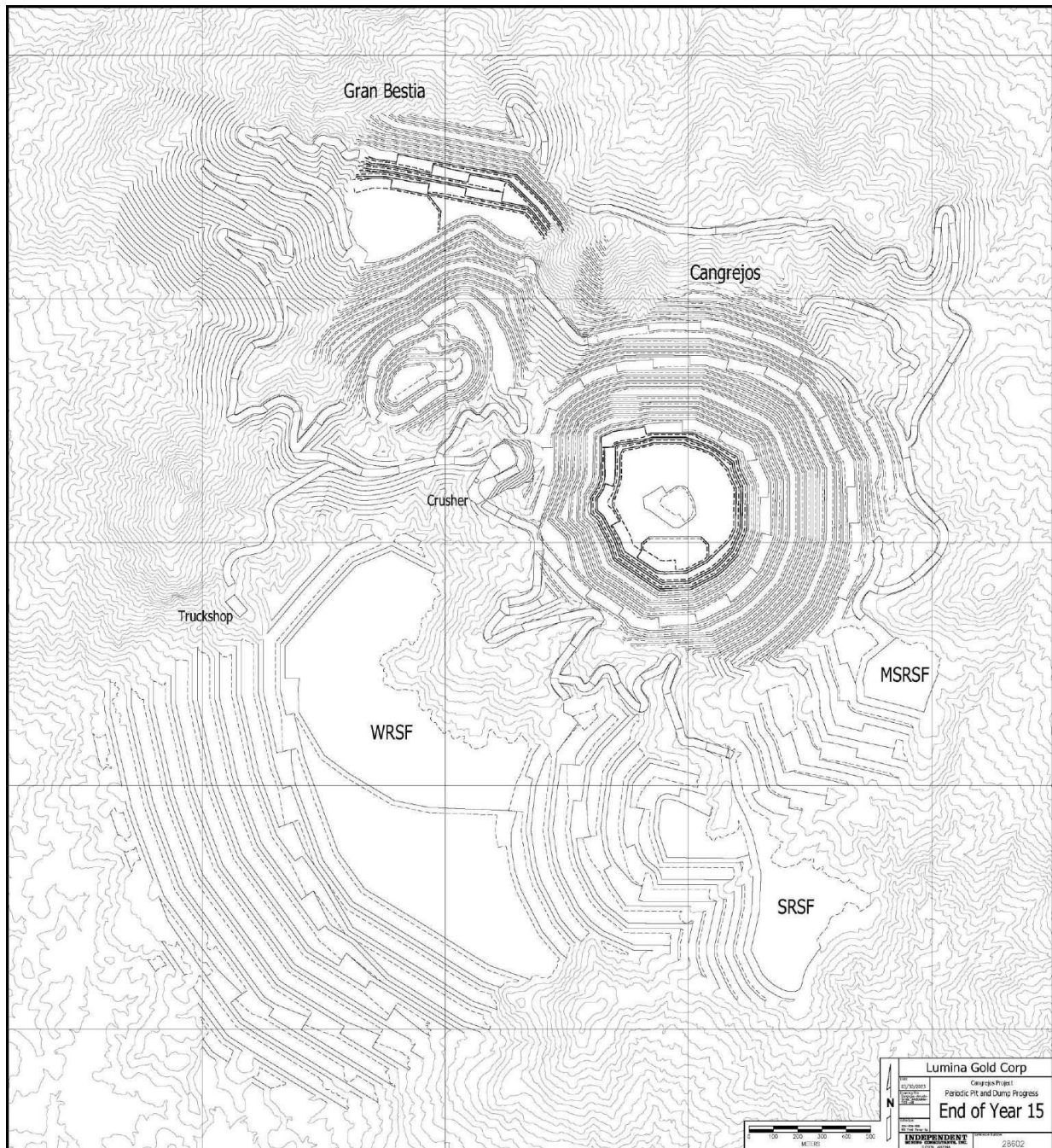


Figura 30.- Plano de las facilidades para el proyecto minero (WRSF - Escombrera) Fuente: IMC 2023

5.6 Medidas de mitigación geotécnica para la escombrera

Con base en los resultados obtenidos en el análisis de estabilidad de taludes mediante el software Slide, y considerando que el área evaluada corresponde al emplazamiento de una escombrera minera con una vida útil estimada de 26 años, se proponen a continuación una serie de medidas de mitigación orientadas a preservar la integridad estructural del depósito y minimizar los riesgos geotécnicos durante su operación.

Los análisis realizados demuestran que, si bien los taludes se encuentran en condiciones generalmente estables bajo distintos escenarios (secos y con presencia de nivel freático), existen zonas cuya estabilidad disminuye ante la saturación o cuando los materiales finos no son compactados adecuadamente. En este contexto, las siguientes medidas se consideran prioritarias para garantizar un desempeño geotécnico seguro a largo plazo:

5.6.1 Gestión y control del nivel freático

El análisis hidráulico mostró una disminución del factor de seguridad cuando se incorpora el nivel freático, especialmente en el Perfil 1. Esto resalta la influencia negativa del agua en la resistencia efectiva del suelo, particularmente en materiales limo-arcillosos (ML y CL-ML). Se propondría una implementación de sistemas de drenaje subterráneo mediante drenes horizontales, pozos de alivio o drenes franceses en zonas susceptibles.

Construcción de canales de coronación y cunetas perimetrales para desviar aguas superficiales y evitar infiltraciones hacia el cuerpo de la escombrera.

Instalación de piezómetros automáticos y manuales para el monitoreo permanente del nivel freático y su comportamiento estacional.

Evaluación del uso de coberturas impermeables o geosintéticos en zonas superiores o inactivas para reducir la infiltración directa.

5.6.2 Optimización del diseño de taludes

Los perfiles analizados muestran que la estabilidad mejora cuando se emplean configuraciones geométricas moderadas. La presencia de bermas y el control de la altura de bancos contribuyen a reducir esfuerzos desestabilizantes. Por lo tanto se debería diseñar taludes en bancos con bermas intermedias cada 10–15 metros de altura vertical, manteniendo ángulos de inclinación menores a 37°, especialmente en zonas con ML.

Revisar periódicamente el diseño de los taludes en función del avance de la escombrera y de los resultados del monitoreo.

Incorporar análisis de sensibilidad en los modelos de estabilidad, considerando variaciones en los parámetros de resistencia y en el nivel freático.

5.6.3 Manejo adecuado del material de descarga

El desempeño geomecánico de la escombrera está condicionado principalmente por las características del material dispuesto. Los materiales más finos (ML y CL-ML) pueden desarrollar presiones de poro elevadas si no se manejan correctamente. Por lo tanto, las medidas de prevención son las siguientes:

Colocación de materiales finos en capas delgadas, con compactación controlada según especificaciones de densidad y humedad óptima.

Disposición selectiva de materiales: ubicar materiales con menor cohesión alejados de los bordes de talud o zonas críticas.

Ejecución de ensayos de campo (densidad, humedad) de forma periódica para verificar la calidad de la compactación en cada fase de llenado.

5.6.4 Monitoreo geotécnico permanente

La operación prolongada de la escombrera implica un seguimiento continuo de sus condiciones geotécnicas. Es fundamental detectar de manera temprana cualquier indicio de inestabilidad. Lo que se debería hacer como medidas propuestas sería las siguientes:

Implementación de una red de instrumentación geotécnica compuesta por inclinómetros, piezómetros y extensómetros en puntos estratégicos.

Inspecciones visuales rutinarias, especialmente durante y después de lluvias intensas o eventos sísmicos.

Establecimiento de umbrales de alerta para deformaciones o variaciones de presión de poro, con protocolos de respuesta inmediata ante desviaciones.

5.6.5 Plan de contingencia y rehabilitación progresiva

Durante los 26 años de operación pueden ocurrir eventos inesperados que comprometan la estabilidad del depósito. Por ello, se recomienda contar con un plan estructurado de acción ante emergencias.

Medidas propuestas:

Desarrollo un programa de respuesta ante emergencias que incluya vías de evacuación y puntos de reunión seguros y procedimientos de intervención geotécnica.

Aplicación de medidas de cierre progresivo en las zonas que ya no reciban material, como cobertura vegetal o coberturas geotécnicas.

Evaluación periódica de zonas antiguas para detectar asentamientos diferenciales, fisuras o erosiones.

6 Conclusiones y recomendaciones:

6.1 Conclusiones:

- Los modelos numéricos realizados en Slide confirman que los taludes proyectados en el área de la escombrera presentan condiciones de estabilidad global adecuadas, con factores de seguridad (FOS) que superan los valores pequeños establecidos por normativa, tanto en condiciones drenadas como bajo escenarios pseudoestáticos con coeficiente sísmico ($k_h = 0.15$). No obstante, la incorporación del nivel freático genera una reducción significativa del FOS, lo que refuerza la necesidad de considerar escenarios hidráulicos realistas desde la etapa de diseño.
- El método de Bishop Simplificado, aplicado en la modelación numérica, demostró ser una herramienta confiable, eficiente y adecuada para materiales homogéneos, como los limos arcillosos y saprolitas presentes en el sitio. Su implementación permitió identificar superficies de falla críticas y evaluar de forma combinada los efectos de saturación y sismo sobre la estabilidad de los perfiles.
- El Perfil 1 evidenció mayor vulnerabilidad estructural, con una disminución del FOS de 2.897 a 2.549 al incluir el nivel freático, y un valor crítico de 1.371 bajo carga sísmica. Esto indica que este sector requiere medidas activas de drenaje superficial y subterráneo, además de un monitoreo constante del nivel freático a través de instrumentación geotécnica.
- El Perfil 2 mostró el mejor desempeño estructural, alcanzando factores de seguridad superiores a 4.5 incluso en condición saturada, y manteniendo más de 3.0 en escenario sísmico. Esto se explica por los parámetros geotécnicos más favorables del material ML y por una geometría de talud eficiente, aunque se recomienda seguir controlando el comportamiento hidráulico para evitar posibles puntos de saturación localizada.

- El Perfil 3, pese a su litología simple, mostró estabilidad aceptable tanto en estado seco como bajo cargas sísmicas ($FOS = 2.611$), siempre que se mantenga en condición parcialmente drenada. El material ML, al presentar una fricción interna adecuada, se comporta favorablemente mientras no se generen presiones de poro elevadas.
- Los ensayos geotécnicos de laboratorio permitieron caracterizar los materiales del área de estudio como suelos de baja a media plasticidad, con cohesión variable entre 8 y 128 kPa y ángulos de fricción interna entre 17° y 34° . Esto sugiere que la resistencia al corte está fuertemente influenciada por el ángulo de fricción, por lo que se requiere un manejo cuidadoso del material durante la operación de la escombrera.
- El análisis de sensibilidad evidenció que pequeñas variaciones en los parámetros geotécnicos afectan de forma significativa la estabilidad, particularmente en perfiles menos resistentes como el Perfil 1. Esto justifica la necesidad de emplear valores característicos conservadores y realizar simulaciones con rangos paramétricos, como parte de una estrategia de diseño robusta.
- Finalmente, el estudio demuestra que el manejo de la incertidumbre en proyectos de infraestructura minera debe ser técnico y proactivo. La integración de múltiples ensayos, el uso de modelación numérica avanzada y la simulación de escenarios críticos (hidráulicos y sísmicos) permiten fortalecer la toma de decisiones para una escombrera segura, operativamente sostenible y ambientalmente responsable, especialmente considerando los 26 años de vida útil proyectada del proyecto.

6.2 RECOMENDACIONES:

- Reforzar el control hidrogeológico en sectores críticos, especialmente en el área correspondiente al Perfil 1, mediante la implementación de sistemas de drenaje superficial (cunetas, canales de coronación) y subterráneo (drenes horizontales, filtros internos) que minimicen la acumulación de agua, reduzcan la presión de poros y prevengan condiciones de inestabilidad asociadas a la saturación.
- Implementar una red integral de monitoreo geotécnico permanente, incorporando piezómetros, inclinómetros y estaciones topográficas de control, con el fin de registrar la evolución del nivel freático, deformaciones y posibles desplazamientos en los taludes a lo largo de toda la vida útil de la escombrera. Este sistema facilitará la detección temprana de riesgos estructurales y permitirá la toma de decisiones preventivas.
- Optimizar la disposición del material de descarga dentro de la escombrera, controlando parámetros clave como la compactación, humedad y granulometría, especialmente en suelos finos (ML y CL-ML). Se recomienda evitar la acumulación de estos materiales en zonas cercanas a bordes activos, taludes inclinados o áreas con baja capacidad drenante.
- Actualizar periódicamente los modelos de estabilidad realizados en Slide, integrando nueva información geotécnica obtenida en campo y laboratorio, así como incorporando escenarios adicionales como lluvias intensas, saturación progresiva o eventos sísmicos relevantes. Además, se debe realizar análisis de sensibilidad paramétrica que permita anticipar el comportamiento del sistema ante posibles variaciones en los parámetros de resistencia.
- Establecer un plan de gestión operativa y cierre progresivo de la escombrera, que contemple medidas de rehabilitación superficial (uso de vegetación, coberturas

drenantes), ajustes en la geometría de taludes según la evolución del depósito, y un sistema de seguimiento post-operacional que garantice la estabilidad estructural, el cumplimiento normativo y la sostenibilidad ambiental en el largo plazo.

7 Bibliografía

- (IGME), I. G. (2007). Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería.
- Aspden JA, L. M. (1995). The geology and tectonic setting of the El Oro Metamorphic Complex, SW Ecuador. British Geological Survey Technical Report;.
- Bishop, A. W. (1955). 1955. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 7-17.
- CANMET. (1979). "Pit Slope Manual - Waste Embankments". Energy, Mines and Resources. Ottawa, Canadá.
- Cornforth, D. H. (2005). Landslides in practice: Investigation, analysis, and remedial/preventative options in soils. John Wiley & Sons.
- Das, B. M. (2015). Principles of Geotechnical Engineering. Cengage Learning.
- Fellenius, W. (1922). The stability of earth dams and slopes. Proceedings of the 2nd Congress on Large Dams, Washington, D.C.
- Fellenius, W. (1936). Calculation of the stability of earth dams. Transactions of the 2nd Congress on Large Dams.
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). Rock Slope Engineering. Institution of Mining and Metallurgy.
- Janbu, N. (1954). Application of composite slip surfaces for stability analysis. European Conference on Stability of Earth Slopes, 43-49.
- Krahn, J. (2004). Stability modeling with SLOPE/W: An engineering methodology. Geo-Slope International Ltd.
- Minas, I. N. (1983). Mapa hidrogeológico del Ecuador. INAMHI-DGGM.
- Morgenstern, N. R. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 79-93.
- Pratt WT, M. W. (1997). The geology of the Saraguro Group, southern Ecuador. British Geological Survey Technical Report;.
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*.
- Stead, D. E. (2000). Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modeling techniques. *Engineering Geology*,.
- Suarez, J. (s.f.). Deslizamientos: analisis geoteotecnico .

- Terzaghi, K. P. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. En R. L. Schuster & R. J. Krizek.
- Vick, S. G. (1900). Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams. Vancouver.
- Vivienda, M. d. (2015). Peligro sísmico Diseño sísmico resistente . En M. d. Vivienda. Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- ASTM D2938. (2024). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens. <https://www.astm.org/d2938-95r02.html>
- ASTM D3148-02. (2024). Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression. <https://www.astm.org/d3148-02.html>
- ASTM D5873-14. (2023). Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method (Withdrawn 2023). <https://www.astm.org/d5873-14.html>
- Barton, N. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses: International Society for Rock Mechanics. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 15, 319-368.
- Barton, N. & Bar, N. (2020). The Q-slope method for rock slope engineering in faulted rocks and fault zones. 1, 9.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI). Normativa Ecuatoriana de la Construcción – NEC-SE-GEO: Estudios Geotécnicos. Quito: MIDUVI; 2015.
- International Council on Mining and Metals (ICMM), United Nations Environment Programme (UNEP), Principles for Responsible Investment (PRI). Global Industry Standard on Tailings Management. Londres: ICMM; 2020.
- International Finance Corporation (IFC), World Bank Group. Environmental, Health, and Safety Guidelines – Mining. Washington, D.C.: World Bank Group; 2007.
- ASTM International. Annual Book of ASTM Standards. Volume 04.08: Soil and Rock (I): D420–D5876. West Conshohocken, PA: ASTM International; última edición vigente.
- Rocscience Inc. Slide2 – User Manual. Toronto, Canadá: Rocscience Inc.; 2021. Disponible en: <https://www.rocscience.com>
- International Council on Mining and Metals (ICMM). Global Industry Standard on Tailings Management. Londres: ICMM, UNEP, PRI; 2020. Disponible en: <https://globaltailingsreview.org>

- International Finance Corporation (IFC). Environmental, Health and Safety Guidelines for Mining. Washington, D.C.: World Bank Group; 2019. Disponible en: <https://www.ifc.org>
- Olalla C, Alonso EE, Gens A. Geotechnical risk management in slope design: Applications to mine slopes. *Géotechnique Letters*. 2020;10(3):375–382. doi:10.1680/jgele.20.00010
- Villavicencio G, Espinace R, Palma A, Fourie AB. Tailings dam failures: Updated statistical overview and recommendations for future practice. *Engineering Geology*. 2021;293:106301. doi:10.1016/j.enggeo.2021.106301
- Pineda J. Geotechnical risk and design principles for tailings and waste rock storage facilities. *Australian Geomechanics Journal*. 2019;54(2):23–38.
- ASTM International. ASTM D3080/D3080M-11 – Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2020.
- Reid D, Leroi E, Franklin J. Assessing and managing the uncertainty in geotechnical engineering. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2018;51(3):317–332. doi:10.1144/qjegh2017-129
- International Council on Mining and Metals (ICMM). Global Industry Standard on Tailings Management. ICMM, UNEP, PRI; 2020.
- International Finance Corporation (IFC). Environmental, Health and Safety Guidelines for Mining. IFC–World Bank Group; 2019.
- Villavicencio G, Espinace R, Palma A, Fourie AB. Tailings dam failures: Updated statistical overview and recommendations for future practice. *Engineering Geology*. 2021; 293:106301.

8 Anexos:

Resultados de los ensayos

Ausenco			Location : Waste Rock : Storage Facility Start date : 08/07/2022 Finish date : 09/07/2022 Drilling company : HP Hubbard Perforaciones Type of drilling : Hidracore 5000 Hammer : SPT Logged : L.M.S. Reviewed and checked : D.A.C. Superficial condition : Low slope			BOREHOLE BH-WRSF-01A (Page 1 of 2) Coordinate System : PSAD 56 North : 9 611 930.77 East : 631 251.06 Elevation (masl) : 337 Phreatic level (m) : 21.90 Depth (m) : 50.00				
Cangrejos Project Pre-Feasibility Study Factual Report Lumina Gold Corp. 106505-01										
Depth (m)	USCS	Graph	MS= Maximum size SU= Undrained shear strength. Qu= Unconfined compressive strength	N° Sample	Sample Rec. (cm/cm)	N° Blows (in 6")	N (SPTvalue)	N° blows Graphic 10 50	Observations	
			Field description							
0	CL-ML		Silty clay, low to medium plasticity, firm to stiff, moist, reddish brown color, homogeneous structure. Gravel= 00%; Sand= 05%; Fines= 95%.	SPT-01 h=1.5 m.	36/45	5/2/2	4		Residual soil, Saprolite, mainly clays and silts SU (0.2 m, 0.675 Kg/cm2) (0.75 m, 0.6725Kg/cm2) (1.1 m, 0.625 Kg/cm2) (1.3 m, 0.250 Kg/cm2) (2.15 m, 0.700 Kg/cm2) (2.3 m, 0.500 Kg/cm2) (2.5 m, 0.500 Kg/cm2) (2.9 m, 0.375 Kg/cm2) (4.1 m, 0.375Kg/cm2) (5.2 m, 0.425 Kg/cm2) (5.65 m, 0.375 Kg/cm2) Qu (0.15 m, 1.260 Kg/cm2) (0.45 m, 1.600 Kg/cm2) (0.7 m, 1.250 Kg/cm2) (0.1 m, 1.250 Kg/cm2) (2.1 m, 0.750 Kg/cm2) (2.25 m, 2.60 Kg/cm2)	
1			CL-ML	Silty clay, low to medium plasticity, firm, dry, yellowish brown color, homogeneous structure. Gravel= 00%; Sand= 10%; Fines= 90%.	SPT-02 h=3.45 m.	40/45	1/3/3			6
2			CL-ML	Silty clay, low to medium plasticity, firm to stiff, moist, reddish brown color, homogeneous structure. Gravel= 00%; Sand= 12%; Fines= 88%.	SPT-03 h=4.50 m.	40/45	3/3/6			9
3	CL-ML		Silty clay, low to medium plasticity, firm to stiff, moist, reddish brown color, homogeneous structure. Gravel= 00%; Sand= 12%; Fines= 88%.	SPT-04 h=7.40 m.	44/45	2/2/8	10		Saprock Qu (2.4 m, 1.60 Kg/cm2) (2.85 m, 1.10Kg/cm2) (3.3 m, 0.76 Kg/cm2) (4.0 m, 0.25 Kg/cm2) (4.2 m, 0.50 Kg/cm2) (4.35 m, 0.76 Kg/cm2) (5.15m, 0.5 Kg/cm2) (5.35 m, 0.75 Kg/cm2) (5.75 m, 2.50 Kg/cm2)	
4			CL-ML							Silty clay, low to medium plasticity, firm to stiff, moist, reddish brown color, homogeneous structure. Gravel= 00%; Sand= 12%; Fines= 88%.
5			CL-ML							Silty clay, low to medium plasticity, firm to stiff, moist, reddish brown color, homogeneous structure. Gravel= 00%; Sand= 12%; Fines= 88%.
6	ML		Silty clay, low to medium plasticity, firm to stiff, moist, reddish brown color with yellowish tones, homogeneous structure. Gravel= 00%; Sand= 14%; Fines= 86%.	SPT-04 h=7.40 m.	44/45	2/2/8	10		SU (6.3 m, 0.325 Kg/cm2) (7.0 m, 0.313 Kg/cm2) (8.1 m, 0.300 Kg/cm2) (8.5 m, 0.375 Kg/cm2) (9.6 m, 0.150 Kg/cm2) (11.0 m, 0.438Kg/cm2) (11.65 m, 0.438Kg/cm2) Qu (6.10 m, 0.250 Kg/cm2) (6.45m, 0.250 Kg/cm2) (7.20 m, 0.250 Kg/cm2) (8.00m, 0.250 Kg/cm2) (8.30 m, 0.500Kg/cm2) (9.10 m, 1.500 Kg/cm2) (9.50 m, 0.230 Kg/cm2) (11.00 m, 0.500Kg/cm2)	
7			CL-ML							Silty clay, low to medium plasticity, firm to stiff, moist, reddish brown color with yellowish tones, homogeneous structure. Gravel= 00%; Sand= 14%; Fines= 86%.
8			CL-ML							Silty clay, low to medium plasticity, firm to stiff, moist, reddish brown color with yellowish tones, homogeneous structure. Gravel= 00%; Sand= 14%; Fines= 86%.
9	ML		Low plasticity silt, soft to very stiff, moist, yellowish brown, homogeneous structure. Presence of isolated gravels of MS= 1.5". Gravel= 04%; Sand= 10%; Fines= 86%.	SPT-04 h=7.40 m.	44/45	2/2/8	10		SU (6.3 m, 0.325 Kg/cm2) (7.0 m, 0.313 Kg/cm2) (8.1 m, 0.300 Kg/cm2) (8.5 m, 0.375 Kg/cm2) (9.6 m, 0.150 Kg/cm2) (11.0 m, 0.438Kg/cm2) (11.65 m, 0.438Kg/cm2) Qu (6.10 m, 0.250 Kg/cm2) (6.45m, 0.250 Kg/cm2) (7.20 m, 0.250 Kg/cm2) (8.00m, 0.250 Kg/cm2) (8.30 m, 0.500Kg/cm2) (9.10 m, 1.500 Kg/cm2) (9.50 m, 0.230 Kg/cm2) (11.00 m, 0.500Kg/cm2)	
10			ML							Low plasticity silt, soft to very stiff, moist, yellowish brown, homogeneous structure. Presence of isolated gravels of MS= 1.5". Gravel= 04%; Sand= 10%; Fines= 86%.
11			ML							Low plasticity silt, soft to very stiff, moist, yellowish brown, homogeneous structure. Presence of isolated gravels of MS= 1.5". Gravel= 04%; Sand= 10%; Fines= 86%.
12	ML	Low plasticity silt, soft to very stiff, moist, yellowish brown, homogeneous structure. Presence of isolated gravels of MS= 1.5". Gravel= 04%; Sand= 10%; Fines= 86%.								

Ausenco			Location : Waste Rock : Storage Facility Start date : 08/07/2022 Finish date : 09/07/2022 Drilling company : HP Hubbard Perforaciones Type of drilling : Hidracore 5000 Hammer : SPT Logged : L.M.S. Reviewed and checked : D.A.C. Superficial condition : Low slope			BOREHOLE BH-WRSF-01A (Page 2 of 2) Coordinate System : PSAD 56 North : 9 611 930.77 East : 631 251.06 Elevation (masl) : 337 Phreatic level (m) : 21.90 Depth (m) : 50.00				
Cangrejos Project Pre-Feasibility Study Factual Report Lumina Gold Corp.										
106505-01										
MS= Maximum size SU= Undrained shear strength. Qu= Unconfined compressive strength										

Ausenco			Location : Waste Rock : Storage Facility Start date : 15/07/2022 Finish date : 16/07/2022 Drilling company : HP Hubbard Drilling Type of drilling : Hammer : SPT Logged : K.C.C. / L.M.S. Checked and reviewed : D.A.C. Superficial condition : Moderate slope			BOREHOLE BH-WRSF-02 (Page 1 of 1) Coordinate System : PSAD 56 North : 9 612 195 East : 631 335 Elevation (masl) : 386 Phreatic level (m) : 5,90 Depth (m) : 30,00				
Cangrejos Project Pre-feasibility Study Factual Report Lumina Gold Corporation S.A.C. 106505-01										
Depth (m)	USCS	Graph	Field description	N° sample	Recov. sample(frac.)	N° blows (in 6")	N (SPT value)	N° blows graphic	Observations	
			MS= Maximum size SU= Undrained shear strength. Qu= Unconfined compressive strength							
0										
1	CL-ML		Silty clay, low to medium plasticity, firm to stiff, moist, brown to reddish brown, homogeneous structure. Gravel= 0%; Sand= 5%; Fines= 95%.	SPT-01	45/45	3/4/5	9		Residual soil (Saprolite).	
2				h=1,50						
3	CL-ML		Silty clay, low to medium plasticity, firm to stiff, moist consistency, brown to reddish brown color, homogeneous structure. Presence of gravel of MS= 2". Gravel= 0%; Sand= 5%; Fines= 95%.	SPT-02	45/45	4/5/8	13		SU (0.4m, 0.525 Kg/cm2) (2.6m, 0.250 Kg/cm2) (4.4m, 0.225 Kg/cm2) (6.35m,0.150 Kg/cm2) Qu (0.1m, 1.260 Kg/cm2) (0.5m, 0.750 Kg/cm2) (1.2m, 0.500 Kg/cm2) (2.2m, 0.250 Kg/cm2) (3.6m, 0.250 Kg/cm2) (4.3m, 0.250 Kg/cm2) (5.05m, 0.250 Kg/cm2) (5.50m, 0.250 Kg/cm2) (6.60m, 0.250 Kg/cm2) (6.90m, 0.600 Kg/cm2)	
4	CL		Low plasticity clay, rigid to hard, moist, brown color, homogeneous structure. Gravel= 4%; Sand= 10%; Fines= 86%.	h=3,00						
5				h=4,50						
6	CL		Low plasticity clay with sand, stiff to hard ,very moist, brown color, homogeneous structure. Gravel= 10%; Sand= 15%; Fines= 75%.	SPT-04	45/45	19/15/21	36			
7	CL		Low plasticity clay with gravel, hard, moist, brown color, homogeneous structure. Presence of cobbles of MS= 6" in 15%. Gravel= 20%; Sand= 5%; Fines= 75%.	h=6,00						
8	SC		Clayey sand, non plastic to low plasticity, medium dense, moist, brown, homogeneous structure. Presence of medium to fine grained sand. Gravel= 10%; Sand= 50%; Fines= 40%.						Residual soil (Saprock).	
9	SC		Clayey sand with gravel, non plastic to low plasticity, dense , moist, brown color, homogeneous structure. Medium to coarse grained sand. Gravel= 15%; Sand= 55%; Fines= 30%.							
10	GP-GC		Poorly graded gravel with clay and sand, non plastic to low plasticity. medium dense, moist, brown color, homogeneous structure. Presence of fine to medium grained sand. Gravel= 10%; Sand= 50%; Fines= 40%.							
11			End of soil logging at 10.05 m. Contact with Quartzdiorite bedrock, Hardness>2.0.							
12										

Ausenco			Location : Waste Rock Start date : 01/08/2022 Finish date : 02/08/2022 Drilling company : HP Hubbard Perforaciones Type of drilling : Hidracore 5000 Type of drill : SPT Logged : L.M.S. Reviewed and checked : D.A.C. Superficial condition : Low slope			BOREHOLE BH-WRSF-03 (Page 1 of 1) Coordinate System : PSAD 56 North : 9 612 791 East : 630 766 Elevation (masl) : 345 Phreatic level (m) : 1.9 Depth (m) : 17.05			
Cangrejos Project Pre-Feasibility Study Factual Report Lumina Gold Corp.									
106505-01									
Depth (m)	USCS	Graph	MS= Maximum size SU= Undrained shear strength. Qu= Unconfined compressive strength	N° Sample	Sample Rec. (cm/cm)	N° Blows (in 6")	N (SPT value)	N° blows Graphic	Observations
			Field description					10 50	
0			Clayey sand, non plastic to low plasticity, medium dense, moist, brown color, medium to coarse grain, homogeneous structure. Gravel= 00%; Sand= 70%; Fines= 30%.						Transported Sand (Colluvial-Alluvial Deposit)
1	SC			SPT-01	40/45	4/7/10	17		
2			Clayey sand, non plastic to low plasticity, very dense, moist, brown color, medium to coarse grain, homogeneous structure. Gravel= 5%; Sand= 60%; Fines= 35%.	h=1,50 m					
3	SC			SPT-02	25/45	18/R	50		
4			Clayey sand, low plasticity, loose , moist, medium to coarse grain, brown color, homogeneous structure. Presence of subangular gravels of MS= 0.5". Gravel= 02%; Sand= 58%; Fines= 40%.	h=3,00					
5	SC			SPT-03	45/45	1/5/5	10		
6			End of soil logging at 4.95 m. Contact with Quartzdiorite bedrock, Hardness>2.0.	h=4,50					

10-07-2022 C:\Users\laura.rojas\Desktop\Cangrejos temporal\Revision perforaciones\BH-WRSF-03\ingles\BH-WRSF-03 bor

Anexo 2.- BH-WRSF-01A

 LabGeo Group S.A.C. Laboratorio Geotécnico & de Concreto	INFORME DE ENSAYO COMPRESIÓN SIMPLE EN ROCA ASTM D7012
---	---

INFORME N° : LABGEO-22-Cr-299.01

Fecha de Emisión : 12/09/2022

Fecha de Recepción : 07/09/2022

Datos del cliente

CLIENTE : AUSENCO PERÚ S.A.C.

DIRECCIÓN : Av. Javier Prado Este Nro. 444 Urb. Jardín (piso 8, 9 y 10) Lima - Lima - San Isidro

PROYECTO : Cangrejos PFS

UBICACIÓN : Ecuador

IDENTIFICACION : BH-WRSF-01A

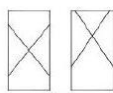
MUESTRA : M-1

PROFUNDIDAD : 26.75 - 26.98

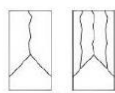
TIPO DE ROCA : ---

Resultados del ensayo:

Fecha de Ensayo	AREA (cm ²)	Carga (kg.)	Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia (Mpa)	Tipo de Fractura
12/09/2022	55.9	10567	188.9	18.5	2



Tipo 1
Conos razonablemente bien formados en ambos extremos, fisuras a través de los cabezales de menos de 25 mm (1 pulgada)



Tipo 2
Conos bien formados en un extremo, fisuras verticales a través de los cabezales, conos no bien definidos en el otro extremo



Tipo 3
Fisuras verticales encolumnadas a través de ambos extremos, conos mal formados



Tipo 4
Fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos; golpea suavemente con un martillo para distinguirla del Tipo 1



Tipo 5
Fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)



Tipo 6
Similar a Tipo 5 pero el extremo del cilindro es puntiagudo

Muestra de perforación entregada por el cliente.

OBSERVACIONES : La identificación del tipo de roca no ha sido proporcionada por el cliente.

Determinación del contenido de humedad no realizado, muestras superficialmente seca.


 ROMERO CRISTOBAL
 CHRISTIAN HENRY
 atencioncliente@labgeo.pe
 Fecha: 12/09/2022 16:43
 Firmado con www.tocapu.pe

Jefe de Laboratorio


 VASQUEZ LOPEZ DAVID
 LEONCIO
 INGENIERO CIVIL CIP 057142
 atencioncliente@labgeo.pe
 Fecha: 12/09/2022 16:44
 Firmado con www.tocapu.pe

Director de Laboratorio

CIP-57142



Sello

Referencia	ASTM D7012 - 14e1	Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures
------------	-------------------	---

Los resultados solo están relacionados con el ítem ensayado. La muestra ha sido identificada y entregada en el laboratorio por el cliente.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de Calidad de

LabGeo Group S.A.C.

Prohibido la reproducción Total o Parcial, excepto con autorización previa y por escrito de LabGeo Group S.A.C.

LABGEO-F-239 / Ver: 00

Laboratorio: Av. Nicolas Aylón N°9746 (Carretera Central km 13) - Ate Vitarte

Página 1 de 1

Tel.: 987428353 / 989891817 e-mail: atencioncliente@labgeo.pe www.labgeo.pe

Project name:	Cangrejos PFS	Report N°: AP-112-22
Client:	Lumina Gold	Project N°: 106505-01
Sample N° / Depth (m):	BH-WRSF-01A / M-2 33.87-34.05	Date: 12-Set-22
Rock Type:	QUARTZ DIORITE	
Requested by:	Ali Hooshier / Scott Effen	
Location:	Ecuador	

N°	Type	W (mm)	D (mm)	Force (N)	De ² (mm ²)	De (mm)	Is	F	Is(50) (MPa)	σc (MPa)	ISRM
1	a	168.84	84.42	27,414	7,126.74	84.42	3.85	1.27	4.87	117	R5
Mean (MPa)									4.87	117	R5

Is(50): Size-corrected point load strength index
σc: Uniaxial compressive strength

Typical modes of failure:

ISRM	Description
R0	Extremely Weak Rock
R1	Very Weak Rock
R2	Weak Rock
R3	Medium Strong Rock
R4	Strong Rock
R5	Very Strong Rock
R6	Extremely Strong Rock

- (a) Valid diametral tests
- (b) Valid axial tests
- (c) Valid block tests
- (d) Invalid core tests
- (e) Invalid axial tests

Note:

The sample were provided and identified by the petitioner.

These results apply only to the samples supplied and tested for the above reference job. The data and information are proprietary and can not be released without the authorization of Ausenco Perú S.A.C. By accepting the data and results represented on this page, client agrees to limit the liability of Ausenco Perú S.A.C. from Client and all other parties claims arising out the use of this data to the cost for the respective test(s) represented here, and the Client agrees to indemnify and hold harmless Ausenco Perú S.A.C. from and against all liability in excess of the aforementioned limit.

Performed by: **IOV** Developed by: **IOV** Checked by: **TOM** Report N°: **AP-112-22**

Project name:	Cangrejos PFS	Report N°:	AP-112-22
Client:	Lumina Gold	Project N°:	106505-01
Sample N° / Depth (m):	BH-WRSF-01A / M-3 42.50-42.75	Date:	12-Set-22
Rock Type:	QUARTZ DIORITE		
Requested by:	Ali Hooshier / Scott Effen		
Location:	Ecuador		

N°	Type	W (mm)	D (mm)	Force (N)	De ² (mm ²)	De (mm)	Is	F	Is(50) (MPa)	σ _c (MPa)	ISRM
1	a	169.06	84.53	17,692	7,145.32	84.53	2.48	1.27	3.14	75	R4
2	a	169.12	84.56	24,776	7,150.39	84.56	3.46	1.27	4.39	105	R5
Mean (MPa)									3.76	90	R4

Is(50): Size-corrected point load strength index
σ_c: Uniaxial compressive strength

Typical modes of failure:

ISRM	Description
R0	Extremely Weak Rock
R1	Very Weak Rock
R2	Weak Rock
R3	Medium Strong Rock
R4	Strong Rock
R5	Very Strong Rock
R6	Extremely Strong Rock

- (a) Valid diametral tests
- (b) Valid axial tests
- (c) Valid block tests
- (d) Invalid core tests
- (e) Invalid axial tests

Note:

The sample were provided and identified by the petitioner.

These results apply only to the samples supplied and tested for the above reference job. The data and information are proprietary and can not be released without the authorization of Ausenco Perú S.A.C. By accepting the data and results represented on this page, client agrees to limit the liability of Ausenco Perú S.A.C. from Client and all other parties claims arising out the use of this data to the cost for the respective test(s) represented here, and the Client agrees to indemnify and hold harmless Ausenco Perú S.A.C. from and against all liability in excess of the aforementioned limit.

Performed by:	Developed by:	Checked by:	Report N°:
IOV	IOV	TOM	AP-112-22

Project name:	Cangrejos PFS	Report N°:	AP-112-22
Client:	Lumina Gold	Project N°:	106505-01
Sample N° / Depth (m):	BH-WRSF-01A / M-4 45.70-45.85	Date:	12-Set-22
Rock Type:	QUARTZ DIORITE		
Requested by:	Ali Hooshair / Scott Effen		
Location:	Ecuador		

N°	Type	W (mm)	D (mm)	Force (N)	De ² (mm ²)	De (mm)	Is	F	Is(50) (MPa)	σ _c (MPa)	ISRM
1	a	179.12	84.56	48,180	7,150.39	84.56	6.74	1.27	8.54	205	R5
Mean (MPa)									8.54	205	R5

Is(50): Size-corrected point load strength index
σ_c: Uniaxial compressive strength

Typical modes of failure:

ISRM	Description
R0	Extremely Weak Rock
R1	Very Weak Rock
R2	Weak Rock
R3	Medium Strong Rock
R4	Strong Rock
R5	Very Strong Rock
R6	Extremely Strong Rock

- (a) Valid diametral tests
- (b) Valid axial tests
- (c) Valid block tests
- (d) Invalid core tests
- (e) Invalid axial tests

Note:

The sample were provided and identified by the petitioner.

These results apply only to the samples supplied and tested for the above reference job. The data and information are proprietary and can not be released without the authorization of Ausenco Perú S.A.C. By accepting the data and results represented on this page, client agrees to limit the liability of Ausenco Perú S.A.C. from Client and all other parties claims arising out the use of this data to the cost for the respective test(s) represented here, and the Client agrees to indemnify and hold harmless Vector from and against all liability in excess of the aforementioned limit.

Performed by:	Developed by:	Checked by:	Report N°:
IOV	IOV	TOM	AP-112-22



Point Load Strength Index

ASTM D-5731

GEOTECHNICAL LABORATORY

Project name:	Cangrejos PFS	Report N°:	AP-112-22
Client:	Lumina Gold	Project N°:	106505-01
Sample N° / Depth (m):	BH-WRSF-02 / M-1 12.70-12.98	Date:	12-Set-22
Rock Type:	QUARTZ DIORITE		
Requested by:	Ali Hooshiair / Scott Effen		
Location:	Ecuador		

N°	Type	W (mm)	D (mm)	Force (N)	De ² (mm ²)	De (mm)	Is	F	Is(50) (MPa)	σ _c (MPa)	ISRM
1	a	126.32	63.16	34,614	3,989.19	63.16	8.68	1.11	9.64	231	R5
2	a	126.30	63.15	38,022	3,987.92	63.15	9.53	1.11	10.59	254	R6
Mean (MPa)									10.11	243	R5

Is(50): Size-corrected point load strength index
 σ_c: Uniaxial compressive strength

Typical modes of failure:

ISRM	Description
R0	Extremely Weak Rock
R1	Very Weak Rock
R2	Weak Rock
R3	Medium Strong Rock
R4	Strong Rock
R5	Very Strong Rock
R6	Extremely Strong Rock

- (a) Valid diametral tests
 (b) Valid axial tests
 (c) Valid block tests
 (d) Invalid core tests
 (e) Invalid axial tests

Note:

The sample were provided and identified by the petitioner.

These results apply only to the samples supplied and tested for the above reference job. The data and information are proprietary and can not be released without the authorization of Ausenco Perú S.A.C. By accepting the data and results represented on this page, client agrees to limit the liability of Ausenco Perú S.A.C. from Client and all other parties claims arising out of the use of this data to the cost for the respective test(s) represented here, and the Client agrees to indemnify and hold harmless Ausenco Perú S.A.C. from and against all liability in excess of the aforementioned limit.

Performed by:	Developed by:	Checked by:	Report N°:
IOV	IOV	TOM	AP-112-22

INFORME N° : LABGEO-22-Cr-299.02

Fecha de Emisión : 12/09/2022
Fecha de Recepción : 07/09/2022

Datos del cliente

CLIENTE : AUSENCO PERÚ S.A.C.
DIRECCIÓN : Av. Javier Prado Este Nro. 444 Urb. Jardín (piso 8, 9 y 10) Lima - Lima - San Isidro
PROYECTO : Cangrejos PFS

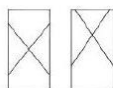
UBICACIÓN : Ecuador

IDENTIFICACION : BH-WRSF-02
PROFUNDIDAD : 18.35 - 18.62

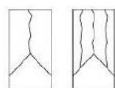
MUESTRA : M-3
TIPO DE ROCA : ---

Resultados del ensayo:

Fecha de Ensayo	AREA (cm ²)	Carga (kg.)	Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia (Mpa)	Tipo de Fractura
12/09/2022	31.4	19410	617.4	60.5	3



Tipo 1
Conos razonablemente bien formados en ambos extremos, fisuras a través de los cabezales de menos de 35 mm (1 pulgada)



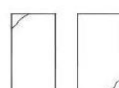
Tipo 2
Conos bien formados en un extremo, fisuras verticales a través de los cabezales, conos no bien definidos en el otro extremo



Tipo 3
Fisuras verticales encorvadas a través de ambos extremos, conos mal formados



Tipo 4
Fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos; golpee suavemente con un martillo para distinguirla del Tipo 1



Tipo 5
fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)



Tipo 6
Similar a Tipo 5 pero el extremo del cilindro es puntiagudo

Muestra de perforación entregada por el cliente.

OBSERVACIONES : La identificación del tipo de roca no ha sido proporcionada por el cliente.
Determinación del contenido de humedad no realizado, muestras superficialmente seca.

CHRISTIAN ROMERO CRISTOBAL
JEFE DE LABORATORIO

ROMERO CRISTOBAL
CHRISTIAN HENRY
atencioncliente@labgeo.pe
Fecha: 12/09/2022 16:44
Firmado con www.tocapu.pe

DAVID LEONCIO VASQUEZ LOPEZ
INGENIERO CIVIL
Reg. CP. N° 57142

VASQUEZ LOPEZ DAVID
LEONCIO
INGENIERO CIVIL CIP 057142
atencioncliente@labgeo.pe
Fecha: 12/09/2022 16:45
Firmado con www.tocapu.pe



Jefe de Laboratorio

Director de Laboratorio
CIP-57142

Sello

Referencia	ASTM D7012 - 14e1	Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures
------------	-------------------	---

Los resultados solo están relacionados con el ítem ensayado. La muestra ha sido identificada y entregada en el laboratorio por el cliente.
Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de Calidad de LabGeo Group S.A.C.
Prohibido la reproducción Total o Parcial, excepto con autorización previa y por escrito de LabGeo Group S.A.C.

Project name:	Cangrejos PFS	Report N°:	AP-112-22
Client:	Lumina Gold	Project N°:	106505-01
Sample N° / Depth (m):	BH-WRSF-02 / M-2 17.03- 17.26	Date:	12-Set-22
Rock Type:	QUARTZ DIORITE		
Requested by:	Ali Hooshair / Scott Eifen		
Location:	Ecuador		

N°	Type	W (mm)	D (mm)	Force (N)	De ² (mm ²)	De (mm)	Is	F	Is(50) (MPa)	σc (MPa)	ISRM
1	a	136.68	68.34	30,714	4,670.36	68.34	6.58	1.15	7.57	182	R5
2	a	136.46	68.23	31,262	4,655.33	68.23	6.72	1.15	7.72	185	R5
Mean (MPa)									7.65	184	R5

Is(50): Size-corrected point load strength index
σc: Uniaxial compressive strength

Typical modes of failure:

ISRM	Description
R0	Extremely Weak Rock
R1	Very Weak Rock
R2	Weak Rock
R3	Medium Strong Rock
R4	Strong Rock
R5	Very Strong Rock
R6	Extremely Strong Rock

- (a) Valid diametral tests
- (b) Valid axial tests
- (c) Valid block tests
- (d) Invalid core tests
- (e) Invalid axial tests

Note:

The sample were provided and identified by the petitioner.

These results apply only to the samples supplied and tested for the above reference job. The data and information are proprietary and can not be released without the authorization of Ausenco Perú S.A.C. By accepting the data and results represented on this page, client agrees to limit the liability of Ausenco Perú S.A.C. from Client and all other parties claims arising out of the use of this data to the cost for the respective test(s) represented here, and the Client agrees to indemnify and hold harmless Ausenco Perú S.A.C. from and against all liability in excess of the aforementioned limit.

Performed by:	Developed by:	Checked by:	Report N°:
IOV	IOV	TOM	AP-112-22

Project name:	Cangrejos PFS	Report N°:	AP-112-22
Client:	Lumina Gold	Project N°:	106505-01
Sample N° / Depth (m):	BH-WRSF-02 / M-4 19.20-19.56	Date:	12-Set-22
Rock Type:	QUARTZ DIORITE		
Requested by:	Ali Hooshair / Scott Effen		
Location:	Ecuador		

N°	Type	W (mm)	D (mm)	Force (N)	De ² (mm ²)	De (mm)	Is	F	Is(50) (MPa)	σc (MPa)	ISRM
1	a	126.32	63.16	30,316	3,989.19	63.16	7.60	1.11	8.44	203	R5
2	a	126.36	63.18	40,972	3,991.71	63.18	10.26	1.11	11.40	274	R6
Mean (MPa)									9.92	238	R5

Is(50): Size-corrected point load strength index
σc: Uniaxial compressive strength

Typical modes of failure:

ISRM	Description
R0	Extremely Weak Rock
R1	Very Weak Rock
R2	Weak Rock
R3	Medium Strong Rock
R4	Strong Rock
R5	Very Strong Rock
R6	Extremely Strong Rock

- (a) Valid diametral tests
- (b) Valid axial tests
- (c) Valid block tests
- (d) Invalid core tests
- (e) Invalid axial tests

Note:

The sample were provided and identified by the petitioner.

These results apply only to the samples supplied and tested for the above reference job. The data and information are proprietary and can not be released without the authorization of Ausenco Perú S.A.C. By accepting the data and results represented on this page, client agrees to limit the liability of Ausenco Perú S.A.C. from Client and all other parties claims arising out the use of this data to the cost for the respective test(s) represented here, and the Client agrees to indemnify and hold harmless Vector from and against all liability in excess of the aforementioned limit.

Performed by:	Developed by:	Checked by:	Report N°:
IOV	IOV	TOM	AP-112-22

Project name:	Cangrejos PFS	Report N°:	AP-112-22
Client:	Lumina Gold	Project N°:	106505-01
Sample N° / Depth (m):	BH-WRSF-02 / M-5 20.20-20.40	Date:	12-Set-22
Rock Type:	QUARTZ DIORITE		
Requested by:	Ali Hooshair / Scott Effen		
Location:	Ecuador		

N°	Type	W (mm)	D (mm)	Force (N)	De ² (mm ²)	De (mm)	Is	F	Is(50) (MPa)	σ _c (MPa)	ISRM
1	a	126.28	63.14	22,194	3,986.66	63.14	5.57	1.11	6.18	148	R5
2	a	126.32	63.16	28,992	3,989.19	63.16	7.27	1.11	8.07	194	R5
Mean (MPa)									7.13	171	R5

Is(50): Size-corrected point load strength index
σ_c: Uniaxial compressive strength

Typical modes of failure:

ISRM	Description
R0	Extremely Weak Rock
R1	Very Weak Rock
R2	Weak Rock
R3	Medium Strong Rock
R4	Strong Rock
R5	Very Strong Rock
R6	Extremely Strong Rock

- (a) Valid diametral tests
- (b) Valid axial tests
- (c) Valid block tests
- (d) Invalid core tests
- (e) Invalid axial tests

Note:

The sample were provided and identified by the petitioner.

These results apply only to the samples supplied and tested for the above reference job. The data and information are proprietary and can not be released without the authorization of Ausenco Perú S.A.C. By accepting the data and results represented on this page, client agrees to limit the liability of Ausenco Perú S.A.C. from Client and all other parties claims arising out the use of this data to the cost for the respective test(s) represented here, and the Client agrees to indemnify and hold harmless Vector from and against all liability in excess of the aforementioned limit.

Performed by:	Developed by:	Checked by:	Report N°:
IOV	IOV	JSG	AP-112-22

Project name:	Cangrejos PFS	Report N°:	AP-112-22
Client:	Lumina Gold	Project N°:	106505-01
Sample N° / Depth (m):	BH-WRSF-02 / M-6 20.95-21.21	Date:	12-Set-22
Rock Type:	QUARTZ DIORITE		
Requested by:	Ali Hooshir / Scott Effen		
Location:	Ecuador		

N°	Type	W (mm)	D (mm)	Force (N)	De ² (mm ²)	De (mm)	Is	F	Is(50) (MPa)	σ _c (MPa)	ISRM
1	a	126.36	63.18	37,242	3,991.71	63.18	9.33	1.11	10.37	249	R5
2	a	126.32	63.16	32,020	3,989.19	63.16	8.03	1.11	8.92	214	R5
Mean (MPa)									9.64	231	R5

Is(50): Size-corrected point load strength index
σ_c: Uniaxial compressive strength

Typical modes of failure:

ISRM	Description
R0	Extremely Weak Rock
R1	Very Weak Rock
R2	Weak Rock
R3	Medium Strong Rock
R4	Strong Rock
R5	Very Strong Rock
R6	Extremely Strong Rock

- (a) Valid diametral tests
- (b) Valid axial tests
- (c) Valid block tests
- (d) Invalid core tests
- (e) Invalid axial tests

Note:

The sample were provided and identified by the petitioner.

These results apply only to the samples supplied and tested for the above reference job. The data and information are proprietary and can not be released without the authorization of Ausenco Perú S.A.C. By accepting the data and results represented on this page, client agrees to limit the liability of Ausenco Perú S.A.C. from Client and all other parties claims arising out the use of this data to the cost for the respective test(s) represented here, and the Client agrees to indemnify and hold harmless Vector from and against all liability in excess of the aforementioned limit.

Performed by:	Developed by:	Checked by:	Report N°:
IOV	IOV	JSG	AP-112-22

Project name:	Cangrejos PFS	Report N°:	AP-112-22
Client:	Lumina Gold	Project N°:	106505-01
Sample N° / Depth (m):	BH-WRSF-02 / M-8 27.39-27.56	Date:	12-Set-22
Rock Type:	QUARTZ DIORITE		
Requested by:	Ali Hooshair / Scott Effen		
Location:	Ecuador		

N°	Type	W (mm)	D (mm)	Force (N)	De ² (mm ²)	De (mm)	Is	F	Is(50) (MPa)	σ _c (MPa)	ISRM
1	a	126.28	63.14	24,702	3,986.66	63.14	6.20	1.11	6.88	165	R5
Mean (MPa)									6.88	165	R5

Is(50): Size-corrected point load strength index
σ_c: Uniaxial compressive strength

Typical modes of failure:

ISRM	Description
R0	Extremely Weak Rock
R1	Very Weak Rock
R2	Weak Rock
R3	Medium Strong Rock
R4	Strong Rock
R5	Very Strong Rock
R6	Extremely Strong Rock

- (a) Valid diametral tests
- (b) Valid axial tests
- (c) Valid block tests
- (d) Invalid core tests
- (e) Invalid axial tests

Note:

The sample were provided and identified by the petitioner.

These results apply only to the samples supplied and tested for the above reference job. The data and information are proprietary and can not be released without the authorization of Ausenco Perú S.A.C. By accepting the data and results represented on this page, client agrees to limit the liability of Ausenco Perú S.A.C. from Client and all other parties claims arising out the use of this data to the cost for the respective test(s) represented here, and the Client agrees to indemnify and hold harmless Vector from and against all liability in excess of the aforementioned limit.

Performed by:	Developed by:	Checked by:	Report N°:
IOV	IOV	JSG	AP-112-22

Project name:	Cangrejos PFS	Report N°:	AP-112-22
Client:	Lumina Gold	Project N°:	106505-01
Sample N° / Depth (m):	BH-WRSF-02 / M-8 28.85-29.19	Date:	12-Set-22
Rock Type:	QUARTZ DIORITE		
Requested by:	Ali Hooshir / Scott Effen		
Location:	Ecuador		

N°	Type	W (mm)	D (mm)	Force (N)	De ² (mm ²)	De (mm)	Is	F	Is(50) (MPa)	σ _c (MPa)	ISRM
1	a	126.38	63.19	28,124	3,992.98	63.19	7.04	1.11	7.83	188	R5
2	a	126.42	63.21	13,622	3,995.50	63.21	3.41	1.11	3.79	91	R4
Mean (MPa)									5.81	139	R5

Is(50): Size-corrected point load strength index
 σ_c: Uniaxial compressive strength

Typical modes of failure:

ISRM	Description
R0	Extremely Weak Rock
R1	Very Weak Rock
R2	Weak Rock
R3	Medium Strong Rock
R4	Strong Rock
R5	Very Strong Rock
R6	Extremely Strong Rock

- (a) Valid diametral tests
- (b) Valid axial tests
- (c) Valid block tests
- (d) Invalid core tests
- (e) Invalid axial tests

Note:

The sample were provided and identified by the petitioner.

These results apply only to the samples supplied and tested for the above reference job. The data and information are proprietary and can not be released without the authorization of Ausenco Perú S.A.C. By accepting the data and results represented on this page, client agrees to limit the liability of Ausenco Perú S.A.C. from Client and all other parties claims arising out the use of this data to the cost for the respective test(s) represented here, and the Client agrees to indemnify and hold harmless Ausenco Perú S.A.C. from and against all liability in excess of the aforementioned limit.

Performed by: **IOV** Developed by: **IOV** Checked by: **JSG** Report N°: **AP-112-22**

ANEXO 4: TP-WRSF-02



LABORATORIO GEOTÉCNICO

Contenido de Humedad

ASTM - D2216

Nombre del Proyecto:	Cangrejos PFS	
Client:	Lumina Gold	
Sample N° / Depth (m):	TP-WRSF-02 / M-01 / 1.30 - 1.60	Report N°: AP-112-22
Descripción / Zona:	SAPROLITE	Project N°: 106505-01
Requested by:	Ali Hooshir / Scott Elfen	Date: 13-Oct-22
Location:	Ecuador	

N° de Prueba	1	2	3
(1) Peso Recip + Suelo Húmedo (g)	95.0	92.9	92.7
(2) Peso Recip + Suelo Seco (g)	71.2	68.5	68.0
(3) Peso Recipiente (g)	0.0	0.0	0.0
(4) Peso del Agua (1) - (2)	23.8	24.4	24.7
(5) Peso Suelo Seco (2) - (3)	71.2	68.5	68.0
(6) Humedad (4/5)*100 %	33.4	35.6	36.3
Humedad Promedio (%)	35.1		

Notas: Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Estos datos se aplican solo a las muestras indicadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Ausenco Perú S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Ausenco Perú S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos al costo de los ensayos respectivos representados aquí.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Report N°:
DCF	HEV	JSG	AP-112-22

Project name:	Cangrejos PFS	Report N°: AP-112-22
Client:	Lumina Gold	Project N°: 106505-01
Sample N° / Depth (m):	TP-WRSF-02 / M-02(1) / 0.30 - 3.00	
Area:	SAPROLITE	
Requested by:	Ali Hooshir / Scott Elfen	Date: 12-Set-22
Location:	Ecuador	

Particles >3" (%) : ---
Gravel (%) : 0.6
Sand (%) : 10.6
Silt and clay (%) : 88.9

Atterberg limits:

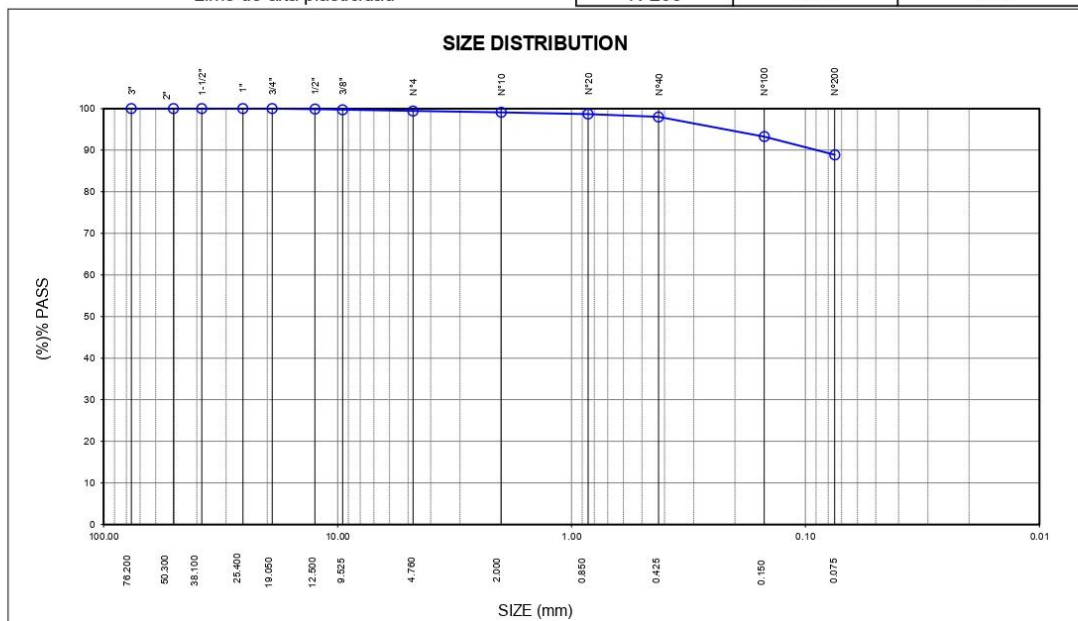
LL (%) : 54
PL (%) : 34
PI (%) : 20

Moisture content (%) : 42.3

USCS Classification : MH

Limo de alta plasticidad

Sieve	Size (mm)	% passing
3"	76.200	100.0
2"	50.300	100.0
1 1/2"	38.100	100.0
1"	25.400	100.0
3/4"	19.050	100.0
1/2"	12.500	99.9
3/8"	9.525	99.7
N°4	4.760	99.4
N°10	2.000	99.1
N°20	0.850	98.7
N°40	0.425	98.0
N°100	0.150	93.3
N°200	0.075	88.9



Note:

The sample were provided and identified by the petitioner.

These results apply only to the samples supplied and tested for the above reference job. The data and information are proprietary and can not be released without the authorization of AUSENCO PERU S.A.C. By accepting the data and results represented on this page, client agrees to limit the liability of AUSENCO PERU S.A.C. from Client and all other parties claims arising out of the use of this data to the cost for the respective test(s) represented here, and the Client agrees to indemnify and hold harmless Ausenco from and against all liability in excess of the aforementioned limit.

Performed by:	Developed by:	Checked by:	Report N°:
RTA	HEV	JSG	AP-112-22

Calle Pacto Andino 227, Chorrillos, Lima, (51-1) 266-7874, Fax (51-1) 203-4630, www.ausenco.com

Project name:	Cangrejos PFS	Report N°:	AP-112-22
Client:	Lumina Gold	Project N°:	106505-01
Sample N° / Depth (m):	TP-WRSF-02 /M-02(1) / 0.30 - 3.00	Date:	12-Set-22
Area:	SAPROLITE		
Requested by:	Ali Hooshlar / Scott Elfen		
Location:	Ecuador		

RETAINED MATERIAL INTO THE MESH No. 4			
% Retained into the mesh No. 4	P ₁	0.6	
Test N°		1	2
1) Weight of gravel S.S.D. in air (gr)			
2) Weight of gravel S.S.D. in water (gr)			
3) Dry weight of gravel (gr)			
4) Apparent Specific Gravity of Solids (3) / [(3)-(2)]	G _{s1}		
5) Specific Gravity of Dry Solid (3) / [(1)-(2)]			
6) Specific Gravity of Solid S.S.D. (1) / [(1)-(2)]			
7) Absortion (%) [(1)-(3)] / (3) * 100			
			Average

MATERIAL PASSING MESH N° 4			
% Passes the mesh N° 4	P ₂	99.4	
1) N° de Pycnometer		19	11
2) Pycnometer Weight (gr)		140.4	140.8
3) Weight of Dry Sample (gr)		100.0	100.0
4) Weight of Dry Sample + Pycnometer (gr)		240.4	240.8
5) Weight of Dry Sample + Pycnometer + Water (gr)		702.1	702.5
6) Pycnometer Weight + Water Weight		638.8	639.4
7) Specific Gravity of Solids (3)/[(3)+(6)-(5)]	G _{s2}	2.72	2.71
8) Temperature (°C)		18	18
9) Temperature correction (K)		1.0004	1.0004
10) Specific Gravity of Solids correction (7)*(9)	G _{s2} (20°C)	2.72	

$$G_{s_{prom}} = \frac{1}{\frac{P_1}{100 \times G_{s1}} + \frac{P_2}{100 \times G_{s2} (20^\circ C)}}$$

$$G_{s_{prom}} = 2.72$$

Note:

El G_{prom} weight is a function of Apparent Specific Gravity.
The sample were provided and identified by the petitioner.

These results apply only to the samples supplied an tested for the above reference job. The data and information are proprietary and can not be released without the authorization of AUSENCO PERU S.A.C. By accepting the data and results represented on this page, client agrees to limit the liability of AUSENCO PERU S.A.C. from Client and all other parties claims arising out the use of this data to the cost for the respective test(s) represented here, and the Client agrees to indemnify and hold harmless Ausenco from and against all liability in excess of the aforementioned limit.

Performed by:	Developed by:	Checked by:	Report N°:
RTA	HEV	JSG	AP-112-22

Calle Pacto Andino 227, Chorrillos, Lima, (51-1) 266-7874, Fax (51-1) 203-4630, www.ausenco.com

Nombre del Proyecto:	Cangrejos PFS			Report N°:	AP-112-22		
Client:	Lumina Gold			Requested by:	Ali Hooshdar / Scott Elfen		
Project N°:	106505-01			Location:	Ecuador		
Sample N° / Depth (m):	TP-WRSF-02 / M-01 / 1.30 - 1.60			Date:	26-Oct-22		
Area:	SAPROLITE						

DATOS DEL ESPÉCIMEN:

Altura Inicial	2.29 cm	clasif. SUCS	MH
Diámetro	5.08 cm	Gravedad Específica	2.71
Altura de sólidos	1.09 cm	Peso de Sólidos (gr.)	59.80
Altura Inicial de Vacíos	1.2 cm	Relación de Vacíos inic.	1.101

ETAPA DE CARGA :

Carga Aplicada (kPa)	Lect. del Extens. (cm)	Asent. δh (cm)	Altura de la muestra (cm)	Variación Relación Vacíos $\Delta e = \delta H / H_s$	Relación de vacíos e_i	Coef. de Consolid. " C_v " (cm ² /s)	Coef de Variación Volum. " m_v " (kPa) ⁻¹
1	12.717		2.287		1.1006	---	---
7	12.704	0.01346	2.274	0.00487	1.0958	0.03454	0.00045
13	12.694	0.02286	2.264	0.00827	1.0924	0.05160	0.00024
27	12.675	0.04242	2.245	0.01534	1.0853	0.04179	0.00025
53	12.644	0.07315	2.214	0.02645	1.0742	0.04179	0.00020
106	12.597	0.12014	2.167	0.04345	1.0572	0.04179	0.00015
213	12.505	0.21209	2.075	0.07670	1.0239	0.02132	0.00015
426	12.345	0.37186	1.915	0.13447	0.9662	0.05160	0.00013
852	12.129	0.58852	1.698	0.21282	0.8878	0.04179	0.00009
1703	11.866	0.85141	1.436	0.30789	0.7928	0.02132	0.00005

ETAPA DE DESCARGA

Carga Aplicada (kPa)	Lect. del Extens. (cm)	Asent. δh (cm)	Altura de la muestra (cm)	Variación Relación Vacíos $\Delta e = \delta H / H_s$	Relación de vacíos e_i	Carga Aplicada (kPa)	"k" (cm/s)
						1	---
						7	1.508E-06
						13	1.230E-06
						27	1.036E-06
1703	11.866	0.85141	1.436	0.30789	0.7928	53	8.143E-07
1703	11.866	0.85141	1.436	0.30789	0.7928	106	6.225E-07
426	11.891	0.82652	1.460	0.29888	0.8018	213	3.107E-07
426	11.891	0.82652	1.460	0.29888	0.8018	426	6.532E-07
106	11.979	0.73863	1.548	0.26710	0.8335	852	3.588E-07
106	11.979	0.73863	1.548	0.26710	0.8335	1703	1.111E-07
106	11.979	0.73863	1.548	0.26710	0.8335	Kprom = 3.585E-07 cm/s (considerando solo los 4 valores finales)	
13	12.058	0.65888	1.628	0.23826	0.8624		
7	12.107	0.60985	1.677	0.22054	0.8801		
1	12.133	0.58471	1.702	0.21144	0.8892		

Notas: Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante

Estos datos se aplican solo a las muestras indicadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Ausenco Perú S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Ausenco Perú S.A.C. de cualquier redamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos al costo de los ensayos respectivos representados aquí.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Report N°:
CCC	HEV	JSG	AP-112-22

Nombre del Proyecto:	Cangrejos PFS		
Client:	Lumina Gold		
Project N°:	106505-01	Report N°:	AP-112-22
Location:	Ecuador	Requested by:	Ali Hooshyar / Scott Elfen
Sample N° / Depth (m):	TP-WRSF-02 / M-01 / 1.30 - 1.60	Date:	26-Oct-22
Area:	SAPROLITE		

DATOS DEL ESPECIMEN		
	Inicial	Final
Contenido de Humedad, %	34.3	33.9
Densidad Seca (gr/cm³)	1.29	1.51
Relación de Vacíos	1.101	0.793

RESULTADOS DEL ENSAYO		
Presión de Preconsolidación, P_c	320	
Índice de Compresión, C_c	0.31	
Índice de Expansión, C_s	0.03	

Notas: Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Estos datos se aplican solo a las muestras indicadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Ausenco Perú S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Ausenco Perú S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos al costo de los ensayos respectivos representados aquí.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Report N°:
CCC	HEV	JSG	AP-112-22

Nombre del Proyecto: **Cangrejos PFS**
Client: **Lumina Gold**

Project N°: **106505-01**

Location: **Ecuador**

Sample N° / Depth (m): **TP-WRSF-02 / M-01 / 1.30 - 1.60**

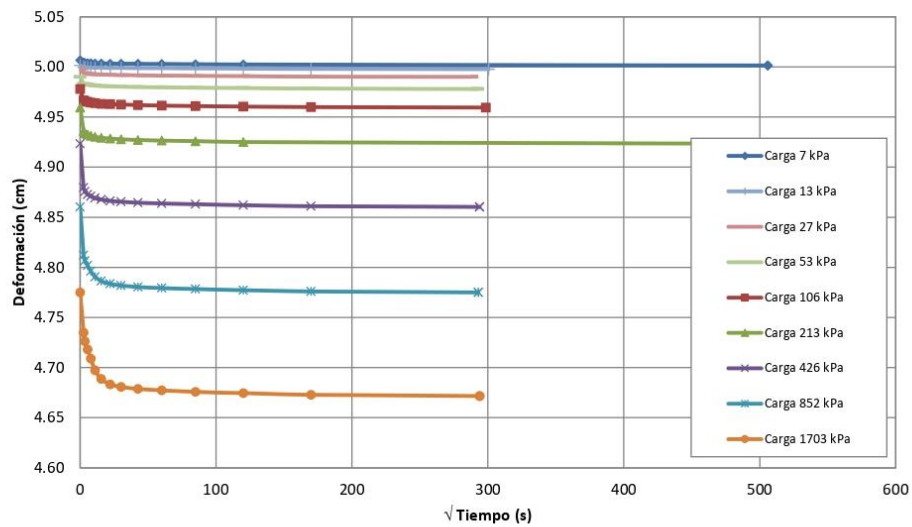
Area: **SAPROLITE**

Report N°: **AP-112-22**

Requested by: **Ali Hooshlar / Scott Effen**

Date: **26-Oct-22**

Curvas de asentamiento



Notas: Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante

Estos datos se aplican solo a las muestras indicadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Ausenco Perú S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Ausenco Perú S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos al costo de los ensayos respectivos representados aquí.

Realizado por:

CCC

Ingresado por:

HEV

Revisado por:

JSG

Report N°:

AP-112-22

Nombre del Proyecto:	Cangrejos PFS		
Cliente	Lumina Gold		
Descripción / Zona:	SAPROLITE	N° Informe de Lab :	AP-112-22
Solicitado por:	Ali Hooshar / Scott Elfen	N° de Proyecto:	106505-01
N° de muestra / Prof. (m):	TP-WRSF-02 / M-01 / 1.30 - 1.60	Fecha:	13-Oct-22
Ubicación:	Ecuador		

N° de Prueba	1	2	3
1) Peso de Muestra húmeda (gr)	95.0	92.9	92.7
2) Diámetro de la muestra (cm)	5.1	5.1	5.1
3) Altura de la muestra (cm)	2.6	2.6	2.6
4) Área de la muestra (cm²)	20.2	20.2	20.2
5) Volumen de la muestra (cm³)	51.8	51.8	51.8
6) Densidad húmeda (gr/cm³)	1.832	1.792	1.788
7) Contenido de Humedad (%)	33.4	35.6	36.3
8) Densidad de la muestra seca (gr/cm³)	1.373	1.321	1.312

Densidad natural promedio (gr/cm³)	1.804
Densidad seca promedio (gr/cm³)	1.335

Humedad promedio (%)	35.1
----------------------	-------------

Observaciones:

Notas: Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante

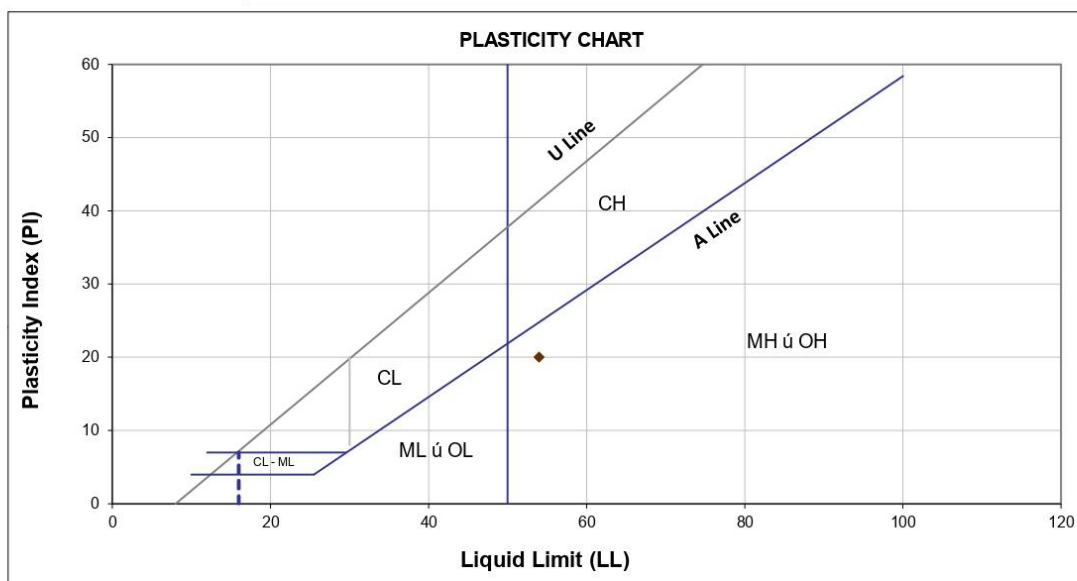
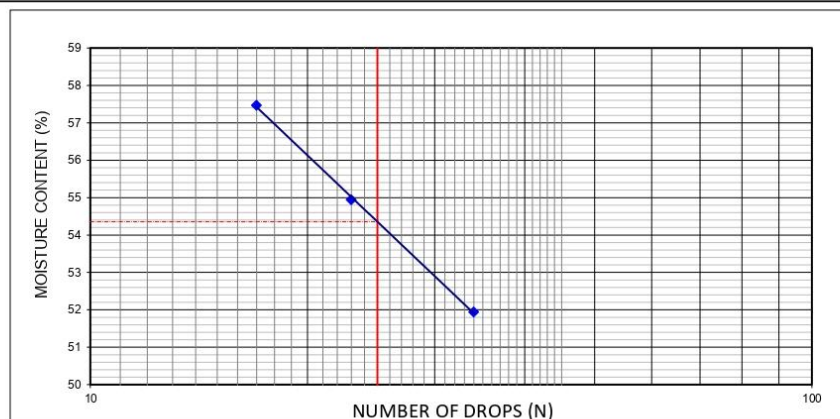
Estos datos se aplican solo a las muestras indicadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Ausenco Perú S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Ausenco Perú S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del cliente y otras partes por el uso de estos datos al costo de los ensayos respectivos representados aquí.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	N° Informe de Lab :
DCF	HEV	JSG	AP-112-22

Project name:	Cangrejos PFS	Report N°: AP-112-22
Client:	Lumina Gold	Project N°: 106505-01
Sample N° / Depth (m):	TP-WRSF-02 / M-02(1) / 0.30 - 3.00	
Area:	SAPROLITE	
Requested by:	Ali Hooshiair / Scott Elfen	Date: 12-Set-22
Location:	Ecuador	

Atterberg limits:

LL (%): 54
PL (%): 34
PI (%): 20



Note:
The sample were provided and identified by the petitioner.

These results apply only to the samples supplied and tested for the above reference job. The data and information are proprietary and can not be released without the authorization of AUSENCO PERU S.A.C. By accepting the data and results represented on this page, client agrees to limit the liability of AUSENCO PERU S.A.C. from Client and all other parties claims arising out of the use of this data to the cost for the respective test(s) represented here, and the Client agrees to indemnify and hold harmless Ausenco from and against all liability in excess of the aforementioned limit.

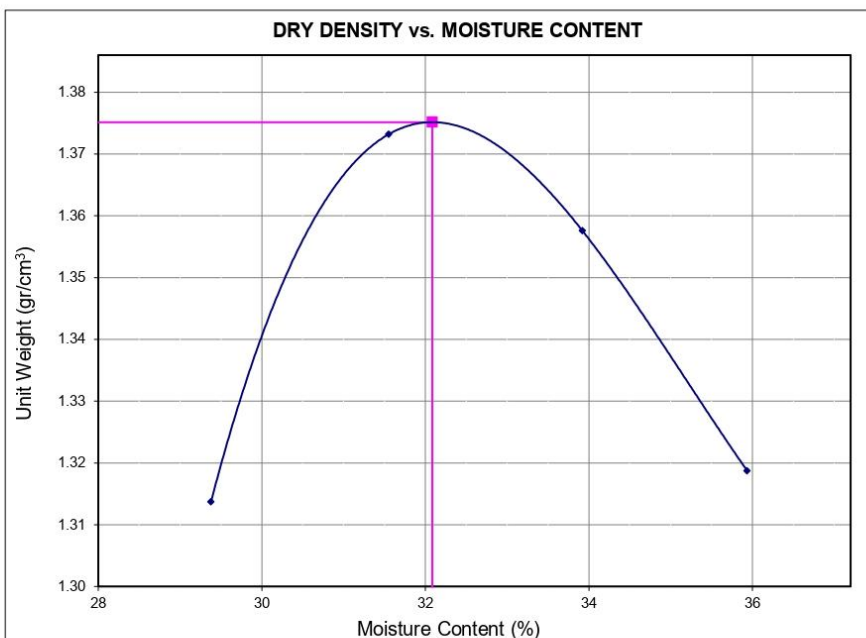
Performed by:	Developed by:	Checked by:	Report N°:
RTA	HEV	JSG	AP-112-22

Calle Pacto Andino 227, Chorrillos, Lima, (51-1) 266-7874, Fax (51-1) 203-4630, www.ausenco.com

GEOTECHNICAL LABORATORY

Project name:	Cangrejos PFS			Report N°:	AP-112-22
Client:	Lumina Gold			Project N°:	106505-01
Sample N° / Depth (m):	TP-WRSF-02 / M-02(1) / 0.30 - 3.00				
Area:	SAPROLITE				
Requested by:	Ali Hooshir / Scott Elfen			Date:	12-Set-22
Location:	Ecuador				

Test N°	1	2	3	4	5	6
Dry unit weight (gr/cm ³)	1.314	1.373	1.358	1.319		
Moisture content(%)	29.2	31.4	33.7	35.7		



Maximum dry unit weight (gr/cm ³)	1.375
Optimum moisture content (%)	31.9

Corrected max. dry unit weight (gr/cm ³)	--
Corrected opt. moisture content (%)	--

Oversize fraction	
GS (Bulk)	=
w(%)	=

Note:

The sample were provided and identified by the petitioner.

These results apply only to the samples supplied and tested for the above reference job. The data and information are proprietary and can not be released without the authorization of AUSENCO PERU S.A.C. By accepting the data and results represented on this page, client agrees to limit the liability of AUSENCO PERU S.A.C. from Client and all other parties claims arising out the use of this data to the cost for the respective test(s) represented here, and the Client agrees to indemnify and hold harmless Ausenco from and against all liability in excess of the aforementioned limit.

Performed by:	Developed by:	Checked by:	Report N°:
RTA	HEV	JSG	AP-112-22

Nombre del Proyecto:	Cangrejos PFS	
Client:	Lumina Gold	
Sample N° / Depth (m):	TP-WRSF-02 / M-02(2) / 0.30 - 3.00	Project N°: 106505-01
Descripción / Zona:	SAPROLITE	Report N°: AP-112-22
Requested by:	Ali Hooshier / Scott Elfen	Date: 9-Oct-22
Location:	Ecuador	

Estado de la muestra: **Remoldeada al 95% del Proctor (Dens Seca = 1.375g/cm³) y O.C.H. = 31.9 %**
 Clasificación SUCS: **ML**
 Confinamiento efectivo: **200 kPa**

Datos del Ensayo

Diámetro (cm)	7.03	Densidad inicial seca(gr/cm³)	1.321	Densidad final seca(gr/cm³)	1.345
Altura (cm)	9.05	Humedad Inicial (%)	31.9	Humedad final (%)	36.4
Gravedad de Sólidos	2.77	Saturación inicial (%)	80.7	Saturación final (%)	95

Calculo del Parámetro B

Presión de Poros PSI	Presión de Celda PSI	B
17.1	16.5	0.97
20	19.5	

Medición del Coeficiente de Permeabilidad

N°	Gradiente (Δh/l)	Vol (V) (cm3)	Caudal (Q) (cm3/seg)	Perm. (K _r) (cm/seg)	T °C	KT20°C (cm/seg)
1	1.08	0.10	3.33E-04	3.9E-06	18	4.1E-06
2	1.06	0.10	3.33E-04	3.9E-06	18	4.1E-06
3	1.04	0.10	3.33E-04	4.0E-06	18	4.2E-06
4	1.02	0.10	3.33E-04	4.0E-06	18	4.2E-06
5	0.99	0.10	3.33E-04	4.0E-06	18	4.3E-06
Promedio	1.04	0.10	3.33E-04	4.0E-06	18	4.2E-06

Notas: Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Estos datos se aplican solo a las muestras indicadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Ausenco Perú S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Ausenco Perú S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos al costo de los ensayos respectivos representados aquí.

Grado de compactación: ☐ Bajo ☐ Ligero ☐ Medio ☐ Alto ☐ Elevado

Realizado por: DCF Ingresado por: HEV Revisado por: JSG Report N°: AP-112-22

Nombre del Proyecto: **Cangrejos PFS**

Client: **Lumina Gold**

Sample N° / Depth (m): **TP-WRSF-02 /M-02(2) / 0.30 - 3.00**

Report N°: **AP-112-22**

Descripción / Zona: **SAPROLITE**

Project N°: **106505-01**

Requested by: **Ali Hooshlar / Scott Elfen**

Date: **17-Oct-22**

Location: **Ecuador**

Clasificación SUCS: ML

Estado : Remoldeado al 95% de MDS (Densidad Seca= 1.306 g/cm³) y OCH= 31.9 %

Etapas de consolidación	Inicial	Final	Velocidad (pulg/min)	
Altura (cm)	14.95	14.38		0.01
Diámetro (cm)	7.03	6.80	Parámetro "B"	0.97
Humedad (%)	31.90	28.14	Presión de celda	803
Densidad seca (gr/cc)	1.305	1.451	Contra presión	103
			Esf. Efect. Inicial	700

Deformación (%)	Esf. Dev. kPa	μ kPa	s_s kPa	s_t kPa	$\bar{p}$ kPa	$\bar{q}$ kPa	$\bar{q} / \bar{p}$	Oblicuidad (s_t/s_s)
0.00	0.00	0.00	700.00	700.00	700.00	0.00	0.00	1.00
0.05	70.86	2.50	697.50	768.36	732.93	35.43	0.05	1.10
0.10	104.46	5.84	694.16	798.62	746.39	52.23	0.07	1.15
0.20	155.09	16.57	683.43	838.52	760.98	77.55	0.10	1.23
0.35	227.18	35.34	664.66	891.84	778.25	113.59	0.15	1.34
0.50	279.16	52.05	647.95	927.12	787.54	139.58	0.18	1.43
0.75	353.22	78.46	621.54	974.76	798.15	176.61	0.22	1.57
1.00	407.08	100.25	599.75	1,006.83	803.29	203.54	0.25	1.68
1.25	480.10	126.88	573.12	1,053.22	813.17	240.05	0.30	1.84
1.50	516.06	143.21	556.79	1,072.85	814.82	258.03	0.32	1.93
1.75	569.73	163.94	536.06	1,105.79	820.93	284.87	0.35	2.06
2.00	597.96	175.23	524.77	1,122.73	823.75	298.98	0.36	2.14
2.50	676.09	202.95	497.05	1,173.14	835.10	338.04	0.40	2.36
3.00	732.01	221.04	478.96	1,210.97	844.96	366.01	0.43	2.53
3.50	777.56	233.15	466.85	1,244.41	855.63	388.78	0.45	2.67
4.00	819.56	242.90	457.10	1,276.67	866.88	409.78	0.47	2.79
4.50	855.74	249.41	450.59	1,306.33	878.46	427.87	0.49	2.90
5.00	879.77	253.15	446.85	1,326.62	886.74	439.89	0.50	2.97
6.00	946.04	255.57	444.43	1,390.47	917.45	473.02	0.52	3.13
7.00	1,000.04	256.02	443.98	1,444.02	944.00	500.02	0.53	3.25
8.00	1,050.46	251.76	448.24	1,498.71	973.48	525.23	0.54	3.34
9.00	1,099.81	245.47	454.53	1,554.34	1,004.44	549.91	0.55	3.42
10.00	1,152.69	237.68	462.32	1,615.00	1,038.66	576.34	0.55	3.49
11.00	1,198.32	228.83	471.17	1,669.48	1,070.32	599.16	0.56	3.54
12.00	1,235.66	220.85	479.15	1,714.81	1,096.98	617.83	0.56	3.58
13.00	1,272.13	211.99	488.01	1,760.14	1,124.08	636.06	0.57	3.61
14.00	1,301.16	206.43	493.57	1,794.74	1,144.16	650.58	0.57	3.64

Nota:

Los datos de remoldeo (Densidad seca y contenido de humedad) han sido indicados por el cliente.

Observaciones:

Los parámetros de resistencia cortante estimados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional especializado en geotecnia.

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante

Grado de compactación:

☐ Bajo
 ☐ Ligero
 ☒ Medio
 ☐ Alto
 ☐ Elevado

Realizado por:

CCC

Ingresado por:

HEV

Revisado por:

JSG

Report N°:

AP-112-22

Calle Pacto Andino 227, Chorrillos, Lima, (51-1) 266-7874, Fax (51-1) 203-4630, www.ausenco.com

Nombre del Proyecto: **Cangrejos PFS**

Client: **Lumina Gold**

Sample N° / Depth (m): **TP-WRSF-02 / M-02(2) / 0.30 - 3.00**

Report N°: **AP-112-22**

Descripción / Zona: **SAPROLITE**

Project N°: **106505-01**

Requested by: **Ali Hooshiar / Scott Elfen**

Date: **17-Oct-22**

Location: **Ecuador**

Clasificación SUCS: ML

Estado : Remoldeado al 95% de MDS (Densidad Seca= 1.306 g/cm³) y OCH= 31.9 %

Etapas de consolidación	Inicial	Final	Velocidad (pulg/min)	
Altura (cm)	14.95	14.63	Parámetro "B"	0.01
Diámetro (cm)	7.03	6.76	Presión de celda	0.97
Humedad (%)	31.90	34.93	Contra presión	453
Densidad seca (gr/cc)	1.305	1.443	Esf. Efect. Inicial	103
				350

Deformación (%)	Esf. Desv. kPa	μ kPa	s_s kPa	s_1 kPa	$\bar{p}$ kPa	$\bar{q}$ kPa	$\bar{q} / \bar{p}$	Oblicuidad (s_1/s_2)
0.00	0.00	0.00	350.00	350.00	350.00	0.00	0.00	1.00
0.05	47.48	6.26	343.74	391.22	367.48	23.74	0.06	1.14
0.10	74.57	10.58	339.42	414.00	376.71	37.29	0.10	1.22
0.20	115.35	18.48	331.52	446.87	389.20	57.67	0.15	1.35
0.35	172.01	28.75	321.25	493.26	407.25	86.00	0.21	1.54
0.50	219.70	39.51	310.49	530.19	420.34	109.85	0.26	1.71
0.75	290.96	53.20	296.80	587.76	442.28	145.48	0.33	1.98
1.00	337.64	64.13	285.87	623.50	454.68	168.82	0.37	2.18
1.25	389.94	77.61	272.39	662.33	467.36	194.97	0.42	2.43
1.50	416.30	84.33	265.67	681.97	473.82	208.15	0.44	2.57
1.75	460.17	94.44	255.56	715.73	485.65	230.09	0.47	2.80
2.00	480.64	99.72	250.28	730.93	490.61	240.32	0.49	2.92
2.50	519.67	113.04	236.96	756.64	496.80	259.84	0.52	3.19
3.00	548.13	121.60	228.40	776.53	502.46	274.06	0.55	3.40
3.50	576.83	127.24	222.76	799.60	511.18	288.42	0.56	3.59
4.00	586.01	131.95	218.05	804.05	511.05	293.00	0.57	3.69
4.50	596.90	135.80	214.20	811.09	512.64	298.45	0.58	3.79
5.00	599.63	137.81	212.19	811.82	512.00	299.82	0.59	3.83
6.00	633.06	141.80	208.20	841.26	524.73	316.53	0.60	4.04
7.00	631.75	143.99	206.01	837.76	521.88	315.88	0.61	4.07
8.00	647.47	145.04	204.96	852.43	528.69	323.74	0.61	4.16
9.00	657.14	145.53	204.47	861.62	533.05	328.57	0.62	4.21
10.00	672.78	145.48	204.52	877.30	540.91	336.39	0.62	4.29
11.00	685.32	144.81	205.19	890.51	547.85	342.66	0.63	4.34
12.00	695.83	144.14	205.86	901.69	553.78	347.92	0.63	4.38
13.00	701.22	143.48	206.52	907.75	557.13	350.61	0.63	4.40
14.00	709.43	142.66	207.34	916.76	562.05	354.71	0.63	4.42

Nota:

Los datos de remoldeo (Densidad seca y contenido de humedad) han sido indicados por el cliente.

Observaciones:

Los parámetros de resistencia cortante estimados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional especializado en geotecnia.

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante

Grado de compactación:

☐ Bajo ☐ Ligero ☒ Medio ☐ Alto ☐ Elevado

Realizado por:

Ingresado por:

Revisado por:

Report N°:

CCC

HEV

JSG

AP-112-22

Calle Pacto Andino 227, Chorrillos, Lima, (51-1) 266-7874, Fax (51-1) 203-4630, www.ausenco.com

Nombre del Proyecto: **Cangrejos PFS**

Client: **Lumina Gold**

Sample N° / Depth (m): **TP-WRSF-02 / M-02(2) / 0.30 - 3.00**

Report N°: **AP-112-22**

Descripción / Zona: **SAPROLITE**

Project N°: **106505-01**

Requested by: **Ali Hooshiar / Scott Effen**

Date: **17-Oct-22**

Location: **Ecuador**

Clasificación SUCS: ML

Estado : Remoldeado al 95% de MDS (Densidad Seca= 1.306 g/cm³) y OCH= 31.9 %

Etapas de consolidación	Inicial	Final	Velocidad (pulg/min)	
Altura (cm)	14.95	14.76	Parámetro "B"	0.01
Diámetro (cm)	7.03	6.82	Presión de celda	0.97
Humedad (%)	31.90	38.05	Contra presión	278
Densidad seca (gr/cc)	1.305	1.404	Esf. Efect. Inicial	103
				175

Deformación (%)	Esf. Desv. kPa	μ kPa	s_0 kPa	s_1 kPa	$\bar{p}$ kPa	$\bar{q}$ kPa	$\bar{q} / \bar{p}$	Oblicuidad (s_1/s_0)
0.00	0.00	0.00	175.00	175.00	175.00	0.00	0.00	1.00
0.05	52.50	0.83	174.17	226.67	200.42	26.25	0.13	1.30
0.10	96.13	2.64	172.36	268.50	220.43	48.07	0.22	1.56
0.20	134.70	6.56	168.44	303.14	235.79	67.35	0.29	1.80
0.35	190.91	12.72	162.28	353.19	257.74	95.45	0.37	2.18
0.50	221.37	18.77	156.23	377.60	266.92	110.68	0.41	2.42
0.75	248.48	27.41	147.59	396.07	271.83	124.24	0.46	2.68
1.00	294.89	34.02	140.98	435.87	288.43	147.44	0.51	3.09
1.25	311.92	38.72	136.28	448.20	292.24	155.96	0.53	3.29
1.50	347.24	44.31	130.69	477.93	304.31	173.62	0.57	3.66
1.75	368.18	49.49	125.51	493.69	309.60	184.09	0.59	3.93
2.00	377.83	51.99	123.01	500.84	311.93	188.92	0.61	4.07
2.50	394.76	56.70	118.30	513.06	315.68	197.38	0.63	4.34
3.00	410.29	61.92	113.08	523.37	318.23	205.14	0.64	4.63
3.50	417.58	65.47	109.53	527.11	318.32	208.79	0.66	4.81
4.00	444.00	67.05	107.95	551.95	329.95	222.00	0.67	5.11
4.50	462.10	68.40	106.60	568.69	337.64	231.05	0.68	5.34
5.00	468.79	69.44	105.56	574.35	339.95	234.40	0.69	5.44
6.00	490.35	70.43	104.57	594.92	349.75	245.18	0.70	5.69
7.00	501.58	69.88	105.12	606.70	355.91	250.79	0.70	5.77
8.00	517.76	69.27	105.73	623.49	364.61	258.88	0.71	5.90
9.00	528.92	68.90	106.10	635.02	370.56	264.46	0.71	5.99
10.00	532.93	69.39	105.61	638.54	372.08	266.46	0.72	6.05
11.00	547.62	67.26	107.74	655.36	381.55	273.81	0.72	6.08
12.00	547.61	65.78	109.22	656.83	383.03	273.80	0.71	6.01
13.00	557.90	63.45	111.55	669.46	390.50	278.95	0.71	6.00
14.00	579.68	63.27	111.73	691.41	401.57	289.84	0.72	6.19

Nota:

Los datos de remoldeo (Densidad seca y contenido de humedad) han sido indicados por el cliente.

Observaciones:

Los parámetros de resistencia cortante estimados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional especializado en geotecnia.

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante

Grado de compactación:

☐ Bajo
 ☐ Ligero
 ☒ Medio
 ☐ Alto
 ☐ Elevado

Realizado por:

CCC

Ingresado por:

HEV

Revisado por:

JSG

Report N°:

AP-112-22

Calle Pacto Andino 227, Chorrillos, Lima, (51-1) 266-7874, Fax (51-1) 203-4630, www.ausenco.com

Nombre del Proyecto: **Cangrejos PFS**

Client: **Lumina Gold**

Sample N° / Depth (m): **TP-WRSF-02 / M-02(2) / 0.30 - 3.00**

Report N°: **AP-112-22**

Descripción / Zona: **SAPROLITE**

Project N°: **106505-01**

Requested by: **Ali Hooshir / Scott Eifen**

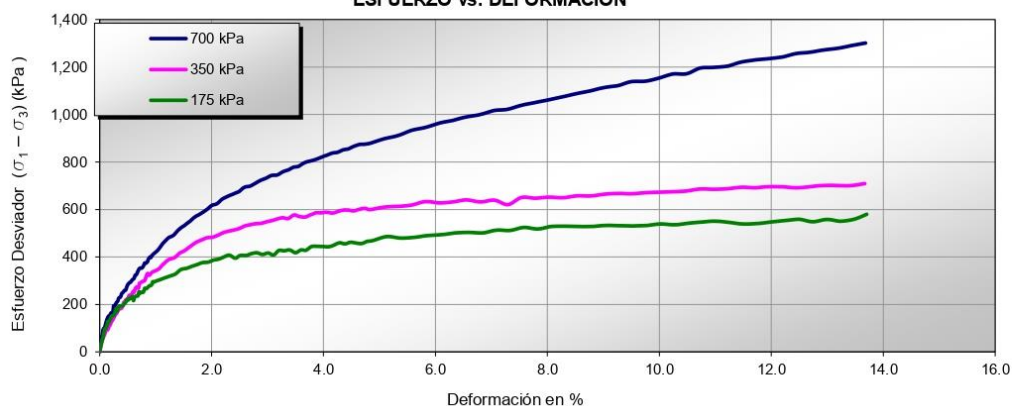
Date: **17-Oct-22**

Location: **Ecuador**

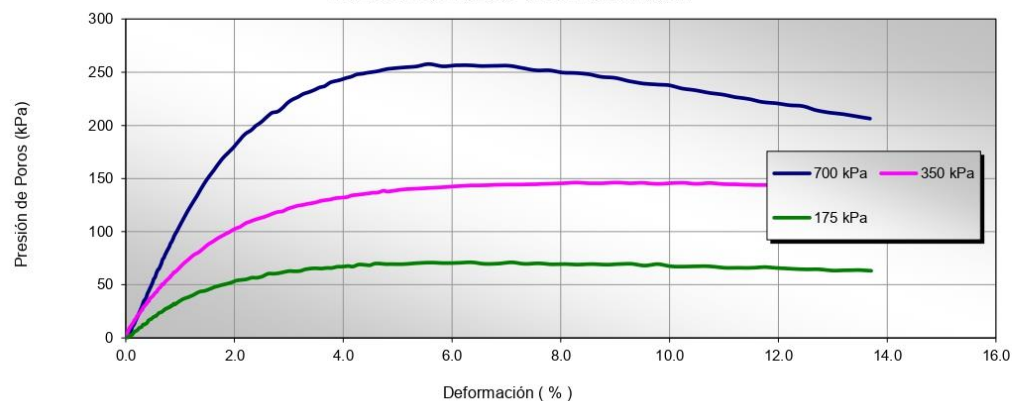
Clasificación SUCS: **ML**

Estado : Remoldeado al 95% de MDS (Densidad Seca= 1.306 g/cm³) y OCH= 31.9 %

ESFUERZO vs. DEFORMACIÓN



PRESIÓN DE POROS vs. DEFORMACIÓN



Nota:

Los datos de remoldeo (Densidad seca y contenido de humedad) han sido indicados por el cliente.

Observaciones:

Los parámetros de resistencia cortante estimados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional especializado en geotecnia.

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante

Grado de compactación:

☐ Bajo
 ☐ Ligero
 ☒ Medio
 ☐ Alto
 ☐ Elevado

Realizado por:
CCC

Ingresado por:
HEV

Revisado por:
JSG

Report N°:
AP-112-22

Calle Pacto Andino 227, Chorrillos, Lima, (51-1) 266-7874, Fax (51-1) 203-4630, www.ausenco.com

Nombre del Proyecto: **Cangrejos PFS**

Client: **Lumina Gold**

Sample N° / Depth (m): **TP-WRSF-02 / M-02(2) / 0.30 - 3.00**

Report N°: **AP-112-22**

Descripción / Zona: **SAPROLITE**

Project N°: **106505-01**

Requested by: **Ali Hooshiar / Scott Eifen**

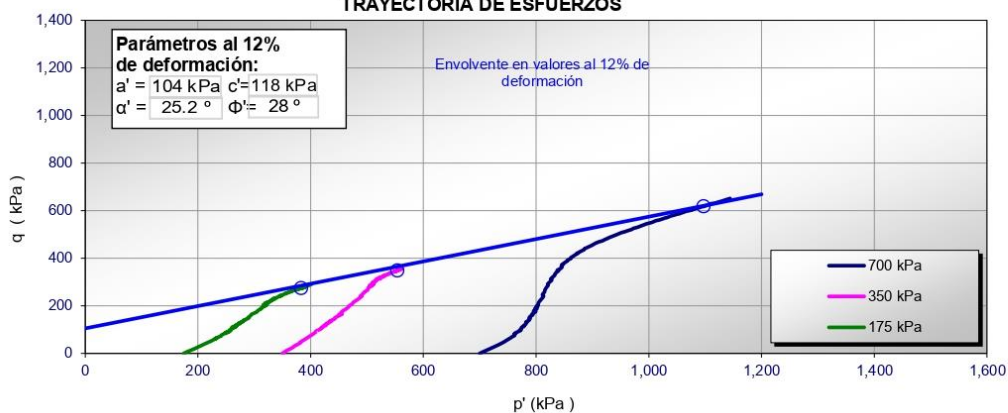
Date: **17-Oct-22**

Location: **Ecuador**

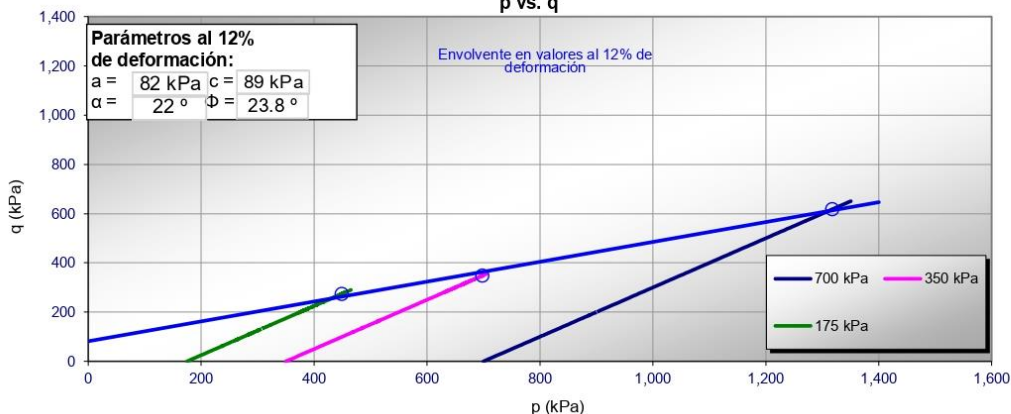
Clasificación SUCS: **ML**

Estado : Remoldeado al 95% de MDS (Densidad Seca= 1.306 g/cm³) y OCH= 31.9 %

TRAYECTORIA DE ESFUERZOS



p vs. q



Nota:

Los datos de remoldeo (Densidad seca y contenido de humedad) han sido indicados por el cliente.

Observaciones:

Los parámetros de resistencia cortante estimados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional especializado en geotecnia.

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante

Grado de compactación:

☐ Bajo

☐ Ligero

☒ Medio

☐ Alto

☐ Elevado

Realizado por:
CCC

Ingresado por:
HEV

Revisado por:
JSG

Report N°:
AP-112-22

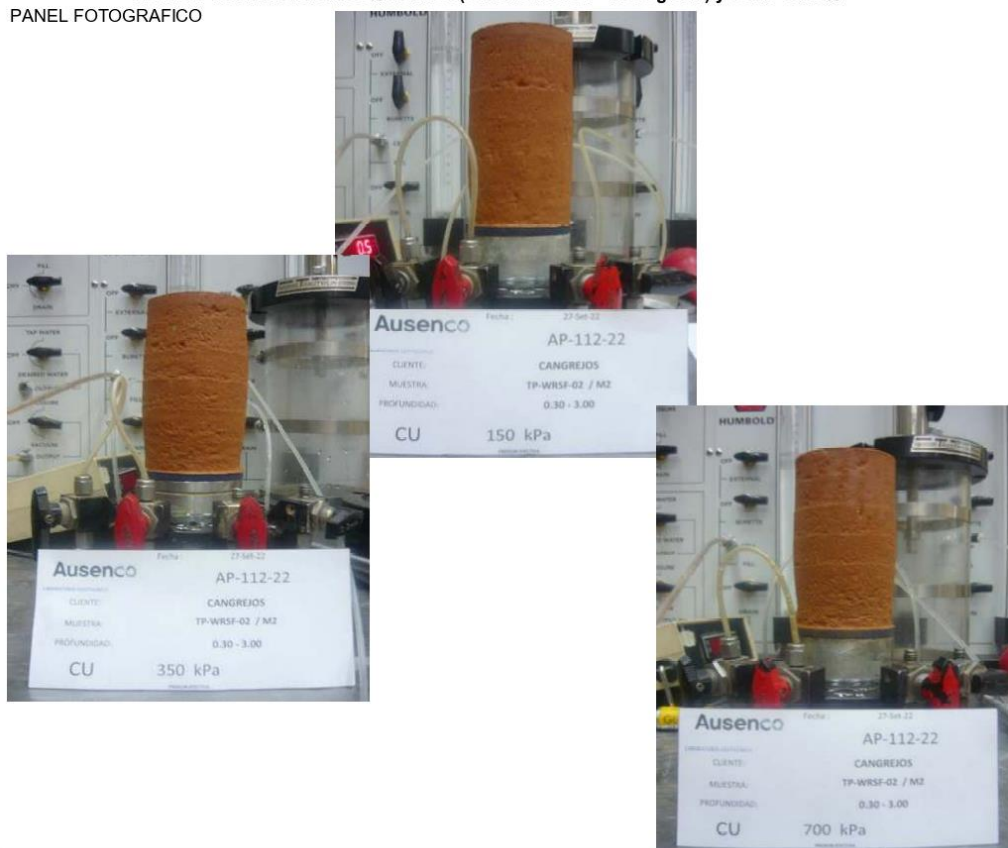
Calle Pacto Andino 227, Chorrillos, Lima, (51-1) 266-7874, Fax (51-1) 203-4630, www.ausenco.com

Nombre del Proyecto:	Cangrejos PFS	
Client:	Lumina Gold	
Sample N° / Depth (m):	TP-WRSF-02 / M-02(2) / 0.30 - 3.00	Report N°: AP-112-22
Descripción / Zona:	SAPROLITE	Project N°: 106505-01
Requested by:	Ali Hooshier / Scott Eifen	Date: 17-Oct-22
Location:	Ecuador	

Clasificación SUCS: ML

Estado : Remoldeado al 95% de MDS (Densidad Seca= 1.306 g/cm³) y OCH= 31.9 %

PANEL FOTOGRAFICO



Nota:

Los datos de remoldeo (Densidad seca y contenido de humedad) han sido indicados por el cliente.

Observaciones:

Los parámetros de resistencia cortante estimados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional especializado en geotecnia.

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante

Grado de compactación:

☐ Bajo
 ☐ Ligero
 ☒ Medio
 ☐ Alto
 ☐ Elevado

Realizado por:
CCC

Ingresado por:
HEV

Revisado por:
JSG

Report N°:
AP-112-22

Project name:	Cangrejos PFS	Report N°: AP-112-22
Client:	Lumina Gold	Project N°: 106505-01
Sample N° / Depth (m):	TP-WRSF-02 / M-02(2) / 0.30 - 3.00	
Area:	SAPROLITE	
Requested by:	Ali Hooshiar / Scott Elfen	Date: 12-Set-22
Location:	Ecuador	

Particles >3" (%) : ---
 Gravel (%) : 2.9
 Sand (%) : 9.9
 Silt and clay (%) : 87.2

Atterberg limits:

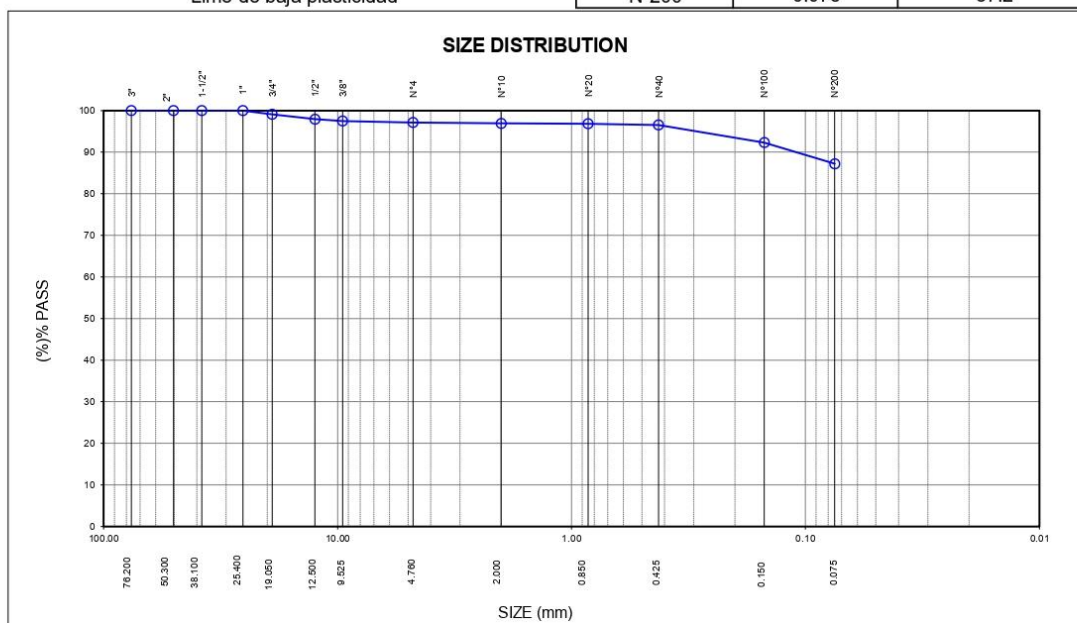
LL (%) : 47
 PL (%) : 33
 PI (%) : 14

Moisture content (%) : 34.3

USCS Classification : ML

Limo de baja plasticidad

Sieve	Size (mm)	% passing
3"	76.200	100.0
2"	50.300	100.0
1 1/2"	38.100	100.0
1"	25.400	100.0
3/4"	19.050	99.1
1/2"	12.500	98.0
3/8"	9.525	97.5
Nº4	4.760	97.1
Nº10	2.000	96.9
Nº20	0.850	96.8
Nº40	0.425	96.5
Nº100	0.150	92.3
Nº200	0.075	87.2



Note:

The sample were provided and identified by the petitioner.

These results apply only to the samples supplied and tested for the above reference job. The data and information are proprietary and can not be released without the authorization of AUSENCO PERU S.A.C. By accepting the data and results represented on this page, client agrees to limit the liability of AUSENCO PERU S.A.C. from Client and all other parties claims arising out of the use of this data to the cost for the respective test(s) represented here, and the Client agrees to indemnify and hold harmless Ausenco from and against all liability in excess of the aforementioned limit.

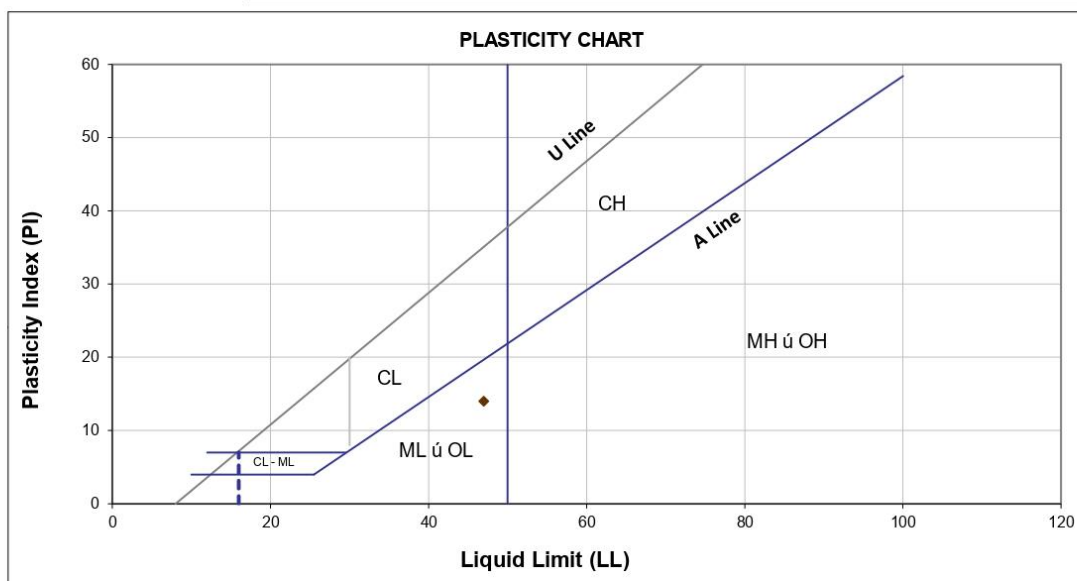
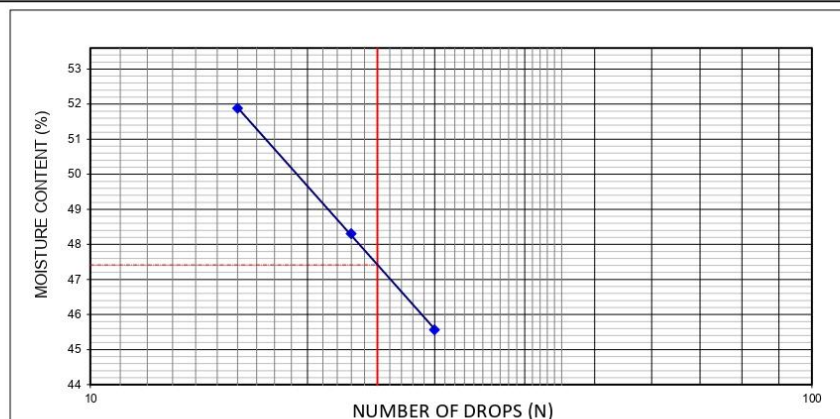
Performed by:	Developed by:	Checked by:	Report N°:
RTA	HEV	JSG	AP-112-22

Calle Pacto Andino 227, Chorrillos, Lima, (51-1) 266-7874, Fax (51-1) 203-4630, www.ausenco.com

Project name:	Cangrejos PFS	Report N°: AP-112-22
Client:	Lumina Gold	Project N°: 106505-01
Sample N° / Depth (m):	TP-WRSF-02 / M-02(2) / 0.30 - 3.00	
Area:	SAPROLITE	
Requested by:	Ali Hooshlar / Scott Elfen	Date: 12-Set-22
Location:	Ecuador	

Atterberg limits:

LL (%): 47
PL (%): 33
PI (%): 14



Note:
The sample were provided and identified by the petitioner.

These results apply only to the samples supplied and tested for the above reference job. The data and information are proprietary and can not be released without the authorization of AUSENCO PERU S.A.C. By accepting the data and results represented on this page, client agrees to limit the liability of AUSENCO PERU S.A.C. from Client and all other parties claims arising out of the use of this data to the cost for the respective test(s) represented here, and the Client agrees to indemnify and hold harmless Ausenco from and against all liability in excess of the aforementioned limit.

Performed by:	Developed by:	Checked by:	Report N°:
RTA	HEV	JSG	AP-112-22

Calle Pacto Andino 227, Chorrillos, Lima, (51-1) 266-7874, Fax (51-1) 203-4630, www.ausenco.com



ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN ASTM - D-2435

LABORATORIO GEOTÉCNICO

Nombre Proyecto: **Cangrejos PFS**

Cliente: **Lumina Gold**

N° de Proyecto: 106505-01

N° Informe Lab : AP-112-22

Ubicación: Ecuador

Solicitado por: Ali Hooshlar / Scott Elfen

N° de muestra: TP-WRSF-02 /M-01 / 1.30 - 1.60

Fecha: 26-Oct-22

Descripción: SAPROLITE

Carga(kPa)	7	Carga(kPa)	13	Carga(kPa)	27	Carga(kPa)	53	Carga(kPa)	106
Tiempo (s)	h(cm)	Tiempo (s)	h(cm)	Tiempo (s)	h(cm)	Tiempo (s)	h(cm)	Tiempo (s)	h(cm)
0	5.0068	0	5.0015	0	4.9978	0	4.9901	0	4.9780
6	5.0044	6	4.9998	6	4.9938	6	4.9833	6	4.9668
12	5.0041	12	4.9997	12	4.9934	12	4.9827	12	4.9659
30	5.0039	30	4.9996	30	4.9931	30	4.9824	30	4.9651
60	5.0038	60	4.9994	60	4.9928	60	4.9819	60	4.9645
120	5.0036	120	4.9993	120	4.9926	120	4.9814	120	4.9639
240	5.0035	240	4.9992	240	4.9924	240	4.9811	240	4.9633
480	5.0034	480	4.9991	480	4.9922	480	4.9807	480	4.9629
900	5.0033	900	4.9990	900	4.9919	900	4.9803	900	4.9625
1800	5.0032	1800	4.9989	1800	4.9917	1800	4.9800	1800	4.9620
3600	5.0030	3600	4.9988	3600	4.9914	3600	4.9797	3600	4.9615
7200	5.0028	7200	4.9986	7200	4.9912	7200	4.9794	7200	4.9610
14400	5.0025	14400	4.9984	14400	4.9908	14400	4.9790	14400	4.9605
255900	5.0015	28800	4.9981	28800	4.9904	28800	4.9785	28800	4.9600
255900	5.0015	90300	4.9978	83100	4.9901	85500	4.9780	89100	4.9595
255900	5.0015	90300	4.9978	83100	4.9901	85500	4.9780	89100	4.9595

Carga(kPa)	213	Carga(kPa)	426	Carga(kPa)	852	Carga(kPa)	1703
Tiempo (s)	h(cm)	Tiempo (s)	h(cm)	Tiempo (s)	h(cm)	Tiempo (s)	h(cm)
0	4.9595	0	4.9233	0	4.8604	0	4.7751
6	4.9362	6	4.8796	6	4.8122	6	4.7350
12	4.9339	12	4.8757	12	4.8066	12	4.7264
30	4.9325	30	4.8728	30	4.8020	30	4.7182
60	4.9313	60	4.8711	60	4.7962	60	4.7090
120	4.9303	120	4.8693	120	4.7907	120	4.6973
240	4.9294	240	4.8677	240	4.7864	240	4.6887
480	4.9286	480	4.8664	480	4.7836	480	4.6834
900	4.9278	900	4.8655	900	4.7819	900	4.6809
1800	4.9272	1800	4.8645	1800	4.7805	1800	4.6788
3600	4.9265	3600	4.8638	3600	4.7794	3600	4.6773
7200	4.9260	7200	4.8630	7200	4.7784	7200	4.6759
14400	4.9252	14400	4.8621	14400	4.7773	14400	4.6745
255900	4.9233	28800	4.8612	28800	4.7761	28800	4.6730
255900	4.9233	86400	4.8604	85800	4.7751	86400	4.6716
255900	4.9233	86400	4.8604	85800	4.7751	86400	4.6716

Notas: Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante

Estos datos se aplican solo a las muestras indicadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Ausenco Perú S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Ausenco Perú S.A.C. de cualquier redamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos al costo de los ensayos respectivos representados aquí.

Realizado por:

CCC

Ingresado por:

HEV

Revisado por:

JSG

N° Informe Lab :

AP-112-22