

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Evaluación geotécnica y geofísica para la factibilidad de un
depósito de relaves afectada por la presencia de antiguas labores
mineras, en base a estudios geotécnicos y geofísicos**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo

Elaborado por

Renzo Marino Chucos Lino

 [0009-0004-7027-5912](https://orcid.org/0009-0004-7027-5912)

Asesor

MSc. Carlos Alberto Rojas León

 [0009-0004-0770-4104](https://orcid.org/0009-0004-0770-4104)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Chucos Lino [1]
Referencia/Reference	[1] R. Chucos Lino, " <i>Evaluación geotécnica y geofísica para la factibilidad de un depósito de relaves afectada por la presencia de antiguas labores mineras, en base a estudios geotécnicos y geofísicos</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Chucos, 2025)
Referencia/Reference	Chucos, R. (2025). <i>Evaluación geotécnica y geofísica para la factibilidad de un depósito de relaves afectada por la presencia de antiguas labores mineras, en base a estudios geotécnicos y geofísicos</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

El presente trabajo va dedicado a mi madre, padre y hermano, siempre son mi motivación personal para progresar en la vida.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios por guiarme y protegerme, a mi casa de estudios UNI-FIGMM, siempre guardo y guardaré los mejores recuerdos de mi etapa universitaria.

A mis profesores y especialistas; MSc. Ing. Carlos Alberto Rojas León y MSc. Ing. César Ramiro Santiago Chirinos, por su tiempo en cada una de las recomendaciones en el presente trabajo. Cada una de sus sugerencias fue tomada de la mejor forma posible.

De igual manera en el aspecto laboral a SRK Consulting por los años laborados.

Resumen

El presente estudio se desarrolla y comprende la factibilidad de un depósito de relaves sobre basamento de antiguas labores mineras denominado “Rinconada”, ubicada en el distrito de Huayllay, provincia de Pasco, departamento de Pasco.

El objetivo principal de la presente investigación es determinar si el área de estudio es una alternativa para almacenar nuevos depósitos de relaves mineros; en base a ello se realizó investigaciones geológicas, geotécnicas y geofísicas, se analiza y evalúa cada unidad geotécnica que conforma el suelo y subsuelo, que lo sobreyacen.

En la zona de estudio, dentro de las investigaciones geotécnicas se realizó, perforaciones con su respectivo registro de logueo en plataforma, ensayos in situ para determinar parámetros del suelo, ensayos de permeabilidad, selección de muestras de suelo, para envío a laboratorio, instalación de piezómetros y monitoreo. Aun nado a ello se realizó renacimiento geológico en antiguos labores mineras existentes. En cuanto a las investigaciones geofísicas se realizó ensayos de refracción sísmica, análisis en arreglo multicanal MAM/MASW y ensayo de tomografía eléctrica.

El procesamiento, análisis de la información de campo y la interpretación de los resultados, denota condiciones geotécnicas favorables del macizo rocoso para la cimentación, sustentado en la caracterización geomecánica del macizo rocoso (RQD, RMR, GSI) y de igual manera la caracterización geotécnica de los tipos de suelo identificados en la zona del proyecto.

Palabras claves — Depósitos de relaves, investigaciones geológicas, investigaciones geotécnicas, investigaciones geofísicas, factibilidad.

Abstract

The present study explores the feasibility of constructing a tailings dam on the foundations of old mining workings called "Rinconada," located in the Huayllay district, Pasco province, Pasco department.

The main objective of this research is to determine whether the study area is an alternative for storing new mining tailings dams. Based on this, geological, geotechnical, and geophysical investigations were conducted, analyzing and evaluating each geotechnical unit comprising the overlying soil and subsoil.

In the study area, geotechnical investigations included drilling with platform logging, in-situ testing to determine soil parameters, permeability testing, soil sample selection for laboratory shipment, and piezometer installation and monitoring. In addition, geological remediation was performed on existing old mining workings. Regarding geophysical investigations, seismic refraction tests, multichannel MAM/MASW array analysis, and electrical tomography testing were performed.

The processing, analysis of field data, and interpretation of the results indicate favorable geotechnical conditions of the rock mass for the foundation, supported by the geomechanical characterization of the rock mass (RQD, RMR, GSI) and the geotechnical characterization of the soil types identified in the project area.

Keywords — Tailings dams, geological investigations, geotechnical investigations, geophysical investigations, feasibility.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	2
1.2.1 Justificación del problema de investigación	3
1.3 Objetivos del estudio	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Hipótesis de la tesis	5
1.4.1 Hipótesis general	5
1.4.2 Hipótesis específicas.....	5
1.5 Metodología de la investigación	6
1.5.1 Tipo y diseño de investigación	6
1.5.2 Etapas de investigación	6
1.6 Antecedentes referenciales	8
1.6.1 Antecedentes internacionales	8
1.6.2 Antecedentes nacionales	10
1.7 Aspectos generales del área de investigación.....	12
1.7.1 Localización y accesibilidad	12
1.7.2 Fisiografía y clima	12
1.7.3 Sismicidad.....	13
Capitulo II. Marcos teórico y conceptual.....	14
2.1 Investigaciones geotécnicas.....	14
2.1.1 Perforaciones geotécnicas	14

2.1.2	Logueo geotécnico.....	15
2.1.3	Características geotécnicas del suelo	16
2.1.4	Características geomecánicas de la roca	21
2.1.5	Ensayo in situ.....	26
2.1.6	Ensayos de permeabilidad	28
2.1.7	Instrumentación geotécnica.....	31
2.1.8	Muestreo para ensayo de laboratorio	33
2.2	Investigaciones geofísicas.....	35
2.2.1	Ensayos de refracción sísmica.....	36
2.2.2	Análisis de ondas superficiales en arreglo multicanal MASW	39
2.2.3	Análisis de microtrepidaciones en arreglo multicanal MAM	41
2.2.4	Tomografía eléctrica.....	43
2.3	Marco conceptual	46
2.3.1	Depósitos de relaves.....	46
2.3.2	Perforación geotécnica:.....	46
2.3.3	Ensayos in situ:	46
2.3.4	Ensayo Lugeon	46
2.3.5	Ensayo Lefranc	47
2.3.6	Permeabilidad:	47
2.4	Geología Regional.....	47
2.4.1	Geomorfología	47
2.4.2	Litología	48
2.4.3	Geología estructural	52
2.5	Geología local	52
2.5.1	Geomorfología	52
2.5.2	Litología	53
2.5.3	Geología estructural.....	57
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		58

3.1	Investigaciones geotécnicas.....	58
3.1.1	Perforaciones geotécnicas	58
3.1.2	Logueo geotécnico.....	61
3.1.3	Características geotécnicas del suelo	61
3.1.4	Características geomecánicas de la roca	67
3.1.5	Ensayos in situ.....	75
3.1.6	Ensayos de permeabilidad	76
3.1.7	Instrumentación geotécnica.....	81
3.1.8	Muestreo para ensayos de mecánica de suelo.....	81
3.1.9	Identificación de labores mineras existentes	82
3.2	Investigaciones geofísicas.....	84
3.2.1	Ensayos de refracción sísmica	84
3.2.2	Ensayo ondas superficiales en arreglo multicanal MASW	87
3.2.3	Ensayo de microtrepidaciones en arreglo multicanal MAM.....	87
3.2.4	Tomografía eléctrica.....	88
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados		89
4.1	Evaluación geológica del depósito de relaves	89
4.1.1	Evaluación geológica	89
4.1.2	Evaluación de labores mineros existentes.....	90
4.2	Evaluación geotécnica del depósito de relaves	93
4.2.1	Evaluación geotécnica del suelo	93
4.2.2	Evaluación geotécnica del macizo rocoso	95
4.3	Evaluación geofísica del depósito de relaves	103
4.3.1	Evaluación geofísica	103
Conclusiones		112
Recomendaciones		115
Referencias bibliográficas.....		116
Anexos		118

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Etapas del proyecto de investigación	7
Tabla 2 : Recorrido y accesibilidad a la zona del proyecto	12
Tabla 3 : Densidad relativa y compactación asociada.....	19
Tabla 4 : Contenido de humedad y codificación.....	20
Tabla 5 : Tipo de suelo y tamaño de partículas.....	20
Tabla 6 : Descripción de suelo de acuerdo a la norma SUCS.....	21
Tabla 7 : Valoración de cada parámetro RMR89	25
Tabla 8 : Valoración de cada parámetro RMR76	25
Tabla 9 : Interpretación de los valores de RMR	26
Tabla 10: Términos y descripción del grado de alteración del macizo rocoso	26
Tabla 11: Análisis granulométrico por malla para cada material	35
Tabla 12: Parámetros para el ensayo de refracción sísmica	39
Tabla 13: Parámetros para el ensayo MASW	41
Tabla 14: Parámetros para el ensayo MAM	43
Tabla 15: Resistividades de rocas sedimentarias en base a Telford.....	45
Tabla 16: Parámetros de tomografía eléctrica	46
Tabla 17: Ubicación y finalidad de las perforaciones geotécnicas.....	59
Tabla 18: Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-02.....	61
Tabla 19: Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-03.....	62
Tabla 20: Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-04.....	63
Tabla 21: Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-05.....	63
Tabla 22: Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-06.....	63
Tabla 23: Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-07.....	64
Tabla 24: Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-08.....	64
Tabla 25: Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-09.....	64
Tabla 26: Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-10.....	65

Tabla 27: Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-11.....	65
Tabla 28: Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-12.....	65
Tabla 29: Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-13.....	66
Tabla 30: Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-14.....	66
Tabla 31: Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-15.....	67
Tabla 32: Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-01.....	68
Tabla 33: Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-02.....	68
Tabla 34: Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-03.....	69
Tabla 35: Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-04.....	69
Tabla 36: Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-05.....	70
Tabla 37: Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-06.....	70
Tabla 38: Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-07.....	71
Tabla 39: Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-08.....	71
Tabla 40: Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-09.....	72
Tabla 41: Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-10.....	72
Tabla 42: Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-11.....	73
Tabla 43: Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-12.....	73
Tabla 44: Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-13.....	74
Tabla 45: Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-14.....	74
Tabla 46: Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-15.....	75
Tabla 47: Resumen de ensayos de SPT ejecutados en los sondajes.....	75
Tabla 48: Resumen de ensayos de LPT ejecutados en los sondajes.....	76
Tabla 49: Resumen de ensayos de CP ejecutados en los sondajes.....	76
Tabla 50: Resumen de ensayos de permeabilidad en los sondajes.....	77
Tabla 51: Instrumentación geotécnica instalado de piezómetros casagrande.....	81
Tabla 52: Instrumentación geotécnica instalado de piezómetros cuerda vibrante.....	81
Tabla 53: Selección de muestras para ensayos de mecánica de suelos.....	82
Tabla 54: Labores mineras en el área de estudio.....	83

Tabla 55: Líneas de refracción sísmica en el área de estudio.....	84
Tabla 56: Descripción geofísica de los ensayos ejecutados MASW.....	87
Tabla 57: Descripción geofísica de los ensayos ejecutados MAM.	88
Tabla 58: Distribución de las líneas del ensayo de tomografía eléctrica.....	88
Tabla 59: Caracterización de labores mineras identificadas.....	91
Tabla 60: Propiedades físicas de la roca intacta	97
Tabla 61: Descripción de los ensayos de ondas MASW (V_p m/s).....	104
Tabla 62: Velocidad promedio de ondas de corte a 30 m de profundidad.....	105
Tabla 63: Resumen de las capas de resistividad del área de estudio	111

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Área de estudio del proyecto.....	4
Figura 2 : Diagrama de flujo del marco teórico de la investigación.....	8
Figura 3 : Formato de registro de logueo geotécnico de suelo y roca	16
Figura 4 : Descripción de la forma de plasticidad en material de suelo	17
Figura 5 : Grado de consistencia del suelo	18
Figura 6 : Gradación del suelo	19
Figura 7 : Procedimiento para la medición y cálculo del RQD	23
Figura 8 : Parámetros para el cálculo del RMR.....	24
Figura 9 : Ensayo Lefranc.....	29
Figura 10: Ensayo Lugeon.....	31
Figura 11: Instalación de piezómetro Casagrande	32
Figura 12: Instalación y monitoreo de piezómetro cuerda vibrante rst.....	33
Figura 13: Análisis granulométrico en base al tamaño de partícula.....	35
Figura 14: Disposición de las líneas sísmicas en cada impacto “shot”	36
Figura 15: Llegada de ondas de propagación a la fuente “trigger”	37
Figura 16: Velocidad de propagación de ondas, distancia vs tiempo	38
Figura 17: Ensayo de refracción sísmica e interpretación geológica	38
Figura 18: Desarrollo del ensayo de refracción sísmica	39
Figura 19: Perfil de la velocidad de onda de corte (Vs) ensayo MASW.....	40
Figura 20: Perfil de la velocidad de onda de corte (Vs) ensayo MAM	42
Figura 21: Disposición dipolo-dipolo en la técnica de tomografía eléctrica.....	44
Figura 22: Valores de resistividad estándar en diferentes rocas y minerales	45
Figura 23: Mapa geológico regional del área del estudio Ondores.....	51
Figura 24: Unidades geomorfológicas identificadas en el área de estudio	53
Figura 25: Columna estratigráfica del sector de estudio.....	54
Figura 26: Afloramiento de sills en el área de estudio	56

Figura 27: Mapa de ubicación de las perforaciones geotécnicas	60
Figura 28: Labores subterráneas proyectadas en el área de estudio	83
Figura 29: Zonas de deslizamiento identificadas.....	90
Figura 30: Tramos vacíos interceptados a través de los sondajes	90
Figura 31: Perfil geotécnico del sondaje SR-09 interceptando zonas de vacío y material de relleno asociado a posibles tajeos	92
Figura 32: Propiedades físicas de los materiales de suelo.....	95
Figura 33: Propiedades de la resistencia de la roca.....	97
Figura 34: Parámetros de rugosidad del macizo rocoso	98
Figura 35: Parámetros de apertura del macizo rocoso.....	99
Figura 36: Parámetros de relleno del macizo rocoso	99
Figura 37: Frecuencia de fracturamiento y RQD medido en los sondajes SR-01, SR-03 y SR-13.	100
Figura 38: Frecuencia de fracturamiento y RQD medido en el sondaje SR-04	100
Figura 39: Análisis del RMR representativo en el área de estudio	101
Figura 40: Valores de conductividad hidráulica en base al depósito y/o formación geológica del área de estudio.....	102
Figura 41: Perfil sísmico V_p (m/s) respecto a la profundidad	103
Figura 42: Sección de resistividad de la línea TE22-01 y 02.....	106
Figura 43: Sección de resistividad de la línea TE22-03.....	107
Figura 44: Sección de resistividad de la línea TE22-04.....	108
Figura 45: Sección de resistividad de la línea TE22-05.....	109
Figura 46: Sección de resistividad de la línea TE22-06.....	110
Figura 47: Sección de resistividad de la línea TE22-07.....	111

Introducción

El presente estudio realiza una exhaustiva investigación geotécnica y geofísica a través de diversos trabajos efectuados en campo, que tuvieron como objetivo la caracterización geotécnica del suelo y caracterización geomecánica del macizo rocoso del área de estudio, contribuyendo a la factibilidad del depósito de relaves.

El contenido del estudio de investigación se planificó en cinco capítulos, además de las conclusiones y recomendaciones

El capítulo I es de generalidades; abarcando la descripción y justificación del problema de investigación, objetivos del estudio e hipótesis, seguido se hace mención de la zona de estudio, su ubicación y accesibilidad.

En el capítulo II se trató del marco teórico tanto de las investigaciones geotécnicas y geofísicas desarrolladas en el proyecto. Asimismo se desarrolló el marco geológico, se hizo referencia a la geología a nivel regional, con la información geológica disponible (INGEMMET) y a nivel local en base a lo observado en campo y citando estudios previos a nivel de geología local de acceso público.

El capítulo III; se centra en las investigaciones geotécnicas y geofísicas, aboca a los trabajos ejecutados en campo, las consideraciones técnicas y/o metodológicas que implicaron y el registro de datos obtenido en campo.

En el capítulo IV, se da a conocer de manera interpretativa y analítica los datos, seguido de una evaluación geotécnica y geofísica del área de estudio.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el presente estudio.

La zona de estudio, además de constituir una alternativa potencial para almacenar un nuevo depósito de relave minero ante un actual incremento de la producción de mineral; también contribuye con la reducción de costos en supervisión del impacto al medio ambiente, dentro de los límites de la unidad minera.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

Cuando nosotros recorremos nuestro país y tenemos la oportunidad de ver instalaciones mineras antiguas y abandonadas, en donde existió estructuras que carecen de información elemental; tales como, planos de diseño y construcción, datos históricos de instrumentación, observaciones visuales, etc. que nos permita conocer más a detalle este tipo de infraestructuras, realmente el panorama es lamentable ya que se carece de mucha información. La visión que se tiene de estos temas en la minería moderna es distinta, ya que en la actualidad ante cualquier tipo de estructuras es recopilar información antes, durante y post construcción que nos permita tener una base de datos histórica a la cual podamos recurrir en algún momento a través del tiempo.

Los proyectos de infraestructura en gran minería constituyen un porcentaje considerable del total de la inversión privada a nivel nacional. Todos los proyectos mineros realizan de forma continua obras de diversos tipos y envergadura que permiten la sostenibilidad del proyecto minero; dentro de este caso se tiene los depósitos de relaves, este tipo de infraestructura presenta una constante evolución en los procesos constructivos y buscan continuamente la optimización y la eficiencia de sus actividades. (Flores, 2021).

La presente investigación involucra un detallado estudio geotécnico y geofísico, principalmente mediante la ejecución de sondajes de perforación y ensayos geofísicos, con el fin de obtener información precisa y confiable sobre las propiedades geotécnicas del material emplazado en el subsuelo presente en el área de estudio. Para lograr ello, se planteó una metodología de trabajo que comprende la recolección de datos geológicos, geotécnicos y geofísicos existentes en la zona, la realización de campaña de perforación diamantina en puntos proyectados, realización de ensayos geofísicos, realización de ensayos de permeabilidad en suelo y roca, ensayos in situ, y selección de muestras para envío a laboratorio para determinar las propiedades físico-mecánicas del suelo y geomecánica de rocas.

Respecto a la contribución de la presente investigación a otras investigaciones similares, aporta principalmente conocimientos geotécnicos y geofísicos especializados para la caracterización, análisis y evaluación de proyectos de investigación de esta naturaleza.

1.2 Descripción del problema de investigación

Actualmente en el Perú, específicamente en las compañías mineras, construyen diferentes tipos de estructuras conocidas como depósito de relaves diseñadas para almacenar fragmentos de roca y minerales remanentes de la explotación y concentración minero-metalúrgica, como parte de una operación minera; los cuales son producidos, removidos y utilizados por la misma compañía minera. Sin embargo, es de necesidad social y ambiental, la construcción de estas obras de construcción requiere de un estudio detallado, bajo estrictos estándares de ingeniería y protección al medio ambiente (Reyes Parra,2015).

La falta de nuevos espacios dentro del área de influencia de las unidades mineras, para la construcción de estructuras de acumulación de relaves principalmente, es la razón por lo que se opta por otras alternativas, como nuevos depósitos de relaves, pero que, al no presentar estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos detallados, requieren de estas investigaciones a detalle, que garanticen la factibilidad de estas estructuras para el almacenamiento de nuevos depósitos (Reyes Parra, 2015).

En ese sentido, las investigaciones geológicas y geotécnicas hasta sus fases de detalle son fundamentales para caracterizar las propiedades químicas y físicas de los cimientos rocosos y/o de suelos naturales que almacenan los relaves, y decidir la construcción de las estructuras ingenieriles (Krynine & Judd, 1980). No obstante, si es que se limitan o no se realizan las investigaciones geológicas necesarias en estos proyectos de ingeniería, las investigaciones geotécnicas quedarán disminuidas o eliminadas y la obras se construyen sin el soporte técnico científico geológico, sin garantizar su estabilidad y seguridad física (Suyo Rivera, 2016).

La geotecnia se sustenta de la practica y/o ejecución de los conceptos geológicos y de diseño de ingeniería evaluando el comportamiento del suelo y subsuelo, lo cual es pertinente para la factibilidad y diseño de cimentaciones para estructuras (Hidalgo Ventocilla, 2024).

La prospección geofísica aplicada a la geotecnia ha logrado obtener un importante lugar de soluciones de diversos problemas asociados a la definición de las condiciones tanto físicas como mecánicas de las estructuras geológicas del subsuelo, además de ubicar zonas kársticas, contactos verticales que puedan generar peligro en una estructura, localización de contactos suelo-roca, reconocer zonas de fallas geológicas.

En consecuencia, la variedad del medio geológico y sus procesos complejos, son factores que condicionan técnica o económicamente un proyecto (González de Vallejo, 2004).

1.2.1 Justificación del problema de investigación

El actual depósito de relaves Animón se encuentra al límite de su capacidad de almacenamiento por ello la minera pretende habilitar un nuevo depósito de relaves que permita almacenar en forma segura los relaves a ser producidos en su planta, determinándose por varios factores utilizar la zona de Rinconada, el cual se ubica en el flanco izquierdo del valle de la laguna Naticocha.

El área entre el pique Montenegro y la laguna Naticocha Centro tiene antecedentes de hundimiento, algunos lo llaman colapso y otros lo describen como subsidencia. La estructura geológica de mayor importancia es la llamada la veta Principal, cuya orientación preferente coincide con el alineamiento de una galería subterránea antigua., actualmente se encuentra cubierta por depósito de desmonte. Al extremo sur del nuevo depósito de relaves se emplazaría a la zona de influencia de la estructura geológica (ver Figura 1)

Además, bajo estas condiciones y la necesidad de conocer las características geológicas, geotécnicas, geofísicas y riesgos asociados a este se sustenta el presente proyecto de investigación.

Figura 1

Área de estudio del proyecto



Fuente: Google Earth, 2024.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la factibilidad del depósito de relaves, tomando como base estudios geotécnicos y geofísicos de ingeniería ejecutados en campo y un análisis detallado que permita garantizar su construcción y estabilidad.

1.3.2 Objetivos específicos

Del objetivo general se desprenden los siguientes objetivos específicos:

- Realizar la evaluación geológica del ámbito del depósito de relaves y antiguas labores mineras.
- Realizar ensayos in situ, ensayos de permeabilidad para investigar las características geológicas, hidrogeológicas y geotécnicas del suelo, macizo rocoso y labores antiguas.

- Realizar perforaciones geotécnicas y zonificar en base a tipo de depósito antrópico, lacustre, residual, fluvio-glaciar para la zona de cimentación del depósito de relaves.
- Representar esquemáticamente el análisis del logeo geotécnico, zonificación litológica, ensayos in situ y sus resultados para cada unidad litológica presente en el área de estudio.
- Realizar análisis estadísticos y cálculos de parámetros geomecánicos (RQD, RMR, GSI) para cada unidad litológica.
- Caracterizar geotécnica y geomecánicamente las unidades de suelo y roca mediante ensayos de laboratorio.
- Interpretar la prospección geofísica; sísmica de refracción y tomografía eléctrica para cuantificar velocidades de ondas P y S para caracterizar estratos subterráneos y delimitar las capas de suelo y roca.

1.4 Hipótesis de la tesis

1.4.1 Hipótesis general

Al desarrollar una adecuada caracterización geotécnica y geofísica del subsuelo de la zona de estudio permitirá determinar en qué medida el macizo rocoso es afectado por la presencia de antiguas labores mineras y su factibilidad para un depósito de relaves.

1.4.2 Hipótesis específicas

- El reconocimiento geológico en el área de estudio permitirá identificar posibles eventos de fenómenos geológicos naturales y zonas afectadas por efectos de labores mineras antiguas.
- Las perforaciones geotécnicas permitirán realizar una correcta identificación de los diferentes tipos de depósitos cuaternarios y/o posibles zonas de tajeo, detallando una adecuada caracterización geotécnica del suelo y roca.
- La interpretación de ensayos geofísicos permitirá identificar estratos con contrastes significativos de velocidad sísmica y resistividad eléctrica, asociado a antiguas labores mineras.

- Los resultados de laboratorio de muestras de suelo en base a las normativas SUCS corroborará la descripción realizada en el logueo geotécnico y permitirá una adecuada determinación del tipo de depósito y/o formación geológica.

1.5 Metodología de la investigación

1.5.1 Tipo y diseño de investigación

El desarrollo de la presente investigación tiene percepción de la realidad de tipo objetiva, con razonamiento deductivo y contraste de hipótesis. La finalidad es comprobar la factibilidad como nuevo depósito de relaves el área de estudio. Por tanto, el enfoque de estudio es mixto por presentar características de investigación cuantitativas y cualitativas, con un alcance de tipo descriptivo, puesto que se analiza y evalúa las características geotécnicas y geofísicas del suelo y subsuelo del área de investigación a partir de diversos trabajos en campo.

El tipo de diseño de investigación es no experimental porque se basa en la observación de fenómenos tal como existe en la realidad, por lo cual en su contexto natural como son los geológicos y geotécnicos, para después analizarlos.

1.5.2 Etapas de investigación

La presentación se desarrollará en las siguientes etapas:

- Etapa inicial de gabinete: Recopilación, evaluación y selección de información bibliográfica, y documental existente acerca del tema de investigación. Para la búsqueda y revisión bibliográfica se recurrirá a la consulta de tesis, libros, revistas geológicas y base bibliográfica. Para la parte de la geología se tendrá como base a la información pública (INGEMMET), específicamente el boletín “Geología de los cuadrángulos de Ambo, Cerro de Pasco y Ondores”:23K.
- Etapa de campo: Ejecución trabajos en el área de estudio, perforación geotécnica, logueo de muestras de perforación, ejecución de ensayos in situ, ensayos de permeabilidad), selección de muestras para laboratorio, prospección geofísica.

- Etapa de laboratorio: Las muestras recolectadas son enviadas a laboratorio para análisis granulométrico, límites de Atterberg, contenido de humedad, ensayos de propiedades físicas.
- Etapa final de evaluación: elaboración de mapas geológicos definitivos con las investigaciones de campo, perfiles geológicos-geotécnicos, interpretación de las investigaciones de campo y laboratorio. Redacción integral del trabajo de investigación.

Tabla 1

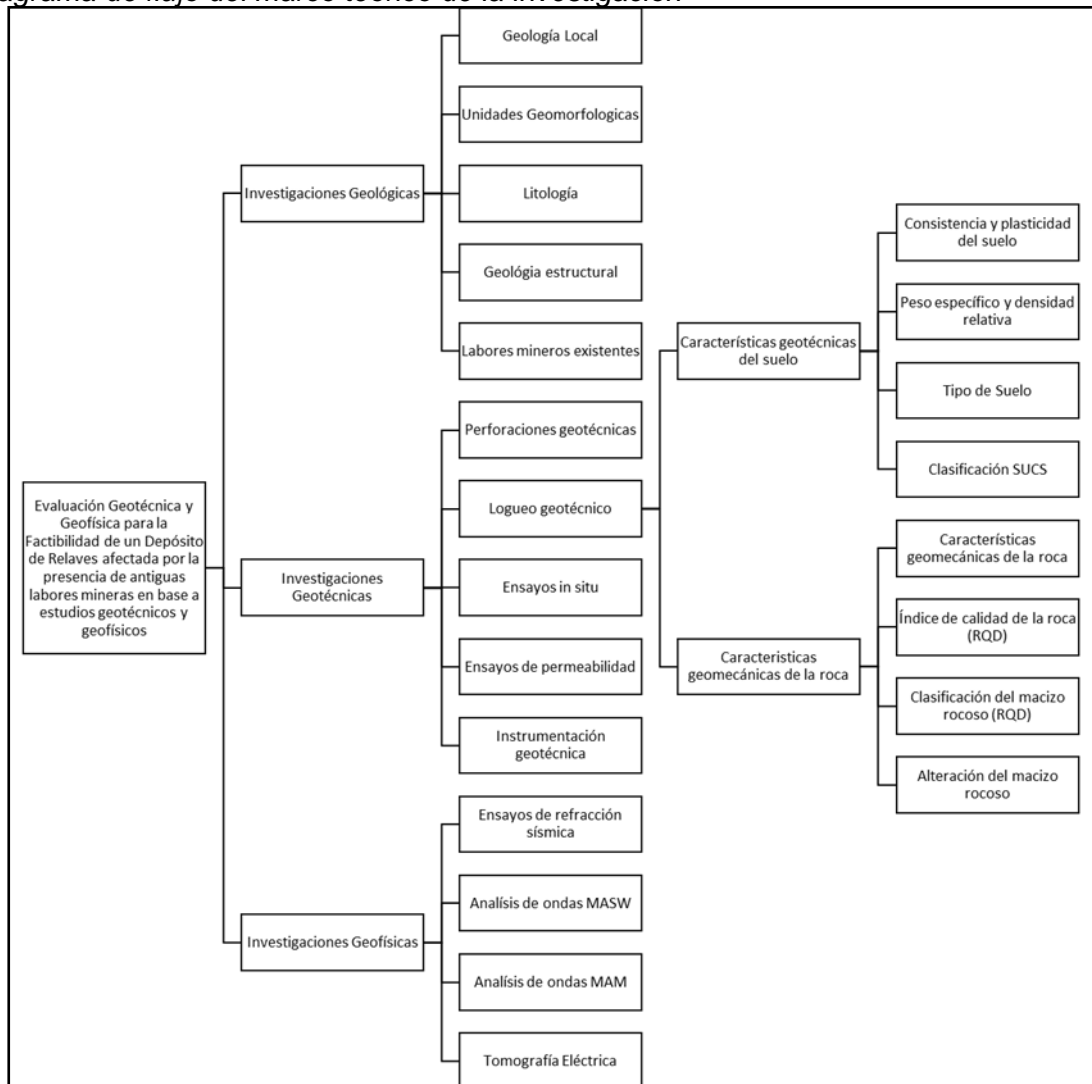
Etapas del proyecto de investigación

ETAPAS	ACTIVIDAD PRINCIPAL	MÉTODOS Y TÉCNICAS	INSTRUMENTOS / EQUIPOS	PRODUCTO
Gabinete	Revisión de Información bibliográfica	Análisis documentario	Informes, bibliografía	Planificación preliminar
	Revisión del boletín de INGEMMET	Visualizar el área de estudio	Google Earth; ArcGIS.	Definir área de estudio
Campo	Reconocimiento geológico en superficie	Observación in situ, GPS	Brújula, GPS	Identificación de afloramientos y antiguas labores mineras
	Perforación geotécnica	Perforaciones geotécnicas e hidrogeológicas	Testigos de perforación	Logueo geotécnico, zonificación de suelo y roca, tipo de depósito y/o formación geológica
	Ensayos in situ	CP, SPT, LPT	Martillo de peso. Muestreador	Parámetros de resistencia y compactación
	Ensayos de permeabilidad	Lugeon / Lefranc	Caudalímetro, manómetro, bomba de inyección.	Parámetros de permeabilidad
	Ensayos geofísicos	Evaluación indirecta del subsuelo	Sismógrafos, geófonos, resistivímetro	Perfiles de velocidad sísmica y resistividad
	Instrumentación geotécnica	Instalación de piezómetros	Sensores de cuerva vibrante y casa grande	Registro del nivel freático y presión intersticial
	Selección de muestras	Muestreo de suelo y roca intacta	Muestreo parafinadas y selladas	Resultados de ensayo de laboratorio, granulometría, límites de Atterberg
	Evaluación de factibilidad	Análisis e interpretación	Integración de datos geológicos, geotécnicos y geofísicos	Análisis correlacional clasificación RMR, RQD, GSI

Fuente: Elaboración propia

Figura 2

Diagrama de flujo del marco teórico de la investigación



Fuente: Elaboración propia.

1.6 Antecedentes referenciales

A continuación, las siguientes referencias internacionales y nacionales están relacionados con el tema presentado.

1.6.1 Antecedentes internacionales

Oñate (2020), en su trabajo de tesis “Caracterización geológica y geotécnica para el depósito de relaves en el área hijuela 10, provincia de Huasco, región de Atacama, Chile” para optar el título de Ingeniera Geóloga ante la Universidad de Concepción de Chile, resalta la importancia del trabajo previo de recopilación y revisión de antecedentes geológicos para una mayor comprensión del área de estudio, y de esa manera delimitar el

trabajo al nivel de detalle propuesto, en base a ello se ejecute el estudio geotécnico al diseño del depósito de relaves. El estudio evalúa la factibilidad de instalar un nuevo depósito de relave próximo a una planta de beneficio dentro del área urbana de la empresa minera. detalla en sus conclusiones que la evaluación del lugar presenta características geológicas y geotécnicas aptas para el proyecto en base a la baja susceptibilidad a la poca probabilidad de remoción de masas y/o flujos. Finalmente, el estudio contribuye a la fase de diseño para la ubicación final del depósito de relaves.

Parra Basto, L (2020), en su trabajo de tesis “Aplicación de los Métodos de Prospección Geofísica para la Caracterización Geotécnica del subsuelo en El Orfanato, Municipio de Pamplona, Norte de Santander” para optar el título de Ingeniero Civil ante la Universidad de Pamplona de Colombia, detalla que el suelo es heterogéneo y presenta cambios laterales bruscos que no siempre son identificados mediante los sondeos, gracias a los avances tecnológicos de la geofísica se puede analizar el subsuelo horizontal y verticalmente disminuyendo el grado de incertidumbre; estos ensayos geofísicos son un complemento de los métodos de exploración convencionales (sondajes) que permiten obtener información detallada del área de estudio. Ello le permitió correlacionar los parámetros geotécnicos del suelo con los ensayos geofísicos. Indica también, que los estudios geotécnicos y geofísicos, interesan como documento base para la evaluación detallada de la factibilidad de proyectos de alta inversión, así como para la determinación del control de calidad de proyectos.

Manchego Barrera, A. & Peña Espitia, G. (2015), en su trabajo de tesis “Estudio geológico y caracterización geotécnica en el sector rural de Helechal y Guasimal del municipio de Tena departamento de Cundinamarca” para optar el título de Ingeniero Geólogo ante la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, menciona que realizó recopilación, revisión y validación de la información geológica y geotécnica existente tanto de fuentes gubernamentales como del sector privado a fin de definir los peligros geológicos asociados. El estudio tuvo por objetivo realizar una caracterización geotécnica detallando las características geológicas del área, perfiles geológicos, obtener muestras del suelo y

en superficie, que permitan la caracterización litológica de las formaciones geológicas, realizar ensayos geofísicos que permitan conocer las particularidades de carácter geofísico; para posteriormente en conjunto con los resultados de laboratorio, para definir las características geotécnicas del terreno.

Cabrera Rivera, T (2007), en su trabajo de tesis “Características geotécnicas de los suelos residuales del batolito de la cordillera de la costa” para optar su título de Ingeniero Civil ante la Universidad de Chile, menciona que el conocimiento de la génesis de estos suelos y su distribución en la zona, permiten comprender y diferenciar las características geotécnicas de ellos y su comportamiento cuando son sometidos a variaciones climáticas, sumado a ello el complejo régimen hidrogeológico, la humedad ambiental y la topografía escarpada. El estudio tuvo objetivo caracterizar geológica y geotécnicamente algunos afloramientos del batolito de la costa, determinando los parámetros que permitan evaluar su comportamiento frente a los factores ya mencionados. La metodología en su trabajo de investigación incluye la caracterización geológica, detallando la estratigrafía presente, realizó extracción de muestras de suelo y roca para obtener sus propiedades índices en laboratorio y de esa manera presentar una caracterización geotécnica contrastada.

1.6.2 Antecedentes nacionales

Tapia, U. (2018) en su tesis “Estabilización física y química del depósito de desmonte” presentado para optar el título de Maestro en Minería y Medio Ambiente ante la Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, indica que realizó investigaciones geotécnicas en las áreas de ubicación de la desmontera ejecutando los siguiente trabajos; investigaciones geotécnicas en las áreas de ubicación de la desmontera para establecer los parámetros de resistencia del suelo, evaluación hidrogeológica en la microcuenca de influencia, identificación de los rasgos estructurales presentes, correspondientes a zonas de fallas y plegamiento

Vega, R. (2022) en su tesis “Evaluación Geotécnica del depósito de desmonte Excélsior de Cerro de Pasco”, presentado para optar el título de Ingeniero Geólogo ante la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Perú, tuvo como objetivo determinar

parámetros geotécnicos y evaluar la factibilidad para la construcción del depósito de desmontera, en cuanto a su metodología realizó la revisión documental, observación de campo, técnica de calicata y trichera, ensayos insitu, los resultados hallados le permitieron obtener parámetros geotécnicos útiles para la determinación de la factibilidad del depósito de desmonte En base a los ensayos de campo y las muestras enviadas a laboratorio de suelos le sirvieron para caracterizar geotécnicamente el suelo como la desmontera, los que utilizo con la finalidad de asegurar la estabilidad física del depósito.

Hidalgo, H.A. (2024) en su tesis “Evaluación geotécnica en el plan de cierre del diseño de depósito de desmontes - mina Shalca - Pacaraos - Huaral - región Lima”, presentado para optar el título de Ingeniero Geólogo ante la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Perú, detalla la optimización de los lugares donde se emplazaran los nuevos depósitos en base a un óptimo diseño geotécnico, haciendo énfasis en la evaluación de las propiedades geotécnicas del material de desmonte mediante ensayos in situ y comparando con pruebas de laboratorio de muestras recolectadas sin presencia de alteración, a través de calicatas y sondajes geotécnicos definidas en el área del proyecto.

Apaza, Y. P. (2016) en su tesis “Evaluación geológica y geotécnica para la ampliación de la presa Ancascocha en la cuenca de Yauca, Ayacucho- Arequipa”, presentado para optar el título de Ingeniero Geólogo ante la Universidad Nacional del Altiplano, Perú, detalla que efectuó una exhaustiva recopilación bibliográfica entorno a su área de evaluación del proyecto, esta inspección bibliográfica le valió para definir su trabajo de mapeo geológico, la ubicación de los sondajes y calicatas. En base a sus hallazgos de la investigación en campo, determinó el diseño e infraestructura de riego en la cuenca de Yauca que abarca los departamentos de Ayacucho y Arequipa, contribuyendo al incremento de la producción agrícola en rendimiento y beneficio de la comunidad. También señala, que las investigaciones geológicas y geotécnicos, son relevantes como anexo fundamental para la evaluación y factibilidad de la presa de tierra, de igual manera para establecer un control de calidad de los materiales y agregados de la cantera.

1.7 Aspectos generales del área de investigación

1.7.1 Localización y accesibilidad

El proyecto se ubica en el distrito de Huayllay, provincia de Pasco, departamento de Pasco, a una altitud referida entre 4580 a 4640 msnm.

La mina es accesible a través de la vía Central Lima-Oroya-Cerro de Pasco donde se recorren 287 Km, hasta la localidad de Villa de Pasco de donde se toma la carretera a Canta-Lima y en ella se recorren 37 Km, hasta Huayllay (el poblado más cercano a la mina).

El acceso directo a la zona del proyecto desde la ciudad de Cerro de Pasco se realiza mediante un recorrido de 1 hora 15 minutos, por vía terrestre sobre carretera asfaltada, llegando hasta la localidad de Huayllay. Luego se continua por una carretera afirmada y trocha carrozable aproximadamente por 25 minutos, hasta llegar a la Unidad Minera Animón. Los detalles del recorrido se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Recorrido y accesibilidad a la zona del proyecto

TRAMO	DISTANCIA (Km)	VÍA	TIEMPO	TIPO DE ACCESO
Cerro de Pasco – Huayllay	54.00	Terrestre	1hr 15 min	Carretera asfaltada
Huayllay – U.M. Animón	10.50	Terrestre	25 min	Trocha

Fuente: Elaboración propia

1.7.2 Fisiografía y clima

El clima de la zona de estudio presenta un clima frígido y seco típico de puna, con temperaturas de 3° a 4° C bajo cero. Entre los meses de enero a marzo se presentan precipitaciones pluviales y el resto del año es seco con presencia de heladas entre abril y junio. La vegetación son pastos conocidos como “ichu” y pastos silvestres y es escasa debido a la falta de material aluvial favorable para la vegetación.

El drenaje superficial confluye a la laguna Junín que pertenece a la cuenca hidrográfica del río Mantaro. La época de mayor precipitación se presenta entre los meses de diciembre a marzo, siendo escasa en los meses de junio a setiembre.

1.7.3 Sismicidad

El área de estudio se encuentra localizada en una zona activamente sísmica, por ello podrían suceder sismos de considerables intensidades, mayores a 8 de la escala de Mercalli. De las fallas regionales activas, las fallas de quiches y de la cordillera blanca, la cual presenta una longitud de 200 km cubierta constantemente de leve, son las más conocidas históricamente en Junín, en 1946.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

En este apartado se desarrolla el marco teórico para la presente tesis, la cual comprende las investigaciones geotécnicas, detallando las características geotécnicas del suelo y características geomecánicas del macizo rocoso, por otra parte, se presenta las investigaciones geofísicas, comprende ensayos de refracción sísmica, análisis en arreglo multicanal MASW/MAM y tomografía eléctrica.

2.1 Investigaciones geotécnicas

Se presenta el marco conceptual que comprende las investigaciones geotécnicas abarcando la perforación diamantina para obtener información confiable sobre las propiedades geotécnicas del material emplazado en el subsuelo; ensayos in situ para determinar las propiedades físicas a la resistencia del suelo; ensayos de permeabilidad para determinar la conductividad hidráulica del suelo; ensayos de refracción sísmica para determinar la potencia de los estratos; con el fin de obtener información precisa y confiable del material emplazado en el subsuelo presente de la zona de estudio.

2.1.1 Perforaciones geotécnicas

La perforación y toma de muestras es uno de los métodos con mayor uso en la exploración del subsuelo, consiste en avanzar una excavación en el subsuelo mediante elementos de corte para la obtención de muestras de material (testigos) para una evaluación visual y descripción detallada de las características intrínsecas (Logueo), con una validación posterior de muestras de ensayos de laboratorio. Para investigaciones en roca, recurren a sondeos por rotación; para suelos, recurren a los sondeos a percusión. El sistema de perforación se compone de múltiples componentes que se conectan a la barra de perforación; tales como: cabeza, tubo portatestigo, extractor, mango portaextractor y corona de corte. Normalmente, se recomienda utilizar el sistema wire line, ya que reduce notablemente el tiempo de maniobras y se obtienen mejores rendimientos. En cuanto a la rotación de la perforación se efectúa con circulación de agua, o lodo bentónico, o en seco, aunque haya presencia de agua o lodo en el taladro.

González de Vallejo, L. (2004) en su libro "Ingeniería Geológica", indica que los sondeos por rotación están en la capacidad de perforar cualquier tipo de suelo o roca hasta profundidades elevadas y de distinta inclinación. La extracción de testigos es continua y el porcentaje de recuperación con respecto a la longitud perforada es muy alto, el cual depende del sistema de extracción.

2.1.2 Logueo geotécnico

El logueo geotécnico permite obtener información geotécnica, características y propiedades del macizo rocoso a partir de testigos de perforación diamantina, los que pueden ser testigos de exploración geológica o taladros orientados.

El registro de logueo geotécnico se ha efectuado a medida que avanza la perforación, en donde se han inspeccionado los testigos de perforación para identificar el tipo de material o tipo de roca.

Las descripciones de los perfiles han sido efectuadas de acuerdo con las normas y recomendaciones de la ASTM (Association Standard for Testing and Materials) y para la descripción visual de suelo, las recomendaciones de la ISRM (International Society Rocks Mechanics) para la descripción del macizo rocoso.

Los parámetros que se registran en el logueo geotécnico de taladros de exploración geológica son básicamente los relacionados a las coordenadas del collar y orientación de la perforación diamantina. Posteriormente se registran o loguean los siguientes datos en cada tramo o corrida de perforación: Profundidad de la corrida (desde-hasta), litología, recuperación, RQD, número de fractura del tramo, resistencia (a carga puntual), rugosidad, relleno, meteorización y las observaciones que se consideren convenientes de acotar referentes a la perforación como son presencia de agua subterránea, interrupción de la perforación, etc.

La información que se recopilará a partir del logueo geotécnico de testigos será empleada básicamente para realizar la caracterización y clasificación del macizo rocoso mediante los sistemas RMR de Bieniawski y el índice Q de Barton.

En el encabezado del registro de logueo se debe registrar la información básica del sondaje, esto incluye: proyecto, cliente, código del sondaje, coordenada (Este, Norte y elevación), orientación del sondaje (inclinación y azimut), profundidad, diámetro del testigo, fecha de inicio y fin de logueo, ver Figura 3.

Figura 3

Formato de registro de logueo geotécnico de suelo y roca

Logueo Geotécnico de Suelo																			
PROYECTO:										UBICACIÓN:					SONDAJE:				
CLIENTE:										PROFUNDIDAD (m):					FECHA INICIO:				
COORDENADAS (X, Y, Z):										INCLINACIÓN:					REGISTRO 1:				
ELEVACIÓN (metros):										AZIMUT:					REGISTRO 2:				
DESCRIPCIÓN DE OPERACIONES:										FECHA FINAL:					DESCRIPCIÓN GEOTÉCNICA POR COLUMNA:				
Fecha: _____ Turno: _____ Logueador: _____ Diámetro de instrumentación: _____ Diámetro de testigo (cm): _____ Fecha de logueo (dd/mm/aa): _____										Fecha: _____ Hora: _____ Cota: _____ INCLINACIÓN: _____ AZIMUT: _____ PROFUNDIDAD (m): _____ FECHA INICIO: _____ FECHA FINAL: _____					Descripción geotécnica por columna: Nombre de suelo (SUCS), coloración, rango de humedad de partículas (de 0.075 mm a 75 µm), medio y grueso, si es graso, fino y grueso), porcentaje de arcillas y limos, presencia de raíces, etc. (en el logueo otras características).				
Detalles Operativos: _____ Avance de Perforación: _____ Características texturales del suelo: _____																			

Logueo Geotécnico de Roca																			
PROYECTO:										UBICACIÓN:					SONDAJE:				
ESTE (m):										INCLINACIÓN (°):					REGISTRO 1:				
NORTE (m):										AZIMUT (°):					REGISTRO 2:				
ELEVACIÓN (metros):										PROFUNDIDAD (m):					N° DE ROCA:				
DESCRIPCIÓN DE OPERACIONES:										FECHA FINAL:					DESCRIPCIÓN GEOTÉCNICA POR COLUMNA:				
Fecha: _____ Turno: _____ Logueador: _____ Diámetro de instrumentación: _____ Diámetro de testigo (cm): _____ Fecha de logueo (dd/mm/aa): _____										Fecha: _____ Hora: _____ Cota: _____ INCLINACIÓN: _____ AZIMUT: _____ PROFUNDIDAD (m): _____ FECHA INICIO: _____ FECHA FINAL: _____					Descripción geotécnica por columna: Nombre de roca (SUCS), coloración, rango de humedad de partículas (de 0.075 mm a 75 µm), medio y grueso, si es graso, fino y grueso), porcentaje de arcillas y limos, presencia de raíces, etc. (en el logueo otras características).				
Detalles Operativos: _____ Avance de Perforación: _____ Características texturales del suelo: _____																			

Fuente: Elaboración propia

El personal responsable del logueo debe verificar que la perforación se ejecuta de manera adecuada, asimismo el uso correcto del equipo de orientación. Asegurarse de que la orientación sea transferida apropiadamente al testigo.

2.1.3 Características geotécnicas del suelo

Las características geotécnicas se refieren a las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, dentro de ellas tenemos la consistencia, gradación, humedad, plasticidad, resistencia, dilatancia estas características se identifican visualmente y corrobora con ensayos de campo.

2.1.3.1 Consistencia del suelo. La consistencia del suelo es la resistencia del suelo a ser deformado, por consiguiente, depende de la firmeza de los materiales que lo componen, y depende de su estado de humedad y de las partículas minerales que lo forman. Los suelos pueden tener diferentes consistencias, como blanda, firme o dura.

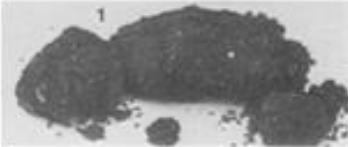



El concepto de consistencia del suelo, incluye algunas propiedades tales como la resistencia a la compresión, la friabilidad, la plasticidad, y la viscosidad. Observaciones de campo y de laboratorio, han llevado a la conclusión de que la consistencia del suelo varía

con propiedades como: la textura, el contenido de materia orgánica, el total de materia coloidal, la estructura (en cierto grado) y el contenido de humedad.

2.1.3.2 Plasticidad y límites de consistencia “Atterberg”. Se comprende por plasticidad a la propiedad de un material por deformarse bajo la acción de cargas o esfuerzos sin ruptura, cuando está húmedo. En relación con la plasticidad de los suelos, durante un proceso de deformación, el volumen de una arcilla permanece constante. Por el contrario, el volumen de una arena cambia continuamente durante el mismo. Si se intenta deformar una masa de arena húmeda rápidamente, esta se desagrega (la arena es friable). En virtud de esto, puede definirse la plasticidad como la propiedad de un material que permite resistir deformaciones rápidas, sin cambiar de volumen y sin agrietarse ni desagregarse.

Figura 4

Descripción de la forma de plasticidad en material de suelo

Forma de las Partículas	Forma	Código
	No Plástico	NP
	Baja Plasticidad	BP
	Plasticidad Media	PM
	Alta plasticidad	AP

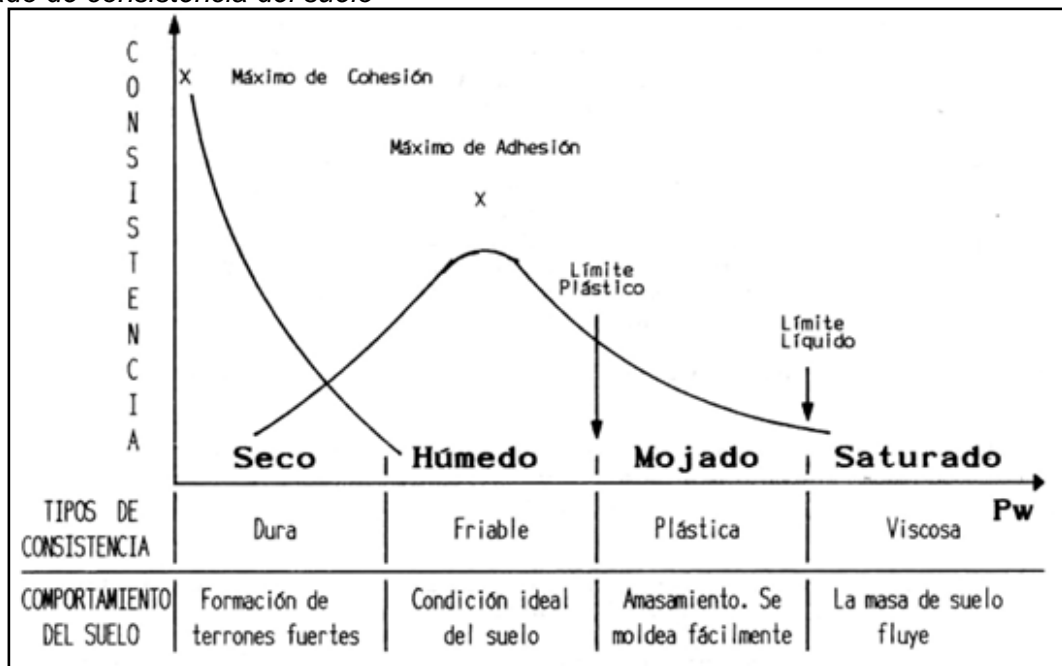
Fuente: Gonzáles de Vallejo, L. (2004), Ingeniería Geológica

En geotecnia se dividen los suelos en función del contenido de humedad que se representa mediante los límites de Atterberg: límite de retracción, ω_R , límite plástico, ω_P , y límite líquido ω_L . Estos valores separan las diferentes consistencias o apariencias del suelo. Así, distinguimos entre consistencia dura o sólida, consistencia friable

(desmenuzable fácilmente) o semisólida, consistencia plástica y consistencia viscosa o fluida, ver Figura 5. De este modo, el límite de retracción, ω_R , es el contenido de humedad del suelo en su apariencia sólida. El límite líquido del suelo, ω_L , es el contenido de humedad en su apariencia líquida. Del mismo modo, el límite plástico o ω_P es el contenido de humedad en el estado plástico del suelo. El contenido de humedad (P_w) y los límites de Atterberg se expresan en % de agua en peso de suelo seco.

Figura 5

Grado de consistencia del suelo



Fuente: Ayala, L. (2014), Manual de Ingeniería Geológica

2.1.3.3 Densidad relativa. La densidad relativa es una manera de indicar el grado de compactación de un suelo y se puede emplear tanto para suelos granulares naturales como para rellenos compactados de estos suelos.

Conceptualmente, la densidad relativa indica el estado de compactación de cualquier tipo de suelo. Sin embargo, y de acuerdo a cómo se determina el valor de la densidad relativa, surgen dificultades para suelos granulares con bolones. Para los suelos finos, la densidad relativa no tiene interés ya que los procedimientos de vibración utilizados para obtener la densidad máxima – referente de la densidad relativa – no son efectivos en

estos suelos, para los cuales el ensayo de compactación será el utilizado en la especificación de los rellenos.

Este parámetro se utiliza para caracterizar materiales arenosos, de forma que una densidad relativa del 0 % equivaldría a una arena suelta y una del 100 % a una arena densa. Una arena con una densidad relativa del 90 % indica que la compactación a la que ha llegado el material es la máxima compactación que puede alcanzar. La tabla 3, califica el estado de compactación del suelo en función de la densidad relativa (D_r %).

Tabla 3

Densidad relativa y compactación asociada

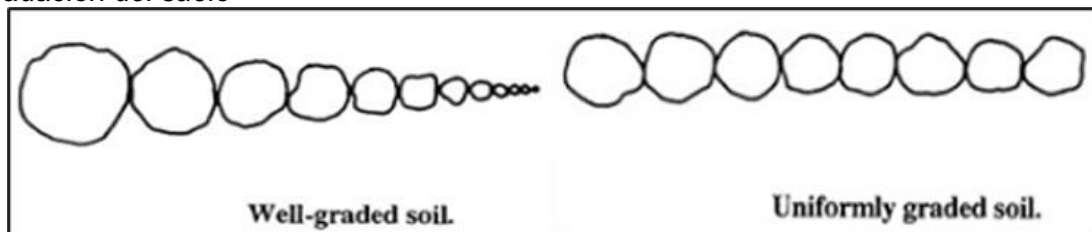
D_r (%)	0-15	15-30	30-50	50-80	>80
Estado de compactación	Muy suelta	Suelta	Media	Densa	Muy Densa

Fuente: Ayala, L. (2014), Manual de Ingeniería Geológica

2.1.3.4 Gradación del suelo. La gradación del suelo es su clasificación en función a las partículas que componen el suelo y su tamaño. Se realiza en porcentaje de peso. Los suelos se pueden clasificar como bien, o mal gradados. En cuanto a los suelos bien gradados; tienen una amplia distribución de tamaños. Por contrario, los suelos mal gradados; tienen ciertos tamaños de partículas que predominan.

Figura 6

Gradación del suelo



Fuente: Ayala, L. (2014), Manual de Ingeniería Geológica

2.1.3.5 Contenido de humedad. El contenido de humedad del suelo es la cantidad de agua que se encuentra en los espacios porosos del suelo. Se puede expresar como un porcentaje, en agua por peso o volumen, o en pulgadas de agua por pie de suelo. El contenido de humedad del suelo depende de varios factores, como el clima, el tipo de terreno o depósito.

Tabla 4*Contenido de humedad y codificación*

DESCRIPCIÓN DE HUMEDAD	CÓDIGO
Seco	SC
Húmedo	H
Saturado	ST

Fuente: Ayala, L. (2014), Manual de Ingeniería Geológica

2.1.3.6 Tipo de suelo y clasificación SUCS. Se define al suelo como un agregado de partículas, minerales o de materia orgánica, en mayor dimensión se le denomina depósito, la cual por acciones mecánicas pueden separarse, incluyendo cantidades variables de agua y aire (de acuerdo a las normas ASTM D3282 y SUCS). El tipo de suelo es la información de entrada para la descripción de un suelo. En la Tabla 5, se muestra la clasificación del suelo en base al tamaño de sus partículas:

Tabla 5*Tipo de suelo y tamaño de partículas*

TIPO DE SUELO EN FUNCIÓN AL TAMAÑO DE PARTÍCULA						
SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS				SUELO DE PARTICULAS FINAS		
Más de la mitad del material es retenido en la malla N°200				Más de la mitad del material pasa la malla N°200		
Bloques	Bolones	Gravas	Arenas	Limos	Arcillas	Orgánicos
>200 mm	60 mm - 200 mm	2 mm - 60 mm	75 µm - 2 mm	< 75 µm		

Fuente: Burt G. Look (2007), Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables

La clasificación del suelo está basada en el Sistema de Clasificación Unificada (SUCS), usado en la actualidad en el mundo, fue fundamentado en el criterio del Sistema de Clasificación de Aeropuertos en 1942 por A. Casagrande, para después ser adoptado por el cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América, ver tabla 6.

Tabla 6

Descripción de suelo de acuerdo a la norma SUCS

PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACIÓN EN EL CAMPO				Símbolo del grupo	Nombre Típico	
(Excluyendo las partículas mayores de 7.6 cm (3"))						
SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS (>50% retenido malla N°4)	Gravas (>50% retenido malla N°4)	Gravas limpias	Variedad en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables	GW	Gravas bien graduadas, mezcla de grava y arena, con poco o nada de finos	
			Predominio de un tamaño o un tipo de tamaño, con ausencia de algunos tamaños intermedios	GP	Gravas mal graduadas, mezcla de grava y arena, con poco o nada de finos	
	Gravas con finos		Fracción fina poco o nada plástica	GM	Gravas limosas, mezcla de grava, arena y limos	
			Fracción fina plástica	GC	Gravas arcillosas, mezcla de grava, arena y arcilla	
	Arenas (>50% pasa malla N°4)	Arenas limpias		Variedad en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables	SW	Arenas bien graduadas, arena con grava, con poco o nada de finos
				Predominio de un tamaño o un tipo de tamaño, con ausencia de algunos tamaños intermedios	SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, con poco o nada de finos
		Arenas con finos		Fracción fina poco o nada plástica	SM	Arenas limosas, mezcla de arenas y limo
				Fracción fina plástica	SC	Arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla
PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACIÓN EN LA FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA N°40						
		Resistencia en estado seco	Dilatancia	Tenacidad	Símbolo del grupo	Nombre Típico
SUELOS DE PARTICULAS FINAS (>50% pasa malla N°200)	Limos y arcillas (límite líquido <50%)	Nula o ligera	Rápida o lenta	Nula	ML	Limo inorgánico, limo arenoso o arcilloso
		Media o alta	Nula o muy lenta	Media	CL	Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas
	Limos y arcillas (límite líquido >50%)	Ligera o media	Lenta	Ligera	OL	Limo orgánico y arcillas limosas orgánicas
		Ligera o media	Lenta o nula	Ligera o media	MH	Limo inorgánico, limos micáceos o diatomáceos, limos elásticos
		Alta o muy alta	Nula	Alta	CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas
		Media o alta	Nula o muy lenta	Ligera a media	OH	Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad
SUELO ALTAMENTE ORGÁNICO		Sensación esponjosa, textura fibrosa		PT	Turba y otro suelo altamente orgánico	

Fuente: Juaréz, B. E. y Rico, R. A. (2005). Mecánica de suelos. Fundamentos de la mecánica de suelos.

2.1.4 Características geomecánicas de la roca

La descripción del macizo rocoso toma datos cualitativos y si fuera posible cuantitativos, por lo que los métodos de caracterización normalmente permiten obtener valores numéricos. En ese sentido, con la ayuda de tablas establecidas con valores y criterios conllevan a cuantificar dichas características y obtener parámetros. Dichos parámetros son fundamentales para la clasificación geomecánica de los macizos rocosos.

2.1.4.1 Recuperación de muestras de testigos. Para la recuperación de testigos de roca y suelos con presencia de bolonería, se empleó el uso de coronas diamantadas y con circulación constante de agua; mientras para la recuperación de muestras de suelo de granulometría fina a media, la perforación se realizó con broca tipo serrucho y con mínima o sin agua. El proceso de perforación se alinea al cumplimiento de la guía Diamond Core Drill Manufacture Association (DCDMA).

La recuperación promedio de testigos deberá ser como mínimo: 90% en roca sana, en roca fracturada y suelo compacto 85%. Se debe usar brocas tipo serrucho para mejorar la recuperación en suelos y desmonte. La perforación en suelo debe incluir la descripción de los materiales encontrados, tales como: color, clasificación de campo, contenido de humedad, consistencia y/o compacidad, contenido de gravas, etc., de acuerdo con lo descrito ASTM D 2113

La recuperación de los testigos de roca de la perforación diamantina de un sondaje se expresa en porcentaje respecto de la longitud total perforada, el cual indica la calidad del terreno y de la competencia general de la roca, ideal para la caracterización geotécnica. En caso se tenga una baja recuperación, indicaría una zona de alto grado de fracturamiento o zona de falla (Cáceres y Lipa, 2019).

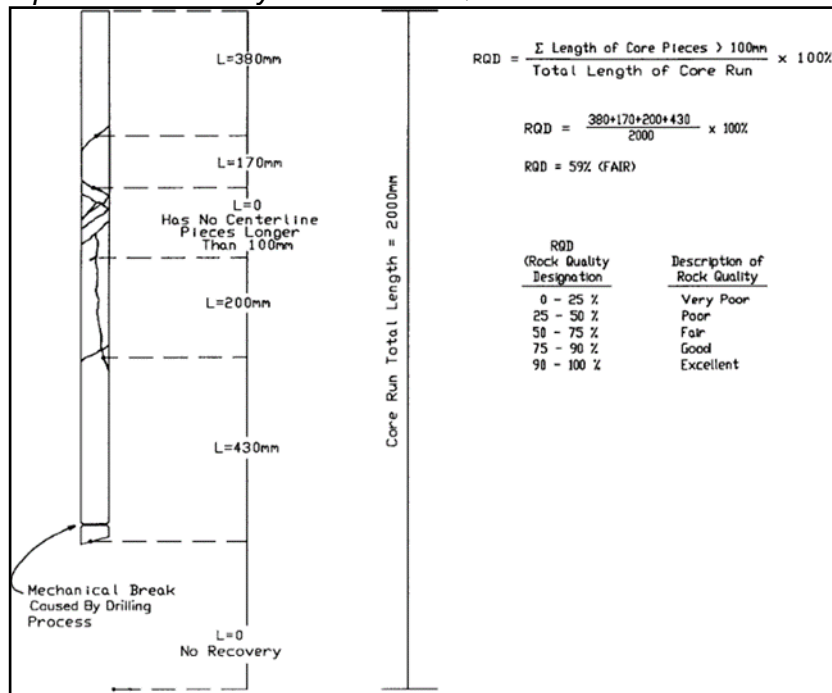
2.1.4.2 Índice de calidad de roca (RQD). El grado de fracturamiento se expresa habitualmente por el valor índice RQD (Rock Quality Designation). Es una medida del grado de fracturamiento del macizo rocoso, también está influenciado por la calidad de la perforación y de la manipulación de los testigos de roca. Para la estimación del RQD se consideran sólo los fragmentos o trozos de testigo de material fresco, excluyéndose los que presentan un grado de alteración importante.

- Para el cálculo del RQD se toma en cuenta sólo los fragmentos o trozos de testigo de material rocoso fresco, se excluyen los que tienen grado de alteración y meteorización avanzada, para los que se considera un RQD = 0 %.
- Se debe medir la longitud de los fragmentos frescos mayores o iguales a 10 centímetros (100 mm), posteriormente se suma la longitud total de los fragmentos.

- Solo aquellas piezas de roca formadas por fracturas naturales (es decir, uniones, zonas de cizalla, planos de estratificación o planos de división que da como resultado superficies de separación) se considerarán para la estimación del RQD.
- Las piezas del núcleo a cada lado de los saltos de núcleo causado por el proceso de perforación se consideran como fragmentos juntos y se cuentan como una sola pieza.

Figura 7

Procedimiento para la medición y cálculo del RQD



Fuente: ASTM International, (1996) Norma D6032.

2.1.4.3 Clasificación del macizo rocoso (RMR). El macizo rocoso es un medio discontinuo, complejo, con un comportamiento geomecánicos que puede ser estudiado y clasificado en función de su aptitud para distintas aplicaciones. Las clasificaciones geomecánicas aportan índices de calidad relacionados con parámetros geomecánicos del macizo, sostenimiento de túneles y taludes, excavabilidad. La descripción y medida de las características y propiedades de la matriz rocosa, de las discontinuidades y de los parámetros globales del macizo rocoso, proporcionan los parámetros requeridos por las distintas clasificaciones.

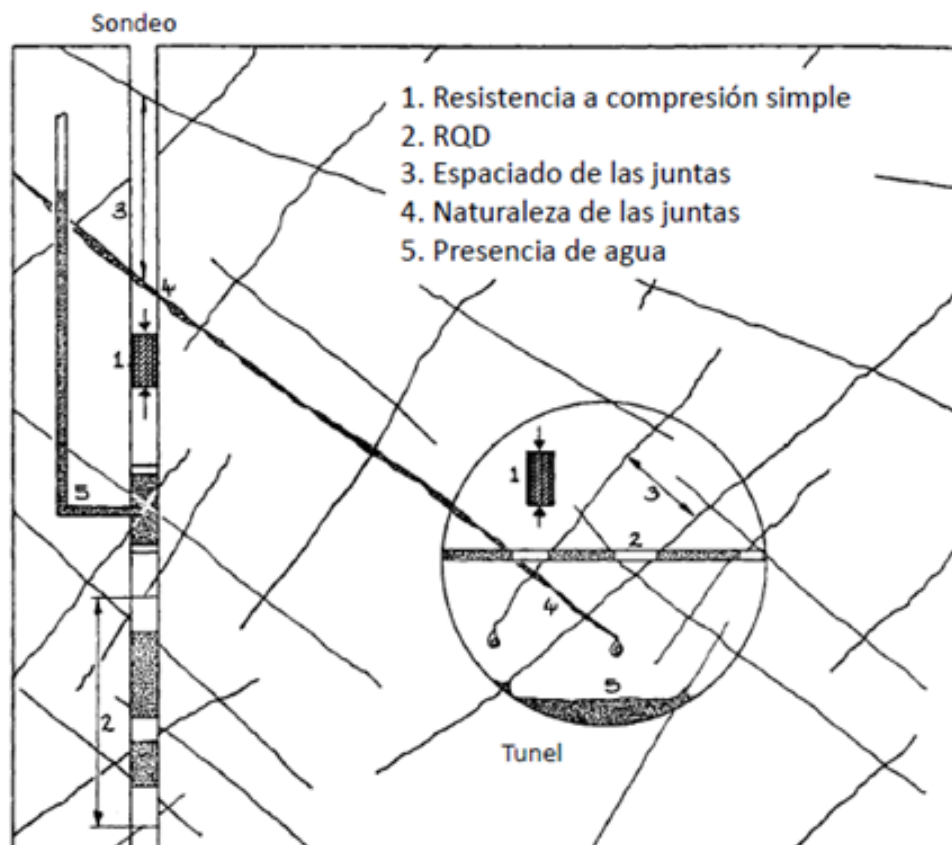
El sistema Rock Mass Rating (RMR) fue desarrollado por Bieniawski a partir de la experiencia en obras realizadas en África del Sur. Esta clasificación evalúa la calidad del macizo rocoso a partir de los siguientes parámetros:

- (1) Resistencia de la roca intacta.
- (2) RQD
- (3) Espaciamiento de las juntas
- (4) Condición o Naturaleza de las juntas
- (5) Presencia de agua subterránea

En la siguiente imagen se visualiza los parámetros en un sondeo representado.

Figura 8

Parámetros para el cálculo del RMR



Fuente: Ayala, L. (2014), Manual de Ingeniería Geológica

En las Tabla 7 y 8; se aprecia los parámetros para la clasificación del RMR89 y RMR76. Donde el puntaje total del RMR está definido por: $(1)+(2)+(3)+(4)+(5)$.

Tabla 7

Valoración de cada parámetro RMR89

PARAMETROS		ESCALA DE VALORES							
1	Resistencia de la roca intacta	Compresión Simple (Mpa)	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 Mpa	1-2 Mpa	Para estos valores es preferible la resistencia a compresión simple		
		Índice Carga Puntual (Mpa)	>250 Mpa	100-250 Mpa	50-100 Mpa	25-50 Mpa	5-25 Mpa	1-5 Mpa	<1 Mpa
	Valoración	15	12	7	4	2	1	0	
2	R.Q.D	90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%			
	Valoración	20	17	13	8	3			
3	Espaciamiento de las juntas	> 2.00 m	0.60-2.00 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm			
	Valoración	20	15	10	8	5			
4	Condición de las juntas	Muy rugosas, sin continuidad, cerradas, roca sana	Ligeramente rugosa, separación < 1mm, roca ligeramente meteorizada	Ligeramente rugosa, separación <1mm, roca muy meteorizada	Espejo de falla o relleno de espesor < 5mm, o juntas abiertas 1-5 mm, juntas continuas	Relleno blando de espesor >5 mm, o juntas abiertas >5 mm, juntas continuas			
		Valoración	30	25	20	10	0		
5	Condición de Agua subterránea	Completamente seco	Manchas de humedad	Muy húmedo	Goteo	Flujo de agua			
		Valoración	15	10	7	4	0		

Fuente: Bieniawski (1989), Engineering rock mass classifications.

Tabla 8

Valoración de cada parámetro RMR76

PARAMETROS		ESCALA DE VALORES							
1	Resistencia de la roca intacta	Compresión Simple (Mpa)	>8 MPa	4-8 MPa	2-4 Mpa	1-2 Mpa	Para estos valores es preferible la resistencia a compresión simple		
		Índice Carga Puntual (Mpa)	>200 Mpa	100-200 Mpa	50-100 Mpa	25-50 Mpa	10-25 Mpa	3-10 Mpa	1-3 Mpa
	Valoración	15	12	7	4	2	1	0	
2	R.Q.D	90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%			
	Valoración	20	17	13	8	3			
3	Espaciamiento de las juntas	>3.00 m	1.00-3.00 m	0.30-1.00 m	50-300 mm	<50 mm			
	Valoración	30	25	20	10	5			
4	Condición de las juntas	Superficies muy rugosas, sin continuidad, sin separación	Superficies algo rugosas, separación < 1mm, paredes de roca dura	Superficies algo rugosas, separación <1mm, paredes de roca suave	Superficie s púlidas o relleno <5mm, juntas abiertas 1-5mm	Relleno blando < 5 mm o juntas abiertas <5mm, juntas continuas			
		Valoración	25	20	12	6	0		
5	Condición de Agua subterránea	Totalmente seco		Húmedo	Ligera presencia de agua	Seco			
		Valoración	10		7	4	0		

Fuente: Bieniawski (1976). Engineering rock mass classifications.

La interpretación de los valores del RMR están sujetas a las puntuaciones que oscilan entre 0 y 100. Esta valoración está definida en cinco clases de roca designadas con números romanos que corresponden con cinco calidades del macizo rocoso: muy buena, buena, regular, mala y muy mala.

Tabla 9

Interpretación de los valores de RMR

DESCRIPCIÓN	RMR	CLASE DE MACIZO ROCOSO
Roca Muy Buena	81-100	I
Roca Buena	61-80	II
Roca Regular	41-60	III
Roca Mala	21-40	IV
Roca Muy mala	0-20	V

Fuente: Bieniawski (1989), Engineering rock mass classifications.

2.1.4.4 Alteración del macizo rocoso. El término alteración implica modificaciones complejas de la roca preexistente o primaria. Estas modificaciones abarcan cambios mineralógicos, texturales y de composición. La alteración del macizo rocoso se determina en cada corrida y se define según lo recomendado por el ISRM (1981).

Tabla 10

Términos y descripción del grado de alteración del macizo rocoso

TÉRMINO	DESCRIPCIÓN
Fresca	Sustancia rocosa no afectada por la alteración, incluyendo oxidación.
Ligeramente alterada	Sustancia rocosa afectada por la alteración al punto que ha ocurrido oxidación parcial y/o blanqueamiento. La textura y/o el color original de la roca no alterada puede todavía ser reconocible.
Moderadamente alterada	Sustancia rocosa afectada al punto que la oxidación y/o el blanqueamiento se extienden sobre toda la sustancia rocosa y el color y la textura originales de la roca no alterada ya no son reconocibles.
Altamente alterada	Sustancia rocosa afectada por la alteración al punto que la oxidación y/o el blanqueamiento afectan toda la sustancia rocosa y señales de descomposición química y física de minerales individuales son generalmente evidentes.
Extremadamente alterada	Sustancia rocosa afectada por la alteración al punto que los minerales de la roca madre están ausentes o fueron completamente reemplazadas.

Fuente: Ayala, L. (2014), Manual de Ingeniería Geológica

2.1.5 Ensayo in situ

Los ensayos geotécnicos in situ constituyen una serie de técnicas variadas e independientes con un objetivo común: la caracterización física y mecánica de las capas que componen el suelo a través de parámetros medidos en el propio medio natural. La

utilización de los ensayos in situ nos permite determinar de forma directa o indirecta parámetros de resistencia, deformabilidad y permeabilidad tanto en suelo como en roca.

Durante las perforaciones diamantinas se han ejecutado ensayos geotécnicos in situ en cada perforación y profundidades variables. Para caracterizar las propiedades de los índices, la resistencia y la conductividad hidráulica de cada unidad geotécnica. A continuación, se detalla los ensayos ejecutados:

La ejecución de los ensayos de penetración SPT consiste básicamente en hincar sobre el terreno utilizando el muestreador de tubo partido, de diámetro interno (DI) 34.90 mm, acoplado a barrilaje hasta la superficie del terreno. Posteriormente, mediante un dispositivo manual se deja caer libremente el martillo de 63.50 kg desde una altura de 76.20 cm sobre la cabeza de golpeo hacia barrilaje. El ensayo se realizó en tramos de 45 cm, se toma la lectura de la cantidad de golpes por cada 15 cm de penetración. El valor del número de golpes de SPT es tomando en cuenta la sumatoria de golpes de los dos últimos tramos de 15 cm.

El ensayo LPT presenta un procedimiento similar al anterior, con la diferencia que el muestreador de tubo partido presenta un diámetro interno (DI) de 61.00 mm, de igual forma, en este ensayo se deja caer, desde una altura de 76.20 m, un martillo de 136 kg. La utilidad de este tipo de ensayo es el mayor diámetro de la cuchara LPT, el cual permite obtener muestras con granulometría más gruesa y ensayar inclusive terrenos clasificados como GC y GM. El ensayo también se realiza en tramos de 45 cm, tomando la lectura de la cantidad de golpes por cada 15 cm de penetración. El ensayo LPT es correlacionable con el ensayo SPT, la diferencia entre estos dos ensayos, como se menciona, es el peso del martillo y el tubo muestreador que es de diámetro mayor que al del ensayo SPT.

El ensayo de penetración de cono (CP) se realiza usando una barra con punta cónica, instrumentada mediante varias barras hasta superficie del terreno, luego, se deja caer libremente el martillo de 63.50 kg desde la altura de 76.20 cm sobre la cabeza de golpeo hacia barrilaje. El ensayo se realiza en tramos de 45 cm, se toma la lectura de la cantidad de golpes por cada 15 cm de penetración.

Con los resultados obtenidos de los ensayos de penetración SPT, LPT y CP se determina la compacidad y consistencia del suelo, y mediante correlaciones existentes se puede estimar la resistencia a la compresión simple y los parámetros resistentes como el ángulo de fricción y la cohesión.

2.1.6 Ensayos de permeabilidad

Los ensayos de permeabilidad en roca son pruebas geotécnicas que miden la capacidad de una roca para permitir el paso de fluidos como el agua, el petróleo o el gas. Se utilizan para evaluar la permeabilidad de rocas fracturadas o macizos rocosos, y son útiles para diseñar estructuras subterráneas como presas y túneles

En campo se realizan los ensayos de permeabilidad del tipo Lugeon y Lefranc de acuerdo con el tipo de material, con la intención de obtener propiedades de conductividad hidráulica.

2.1.6.1 Ensayo Lefranc. El ensayo Lefranc consiste en introducir o bombear agua hacia la perforación diamantina, creando una cavidad que es mantenida constante, a una determinada profundidad. Este ensayo es aplicable principalmente a suelos y rocas muy fracturadas.

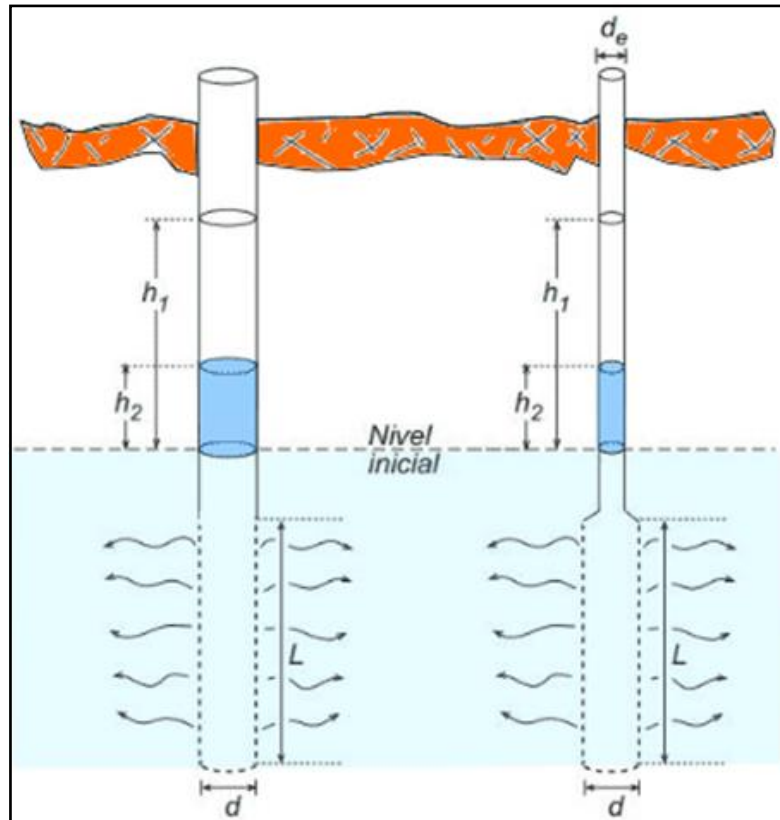
Existen dos modalidades, con carga constante y con carga variable. El uso de una modalidad u otra varía en función del caudal que admite el tramo de ensayo. Así, para los materiales que presentaron elevada permeabilidad y admitieron un mayor caudal, se empleó el método de carga constante.

Los ensayos Lefranc de carga Constante, consisten en inyectar, por intermedio de una bomba, un caudal de agua necesario para mantener un nivel constante, cuyo consumo de agua es leído en el caudalímetro.

Los ensayos se efectuaron a distintas profundidades espaciadas aproximadamente cada cinco (05) metros y los tramos de ensayos han variado de 0.60 m a 8.00 metros. Los resultados de los ensayos nos indican la permeabilidad del material, lo cual puede ser utilizado mediante correlaciones para obtener el índice de porosidad (suelo).

Figura 9

Ensayo Lefranc



Fuente: Maldonado, Y. (2020), Ensayo Lefranc carga constante y carga variable.

2.1.6.2 Ensayo Lugeon. Este ensayo sirve para determinar la permeabilidad y el comportamiento de los macizos rocosos frente a la percolación del agua a través de sus fisuras.

Al igual que el ensayo tipo Lefranc, se determina la profundidad para realizar el ensayo, seguidamente se lava con agua limpia y se determina el bulbo de ensayo a realizar, normalmente 10 m de tramo de ensayo.

El ensayo consiste en inyectar agua a distintas presiones en un determinado tiempo, previamente obturado con packer. La cantidad de agua inyectada es medida por un caudalímetro durante un tiempo necesario para que se obtenga gastos constantes. Las presiones de ensayo se dividen en estadios máximas, intermedias y mínimas, estas presiones máximas deben estar por debajo de la carga litostática, para evitar la disturbación del macizo en el pozo. El supervisor recomendará las presiones del ensayo.

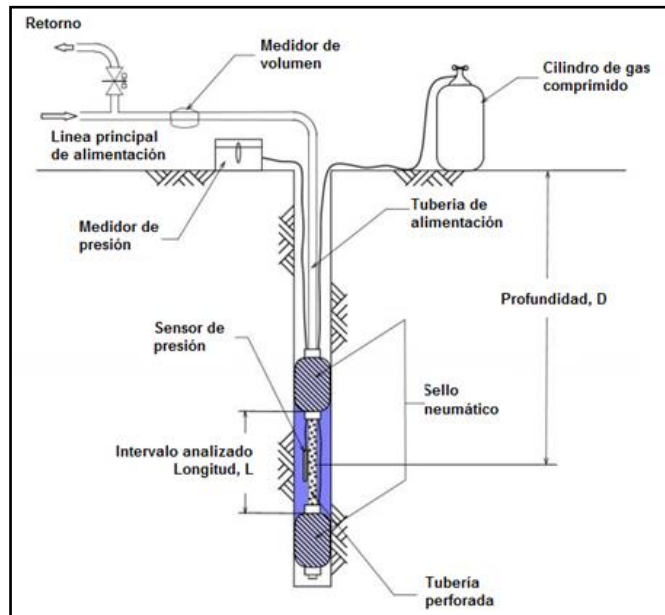
Se usa obturador (packer) neumático que garantice el perfecto sellado del espacio anular del sondeo. Se recomienda el uso de gas nitrógeno para el inflado del packer.

Para la prueba se recomienda seguir los siguientes pasos:

- Lavar el tramo de ensayo lo más limpio posible (obteniendo agua cristalina) antes de iniciar el ensayo.
- Levantar la tubería de perforación para obtener el tramo de ensayo.
- Medir el nivel de agua en caso exista.
- Bajar el packer sujetado al cable wireline previamente conectado al cable del nitrógeno, asegurarse si esta se ubicó perfectamente.
- Inflar el packer con gas nitrógeno, verificando que los cables de conexión de nitrógeno no presenten fugas. No se debe exceder la presión de inflado sobre la capacidad máxima recomendada.
- Inyectar agua a presión, inferior al primer estadio, hasta saturar el tramo de ensayo.
- Inyectar agua a las presiones establecidas, en forma ascendente y luego descendente.
- En cada estadio debidamente estabilizado se efectuarán las medidas del caudal cada
cada
- minuto, hasta llegar alrededor de 10 medidas de caudal. Es necesario precisar que la lectura del caudal debe variar más o menos 10%.
- Cualquier detalle u observación durante el ensayo debe ser registrado en el formato del ensayo.
- Una vez concluido el ensayo se desconecta el cable del nitrógeno para desinflar el packer y luego retirar del sondeo.

Figura 10

Ensayo Lugeon



Fuente: Ensayo lugeon s.f. (2024), <https://lugeon.blogspot.com/>

2.1.7 Instrumentación geotécnica

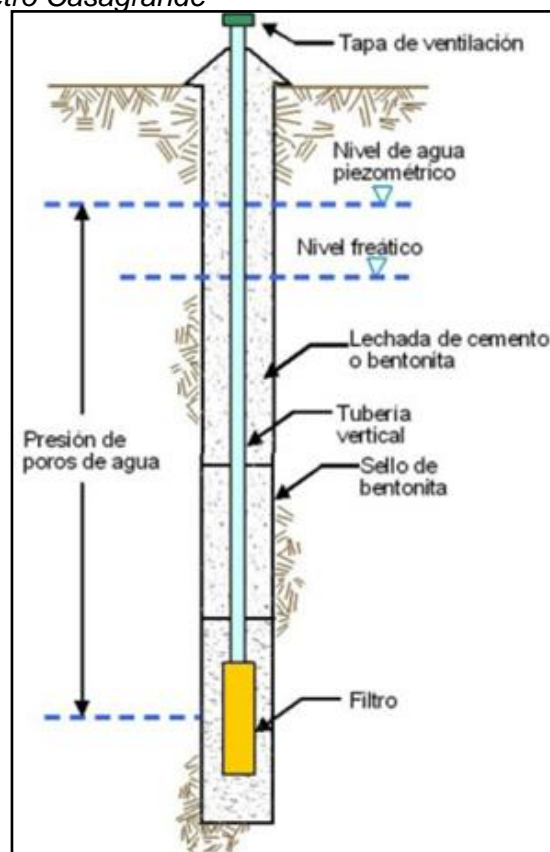
Herrera, H. J y Castilla, G. J. (2012) en su libro “Utilización de técnicas de sondeos en estudios geotécnicos”, señala que los piezómetros se diseñan para medir el potencial hidráulico de forma puntual en niveles acuíferos individualizados. Los tramos filtrantes de la tubería piezométrica son fijados en función de la columna litológica investigada con el sondeo previo y se aislarán los tramos filtrantes del resto del sondeo, colocando tapones en el anular entre la tubería y el taladro. Al finalizar la instalación, los piezómetros serán limpiados mediante bombeo para asegurar una perfecta conexión con el acuífero.

La instrumentación geotécnica en minería es un proceso que consiste en medir y controlar variables del terreno o de las estructuras para garantizar su seguridad. Los piezómetros son instrumentos empleados para monitorear los niveles piezométricos de agua, necesarios en los controles de colocación del material de relleno, la predicción de la estabilidad de los taludes, el monitoreo de la infiltración y la verificación de modelos de flujos. En el presente proyecto de investigación se han instalado dos tipos de piezómetros tipo Casagrande y piezómetros eléctricos de cuerda vibrante. A continuación, se indican las características de cada uno de ellos.

2.1.7.1 Piezómetros tipo casagrande o tubo abierto. Read, J. y Stacey, P. (2009) en su libro *Guidelines for Open Pit Slope Desing*, indica que este tipo de piezómetro consiste desde la base del pozo con tubería ranurada de longitud deseada, unida con una tubería impermeable que sube hacia la superficie. El intervalo de tubería ranurada está aislado por un sello superior, generalmente con lechada. Los piezómetros tipo Casagrande son instalados en perforaciones y consisten en un filtro unido a una tubería vertical. El filtro es colocado en una zona de arena y posteriormente se coloca un sello de bentonita para aislar la presión de poros en el filtro. El espacio entre la tubería vertical y la perforación es relleno con un mortero de cemento para prevenir el movimiento no deseado del agua hacia la superficie. El detalle de la instalación se muestra en la Figura 11.

Figura 11

Instalación de piezómetro Casagrande



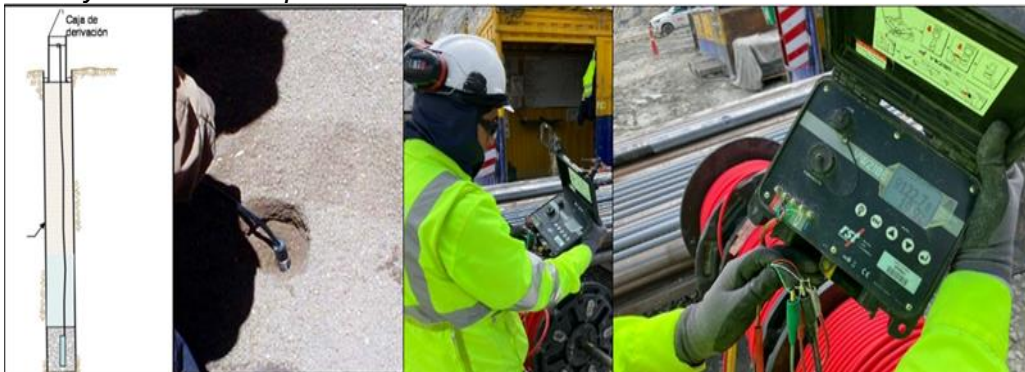
Fuente: Ayala, L. (2014), *Manual de Ingeniería Geológica*

2.1.7.2 Piezómetro de sensores cuerda vibrante. Los piezómetros eléctricos de cuerda vibrante son sellados en pozos de perforación y embebidos en rellenos para medir las presiones de poros.

Los sensores de cuerda vibrante son dispositivos cuyas mediciones se generan a partir de las deformaciones, contienen un cable de acero altamente extensible con un ancla fija a una extremidad y al otro extremo cuenta con un diafragma que entra en contacto con la presión del agua. El cable se altera eléctricamente, con la frecuencia resonante de vibración proporcional a la tensión en el cable. Esta frecuencia induce una corriente alternativa en la bobina que es detectada por la unidad de lectura, y esta es convertida en unidades de presión. Estos piezómetros otorgan una gran precisión y estabilidad en las lecturas realizadas, bajo condiciones geotécnicas rigurosas.

Figura 12

Instalación y monitoreo de piezómetro cuerda vibrante rst.



Fuente: Elaboración propia

2.1.8 Muestreo para ensayo de laboratorio

Botía, W. (2015) en su libro “Manual de procedimientos de ensayos de suelos y memorias de cálculo”, menciona que la caracterización y clasificación de los suelos es posible gracias a procedimientos efectuados a los mismos en las pruebas de laboratorio. Con el objetivo de garantizar que los resultados en los estudios de suelos tengan la menor variabilidad posible entre laboratorios, se han constituido normas estándar para la realización de dichos ensayos. La precisión en los resultados de los ensayos de laboratorio no solamente depende del seguimiento estricto de los pasos recomendados por las normas existentes, sino también de la calidad y buen estado de los equipos que se utilicen en el proceso. Así como de la preparación de las personas encargadas y del conocimiento que estos tengan acerca del tema, de las condiciones de los lugares destinados a los

laboratorios, de los procedimientos de extracción y manejo de muestras y de otros tantos factores.

Se consideran muestras alteradas aquellas una vez son extraídas del terreno pierden la condición de su estructura original. Normalmente son recolectadas por medios de perforación y son almacenadas de manera tal que se conserve su humedad natural o contenido de agua.

Se consideran muestras inalteradas aquella que son extraídas por métodos que hacen posible que se mantenga la estructura natural de los suelos, como son la humedad natural, composición mineralógica y la relación de poros o vacíos. De igual manera son almacenadas y recubiertas con material impermeabilizante para mantener sus propiedades. Es necesario aclarar que la palabra inalterada no se maneja de manera totalmente literal, pues se considera poco posible el mantener el 100 % de las propiedades del suelo, una vez este haya sido extraído y trasladado a laboratorio.

2.1.8.1 Análisis granulométrico. Rodríguez, W. (2019) en su libro Fundamentos de ingeniería geotécnica suelos y cimentaciones menciona que el análisis granulométrico consiste en hacer pasar el suelo seco a través de un conjunto de mallas o tamices de alambre, pesar cada suelo retenido en cada malla y determinar en porcentaje, la cantidad que pasa o atraviesa cada malla. Luego se grafican en papel semilogarítmico; el diámetro de cada malla en las abscisas y los porcentajes que pasan en las ordenadas. La curva así obtenida se llama; curva de distribución granulométrica. Sirve para clasificar el suelo, conocer si está bien gradada para una buena base de construcción y, sí está dentro de los límites de las especificaciones.

Los tamices pueden ser para gravas, arenas y material fino. Se presentan los diámetros según la ASTM. En Tabla 11, se presenta la lista de los números de mallas utilizados de manera convencional y el tamaño correspondiente a sus aberturas, estas mallas son de uso común para el análisis de suelos para fines de su clasificación.

Tabla 11

Análisis granulométrico por malla para cada material

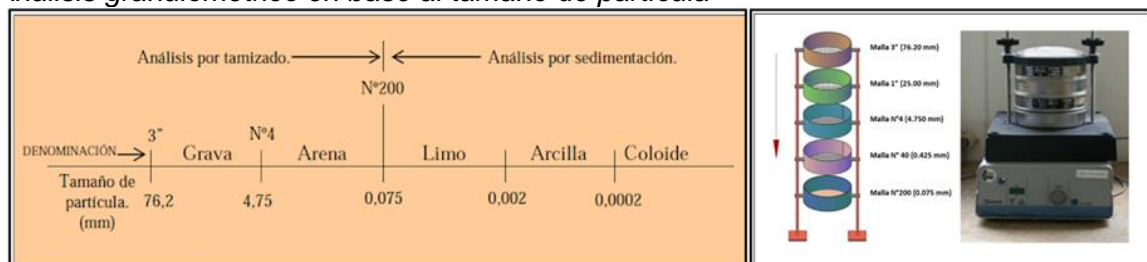
MATERIAL	N° MALLA	DIÁMETRO (mm)
Grava	3"	76.20
	2"	50.00
	1 ½ "	38.10
	1"	25.00
	¾"	19.00
	½"	12.50
	3/8"	9.500
Arena	N° 4	4.750
	N°10	2.000
	N°20	0.850
	N°40	0.425
	N°60	0.250
	N°100	0.150
Fino	Platillo	-

Fuente: Rodríguez, W. (2019), Fundamentos de ingeniería geotécnica suelos y cimentaciones

La aplicación del análisis por tamizado se aplica para tamaño de partícula mayor a 0.075 mm, para partícula menor a 0.075 mm se emplea un análisis por sedimentación.

Figura 13

Análisis granulométrico en base al tamaño de partícula



Fuente: Rodríguez, W. (2019), Fundamentos de ingeniería geotécnica suelos y cimentaciones

2.2 Investigaciones geofísicas

Los métodos geofísicos vienen siendo las técnicas con mayor incidencia en las aplicaciones geotécnicas. Su razón estriba en que los parámetros que se miden en esta metodología estén ligados íntimamente a las características dinámicas de los macizos rocosos y suelos.

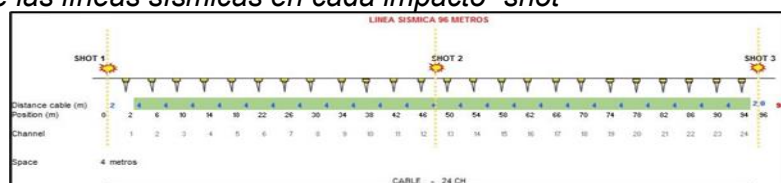
Varios tipos de procedimientos de exploración geofísica permiten una rápida evaluación de las características del subsuelo. Estos permiten una rápida cobertura de grandes áreas y son menos caros que la exploración convencional. Sin embargo, en muchos casos una interpretación definitiva de los resultados es difícil. Por esa razón, esos procedimientos deben usarse de manera complementaria con investigaciones geotécnicas. A continuación, se detalle los métodos empleados en el presente proyecto.

2.2.1 Ensayos de refracción sísmica

El ensayo de refracción sísmica es un método de exploración geofísica que permite determinar la estratigrafía del subsuelo en forma indirecta, basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que lo conforman. Este método consiste en la medición de los tiempos de viaje de las ondas de compresión (ondas p) generadas por una fuente de energía impulsiva a unos puntos localizados a distancias predeterminadas a lo largo de un eje sobre la superficie del terreno. La energía, que se propaga en forma de ondas, es detectada, amplificada y registrada de tal manera que puede determinarse su tiempo de arribo en cada punto. El tiempo cero o inicio de la grabación es generado por un dispositivo de arranque o “trigger” que activa el sistema de adquisición de datos al momento de producirse el impacto o explosión. La diferencia entre el tiempo de arribo y el tiempo cero permite evaluar el tiempo de propagación de las ondas desde la fuente de energía hasta el lugar en que éstas son registradas. Los datos de tiempo y distancia obtenidos para diferentes ubicaciones del punto de aplicación de la energía (shot), nos permite determinar las velocidades de propagación de ondas p a través de los diferentes estratos de suelos y rocas cuya estructura, geometría y continuidad son investigadas (Rivera, 2016).

Figura 14

Disposición de las líneas sísmicas en cada impacto “shot”



Fuente: Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (2011), Estudios geofísicos.

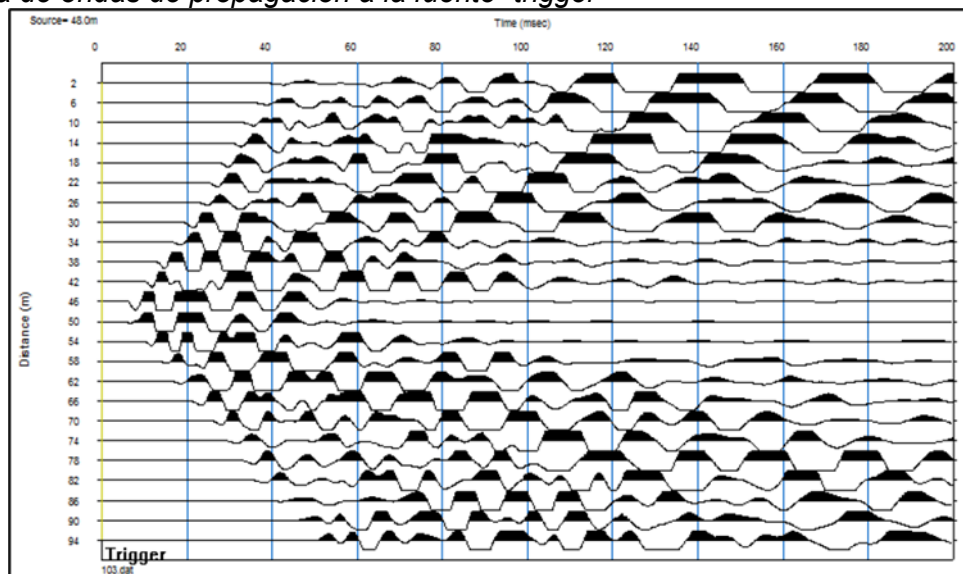
El ensayo de refracción sísmica se basa en que, a mayor profundidad, la velocidad de transmisión en el medio aumenta debido a la compactación del suelo y la composición de los estratos del suelo. Las ondas generadas por los impactos o golpes, arriban a los geófonos, después de un tiempo “t” y dependen también de la distancia “d” al martillo, así como de la elasticidad y de la densidad del medio.

Los arribos de las ondas producen vibraciones que son registrados en cada uno de los geófonos, estas son amplificadas por el sismógrafo y visualizados en la pantalla de una laptop. El Esquema nos muestra un tendido sísmico característico y la distribución de los impactos en la línea geofísica.

Las ondas que se generan son las de tipo “P” y “S”, las más usadas en los estudios de ingeniería geotécnica, se producen mediante explosivos, trípode metálico y pesa de SPT, martillo semihidráulico y de manera usual con un martillo y/o comba.

Figura 15

Llegada de ondas de propagación a la fuente “trigger”

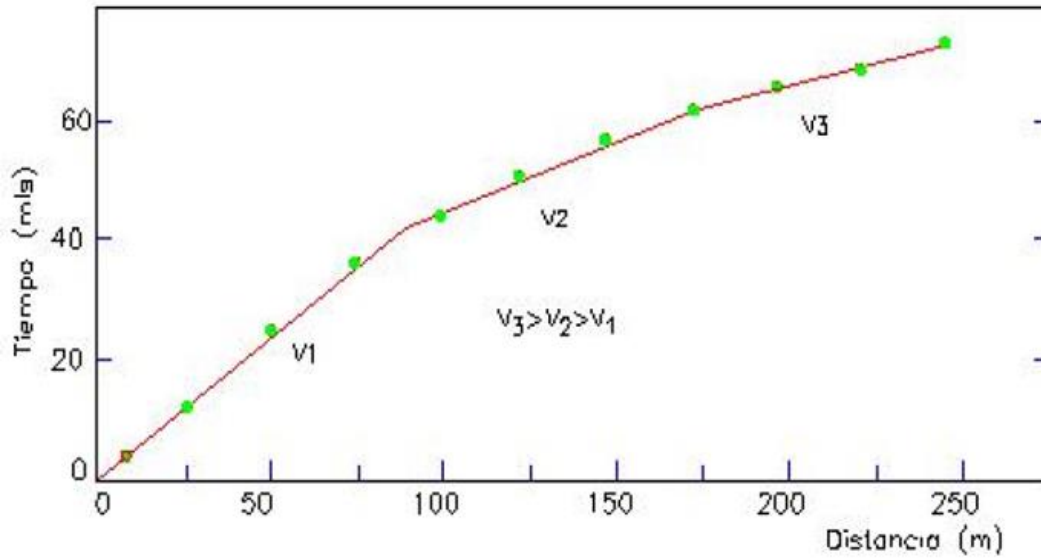


Fuente: Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (2011), Estudios geofísicos.

Una vez obtenido el registro de los tiempos de viajes y distancia, entre el tiempo inicial y cada instante de respuesta al detector (perturbación). Dicha información tiempo-distancia; también llamada dromocrónica, es analizada para obtener una interpretación en forma de velocidad de propagación de onda y el material del subsuelo, ver Figura 16.

Figura 16

Velocidad de propagación de ondas, distancia vs tiempo

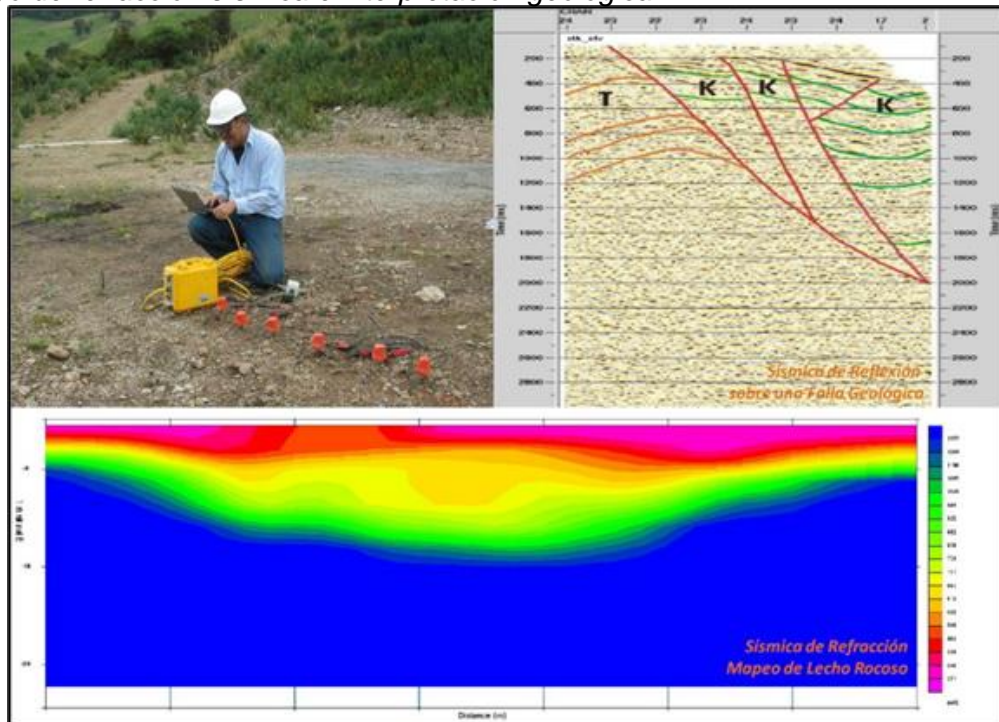


Fuente: Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (2011), Estudios geofísicos.

Es importante mencionar que el método de refracción sísmica está limitado a determinar capas de velocidades crecientes con la profundidad, ver Figura 17

Figura 17

Ensayo de refracción sísmica e interpretación geológica



Fuente: Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (2011), Estudios geofísicos.

Parámetros de adquisición en el ensayo de refracción sísmica.

Los parámetros de levantamiento de campo se presentan en la tabla 12

Tabla 12

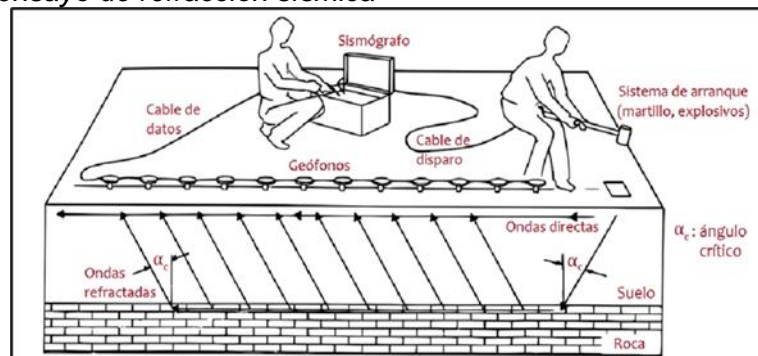
Parámetros para el ensayo de refracción sísmica

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Mediciones	T, tiempo de arribo en P
Arreglo de geófonos	24 unidades
Intervalo de geófonos	5 m y 10 m
Ganancia de Pre amplificación	24 Db
Intervalo de muestreo	0.25 ms
Fuente de Tiro	Comba de 18 Lb y Escopeta sísmica
Formato de Grabación	archivos *.dat

Fuente: Elaboración propia

Figura 18

Desarrollo del ensayo de refracción sísmica



Fuente: Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (2011), Estudios geofísicos.

2.2.2 Análisis de ondas superficiales en arreglo multicanal MASW

El ensayo MASW o análisis de múltiples canales de ondas superficiales, generadas por una fuente activa, permite la estimación del perfil de velocidad de ondas de corte del sitio en estudio por medio del registro y posterior análisis de ondas superficiales. Presenta una serie de ventajas técnicas y logísticas que lo han llevado a ser uno de los principales métodos utilizados para definir la clasificación sísmica del suelo, según el International Building Code (IBC, 2018). Utiliza equipos semejantes a la refracción sísmica y presenta un procedimiento parecido, lo que la hace una técnica muy eficiente, combinando una buena precisión, poco tiempo de consumo por ensayo y un bajo costo de operación en relación a otras técnicas sísmicas.

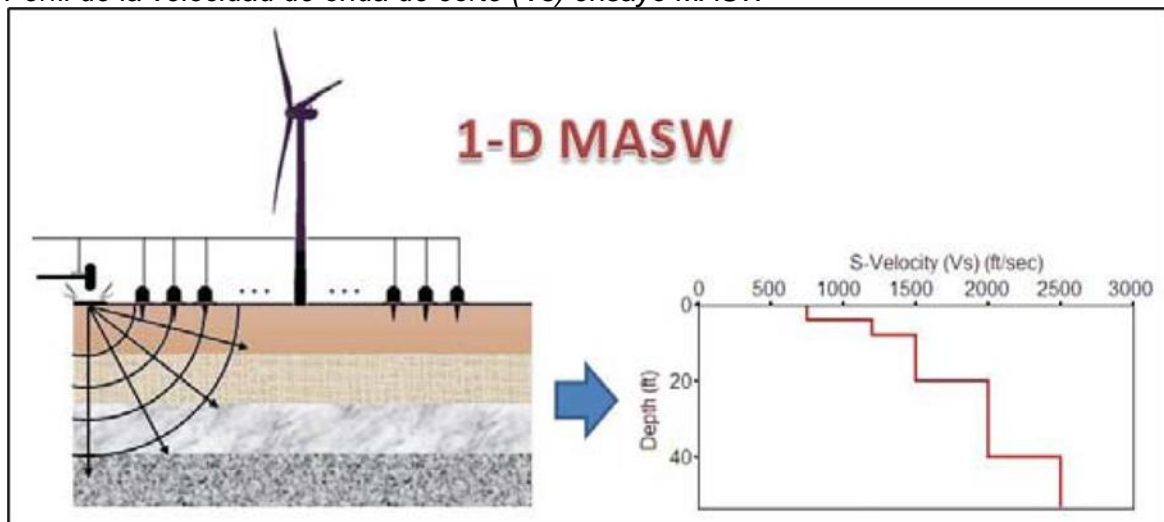
El ensayo MASW primero mide las ondas sísmicas superficiales generadas a partir de diferentes tipos de fuentes sísmicas (como un martillo), realiza el análisis de las

velocidades de propagación de estas ondas de superficie, y, finalmente, calcula la variación de la velocidad de ondas de corte (V_s) por debajo de la zona de estudio a partir de un modelo patrón de velocidad de propagación de las ondas de superficie.

La velocidad de ondas de corte (V_s) permite hallar una de las constantes elásticas y está estrechamente relacionado con el módulo de young. En la mayoría de circunstancias, V_s es un indicador directo de la rigidez del suelo y por lo tanto se utiliza comúnmente para estimar la capacidad de soporte de carga. Después de un procedimiento relativamente simple, se puede definir V_s por medio de los modelos 1-D, 2-D y 3-D. (Zevallos,2017).

Figura 19

Perfil de la velocidad de onda de corte (V_s) ensayo MASW



Fuente: Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (2011), Estudios geofísicos.

Este ensayo geofísico es comúnmente empleado en estudios geotécnicos para la cimentación de infraestructuras, como presas de relaves, presas de tierra, pads de lixiviación, y construcción de cimientos profundos (subterráneos). Se logran relaciones efectivas con la secuencia estratigráfica del suelo y subsuelo en lugares donde se realizan calicatas y perforaciones geotécnicas. Por ello presenta una alta fiabilidad y representa una opción más rentable para la evaluación de los parámetros elásticos del suelo del área de estudio.

Este método MASW utiliza la dispersión de las ondas Rayleigh, que solamente toma dos tercios del total de la energía sísmica generada por el impacto de una fuente

sobre la superficie, lo que indica una facilidad relativa de la medición en campo y de la adquisición de datos, por lo que se le considera muy útil. Sin embargo, los inconvenientes pueden aparecer al igual que en todos los otros métodos sísmicos.

Por ejemplo, la fuente genera ondas de cuerpo, tipos elevados de ondas Rayleigh, sonidos ambientales aleatorios y arribos de ondas coherentes de objetos superficiales, los cuales interfieren con la señal, ya que el modelo básico de las ondas Rayleigh es propagarse directamente desde la fuente.

El método sísmico de multicanales usa diferentes cantidades de receptores extendidos en modelos lineales, espaciados a distancias iguales y conectadas a un canal individual de registro. La realización de una medición en campo consiste en la obtención de múltiples registros de ondas a diferentes distancias de la ubicación de la fuente que las genera.

Parámetros para el ensayo MASW.

Los parámetros para el ensayo de refracción sísmica se dan a conocer en la tabla 13.

Tabla 13: Parámetros para el ensayo MASW

Parámetros para el ensayo MASW

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Configuración del dispositivo	Lineal
Intervalo de geófonos	3 m
Cantidad de geófonos	24 unidades
Frecuencia de geófonos	Geófono 4.5 Hz
Distancia de Shots	En la prolongación de la línea fuera de ella a una distancia de 10%, 20% y 40% de la longitud del dispositivo, tanto de modo normal como reverso
Fuente sísmica	Comba de 18 Lb
Trigger	Interruptor de tiro conectado al puerto de sismógrafo
Intervalo de muestreo	0.5
Longitud de registro	2 s

Fuente: Elaboración propia

2.2.3 Análisis de microtrepidaciones en arreglo multicanal MAM

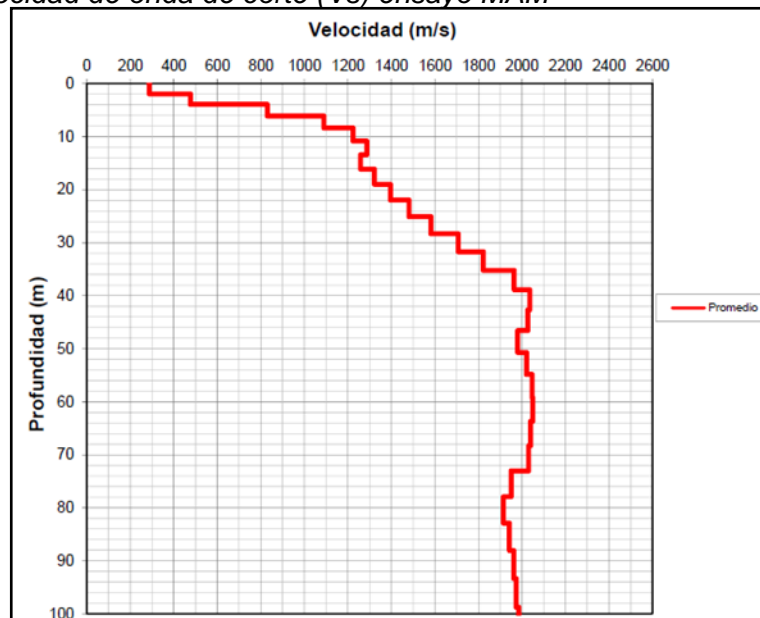
El ensayo MAM o Análisis de Microtrepidaciones en Arreglo Multicanal es un método pasivo de exploración geofísica basado en el análisis de los microtremores. No se

requiere que se genere ninguna señal, como las producidas para registrar las señales de los ensayos MASW. El ensayo MAM, implica el monitoreo de las vibraciones del entorno, utiliza como base o fuente el ruido ambiental, en arreglos predeterminados y a través del análisis de dispersión, se establece el perfil de velocidades de onda S.

Este método permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto en forma indirecta, basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que la conforman, obteniéndose el perfil de velocidades de ondas de corte (V_s) para el punto central de dicha línea, como puede verse en la Figura 20.

Figura 20

Perfil de la velocidad de onda de corte (V_s) ensayo MAM



Fuente: Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (2011), Estudios geofísicos.

Si bien el ensayo MASW puede llegar a profundidades de investigación de 20 a 30 m, mientras que el MAM tiene mayor precisión que el ensayo MASW en profundidades mayores a 30 m, por lo que se complementa con dicho ensayo para obtener el perfil completo del terreno. Determinando los perfiles estratigráficos del suelo en profundidad en función a las velocidades de ondas de corte V_s . La combinación de los métodos MASW y MAM, permiten obtener perfiles de onda s hasta la profundidad promedio de 20 a 50 m.

Parámetros para el ensayo MAM.

Los parámetros para el ensayo MAM se dan a conocer en la tabla 14

Tabla 14*Parámetros para el ensayo MAM*

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Configuración del dispositivo	Lineal
Intervalo entre geófonos	3 m
Número de geófonos	24 unidades
Tipo de geófonos	Geófono vertical de 4.5 Hz
Trigger	Manual keyboard trigger
Intervalo de muestreo	2 ms
Longitud de registro	32 s

Fuente: Elaboración propia

2.2.4 Tomografía eléctrica

La Tomografía eléctrica consiste en obtener una serie de medidas de resistividad aparente con un dispositivo tetraelectrónico, tanto en profundidad como lateralmente, en un breve espacio de tiempo, es una herramienta muy potente para llevar a cabo correlaciones entre resistividad y tipo de material en el terreno, de tal forma que el resultado final será una sección 2-D a varios niveles de profundidad (Secciones de Resistividad), modelo a partir del cual podremos determinar la presencia o no de filtraciones en profundidad, mediante la localización de áreas en donde tengamos una disminución anómala del valor de la resistividad del terreno, y las áreas donde se tengan valores muy altos de resistividad indicaran zonas de material compacto de alta densidad.

Los métodos eléctricos de resistividad emplean una fuente artificial de corriente, que se introduce en el suelo a través de 2 electrodos. El procedimiento consiste en medir los potenciales en otros electrodos en las proximidades del flujo de corriente. Debido a que la corriente se mide de esta forma, es posible determinar una resistividad efectiva o aparente del subsuelo.

Se obtiene un modelo de variación de la resistividad aparente en función de la profundidad, a partir de mediciones realizadas en superficie. La profundidad alcanzada por la corriente aumenta a medida que crece la distancia AB, aunque generalmente no existe una relación de proporcionalidad entre ambas.

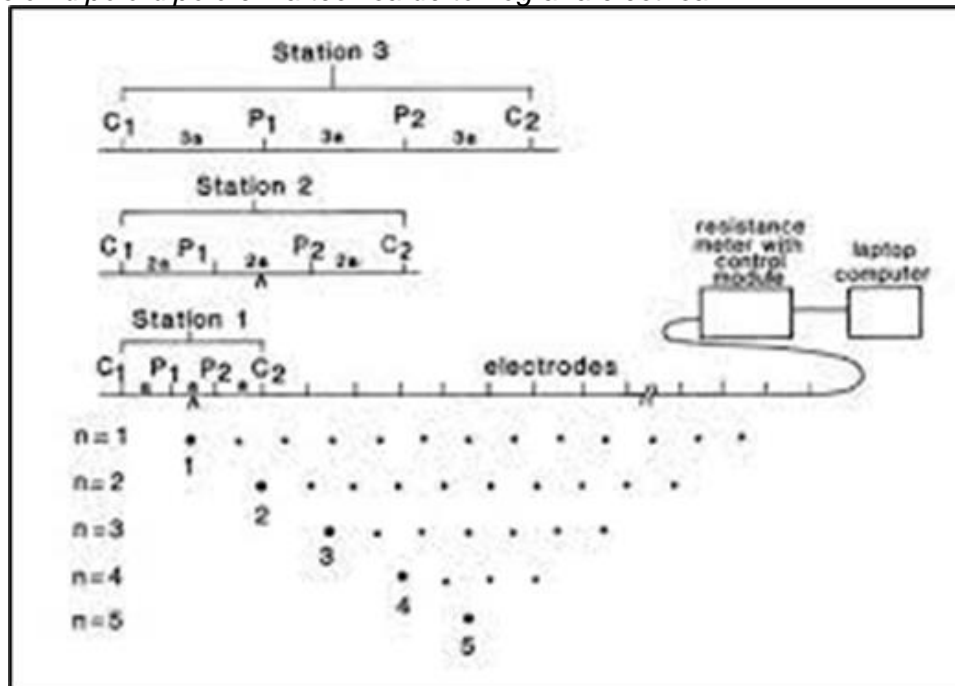
Para registrar los datos se hace circular en el terreno una corriente (que en este caso es continua) para medir los valores de voltaje (V) y corriente (I) respectivos; los contrastes que se presentan están de acuerdo con las características eléctricas del suelo.

En este sentido la técnica de la resistividad de tomografía eléctrica es superior a los otros métodos eléctricos, ya que los resultados cuantitativos se obtienen mediante el uso de una fuente controlada de dimensiones específicas.

Este método, es requerido cuando se requiere conocer la variación lateral de una formación geológica, la distribución de una pluma de contaminación, oquedades, contactos verticales, etc., debido a la variedad de arreglos a utilizar (escoger en función a la aplicación) se tiene Dipolo – Dipolo, Polo – Dipolo, Wenner Schlumber, etc (Summer, 1972).

Figura 21

Disposición dipolo-dipolo en la técnica de tomografía eléctrica

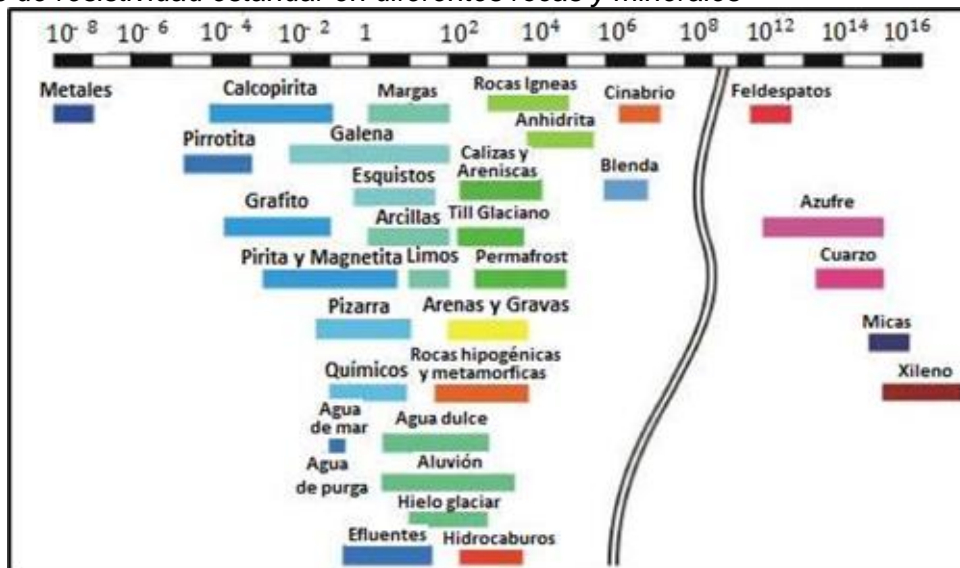


Fuente: Orellana, T. (1972) Prospección geoelectrica.

A continuación, se presenta los márgenes de variación más comunes en algunas rocas y minerales. La fisuración, impregnación de agua salada, etc., pueden extender estos límites, ver Figura 22.

Figura 22

Valores de resistividad estándar en diferentes rocas y minerales



Fuente: Orellana, T. (1972) Prospección geohelétrica.

Tabla 15

Resistividades de rocas sedimentarias en base a Telford

TIPO DE ROCA	INTERVALO DE RESISTIVIDAD (OHM-M)
Lutitas consolidadas	20 a 2x10 ³
Argilitas	10 a 8x10 ²
Conglomerados	2x10 ³ a 10 ⁴
Areniscas	1 a 6.4x10 ⁸
Lutitas	50 a 10 ⁷
Dolomías	3.5x10 ² a 5x10 ³
Arcillas saturadas no consolidadas	20
Margas	3 a 70
Arcillas	1 a 100
Aluviones y arenas	10 a 800
Arenas con petróleo	40 a 800

Fuente: Telford, W. (1976) Propiedades geofísicas de rocas y suelos calcáreos.

Cabe mencionar que la resistividad de algunos minerales, y como consecuencia de las rocas que estos forman, varía según la dirección del medio que se toma, es decir presenta anisotropía.

Parámetros para el ensayo de tomografía eléctrica.

Los parámetros para el ensayo se dan a conocer en la tabla 16.

Tabla 16

Parámetros de tomografía eléctrica

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Configuración	Polo – Dipolo
Intervalo de electrodos	13 m
Stacks min /max	04-10
Quality factor	2
Reading	Promedio
Voltaje	Asignado
# de mediciones de lectura	2

Fuente: Elaboración propia

2.3 Marco conceptual

A continuación, se definen los conceptos relacionados con la presente investigación.

2.3.1 Depósitos de relaves

Es una obra de ingeniería diseñada para satisfacer exigencias legales nacionales, de modo que se aisle completamente los sólidos (relaves) depositados del ecosistema circundante

2.3.2 Perforación geotécnica:

Las perforaciones geotécnicas fueron diseñadas para recolectar datos geotécnicos, geofísicos de fondo de pozo, estructurales e hidrogeológicos que se utilizarán para generar modelos hidrogeológicos y de estabilidad de taludes a escala de depósito.

2.3.3 Ensayos in situ:

Son pruebas realizadas directamente en el terreno, en el lugar donde se encuentra la muestra, sin necesidad de llevarla a un laboratorio.

2.3.4 Ensayo Lugeon

Es un tipo de ensayo dentro de la perforación geotécnica realizado en el interior de un sondeo (ensayo in situ), que define el valor de la permeabilidad (K) en rocas (macizos rocosos) variablemente fracturados, donde se introduce agua a presión constante en tramos aislados y semiaislados.

2.3.5 Ensayo Lefranc

Es un método geotécnico ampliamente utilizado para determinar la permeabilidad de suelos granulares y semi-permeables, como arenas, limos y rocas fracturadas. Para evaluar la estabilidad del terreno y prevenir problemas relacionados con la filtración de agua

2.3.6 Permeabilidad:

Propiedad del material que determina la facilidad con la que los fluidos pueden atravesarlo, influyendo en la retención de agua y estabilidad del relleno.

2.4 Geología Regional

2.4.1 Geomorfología

La mina Chungar desde contexto regional está proyectada en una franja de depresión de 18 km aproximadamente con orientación preferente NO-SE, entre el flanco este de la cordillera Occidental de los Andes y la zona agreste del bosque de piedras de Huayllay, con relieves característicos de colinas alargadas y redondeadas limitadas en las partes bajas por lagunas.

La mina Animón propiedad de la Unidad Minera Chungar está ubicada entre el flanco este de la Cordillera Occidental y la llanura en el lago Junín conocido como pampa de Bombón, esta llanura separa la cordillera Occidental y Oriental tiene dirección cordillerana preferente de NO-SE y donde la acción glacial modeló el relieve actual dejando cerros ondulados, depresiones en donde se han formado lagunas de mediana y gran dimensión como es Naticocha, Huaroncocha y Yanamachay.

El área de estudio está rodeada por varias lagunas que mayormente fluyen hacia el río Mantaro de la cuenca del Atlántico, su origen se debe a procesos de desglaciación que produjo los depósitos morrénicos y fluvio-glaciares en la base de los valles.

Estos sucesos geológicos acontecieron entre el Cenozoico y el Cuaternario modelando la geoforma de la zona de estudio, y la erosión diferenciada fue marcada por el proceso de glaciación desde el Pleistoceno. Todo este conjunto de fenómenos ha dado

origen a marcadas geoformas entre las que sobresalen en el área altiplanicies, colinas y montañas.

Altiplanicies: Las llanuras y altiplanicies onduladas, presentan pendientes que varían de llana a moderadamente inclinada (0 a 8%).

Colinas: Presentan menor altitud, estas superficies sobresalen en las planicies onduladas, con pendientes entre 8% y 25%, cuyas altitudes varían entre 4,600 a 4750 msnm, se ubican en la parte Sur y Norte de la zona de estudio. Estas colinas son formadas por acción erosiva y por movimientos tectónicos y se encuentran frecuentemente cubiertos por material morrénico.

Montañas: Estas áreas se caracterizan por presentar relieves muy abruptos y topografías que van desde poco accidentadas, colinas con pendientes variables (8%-25%), hasta muy accidentadas con pendientes empinadas entre 25% a 75%, cuyas altitudes varían entre 4,400 a 4800 msnm.

2.4.2 Litología

Según la geología del cuadrángulo de Ondores (INGEMMET, 2011), la secuencia estratigráfica desde la zona de Cerro de Pasco hasta la zona de las minas Huarón - Animón está conformada en la base por rocas sedimentarias calcáreas Triásico-Jurásicas del Grupo Pucará, seguido por las rocas sedimentarias Cretácicas del Grupo Goyllarisquizga y las formaciones Pariahuanca, Chulec, Pariatambo y Jumasha, en la zona superior por rocas sedimentarias Paleógenas - Neógenas en su mayoría sílico - clásticas de origen continental de las formaciones Pocobamba, Calera y Huayllay y superficialmente cubierto por depósitos del Cuaternario (aluvial y glacial).

Se describen las características estratigráficas y litológicas a nivel regional de la zona de estudio de la presente investigación:

2.4.2.1 Formación Casapalca. La formación Casapalca también denominada formación Pocobamba y lo dividen en dos miembros llamados Cacuán y Shuco como sigue: El miembro Cacuán está comprendido hacia la base por conglomerados con clastos sub angulosos a sub redondeados de diferente composición. Ángeles (1999), determinó

que la base del miembro Cacúan está conformado por secuencias grano crecientes de 10 a 25 m de grosor compuestos por lutitas, areniscas con laminación en artesa y conglomerados de clastos sub redondeados e imbricados. En Cerro de Pasco, hacia la parte media y al tope, afloran calizas lagunares blanquecinas y grises con presencia de sílex y chert.

El miembro Shuco, aflora en los alrededores de Cerro de Pasco y está compuesto por conglomerados y brechas sedimentarias con escasos lentes de limolitas y areniscas; la mayor parte de los clastos son de caliza y sílex de la Formación Chambará, con diámetros de 2 a 30 cm, que pueden llegar a 6 m de grosor (Ángeles, 1999). Entre Huayllay - laguna Runrún, de acuerdo con Cueva (2008), el miembro Shuco está compuesto por conglomerados con clastos de 15 cm de diámetro, envueltos en una matriz arenosa, intercalados con areniscas de grano medio a fino, lutitas y algunos lentes de calizas.

En el área de la mina Animón a la formación Casapalca han estimado un espesor aproximado de 1380 a 1480 m y lo dividen en dos miembros: B y C.

El miembro B, consta de 3 niveles: Hacia la base una intercalación de limo-arcillitas con areniscas de matriz calcárea. En la parte media se tiene conglomerados clasto soportado de arenisca cuarzosa y caliza. Hacia la parte superior, areniscas de matriz calcárea con intercalaciones de limolitas. Su grosor aproximado es de 800 m.

El miembro C, consta de 3 niveles: En el parte inferior, compuesto por calizas gris claras con presencia de chert que cambia lateralmente a facies de margas y areniscas calcáreas). Esta caliza puede estar fuertemente silicificada debido a fluidos hidrotermales. En la parte media, está compuesto por una alternancia de areniscas con matriz calcárea, conglomerados, limoarcillitas y niveles tobáceos. Cabe resaltar que estos conglomerados tienen clastos de rocas volcánicas. El grosor de este miembro varía entre 260 – 300 m.

2.4.2.2 Formación Calera. La formación Calera sobreyace en leve discordancia angular a la formación Casapalca; es una secuencia de rocas sedimentarias, volcánicas y volcano - sedimentarias se han reconocido tres miembros: inferior, medio y superior (Ángeles, 1999). La sedimentación habría empezado en el Eoceno Superior hasta el

Oligoceno, la datación radiométrica se ha basado en las biotitas de una toba dacítica ubicada en la base de esta formación que aflora en la mina Colquijirca, asignándole una edad de 36 - 37 Ma (Noble, 1999), es como sigue:

El miembro Inferior, aflora en la localidad de Calera (cercana a Cerro de Pasco) está compuesto por conglomerados con clastos angulosos provenientes del Grupo Pucará, intercalados con limos, lutitas y delgados niveles de tobas riolíticas. Tiene un grosor de 64 m.

El miembro Medio, aflora en la localidad de Calera, alcanza 55 m de grosor; hacia la base es casi enteramente calcárea, con abundancia de sílex con gasterópodos, bivalvos y madrigueras; hacia el techo están presentes calizas margosas e intercalaciones de lutitas gris verdosas, probablemente derivadas de piroclastos. En Colquijirca, el Miembro Medio tiene un grosor de entre 50 a más de 200 m.

El miembro Superior, aflora en Colquijirca, se compone de delgadas alternancias de lutitas, limolitas, areniscas, dolomías margosas, dolomías, chert y además abundante contenido de materia orgánica y supera los 150 m de grosor. En los alrededores de la mina Animón, tiene un grosor aproximado de 500 m.

2.4.2.3 Grupo Calipuy. Sobre yaciendo en discordancia a las formaciones Casapalca y Calera, se tiene una secuencia volcánica, cuya litología es extremadamente variada, consistiendo principalmente de lavas andesíticas púrpuras, piroclastos gruesos, tufos finamente estratificados, basaltos, riolitas y dacitas, todos los cuales presentan variaciones laterales bastante rápidos. Existe evidencia de dataciones radiométricas realizadas por Farrar, E. y Noble, D. (1976) en dos muestras tomadas en la localidad de Río Pallanga, por el método K-Ar, obtienen edades que oscilan entre 14.58 ± 0.48 y 14.67 ± 0.48 M.a.

2.4.2.4 Volcánicos Huayllay. En los alrededores del poblado de Huayllay, sobreyaciendo en discordancia angular a la formación Casapalca y al grupo Pucará, aflora una secuencia de ignimbritas de color blanquecino denominado como Volcánico Huayllay. La edad de estas ignimbritas fue datada por el método K-Ar en 6.2 ± 0.2 Ma. (Cobbing et

al., 1996) y en 5.2 ± 0.20 Ma. (Farrar & Noble, 1976). Estas dataciones ubican a las ignimbritas del Volcánico Huayllay entre el Mioceno Superior al Plioceno.

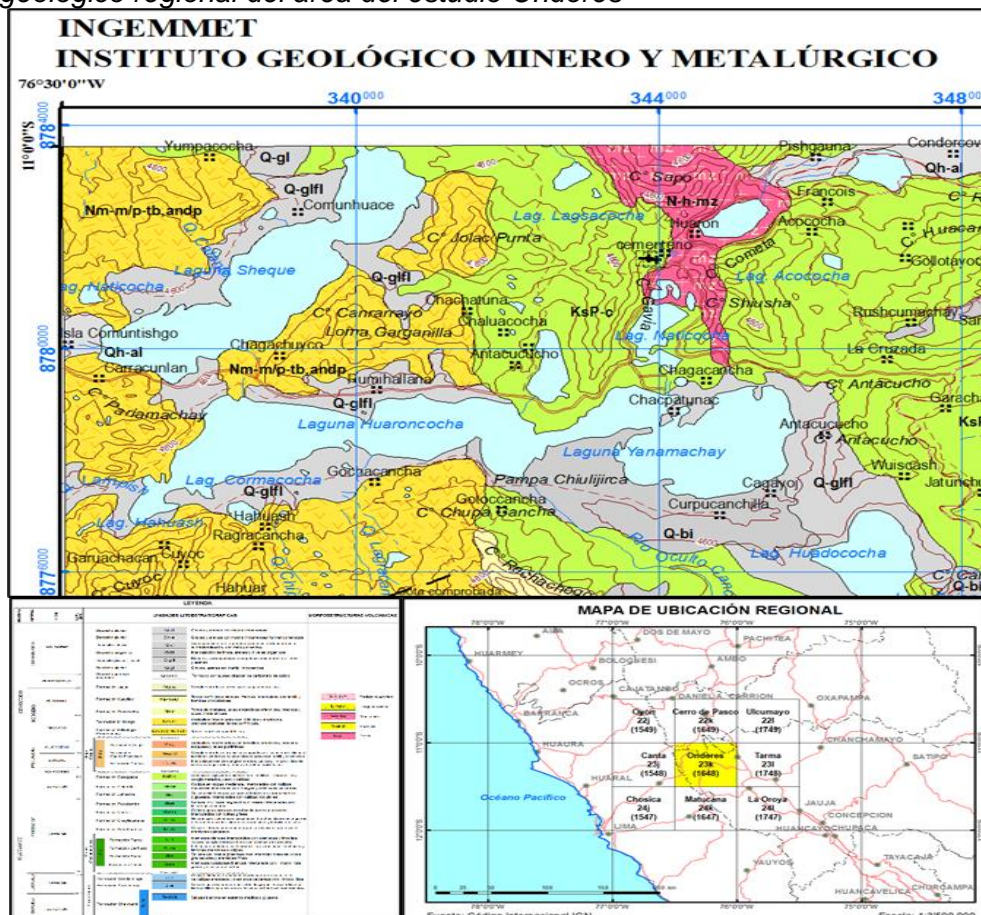
En alrededores de la mina Animón esta secuencia volcánica ha sido dividida en 3 depósitos:

- En la base consta de toba de lapilli de composición dacítica a riódacítica,
- En la parte media compuesta de toba de bloques y ceniza de clastos de composición dacítica
- Al tope compuesto de lava andesítica con textura porfírica.

2.4.2.5 Cuerpos ígneos. Se han reconocido pequeños cuerpos ígneos de composición dacítica, a manera de pequeños stocks, diques y/o sills que intruyen a la Formación Casapalca. Estos han sido datados por Thouvenin (1983) mediante el método por K/Ar en 10.3 ± 0.1 Ma.

Figura 23

Mapa geológico regional del área del estudio Ondores



Fuente: INGEMMET, (2017) Cuadrángulo de Ondores.

2.4.3 Geología estructural

El contexto estructural del sitio está caracterizado por el anticlinal de Huarón, que conforma la estructura principal y que está relacionado con la mineralización de las minas Huarón y Animón cuyo eje tiene una dirección NNO/SSE; este anticlinal asimétrico presenta pliegues de carácter regional de dirección general NNO y fallas de carácter local. Asimismo, estructuras sinclinales y anticlinales disturbán las rocas de las Formaciones más recientes como son Casapalca y Calipuy. Asociado al plegamiento se tienen fallas de orientación NO-SE, NE-SO, fracturamiento y estructuras en vetas y cuerpos mineralizados de orientación E-O.

2.5 Geología local

2.5.1 Geomorfología

La zona del proyecto está ubicada en el flanco izquierdo de la laguna Naticocha Centro y la colina alargada que nace de los cerros Cometa (4815 msnm) y Shiusha (4825 msnm) en dirección suroeste y termina en el borde de la laguna Naticocha Sur.

Desde el espejo de agua de la laguna Naticocha Centro hasta la cima del cerro es una ladera adulada, en ella es posible identificar tres unidades geomorfológicas principales que se describe a continuación:

- Laguna y llanura lacustrina (UG-01); esta unidad geomorfológica corresponde a la laguna seguida por una terraza y llanura lacustrina, la terraza tiene de 10 a 14° de inclinación y 10 a 15 m de altura aproximadamente, la llanura tiene 3° a 5° de inclinación con pequeñas depresiones o pozas de agua aisladas con bofedales.
- Terrazas aluviales y glaciares (UG-02); esta unidad geomorfológica está entre la llanura lacustrina y la ladera rocosa, es una llanura aluvial y glaciar ondulada entre 5 a 8° de inclinación con pequeñas terrazas intermedias. Las oficinas e instalaciones de la mina están en esta zona.
- Laderas rocosas (UG-03); esta unidad geomorfológica corresponde a la ladera modelada en rocas sedimentarias, tiene 22° a 26° de inclinación y la superficie del

terreno muestra aspecto rugoso y es flanco oeste de la colina alargada que termina en la laguna Naticocha.

Figura 24

Unidades geomorfológicas identificadas en el área de estudio



Fuente: Google Earth, 2024.

2.5.2 Litología

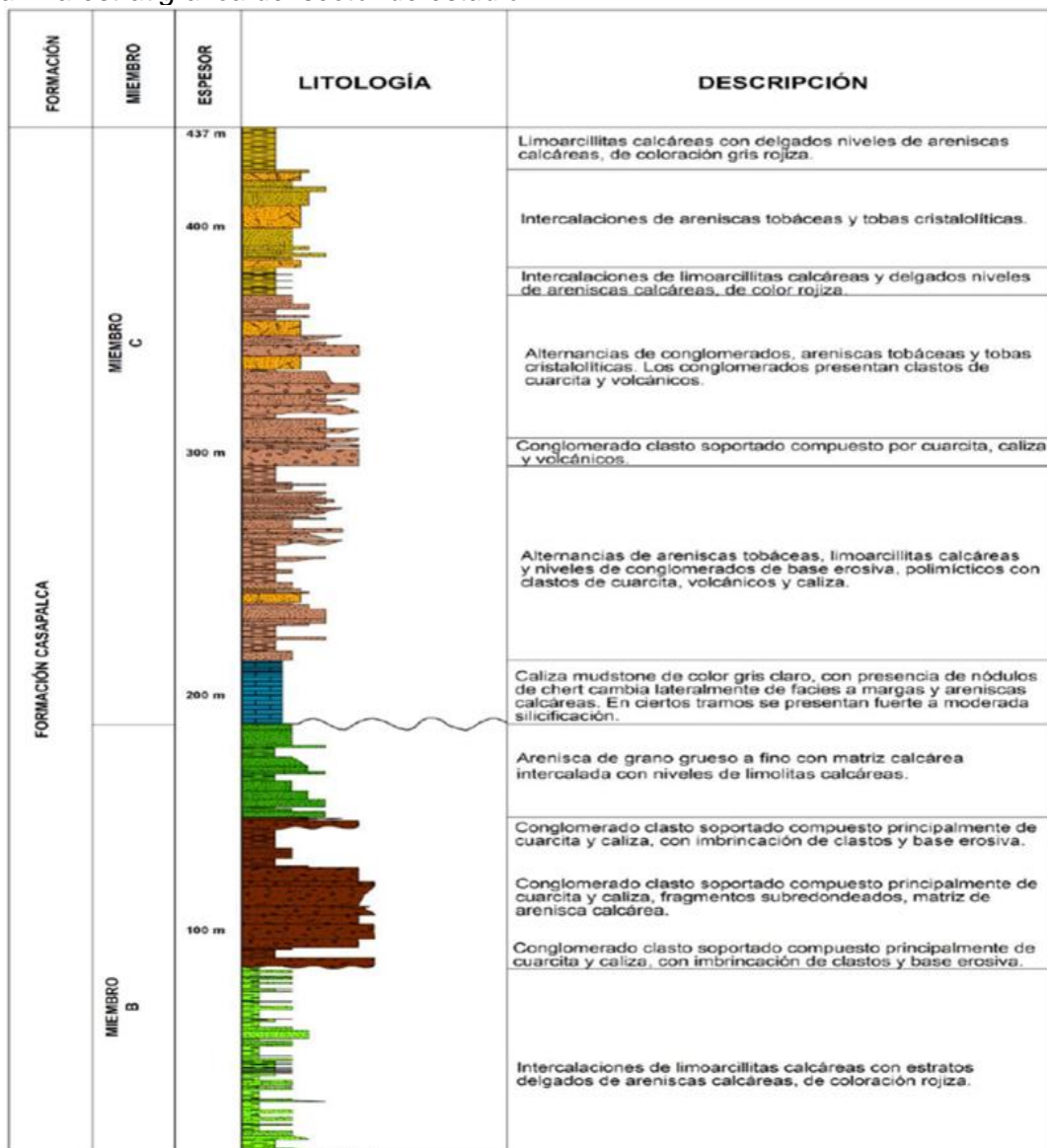
El yacimiento de Animon litológicamente está conformado por rocas sedimentarias que reflejan un período de inmersión y una intensa denudación. Las capas rojas del grupo Casapalca presentan 2 ciclos de sedimentación: el ciclo antiguo es el más potente de 1,400 m a 1,500 m de grosor y el ciclo más joven tiene una potencia de 800 m a 900 m. Cada ciclo en su parte inferior se caracteriza por la abundancia de conglomerados y areniscas, en su parte superior contienen horizontes de chert, yeso y piroclásticos. La gradación de los clastos y la orientación indican que los materiales han venido del Este, probablemente de la zona actualmente ocupada por la Cordillera Oriental de los Andes.

Se distinguen 2 formaciones bien marcadas: la formación inferior, constituida por margas y areniscas que se ubica en la parte central y más profunda del anticlinal de Huarón, su espesor debe sobrepasar los 800 m, y la formación superior, que tiene un grosor de 800 m, es la única masa rocosa presente en ambos flancos del anticlinal.

Según la columna estratigráfica establecida por la mina Animón, el Membro B está constituido por tres niveles. La base es una intercalación de limo-arcillitas con areniscas de matriz calcárea, la zona intermedia por conglomerados clasto soportado de arenisca cuarzosa y caliza y hacia el techo areniscas de matriz calcárea con intercalaciones de limolitas. Los tres niveles alcanzan 800 m de espesor en promedio.

Figura 25

Columna estratigráfica del sector de estudio



Fuente: Animón, (2020)

A continuación, se describen en forma detallada las unidades litológicas identificadas.

2.5.2.1 Formación Casapalca (Ks-ca). Esta unidad litológica yace en la zona de cimentación del depósito de relaves es la más extendida en la mina Chungar. La base del Miembro B, está conformado por estratos de margas rojizas y grises, en ambos flancos de la laguna Naticocha tiene mayor exposición y por efecto del anticlinal de Animón, se describen a continuación:

- Miembro B - margas rojizas; es la roca con mayor exposición en la zona de estudio, está constituido por areniscas de color rojizas con intercalación de horizontes de limo arcillitas y lutitas, grano fino con estratos que varían de 0.05 a 0.12 m de espesor, en algunos sectores presenta vetillas de calcita y en otros sectores indicios de disolución de carbonatos, resistencia débil, leve a moderadamente fracturada, diaclasas planas y lisas, la principal familia de diaclasamiento son los planos de estratificación con rumbos de N25° a 45°E, y buzamientos de 35 a 60° SE.
- Miembro B - margas grises; en la superficie del terreno es muy escaso los afloramientos registrados, sin embargo, en la mayoría de las perforaciones diamantinas se ha registrado a distintas profundidades y en algunos casos se muestra una intercalación de margas grises y rojas. Está constituido por margas de color gris verdosa, fina, en algunos sectores se intercala con horizontes delgados de limolita y lutita y presenta en ciertos sectores vetillas de calcita, huellas de karsticidad (1 a 5 cm), la resistencia de la roca es moderadamente resistente, leve a moderadamente fracturada, la familia principal de diaclasa son los planos de estratificación, con rumbos de N10 a 40° E, y buzamientos de 28 a 40° SE.

2.5.2.2 Sills de pórfido monzonítico. El sills aflora muy próximo a la cumbre en posesión casi concordante a los planos de estratificación. Está constituido por pórfido monzonítico, de color gris verdosa, grano medio a grueso, textura porfirítico, tiene una potencia de 40 m aproximadamente. La roca es resistente, moderada a muy fracturada, la familia principal de diaclasas presenta rumbos de N80 a 95°E, y buzamientos de 45 a 85° SE.

Figura 26

Afloramiento de sills en el área de estudio



Fuente: Animón, (2023)

2.5.2.3 Cuaternario. A nivel local, fueron cuatro (4) los depósitos cuaternarios identificados, que son: depósitos morrénicos, depósitos lacustres, depósitos antrópicos y depósitos fluvioglaciares.

Los depósitos morrénicos están expuestos en los flancos de la laguna Naticocha Centro, están constituidos principalmente por grava arcillo limosas, firmes a rígidas, con finos de plasticidad media a alta. Sobre las morrenas yacen los depósitos lacustrinos recientes en el fondo de la laguna Naticocha Centro, con un espesor menor que 5.00 m. Estos suelos lacustrinos son limos y arcillas blandas, normalmente consolidadas, entre húmedas y saturadas.

Los depósitos antrópicos corresponden a los materiales utilizados en la construcción de plataformas para las instalaciones mineras, campamentos y los materiales de corte de los accesos, y por lo tanto, están situadas de manera considerable alrededor de la laguna Naticocha. Estos suelos son de grava areno limo arcilloso. En las plataformas son densos, mientras que los que cubren los flancos del vaso de la laguna son entre sueltos y permeables.

Los depósitos fluvioglaciares se ubican en el sector Noreste de la laguna Naticocha. Estarían en relación con un antiguo canal de descarga de las lagunas Naticocha Norte a la Naticocha Centro. Sus constituyentes son arena limosa con poca grava y algunos cantos con bloques. Este tipo de depósito no se ha observado en el levantamiento geológico de superficie, y se ha reportado a partir de las muestras de las perforaciones.

2.5.3 Geología estructural

El área de estudio se emplaza en el flanco este del anticlinal de Huarón, donde los estratos tienen una dirección general de N10-20°E/40°-60°SE, 03 sistemas de juntas y algunas aleatorias afectan la zona así como los sistemas de fallas y veta– fallas de gran longitud y típicos de la zona de estudio como son: la veta Principal (N30°W/80°NE), Martita (N85°W/85°SW) y veta ramal de la veta Principal (E-W/85°N), que afloran en superficie, tienen gran potencia (2 m), presentan zonas de alteración argílica asociadas a brechas bien consolidadas con mineralización de sulfuros y presencia de cuarzo.

La veta ramal Principal atraviesa el sector sur del depósito proyectado, aflora en el talud este a espaldas del sector campamento, tiene un ancho de 0.40 m con presencia de sulfuros metálicos y cuarzo. Otras fallas locales afloran en superficie.

En el transcurso de las perforaciones, se cortaron estas estructuras y otras fallas locales en los sondajes SR-08, SR-09, SR-11.

Las principales fallas observadas son de rumbo Este - Oeste, casi en su mayoría han sido rellenadas por soluciones mineralizadas, formando vetas, y algunas de ellas se están explotando actualmente. Tienen distintas dimensiones en longitud y ancho.

Se reconocen dos (2) sistemas principales de familias de fallas, un sistema transversal al anticlinal de Huarón, de dirección Este - Oeste, y la familia o sistema longitudinal en la dirección Norte - Sur.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

En el presente capítulo se describe la secuencia de trabajos ejecutados para la presente investigación, que involucra la revisión detallada de la caracterización geológica del área de estudio y el desarrollo de cada etapa de investigación, hasta la obtención de los resultados finales y del informe final.

3.1 Investigaciones geotécnicas

Las actividades desarrolladas en las investigaciones geotécnicas fueron la ejecución de perforaciones diamantina, logueo geotécnico, registro de ensayos in situ, ensayos de permeabilidad, instalación de piezómetros, así como también el registro de nivel de agua.

3.1.1 Perforaciones geotécnicas

El programa contempló la ejecución de quince (15) perforaciones diamantinas con profundidades que varían de 35.00 m a 85.00 m, con ángulos de inclinación de 60°, 75° y verticales.

Estas se ejecutaron con fines de investigación geológica, geotécnica e hidrogeológica. La longitud total de perforaciones efectiva alcanzó los 840.30 m.

En la Tabla 17, se muestra la ubicación y distribución de los sondajes en la zona de estudio y se detalla las perforaciones ejecutadas.

En la distribución de los sondajes se consideró el propósito geotécnico e hidrogeológico, por lo que se realizaron ocho (08) sondajes para fines geotécnicos y seis (06) para fines hidrogeológicos.

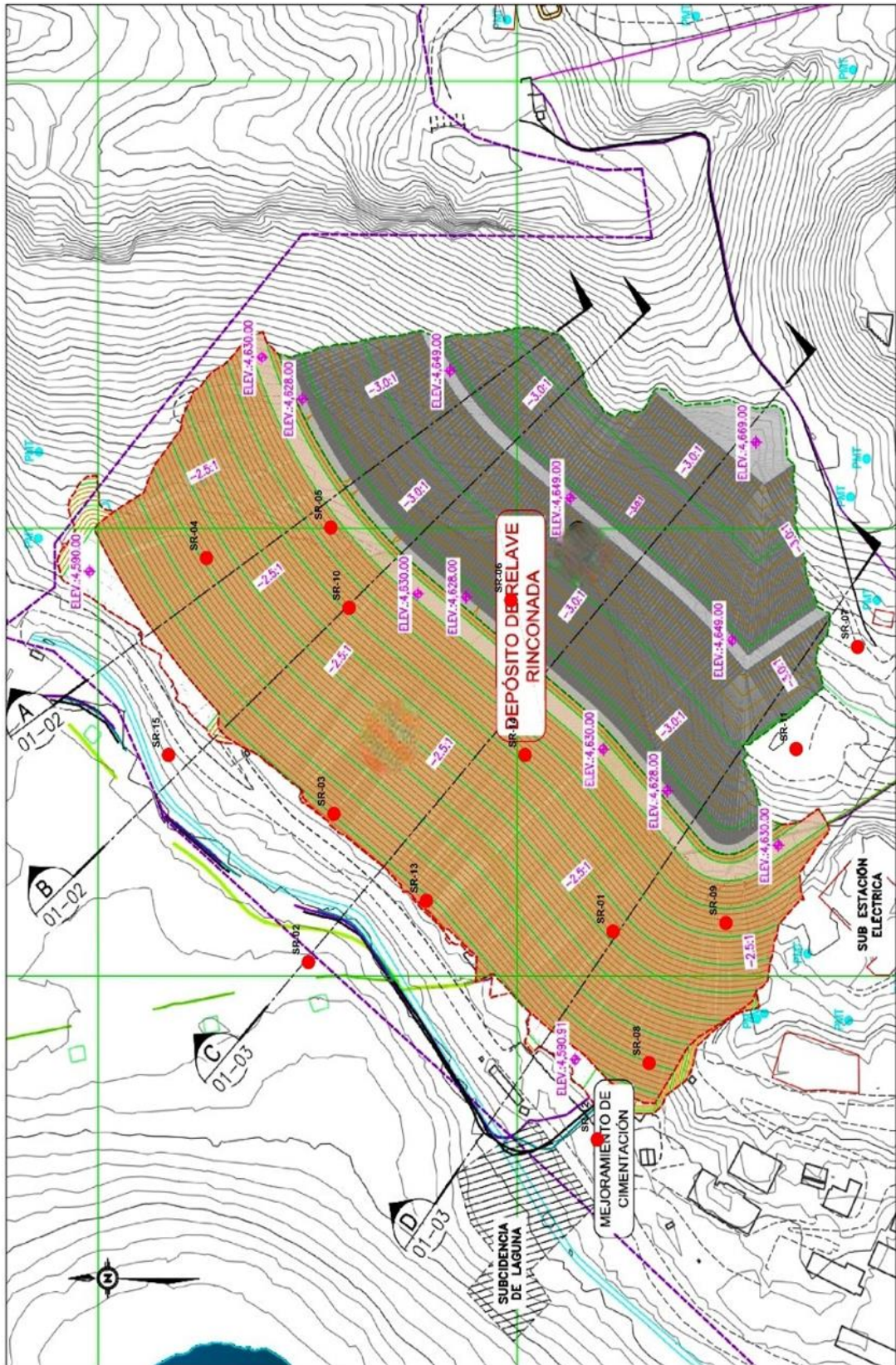
Tabla 17*Ubicación y finalidad de las perforaciones geotécnicas*

SONDAJE	COORDENADAS			Longitud (m)	Inclina ción (°)	FINALIDAD DE LA PERFORACIÓN
	UTM WGS-84		COTA (msnm)			
	ESTE (m)	NORTE (m)				
SR-01	344420.18	8780354.03	4600.93	43.30	-90°	Geológico, Geotécnico e Hidrogeológico
SR-02	344406.47	8780499.22	4575.73	40.40	-90°	Geológico e Hidrogeológico
SR-03	344472.74	8780487.16	4589.79	56.40	-90°	Geológico e Hidrogeológico
SR-04	344585.35	8780551.33	4594.47	55.40	-90°	Geológico, Geotécnico e Hidrogeológico
SR-05	344600.72	8780488.61	4604.64	35.00	-90°	Geológico, Geotécnico e Hidrogeológico
SR-06	344568.13	8780402.64	4597.92	55.20	-90°	Geológico, Geotécnico e Hidrogeológico
SR-07	344547.38	8780237.36	4646.22	65.20	-75°	Geológico, Geotécnico e Hidrogeológico
SR-08	344361.35	8780336.78	4594.1	55.20	-75°	Geológico e Hidrogeológico
SR-09	344424.01	8780300.20	4605.9	70.00	-90°	Geológico, Geotécnico e Hidrogeológico
SR-10	344564.75	8780479.95	4596.14	45.80	-90°	Geológico, Geotécnico e Hidrogeológico
SR-11	344501.69	8780266.63	4639.09	70.30	-75°	Geológico, Geotécnico e Hidrogeológico
SR-12	344327.23	8780361.44	4586.08	60.10	-60°	Geológico e Hidrogeológico
SR-13	344432.95	8780443.32	4588.58	50.00	-90°	Geológico e Hidrogeológico
SR-14	344499.00	8780396.00	4594.55	85.00	-60°	Geológico, Geotécnico e Hidrogeológico
SR-15	344499.00	8780566.00	4584.7	53.00	-90°	Geológico e Hidrogeológico
TOTAL					840.30 m	

Fuente: Elaboración propia

Figura 27

Mapa de ubicación de las perforaciones geotécnicas



Fuente: Animón, (2022).

3.1.2 Logueo geotécnico

En base al registro de logueo geotécnico para cada sondaje se ha efectuado una caracterización geotécnica del suelo y caracterización geomecánica de la roca.

3.1.3 Características geotécnicas del suelo

Se realizó la caracterización geotécnica de los suelos en base a los sondajes perforados. De los 15 sondajes ejecutados, solo en el sondaje SR-01 se interceptó macizo rocoso desde el nivel superficial de la perforación (0.00 m). En cuanto a los otros 14 sondajes se identificó primeramente material de suelo y un posterior contacto suelo-roca; se presenta a continuación las siguientes tablas detalladas para cada sondaje.

En el sondaje SR-02 tuvo una profundidad de 40.40 m, se interceptó material de suelo de 0.00 m a 16.00 m.

Tabla 18

Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-02.











PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO	MATERIAL
DE	HASTA		
0.00	1.10	Arena arcillosa (SC), G: 5%, A: 55%, F: 40, arena de grano fino, tmáx: 6 cm, húmedo, beige, medianamente densa, finos de baja a media resistencia al estado seco, dilatancia rápida, de baja plasticidad.	
1.10	5.45	Grava limosa (GM), G: 45%, A: 15%, F: 40%, grava de grano fino a medio, subangulosa, composición polimíctica, tmáx: 4 cm, presencia de bolonería 9 cm, densa, húmedo, beige, dilatancia lenta y plasticidad media.	
5.45	15.30	Arena arenosa (CL), G: 5%, A: 15%, F: 80%, húmedo, beige, alta resistencia al estado seco, dilatancia nula, plasticidad media, presencia de material orgánico.	
15.30	16.00	Grava Limosa (GM), G: 50%, A: 10%, F: 40%, grava gruesa, forma subangulosa, composición polimíctica, tmáx: 3 cm, bolonería tmáx: 10 cm, densa, húmedo, beige, plasticidad media, dilatancia rápida y plasticidad baja.	

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-03 tuvo una profundidad de 56.40 m, se interceptó material de suelo de 0.00 m a 19.95 m.

Tabla 19

Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-03.


PROFUNDIDAD (M)		CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO	MATERIAL
DE	HASTA		
0.00	1.20	Grava limosa con arena (GM), G 50%, A 30%, F 20%, subredondeados, composición polimictica, tmáx 6 cm, medianamente densa, húmedo, beige, resistencia media al estado seco, no plástico a plasticidad baja.	
1.20	1.60	Grava bien gradada con arena (GP-GM), G:60%, A: 30%, F:10%, subangulosa, composición polimictica, tmáx 6 cm, medianamente densa, húmedo, gris, resistencia media al estado seco.	
1.60	3.90	Grava arcillosa con arena (GC), G:50%, A:5%, F:45%, angulosa, composición polimictica, tmáx 5 cm, medianamente densa, húmedo, beige, resistencia media al estado seco, plasticidad de baja a media.	
3.90	6.85	Arcilla con grava (CL), G:10%, A:20, F:70%, angulosa, composición polimictica, tmáx 5 cm, suelta, húmedo, beige, resistencia media al estado seco, plasticidad media.	
6.85	9.00	Arena arcillosa (SC). G:24%, A:56%, F:20%, subangulosa, composición polimictica, tmáx 5 cm, medianamente densa a densa, húmedo, beige negro, resistencia media al estado seco, dilatancia lenta, plasticidad media.	
9.00	11.60	Grava arcillosa (GC), G:60%, A:25%, F:15%, angulosa, composición polimictica, tmáx 5 cm, medianamente densa a densa, húmedo, beige, resistencia media al estado seco, dilatancia lenta, plasticidad de baja a media.	
11.60	12.20	Grava arcillosa con arena (GC), G:60%, A:15%, F:25%, grano medio a grueso, forma subangulosa, composición polimictica, tmáx 7cm, presencia de bolonería tmáx 10 cm, densa a muy densa, húmedo, beige, dilatancia lenta.	
12.20	13.25	Grava arcillosa (GC), G:50%, A:15%, F:35%, subangulosa, composición polimictica, tmáx 5.5 cm, medianamente densa a densa, húmedo, beige, resistencia media al estado seco, dilatancia lenta, plasticidad baja.	
13.25	14.25	Arcilla arenosa (CL), G:15%, A:25%, F:60%, subangulosa, composición polimictica, tmáx 3 cm, densa, húmedo, beige, resistencia media al estado seco, dilatancia lenta, plasticidad baja.	
14.25	19.95	Grava arcillosa (GC), G:55%, A:10%, F:35%, subangulosa, composición polimictica, tmáx 6 cm, densa, húmedo, beige, resistencia media al estado seco, dilatancia lenta, plasticidad baja.	

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-04 tuvo una profundidad de 55.40 m, se interceptó material de suelo de 0.00 m a 7.75 m.

Tabla 20

Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-04.



PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO	MATERIAL
DE	HASTA		
0.00	7.75	Grava limosa con arena (GM), G: 45%, A: 25%, F:30%, grava de grano grueso, forma angulosa, composición monomíctica, t _{máx} 7 cm, suelta, seco, beige, resistencia baja al estado seco, dilatancia nula, finos de mediana plasticidad.	

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-05 tuvo una profundidad de 35.00 m, se interceptó material de suelo de 0.00 m a 3.45 m.

Tabla 21

Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-05.


PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO	MATERIAL
DE	HASTA		
0.00	1.80	Limo con arena y grava (ML), G: 15%, A: 20%, F: 65%, medianamente firme, seco, beige, resistencia media al estado seco, dilatancia rápida, plasticidad baja, presencia de grava de forma angulosa, t _{máx} 5 cm.	
1.80	3.45	Arcilla (CL), G: 5%, A: 10%, F: 85%, medianamente firme, seco, beige, resistencia media al estado seco, dilatancia nula, baja a media plasticidad.	

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-06 tuvo una profundidad de 55.20 m, se interceptó material de suelo de 0.00 m a 1.00 m.

Tabla 22



Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-06.

PROFUNDIDAD (M)		CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO	MATERIAL
DE	HASTA		
0.00	1.25	Grava limosa (GM), G: 60%, A: 20%, F:20%, grano grueso, subangulosa, composición polimíctica, t _{máx} 5 cm, medianamente densa, seco, beige, finos de media resistencia al estado seco, dilatancia rápida.	

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-07 tuvo una profundidad de 65.20 m, se interceptó material de suelo de 0.00 m a 1.75 m.


Tabla 23*Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-07.*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO	MATERIAL
DE	HASTA		
0.00	1.54	Grava limosa con arena (GM), G: 60%, A: 25%, F:15%, grava gruesa, monomictico (Marga rojiza), tmáx 7 cm, suelto, seco, beige, resistencia baja al estado seco, dilatancia alta, finos de baja a media plasticidad.	
1.54	1.75	Limo (ML), G: 00%, A: 10%, F:90%, medianamente denso a denso, seco, beige, resistencia al estado seco medio, dilatancia media, plasticidad media.	

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-08 tuvo una profundidad de 55.20 m, se interceptó material de suelo de 0.00 m a 2.00 m.


Tabla 24*Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-08.*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO	MATERIAL
DE	HASTA		
0.00	2.20	Grava limosa con arena (GM), G: 75%, A: 10%, F:15%, grano grueso, subangulosa, composición polimictica, tmáx 15 cm, moderadamente densa, seco, beige, finos de media resistencia al estado seco, dilatancia rápida, finos de plasticidad baja.	

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-09 tuvo una profundidad de 70.00 m, se interceptó material de suelo de 0.00 m a 1.80 m.


Tabla 25*Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-09.*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO	MATERIAL
DE	HASTA		
0.00	1.80	Grava limosa con arena (GM), G: 50%, A: 20%, F:30%, grano grueso, subangulosa a angulosa, composición polimictica, tmáx 4 cm, medianamente densa, seco, beige, finos de media resistencia al estado seco, dilatancia alta, finos de plasticidad baja.	

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-10 tuvo una profundidad de 45.80 m, se interceptó material de suelo de 0.00 m a 1.70 m.


Tabla 26*Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-10*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO	MATERIAL
DE	HASTA		
0.00	1.70	Grava limosa con arena (GM), G: 50%, A: 15%, F: 35%, grava gruesa, subangulosa, composición polimíctica, tmáx 5 cm, medianamente densa, seco, beige, finos media resistencia al estado seco, dilatancia rápida, finos de baja plasticidad.	

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-11 tuvo una profundidad de 70.30 m, se interceptó material de suelo de 0.00 m a 6.30 m.



Tabla 27*Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-11.*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO	MATERIAL
DE	HASTA		
0.00	6.30	Grava limosa con arena (GM), G: 65%, A: 15%, F: 20%, grano grueso, subangulosa, composición polimíctica, tmáx 5 cm, medianamente densa, seco, beige, resistencia media al estado seco, dilatancia rápida, finos de baja plasticidad.	

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-12 tuvo una profundidad de 60.10 m, se interceptó material de suelo de 0.00 m a 3.50 m.

Tabla 28*Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-12.*



PROFUNDIDAD (M)		CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO	MATERIAL
DE	HASTA		
0.00	1.87	Grava limosa (GM), G: 65%, A: 10%, F: 25%, grava gruesa, angulosa, composición monomíctica, tmáx 6 cm, suelta, seco, beige, resistencia media del estado seco, dilatancia lenta, finos de mediana plasticidad	
1.87	3.50	Limo con arena con grava (ML), G: 15%, A: 35%, F: 50%, grava gruesa, angulosa, composición monomíctica, tmáx 7 cm, consistencia media a blanda, seco, beige, dilatancia lenta, fino de mediana plasticidad.	

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-13 tuvo una profundidad de 50.00 m, se interceptó material de suelo de 0.00 m a 10.80 m.

Tabla 29

Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-13.


PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO	MATERIAL
DE	HASTA		
0.00	2.25	Grava arcillosa con arena (GC), G:60%, A:15%, F:25%, composición polimictica, seco, subangulosa, tmáx 4 cm, medianamente densa, beige, resistencia media al estado seco, dilatancia lenta, plasticidad baja.	
2.25	10.80	Arcilla con grava (CL), G:10%, A:25%, F:65%, composición polimictica, subangulosa, tmáx 3 cm, medianamente densa, seco, beige, resistencia media al estado seco, dilatancia nula, plasticidad media.	

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-14 tuvo una profundidad de 85.00 m, se interceptó material de suelo de 0.00 m a 0.30 m

Tabla 30

Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-14.





PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO	MATERIAL
DE	HASTA		
0.00	0.30	Grava limosa con arena (GM), G: 60%, A: 15%, F: 25%, grava gruesa, subangulosa, composición polimíctica, tmáx: 4 cm, seco, beige, resistencia media al estado seco, dilatancia nula, plasticidad media.	

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-15 tuvo una profundidad de 53.00 m, se interceptó material de suelo de 0.00 m a 15.28 m

Tabla 31

Caracterización geotécnica del suelo en el sondaje SR-15.

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO	MATERIAL
DE	HASTA		
0.00	6.45	Limo gravoso con arena (ML), G:30%, A:10%, F:60%, grava media a gruesa, forma subangulosa, composición polimictica, tmáx 7 cm, suelto, seco, beige, resistencia media al estado seco, dilatancia lenta.	
6.45	8.90	Arena pobremente gradada con limo y grava (SP-SM), G:25%, A: 65%, F: 10%, arena fina a media, forma subangulosa, composición polimictica, tmáx 7 cm, suelto, seco, beige resistencia media al estado seco, dilatancia rápida, finos de mediana plasticidad.	
8.90	14.05	Grava limosa (GM), G: 60%, A: 05%, F: 35%, grava gruesa, forma subangulosa, composición polimictica, tmáx 7 cm, suelto, seco, beige, resistencia media al estado seco, dilatancia lenta, finos de media a alta plasticidad.	
14.05	15.28	Limo arcilloso (ML), G:05%, A:05%, F:90%, grava fina, forma subangulosa, composición polimictica, tmáx 1 cm, muy firme, húmedo, beige negro, resistencia alta al estado seco, dilatancia rápida, finos de alta plasticidad.	

Fuente: Elaboración propia

3.1.4 Características geomecánicas de la roca

Se realizó la caracterización geomecánica del macizo rocoso en base a los sondajes perforados. Se presenta a continuación las siguientes tablas detalladas para cada sondaje.

En el sondaje SR-01, se interceptó macizo rocoso desde los 0.00 m. hasta la profundidad final de 40.40 m.

Tabla 32*Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-01*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO
DE	HASTA	
0.00	6.55	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, ligera a moderadamente fracturada, presencia de karsticidad (relleno de mineral glauconita), juntas ligeramente rugosas, onduladas, rellenos de óxidos, calcita, presencia de venillas de calcita.
6.55	8.90	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca débil (R2), moderadamente meteorizada, fuertemente fracturada a triturada, juntas ligeramente rugosas, planas, rellenos de limos, arcilla, óxidos, y calcita.
8.90	18.40	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca moderadamente resistente (R3), fuertemente meteorizada, fuertemente fracturada, juntas ligeramente rugosas, onduladas, rellenos de limo y arcilla.
18.40	25.00	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca débil (R2), ligeramente meteorizada, muy fracturada, juntas ligeramente rugosas, onduladas, rellenos de limos, óxidos y calcita.
25.00	43.30	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca débil (R2), levemente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas ligeramente rugosas a rugosas, onduladas, relleno de calcita, óxidos, limos. Tramo de Falla desde 37.50 m. a 37.56 m., relleno de panizo y roca triturada R0. Tramo de Falla desde 41.35 m. a 41.39 m., relleno de panizo y roca triturada R0.

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-02, se interceptó macizo rocoso desde los 16.00 m. hasta la profundidad final de 40.40 m.

Tabla 33*Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-02*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO
DE	HASTA	
16.00	25.50	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, medianamente fracturada, juntas suaves, planas, relleno de limos, arcillas, calcita y presencia de pátinas, escasas presencia de venillas de calcita.
25.50	28.80	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca muy débil (R1), moderada a altamente meteorizada, fuertemente fracturada, juntas rugosas, onduladas, relleno de limos, arcilla, calcita y óxidos. Tramo de falla de 26.25 m a 26.40 m, relleno de gouge
28.80	36.00	Marga (MG), textura no clástica, rojiza, roca resistente (R4), ligeramente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas suaves y planas, relleno de limos, arcilla, calcita y óxidos.
36.00	36.65	Marga (MG), textura no clástica, gris, muy débil (R1), moderadamente meteorizada (MW), fuertemente fracturada, juntas ligeramente rugosas, onduladas, relleno de calcita, limos y óxidos.
36.65	40.40	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, muy fracturada, juntas suaves, planas, relleno de calcita, limos, óxidos

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-03, se interceptó macizo rocoso desde los 19.95 m. hasta la profundidad final de 56.40 m.

Tabla 34*Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-03*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO
DE	HASTA	
19.95	23.60	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca moderadamente resistente (R3), moderadamente meteorizada, levemente fracturada, moderadamente meteorizada, juntas ligeramente rugosas, onduladas, relleno de óxidos y calcita.
23.60	29.75	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, juntas suaves a ligeramente rugosas, planas, rellenos de óxidos y calcita, presencia de karsticidad.
29.75	39.10	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca débil (R2), ligeramente meteorizada, fuertemente fracturada, juntas ligeramente rugosas, onduladas, rellenos de óxidos, calcita y limos.
39.10	43.80	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, levemente fracturada, presenta juntas ligeramente rugosas, planas, rellenos de óxidos, calcita, limos y arenas. Presencia de karsticidad.
43.80	49.88	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca débil (R2), ligeramente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas ligeramente rugosas, onduladas, relleno de óxidos, calcita y limos.
49.88	52.27	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, levemente fracturada, juntas suaves a ligeramente rugosas, onduladas, relleno de óxidos y calcita.
52.27	56.40	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca débil (R2), ligeramente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas suaves, planas, relleno de óxidos, calcita y limos.

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-04, se interceptó macizo rocoso desde los 8.00 m. hasta la profundidad final de 55.40 m.

Tabla 35*Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-04*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO
DE	HASTA	
8.00	16.35	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca débil (R2), medianamente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas onduladas y planas, suaves, relleno de óxidos, presenta venillas de calcita.
16.35	27.37	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, moderadamente resistente (R3), fresca, levemente fracturada, juntas onduladas, suaves a ligeramente rugosas, relleno de óxidos y calcita, presenta venillas de calcita.
27.37	44.43	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, moderadamente resistente (R3), medianamente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas onduladas, suaves a ligeramente rugosas, relleno de calcita y calcopirita.
44.43	55.40	Marga (MG), textura no clástica, gris, moderadamente resistente (R3), fresca, levemente fracturada, juntas onduladas, suaves con relleno de óxidos y calcita, presenta venillas de calcita.

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-05, se interceptó macizo rocoso desde los 3.45 m. hasta la profundidad final de 35.00 m.

Tabla 36*Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-05*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO
DE	HASTA	
3.45	10.90	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca moderadamente resistente (R3), moderadamente fracturada, ligeramente meteorizada, juntas ligeramente rugosas, planas, relleno de óxidos y limos.
10.90	13.90	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca resistente (R4), fresca, levemente fracturada, juntas ligeramente rugosas, onduladas, relleno de calcita y óxidos.
13.90	30.65	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas rugosas, onduladas, relleno de óxidos, limos y calcita.
30.65	35.00	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca débil (R2), ligeramente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas ligeramente rugosas, onduladas, relleno de óxidos y limos.

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-06, se interceptó macizo rocoso desde los 1.25 m. hasta la profundidad final de 55.20 m.

Tabla 37*Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-06*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO
DE	HASTA	
1.25	4.30	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas ligeramente rugosas, onduladas, relleno de óxidos, limos y arcillas.
4.30	21.90	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca resistente (R4), ligeramente meteorizada, levemente fracturada, juntas suaves, planas, relleno de óxidos, limos, arcillas y calcita.
21.90	33.80	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca resistente (R4), ligeramente meteorizada, levemente fracturada, juntas ligeramente rugosas, onduladas, relleno de calcita y óxidos.
33.80	37.00	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca débil (R1), moderadamente meteorizada, fuertemente fracturada, juntas ligeramente rugosas, onduladas, relleno de óxidos, calcita, arcillas. Tramo de falla de 34.60m a 35.90 m, relleno de panizo.
37.00	43.30	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, levemente fracturada, juntas ligeramente rugosas, onduladas, relleno de óxidos y calcita.
43.30	55.20	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas ligeramente rugosas, onduladas, rellenos de óxidos y calcita.

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-07, se interceptó macizo rocoso desde los 1.75 m. hasta la profundidad final de 65.20 m.

Tabla 38*Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-07*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO
DE	HASTA	
1.75	10.05	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca débil (R2), moderadamente meteorizada, moderadamente fracturada; juntas onduladas suaves, relleno de óxidos.
10.05	18.90	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca moderadamente resistente (R3), moderadamente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas onduladas, suaves, relleno de óxidos.
18.90	33.37	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca débil (R2), ligeramente meteorizada, levemente fracturada, juntas onduladas, suaves a ligeramente rugosas, relleno de calcita, rodocrosita. Tramos de falla de 28.09m a 28.39 m, 29.40m a 29.90m, 31.73m a 33.37m, relleno de gouge y arcilla.
33.37	43.44	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, levemente fracturada, juntas onduladas, rugosas, relleno de calcita y venillas de rodocrosita asociado con cuarzo.
43.44	56.80	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, levemente fracturada, juntas onduladas, suaves, relleno de óxidos.
56.80	60.45	Marga (MG), no clástica, gris, roca débil (R2), moderadamente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas onduladas, suaves, relleno de óxidos y calcita.
60.45	65.20	Marga (MR), no clástica, rojiza, roca moderadamente resistente (R3), moderadamente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas onduladas, suaves, relleno de óxidos.

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-08, se interceptó macizo rocoso desde los 1.75 m. hasta la profundidad final de 55.20 m.

Tabla 39*Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-08*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO
DE	HASTA	
2.20	7.20	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca muy débil (R1), moderadamente meteorizada; juntas onduladas de suaves a ligeramente rugosas con relleno de óxidos y arcillas.
7.20	24.90	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca débil (R2), moderadamente meteorizada, moderadamente fracturada; juntas onduladas, con relleno de calcita y pirita.
24.90	29.60	Brecha, silicificada, gris, compuesta por clastos subangulosos, con una matriz de cuarzo y carbonatos, moderadamente resistente (R3), levemente meteorizada, presencia de mineralización de esfalerita y galena, juntas relleno de óxidos y limos.
29.60	38.10	Material de relleno (Fragmentos rocosos)
38.10	44.45	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca moderadamente resistente (R3), levemente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas onduladas suaves con relleno de óxidos y calcita.
44.45	55.20	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca moderadamente resistente (R3), levemente meteorizada, levemente fracturada, juntas onduladas rugosas con relleno de calcita.

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-09, se interceptó macizo rocoso desde los 2.00 m. hasta la profundidad final de 70.00 m.

Tabla 40*Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-09*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO
DE	HASTA	
2.00	9.20	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca débil (R2), altamente fracturada, moderadamente meteorizada, juntas rugosas, onduladas, rellenos de óxidos y sílice, presencia de venas de mineral de calcopirita, galena y esfalerita.
9.20	19.70	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas ligeramente rugosas, onduladas, rellenos de limos y calcita. Tramo de falla desde 11.72 m hasta 11.85 m, relleno de panizo.
19.70	24.90	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas ligeramente rugosas a rugosas, onduladas, relleno de sílice, óxidos y calcita, presencia de karsticidad.
24.90	37.60	Material de relleno (vestigios de madera y bloques de roca)
37.60	50.00	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, levemente fracturada, juntas ligeramente rugosas, onduladas, relleno de calcita y óxidos, presencia de venillas de calcita.
50.00	60.10	Material de relleno (vestigios de madera y bloques de roca)
60.10	64.50	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca resistente (R4), ligeramente meteorizada, levemente fracturada, juntas ligeramente rugosas a rugosas, planas, relleno de óxidos
64.50	70.00	Areniscas (Ar), textura clástica, grano fino, beige, roca moderadamente resistente (R3), levemente meteorizada, ligeramente fracturada, juntas ligeramente rugosas, onduladas, rellenos de arcilla, limos.

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-10, se interceptó macizo rocoso desde los 2.10 m. hasta la profundidad final de 45.80 m.

Tabla 41*Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-10*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO
DE	HASTA	
2.10	20.20	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca moderadamente resistente (R3), levemente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas ligeramente rugosas, planas a onduladas, relleno de óxidos, calcita y limos.
20.20	38.80	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca moderadamente resistente (R3), levemente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas suaves, onduladas, relleno de óxidos y calcita.
38.80	43.45	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca resistente (R4), levemente meteorizada, levemente fracturada, juntas rugosas, onduladas, relleno de óxidos, calcita, y glauconita.
43.45	45.80	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, fuertemente fracturada, juntas rugosas, relleno de óxidos y limos.

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-11, se interceptó macizo rocoso desde los 6.30 m. hasta la profundidad final de 70.30 m.

Tabla 42*Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-11*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO
DE	HASTA	
6.30	17.40	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca moderadamente resistente (R3), moderadamente meteorizada; juntas onduladas ligeramente rugosas, relleno de calcopirita, esfalerita y cuarzo, presenta venillas de calcita.
17.40	39.10	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, levemente fracturada, juntas onduladas, suave, relleno de calcita, calcopirita y esfalerita, presencia de venillas de calcita y rodocrosita.
39.10	40.70	Material de relleno
40.70	43.30	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca muy débil (R1), altamente meteorizada, intensamente fracturada, juntas onduladas, rugosas, relleno de óxidos, arcillas, limos.
43.30	48.20	Material de relleno
48.30	52.12	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca moderadamente resistencia (R3), moderadamente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas planas, rellenos de arcillas y óxidos.
52.12	61.14	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca moderadamente resistencia (R3), moderadamente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas onduladas, suaves, relleno de arcilla y óxidos.
61.14	70.30	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca resistente (R4), ligeramente meteorizada, levemente fracturada, juntas onduladas, relleno de óxidos, presencia de oquedades.

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-12, se interceptó macizo rocoso desde los 3.50 m. hasta la profundidad final de 60.10 m.

Tabla 43*Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-12*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO
DE	HASTA	
3.50	19.10	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, moderadamente resistente (R3), moderadamente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas onduladas, suaves, con relleno de óxidos.
19.10	29.85	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca débil (R2), altamente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas onduladas, suaves, relleno de óxidos y arcilla. Tramo de falla de 25.50 m a 27.50 m y 28.50 m a 29.00 m.
29.85	35.20	Brecha, silicificada, gris, compuesta por clastos subangulosos, con una matriz de cuarzo y carbonatos, moderadamente resistente (R3), levemente meteorizada, presencia de mineralización de esfalerita y galena, juntas relleno de óxidos y limos.
35.20	40.95	Material de relleno.
40.95	52.20	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca débil (R2), altamente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas onduladas, suaves, relleno de óxidos y arcilla.
52.20	60.10	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca moderadamente resistente (R3), levemente meteorizada, levemente fracturada, juntas onduladas, suaves, relleno de óxidos.

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-13, se interceptó macizo rocoso desde los 10.80 m. hasta la profundidad final de 50.00 m.

Tabla 44*Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-13*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO
DE	HASTA	
10.80	19.60	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca débil (R2), levemente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas suaves, onduladas y relleno de arcillas, óxidos, presencia de venillas de calcita.
19.60	27.45	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca moderadamente resistente (R3), levemente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas ligeramente rugosas, onduladas y relleno de arcillas, óxidos.
27.45	37.00	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca moderadamente resistente (R3), levemente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas suaves, onduladas, relleno de óxidos y arcillas.
37.00	50.00	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca moderadamente resistente (R3), ligeramente meteorizada, ligeramente alterada, levemente fracturada, juntas rugosas, onduladas y relleno de arcillas y óxidos.

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-14, se interceptó macizo rocoso desde los 0.30 m. hasta la profundidad final de 85.00 m.

Tabla 45*Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-14*

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO
DE	HASTA	
0.30	6.80	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca débil (R2), moderadamente meteorizada, ligeramente alterada, moderadamente fracturada, juntas onduladas, rugosas, relleno de óxidos y calcita.
6.80	13.80	Marga (MG), textura no clástica, gris, moderadamente resistente (R3), moderadamente meteorizada, ligeramente alterada, moderadamente fracturada, juntas onduladas, rugosas, relleno de calcita y óxidos.
13.80	33.60	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, roca resistente (R4), ligeramente meteorizada, levemente fracturada, juntas onduladas, rugosas, relleno de óxidos.
33.60	40.80	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca moderadamente resistente (R3), moderadamente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas onduladas, rugosas, relleno de óxidos y calcita.
40.80	46.50	Marga (MG), textura no clástica, moderadamente resistente (R3), moderadamente meteorizada, levemente fracturada, juntas onduladas, rugosas, relleno de calcita y óxidos.
46.50	64.00	Marga (MG), textura no clástica, gris, moderadamente resistente (R3), moderadamente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas onduladas, rugosas, relleno de calcita y óxidos.
64.00	74.50	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, moderadamente resistente (R3), moderadamente meteorizada, levemente fracturada, juntas onduladas, rugosas, relleno de óxidos.
74.50	85.00	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, moderadamente resistente (R3), moderadamente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas onduladas, rugosas, relleno de calcopirita y esfalerita, presencia de venillas de rodocrosita y calcita.

Fuente: Elaboración propia

En el sondaje SR-15, se interceptó macizo rocoso desde los 15.28 m. hasta la profundidad final de 50.00 m.

Tabla 46

Caracterización geomecánicas de la roca en el sondaje SR-15

PROFUNDIDAD (m)		CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO
DE	HASTA	
15.28	32.72	Marga (MG), textura no clástica, gris, roca débil (R2), moderadamente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas onduladas, suaves, relleno de calcita y óxidos.
32.72	39.15	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, moderadamente resistente (R3), moderadamente meteorizada, moderadamente fracturada, juntas onduladas, suaves, relleno de calcita y óxidos.
39.15	44.93	Marga (MR), textura no clástica, rojiza, moderadamente resistente (R3), moderadamente meteorizada, levemente fracturada, juntas onduladas, suaves, relleno de óxidos.
44.93	50.00	Marga (MG), textura no clástica, gris, moderadamente resistente (R3), moderadamente meteorizada, levemente fracturada, juntas onduladas, suaves, relleno de calcita

Fuente: Elaboración propia

3.1.5 Ensayos in situ

En total se realizó: ocho (08) ensayos de SPT; ver la tabla 47, quince (15) ensayos de LPT; ver la tabla 48, cuatro (04) ensayos de CP; ver la tabla 49.

Tabla 47

Resumen de ensayos de SPT ejecutados en los sondajes

SONDEO	ENSAYO TIPO	TRAMO (M)		N (CAMPO)	LITOLOGÍA	FORMACIÓN GEOLÓGICA	TOTAL
		DESDE	HASTA				
SR-02	SPT N° 01	7.00	7.45	20	CL	Depósito Lacustre	4
	SPT N° 02	8.65	9.10	22	CL	Depósito Lacustre	
	SPT N° 03	11.65	12.10	19	CL	Depósito Lacustre	
	SPT N° 04	14.00	14.45	37	SC	Depósito Lacustre	
SR - 03	SPT N° 01	5.40	5.85	4	CL	Depósito Fluvioglaciario	1
SR - 05	SPT N° 01	2.50	2.95	6	CL	Depósito Residual	1
SR - 13	SPT N° 01	4.50	4.95	5	CL	Depósito Fluvioglaciario	2
	SPT N° 02	7.50	7.95	38	CL	Depósito Fluvioglaciario	
TOTAL							8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 48*Resumen de ensayos de LPT ejecutados en los sondajes*

SONDEO	ENSAYO TIPO	TRAMO (M)		N (CAMPO)	LITOLOGÍA	FORMACIÓN GEOLÓGICA	TOTAL
		DESDE	HASTA				
SR-02	LPT N° 01	1.50	1.95	78	GW-GM	Depósito Lacustre	3
	LPT N° 02	3.00	3.25	52	GW-GM	Depósito Lacustre	
	LPT N° 03	5.00	5.45	73	CL-ML	Depósito Lacustre	
SR-03	LPT N° 01	3.90	4.35	5	CL	Depósito Antrópico	7
	LPT N° 02	6.85	7.30	18	SC	Depósito Fluvioglaciario	
	LPT N° 03	9.00	9.45	60	GC	Depósito Fluvioglaciario	
	LPT N° 04	10.50	10.95	64	GC	Depósito Fluvioglaciario	
	LPT N° 05	12.80	13.25	33	GC	Depósito Fluvioglaciario	
	LPT N° 06	17.00	17.45	48	GC	Depósito Fluvioglaciario	
	LPT N° 07	18.50	18.95	67	GC	Depósito Fluvioglaciario	
SR-13	LPT N° 01	1.50	1.95	28	GC	Depósito Antrópico	4
	LPT N° 02	3.45	3.90	14	GC	Depósito Antrópico	
	LPT N° 03	6.00	6.30	20	CL	Depósito Fluvioglaciario	
	LPT N° 04	9.50	9.95	50	GC	Depósito Fluvioglaciario	
SR-15	LPT N° 01	8.50	8.95	47	SP-SM	Depósito Antrópico	1
TOTAL							15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 49*Resumen de ensayos de CP ejecutados en los sondajes*

PERFORACIÓN DIAMANTINA	ENSAYO TIPO	TRAMO (M)		N (CAMPO)	LITOLOGÍA	FORMACIÓN GEOLÓGICA	TOTAL
		DESDE	HASTA				
SR-03	CP-01	1.60	2.05	28	GC	Depósito Antrópico	2
	CP-02	15.50	15.95	4	GC	Depósito Fluvioglaciario	
SR-15	CP-01	1.50	1.95	45	ML	Depósito Antrópico	2
	CP-02	3.00	3.45	12	ML	Depósito Antrópico	
TOTAL							4

Fuente: Elaboración propia

3.1.6 Ensayos de permeabilidad

En total se realizó ciento cuarenta (140) ensayos de permeabilidad, en las quince (15) perforaciones diamantinas. De las cuales cincuenta y dos (52) ensayos fueron del tipo Lefranc y ochenta y ocho (88) ensayos del tipo Lugeon. El resumen está en la tabla 50.

Tabla 50

Resumen de ensayos de permeabilidad en los sondeos

Sondeo	Ensayo N°	Ensayo Tipo	Profundidad		K (cm/s)	Grado de permeabilidad según K	Litología
			Desde (m)	Hasta (m)			
SR-01	1	LCC	1.80	4.80	1.28E-05	Algo Permeable	Marga gris
	2	LCC	4.80	10.00	5.16E-06	Poco Permeable	Marga gris
	3	LCC	12.00	15.00	1.82E-06	Poco Permeable	Marga rojiza
	1	LUG	11.50	20.00	1.43E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	2	LUG	18.00	25.00	7.48E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	3	LUG	21.00	30.00	1.86E-05	Algo Permeable	Marga gris
	4	LUG	30.00	35.00	7.38E-04	Algo Permeable	Marga gris
	5	LUG	38.00	43.00	1.21E-04	Algo Permeable	Marga gris
SR-02	1	LCC	5.00	6.50	2.55E-05	Algo Permeable	Limo gravoso
	2	LCC	10.50	13.00	2.46E-06	Poco Permeable	Limo gravoso
	3	LCC	15.50	17.00	1.62E-06	Poco Permeable	Marga rojiza
	4	LCC	20.00	25.00	3.60E-06	Poco Permeable	Marga rojiza
	5	LCC	25.00	28.00	3.43E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	6	LCC	28.30	32.50	2.09E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	7	LCC	32.00	36.00	2.36E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	8	LCC	36.00	40.40	5.31E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
SR-03	1	LCC	5.40	8.00	2.55E-03	Permeable	Grava arcillosa
	2	LCC	11.70	12.80	5.10E-04	Algo Permeable	Grava arcillosa
	3	LCC	12.60	14.75	4.49E-04	Algo Permeable	Grava arcillosa
	4	LCC	18.00	19.95	4.54E-04	Algo Permeable	Grava arcillosa
	5	LCC	28.50	33.40	5.84E-05	Algo Permeable	Marga gris
	6	LCC	34.00	38.00	7.31E-05	Algo Permeable	Marga gris
	7	LCC	46.50	50.90	1.74E-04	Algo Permeable	Marga rojiza
	1	LUG	24.00	28.00	2.80E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
SR-04	2	LUG	40.00	42.40	9.53E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	3	LUG	42.00	46.70	1.34E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	4	LUG	51.00	56.40	7.40E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	1	LCC	5.35	9.00	2.41E-04	Algo Permeable	Grava limosa con arena
	1	LUG	10.00	14.10	3.84E-04	Algo Permeable	Marga rojiza
	2	LUG	15.00	19.40	1.66E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	3	LUG	18.00	25.10	1.00E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	4	LUG	24.00	30.00	1.04E-05	Algo Permeable	Marga rojiza

	5	LUG	30.00	35.00	9.87E-06	Poco Permeable	Marga rojiza
	6	LUG	35.00	40.00	5.99E-06	Poco Permeable	Marga rojiza
	7	LUG	40.00	45.00	3.23E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	8	LUG	45.00	50.00	1.49E-04	Algo Permeable	Marga gris
	9	LUG	50.40	55.40	2.55E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
SR-05	1	LCC	4.60	8.00	6.98E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	2	LCC	9.50	11.50	1.61E-04	Algo Permeable	Marga rojiza
	3	LCC	12.20	16.90	2.28E-06	Poco Permeable	Marga rojiza
	1	LUG	19.00	24.50	4.57E-07	Poco Permeable	Marga rojiza
	2	LUG	26.00	35.00	6.46E-06	Poco Permeable	Marga rojiza
SR-06	1	LCC	1.80	6.10	1.48E-04	Algo Permeable	Marga rojiza
	2	LCC	6.00	10.00	1.80E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	3	LCC	11.00	15.50	8.81E-06	Poco Permeable	Marga rojiza
	4	LCC	16.00	20.60	4.98E-06	Poco Permeable	Marga rojiza
	5	LCC	40.30	43.00	8.65E-05	Algo Permeable	Marga gris
	1	LUG	21.00	27.00	2.37E-05	Algo Permeable	Marga gris
	2	LUG	28.65	36.00	9.45E-06	Poco Permeable	Marga gris
	3	LUG	42.00	50.00	4.76E-06	Poco Permeable	Marga rojiza
SR-07	1	LUG	3.50	7.55	2.14E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	2	LUG	7.50	12.40	1.76E-05	Algo Permeable	Marga rojiz
	3	LUG	12.50	18.00	1.53E-05	Algo Permeable	Marga gris
	4	LUG	18.00	23.20	1.00E-04	Algo Permeable	Marga gris
	5	LUG	23.00	29.40	1.58E-04	Algo Permeable	Marga gris
	6	LUG	29.00	35.25	1.08E-04	Algo Permeable	Marga gris
	7	LUG	35.00	40.90	1.06E-04	Algo Permeable	Marga gris
	8	LUG	40.00	45.20	3.16E-04	Algo Permeable	Marga rojiza
	9	LUG	45.00	50.90	2.20E-04	Algo Permeable	Marga rojiza
	10	LUG	50.00	56.60	2.28E-04	Algo Permeable	Marga rojiza
	11	LUG	55.50	60.60	3.15E-04	Algo Permeable	Marga gris
	12	LUG	60.50	65.20	1.80E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
SR-08	1	LCC	2.00	5.00	3.51E-03	Permeable	Marga gris
	2	LCC	19.40	22.40	4.26E-04	Algo Permeable	Marga gris
	3	LCC	28.00	31.40	1.48E-04	Algo Permeable	Marga gris
	4	LCC	33.60	36.60	3.62E-04	Algo Permeable	Marga gris
	1	LUG	9.00	12.00	7.57E-04	Algo Permeable	Marga gris
	2	LUG	14.00	17.00	2.12E-04	Algo Permeable	Marga gris
	3	LUG	22.40	26.00	7.21E-04	Algo Permeable	Marga gris

	4	LUG	41.00	44.00	3.56E-04	Algo Permeable	Marga rojiz
	5	LUG	48.00	55.00	1.98E-04	Algo Permeable	Marga rojiz
SR-09	1	LCC	5.00	8.00	4.38E-05	Algo Permeable	Marga gris
	2	LCC	10.30	13.70	1.78E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	3	LCC	38.10	45.90	7.11E-05	Algo Permeable	Marga gris
	1	LUG	13.00	19.40	2.42E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	2	LUG	63.00	70.00	1.66E-04	Algo Permeable	Areniscas
	1	LCC	2.70	4.40	2.56E-03	Permeable	Marga rojiza
	2	LCC	7.00	10.00	4.67E-04	Algo Permeable	Marga gris
SR-10	1	LUG	10.00	16.00	4.92E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	2	LUG	18.00	25.00	1.12E-06	Poco Permeable	Marga rojiza
	3	LUG	20.50	26.00	4.70E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	4	LUG	26.00	31.00	1.68E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	5	LUG	29.00	35.30	2.33E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	6	LUG	36.00	40.50	1.08E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	7	LUG	40.00	45.80	6.26E-06	Poco Permeable	Marga rojiza
	1	LCC	4.00	5.00	7.62E-03	Permeable	Grava limosa con arena
	2	LCC	7.20	8.90	2.40E-03	Permeable	Marga gris
	3	LCC	12.40	13.40	1.09E-03	Permeable	Marga gris
	4	LCC	48.50	49.70	3.79E-03	Permeable	Marga gris
SR-11	1	LUG	14.50	18.05	4.83E-05	Algo Permeable	Marga gris
	2	LUG	21.00	24.00	7.24E-05	Algo Permeable	Marga gris
	3	LUG	24.00	27.70	2.55E-04	Algo Permeable	Marga gris
	4	LUG	27.00	30.65	1.67E-05	Algo Permeable	Marga gris
	5	LUG	31.00	33.60	1.90E-04	Algo Permeable	Marga gris
	6	LUG	33.00	36.40	3.12E-05	Algo Permeable	Marga gris
	7	LUG	37.00	39.80	8.13E-04	Algo Permeable	Marga gris
	8	LUG	50.40	55.30	1.89E-04	Algo Permeable	Marga rojiza
	9	LUG	56.50	61.50	3.50E-04	Algo Permeable	Marga rojiza
	10	LUG	62.00	70.30	9.43E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	1	LCC	22.00	26.00	1.31E-04	Algo Permeable	Marga gris
	2	LCC	31.20	35.20	1.89E-04	Algo Permeable	Marga gris
	3	LCC	38.00	40.90	2.06E-04	Algo Permeable	Marga gris
SR-12	1	LUG	5.50	9.90	1.95E-04	Algo Permeable	Marga rojiza
	2	LUG	11.00	17.40	1.25E-04	Algo Permeable	Marga rojiza
	3	LUG	16.00	21.50	1.43E-04	Algo Permeable	Marga rojiza
	4	LUG	25.00	30.50	1.61E-05	Algo Permeable	Marga gris

	5	LUG	43.50	47.90	3.42E-04	Algo Permeable	Marga gris
	6	LUG	50.00	55.00	3.70E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	7	LUG	55.00	60.10	4.33E-04	Algo Permeable	Marga gris
SR-13	1	LCC	5.50	6.10	1.64E-04	Algo Permeable	Arcilla con grava
	2	LCC	9.45	10.80	2.05E-05	Algo Permeable	Arcilla con grava
	3	LCC	13.00	15.00	2.65E-04	Algo Permeable	Marga gris
	4	LCC	18.00	20.00	1.53E-04	Algo Permeable	Marga rojiza
	5	LCC	36.50	38.10	1.64E-04	Algo Permeable	Marga gris
	1	LUG	25.00	25.95	1.93E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	2	LUG	29.50	31.00	2.64E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	3	LUG	42.00	44.10	3.92E-05	Algo Permeable	Marga gris
SR-14	4	LUG	47.50	50.00	1.75E-05	Algo Permeable	Marga gris
	1	LCC	10.20	12.50	7.34E-04	Algo Permeable	Marga gris
	1	LUG	18.00	21.30	6.31E-04	Algo Permeable	Marga rojiza
	2	LUG	24.00	25.80	1.20E-04	Algo Permeable	Marga gris
	3	LUG	32.50	35.10	3.76E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	4	LUG	40.00	42.00	2.63E-05	Algo Permeable	Marga gris
	5	LUG	48.50	50.00	1.27E-03	Permeable	Marga rojiza
	6	LUG	53.00	55.00	8.49E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	7	LUG	57.50	60.00	6.30E-04	Algo Permeable	Marga rojiza
	8	LUG	65.50	67.20	7.49E-04	Algo Permeable	Marga rojiza
	9	LUG	71.50	73.80	9.22E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
SR-15	10	LUG	77.50	79.50	1.64E-05	Algo Permeable	Marga gris
	11	LUG	83.00	85.00	1.42E-05	Algo Permeable	Marga rojiza
	1	LCC	4.00	4.95	2.97E-04	Algo Permeable	Limo gravoso
	2	LCC	7.40	10.20	1.80E-04	Algo Permeable	Grava limosa
	3	LCC	11.00	15.10	2.79E-05	Algo Permeable	Grava limosa
	1	LUG	18.00	20.00	9.23E-05	Algo Permeable	Marga gris
	2	LUG	20.00	25.00	1.49E-05	Algo Permeable	Marga gris
3	LUG	27.00	30.30	7.73E-05	Algo Permeable	Marga gris	
4	LUG	31.00	35.00	9.66E-05	Algo Permeable	Marga rojiza	
5	LUG	35.00	40.40	6.00E-06	Poco Permeable	Marga rojiza	
6	LUG	38.00	45.40	2.14E-05	Algo Permeable	Marga rojiza	
7	LUG	48.00	53.00	2.22E-05	Algo Permeable	Marga gris	

Nota: Clasificación del grado de permeabilidad: Terzaghi y Peck, 1967
Fuente: Elaboración propia

3.1.7 Instrumentación geotécnica

En la tabla 51 y tabla 52 se detallan las profundidades de instrumentación de los piezómetros casagrande y cuerda vibrante en cada sondaje.

Tabla 51

Instrumentación geotécnica instalado de piezómetros casagrande.

Perforación diamantina	Profundidad Perforación (m)	Profundidad piezómetro Casagrande		Diámetro del Piezómetro (Ø)
		A (m)	B (m)	
SR-01	43.30	43.00	-	A, Ø= 1 1/2"
SR-02	40.40	40.00	-	A, Ø= 1 1/2"
SR-03	56.40	56.00	-	A, Ø= 1 1/2"
SR-04	55.40	55.00	-	A, Ø= 1 1/2"
SR-05	35.00	34.50	15.00	A, Ø= 1 1/2" B, Ø= 1"
SR-06	55.20	55.00	-	A, Ø= 1 1/2"
SR-10	45.80	45.50	-	A, Ø= 1 1/2"
SR-12	60.10	59.70	-	A, Ø= 1 1/2"
SR-15	53.00	15.30	-	A, Ø= 1 1/2"

Fuente: Elaboración propia

Tabla 52

Instrumentación geotécnica instalado de piezómetros cuerda vibrante.

Perforación diamantina	Profundidad Perforación (m)	Profundidad piezómetro de cuerda vibrante	
		A (m)	B (m)
SR-01	43.30	32.00	15.00
SR-02	40.40	12.00	30.00
SR-03	56.40	9.00	35.00
SR-04	55.40	16.00	-
SR-05	35.00	22.00	-
SR-06	55.20	44.00	20.00
SR-10	45.80	31.00	-
SR-12	53.00	21.00	35.00

Fuente: Elaboración propia

3.1.8 Muestreo para ensayos de mecánica de suelo

Se recopilaron veinte (20) muestras obtenidas a partir de la selección de muestras en algunas perforaciones, ver tabla 53.

Tabla 53

Selección de muestras para ensayos de mecánica de suelos.

PERFORACIÓN DIAMANTINA	CÓDIGO DE MUESTRA	TRAMO (M)		TOTAL
		DESDE	HASTA	
SR-02	LPT-01	1.50	1.95	10
	LPT-02	3.00	3.25	
	LPT-03	5.00	5.45	
	Shelby-01	6.50	7.00	
	Shelby-02	8.00	8.65	
	Shelby-03	11.00	11.65	
	SPT-01	7.00	7.45	
	SPT-02	8.65	9.10	
	SPT-03	11.65	12.10	
	SPT-04	14.00	14.45	
SR-03	LPT-01	3.90	4.35	8
	LPT-02	6.85	7.30	
	LPT-03	9.00	9.45	
	LPT-04	10.50	10.95	
	LPT-05	12.80	13.25	
	LPT-06	17.00	17.45	
	LPT-07	18.50	18.95	
SR-05	SPT-01	5.40	5.85	1
SR-15	MS-01	2.50	2.95	3
	LPT-01	0.90	1.50	
	Shelby-01	8.50	8.95	
Total				20

Fuente: Elaboración propia

3.1.9 Identificación de labores mineras existentes

En la zona de estudio y áreas aledañas se han identificado una (01) bocamina, siete (07) chimeneas y dos (02) piques. La ubicación y las dimensiones se muestra indicada en la tabla 55, no fue posible medir las dimensiones reales dado que el ingreso está cubierto por lozas de concreto, muros de concreto y otros.

Tabla 54

Labores mineras en el área de estudio.

TIPO DE LABOR	CÓDIGO	COORDENADAS UTM (WGS84)		COTA (msnm)	DIMENSIONES (m)	ESTADO
		ESTE (m)	NORTE (m)			
Bocamina	B2	344 608	8 780 596	4602	2.65 x 2.25	No operativo
Chimenea	CH4-RB05	344 391	8 780 409	4584	5.10 x 5.10	Operativa
Chimenea	B1	344 671	8 780 518	4638	5.0 x 5.0	No operativo
Chimenea	CH1-RB46	344 640	8 780 397	4644	4.0 x 4.0	Operativa
Chimenea	CH2-RB42	344 638	8 780 299	4660	2.0 x 2.0	Operativa
Chimenea	CH3	344 638	8 780 299	4660	2.0 x 2.0	Operativa
Chimenea	PCM-AN-CH-08	344 417	8 780 354	4599	No información	Cerrada
Chimenea	CH5-RB63	344 852	8 780 412	4702	No información	Operativa
Pique Montenegro	-	344 366	8 780 308	4602	No información	No operativo
Pique Jacob Timmers	-	344 356	8 780 223	4606	No información	Operativa

Fuente: Animón 2023.

Figura 28

Labores subterráneas proyectadas en el área de estudio



Fuente: Google Earth, 2023.

3.2 Investigaciones geofísicas

En el área de estudio se realizó 35 líneas de refracción sísmica, también se ejecutó 11 sondajes MASW con el cual se alcanzó una profundidad de 30 m. Adicionalmente se ejecutó 08 sondajes MAM con los cuales se alcanzó una profundidad máxima de 108 m.

3.2.1 Ensayos de refracción sísmica

Se realizó 35 líneas de refracción sísmica, las cuales permitieron explorar un rango de profundidad de entre 25 a 40 m por debajo de la superficie del terreno, ver tabla 55.

Tabla 55

Líneas de refracción sísmica en el área de estudio

Línea	Estrato	Vp (m/s)	Espesor(m)	Descripción
LS-01_A(01 y 02) (A-D)	1	300 – 700	0.1 – 2.7	Material granular medianamente denso
	2	700 – 1500	1.0 – 3.1	Material granular denso
	3	1500 – 2700	4.1 – 13.2	Material granular muy denso o roca fracturada
	4	2700 – 3500	5.1 – 22.2	Roca ligeramente fracturada a roca sana
LS-01_A(03 y 04) (E-H)	1	300 – 700	0.2 – 1.8	Material granular medianamente denso
	2	700 – 1500	0.7 – 2.8	Material granular denso
	3	1500 – 2700	3.2 – 14.1	Material granular muy denso o roca fracturada
	4	2700 – 3500	10.9 – 22.2	Roca ligeramente fracturada a roca sana
LS-01_B(01) (I-J)	1	300 – 700	0.2 – 3.8	Material granular medianamente denso
	2	700 – 1500	3.4 – 5.9	Material granular denso
	3	1500 – 2700	9.6 – 14.7	Material granular muy denso o roca fracturada
	4	2700 – 3500	5.0 – 8.3	Roca ligeramente fracturada a roca sana
LS-01_B(02 y 03) (K-N)	1	300 – 700	0.2 – 6.1	Material granular medianamente denso
	2	700 – 1500	2.4 – 6.2	Material granular denso
	3	1500 – 2700	6.5 – 19.1	Material granular muy denso o roca fracturada
	4	2700 – 3500	6.5 – 16.9	Roca ligeramente fracturada a roca sana
LS-02_(01 y 02) (O-R)	1	300 – 700	0.4 – 2.2	Material granular medianamente denso
	2	700 – 1500	1.5 – 3.4	Material granular denso
	3	1500 – 2700	3.3 – 17.9	Material granular muy denso o roca fracturada
	4	2700 – 3500	15.4 – 36.5	Roca ligeramente fracturada a roca sana
LS-03_(01 y 02) (S-V)	1	300 – 700	0.8 – 6.0	Material granular medianamente denso
	2	700 – 1500	2.4 – 13.6	Material granular denso
	3	1500 – 2700	12.9 – 23.2	Material granular muy denso o roca fracturada
LS-04 (W-X)	1	1100 – 1500	2.9 – 6.3	Material granular denso

Línea	Estrato	Vp (m/s)	Espesor(m)	Descripción
	2	1500 – 2500	19.2 – 22.7	Material granular muy denso o roca fracturada
LS-05 (Y-Z)	1	700 – 1500	2.5 – 5.8	Material granular denso
	2	1500 – 2700	13.5 – 19.4	Material granular muy denso o roca fracturada
	3	2700 – 2900	3.8 – 6.6	Roca ligeramente fracturada a roca sana
	1	700 – 1500	4.3 – 9.6	Material granular denso
LS-06_(01) (AA-AB)	2	1500 – 2700	19.1 – 25.4	Material granular muy denso o roca fracturada
	1	700 – 1500	2.5 – 10.3	Material granular denso
LS-06_(02 y 03) (AC-AF)	2	1500 – 2700	15.9 – 24.6	Material granular muy denso o roca fracturada
	3	2700 – 2900	2.2 – 3.8	Roca ligeramente fracturada a roca sana
	1	700 – 1500	8.4 – 18.3	Material granular denso
LS-07 (AG-AH)	2	1500 – 1900	9.7 – 13.5	Material granular muy denso o roca fracturada
	1	300 – 700	0.2 – 3.9	Material granular medianamente denso
LS-08 (AI-AJ)	2	700 – 1500	5.3 – 15.1	Material granular denso
	3	1500 – 1900	4.9 – 14.3	Material granular muy denso o roca fracturada
	1	700 – 1500	2.3 – 7.1	Material granular denso
LS-09 (AK-AL)	2	1500 – 2700	2.4 – 7.8	Material granular muy denso o roca fracturada
	3	2700 – 3500	5.6 – 14.6	Roca ligeramente fracturada a roca sana
	4	3500 – 4300	12.0 – 20.5	Roca sana
	1	700 – 1500	1.1 – 6.2	Material granular denso
LS-10 (AM-AN)	2	1500 – 2700	2.1 – 9.4	Material granular muy denso o roca fracturada
	3	2700 – 3500	4.9 – 11.1	Roca ligeramente fracturada a roca sana
	4	3500 – 4300	7.6 – 14.4	Roca sana
	1	700 – 1500	4.5 – 12.1	Material granular denso
LS-11 (AO-AP)	2	1500 – 2700	5.7 – 19.2	Material granular muy denso o roca fracturada
	3	2700 – 3500	5.5 – 12.1	Roca ligeramente fracturada a roca sana
	4	3500 – 3900	5.6 – 16.1	Roca sana
	1	300 – 700	0.4 – 3.8	Material granular medianamente denso
LS-12 (AQ-AR)	2	700 – 1500	2.0 – 5.7	Material granular denso
	3	1500 – 2700	10.3 – 14.4	Material granular muy denso o roca fracturada
	4	2700 – 3500	6.0 – 16.6	Roca ligeramente fracturada a roca sana
	1	900 – 1500	2.1 – 6.4	Material granular denso
LS-13 (AS-AT)	2	1500 – 2700	8.0 – 17.6	Material granular muy denso o roca fracturada
	3	2700 – 3100	5.2 – 7.8	Roca ligeramente fracturada a roca sana
	1	900 – 1500	1.6 – 6.0	Material granular denso
LS-14 (AU-AV)	2	1500 – 2700	4.4 – 16.3	Material granular muy denso o roca fracturada

Línea	Estrato	Vp (m/s)	Espesor(m)	Descripción
	3	2700 – 3100	9.0 – 10.5	Roca ligeramente fracturada a roca sana
LS-15 (AW-AX)	1	300 – 700	0.6 – 1.1	Material granular medianamente denso
	2	700 – 1500	1.2 – 3.6	Material granular denso
	3	1500 – 2700	5.0 – 13.5	Material granular muy denso o roca fracturada
	4	2700 – 3100	6.1 – 8.6	Roca ligeramente fracturada a roca sana
	1	300 – 700	3.9 – 10.5	Material granular medianamente denso
LS-16_(01 y 02) (AY-BB)	2	700 – 1500	9.7 – 15.6	Material granular denso
	3	1500 – 1700	3.1 – 9.7	Material granular muy denso o roca fracturada
	1	500 – 700	0.6 – 1.2	Material granular medianamente denso
LS-17 (BC-BD)	2	700 – 1500	2.3 – 4.9	Material granular denso
	3	1500 – 2700	14.9 – 20.3	Material granular muy denso o roca fracturada
	1	300 – 700	1.0 – 5.1	Material granular medianamente denso
LS-18 (BE-BF)	2	700 – 1500	2.2 – 4.0	Material granular denso
	3	1500 – 2700	5.5 – 9.6	Material granular muy denso o roca fracturada
	4	2700 – 3500	9.3 – 16.5	Roca ligeramente fracturada a roca sana
	1	700 – 1500	2.5 – 4.9	Material granular denso
LS-19 (BG-BH)	2	1500 – 2700	2.2 – 10.6	Material granular muy denso o roca fracturada
	3	2700 – 3500	1.2 – 11.1	Roca ligeramente fracturada a roca sana
	4	3500 – 3900	3.5 – 7.2	Roca sana
	1	300 – 700	0.9 – 3.0	Material granular medianamente denso
LS-20 (BI-BJ)	2	700 – 1500	1.6 – 3.1	Material granular denso
	3	1500 – 2700	7.3 – 16.5	Material granular muy denso o roca fracturada
	4	2700 – 3100	6.7 – 13.4	Roca ligeramente fracturada a roca sana
	1	700 – 1500	0.9 – 3.8	Material granular denso
LS-21 (BK-BL)	2	1500 – 2700	2.8 – 4.6	Material granular muy denso o roca fracturada
	3	2700 – 3500	5.3 – 22.7	Roca ligeramente fracturada a roca sana
	4	3500 – 3900	6.3 – 10.0	Roca sana
	1	500 – 700	0.7 – 4.6	Material granular medianamente denso
LS-22 (BM-BN)	2	700 – 1500	4.9 – 11.8	Material granular denso
	3	1500 – 2100	8.1 – 14.7	Material granular muy denso o roca fracturada
	1	700 – 1500	2.0 – 5.9	Material granular denso
LS-23 (BO-BP)	2	1500 – 2700	14.5 – 17.1	Material granular muy denso o roca fracturada
	1	700 – 1500	1.6 – 5.4	Material granular denso
LS-24 (BQ-BR)	2	1500 – 2700	2.9 – 5.8	Material granular muy denso o roca fracturada
	3	2700 – 3500	10.2 – 13.3	Roca ligeramente fracturada a roca sana

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Ensayo ondas superficiales en arreglo multicanal MASW

Se ejecutó 11 sondajes MASW con el cual se alcanzó una profundidad de 30 m.

Tabla 56

Descripción geofísica de los ensayos ejecutados MASW.

Línea	Estrato	Vs(m/s)	Espesor(m)	Prof.(m)	Descripción
MASW-01	1	509 – 613	2.5	2.5	Material granular denso
	2	761 – 1458	27.5	30	Material granular muy denso o roca fracturada
MASW-02	1	382 – 665	22.4	22.4	Material granular denso
	2	747 – 939	7.6	30	Material granular muy denso o roca fracturada
MASW-03	1	459 – 611	7.9	7.9	Material granular denso
	2	708 – 1087	22.1	30	Material granular muy denso o roca fracturada
MASW-04	1	511 – 636	3.8	3.8	Material granular denso
	2	701 – 1498	23.9	27.7	Material granular muy denso o roca fracturada
	3	1595	2.3	30	Roca ligeramente fracturada a roca sana
MASW-05	1	401 – 639	2.6	2.6	Material granular denso
	2	985 – 1427	24.3	26.9	Material granular muy denso o roca fracturada
	3	1516	3.1	30	Roca ligeramente fracturada a roca sana
MASW-06	1	475	1.1	1.1	Material granular denso
	2	718 – 1505	28.9	30	Material granular muy denso o roca fracturada
MASW-07	1	331 – 645	7.7	7.7	Material granular denso
	2	727 – 1370	22.3	30	Material granular muy denso o roca fracturada
MASW-08	1	286 – 675	14.1	14.1	Material granular denso
	2	760 – 1236	15.9	30	Material granular muy denso o roca fracturada
MASW-09	1	356 – 692	7.9	7.9	Material granular denso
	2	746 – 1065	22.1	30	Material granular muy denso o roca fracturada
MASW-10	1	232 – 280	6.9	6.9	Material granular medianamente denso
	2	317 – 619	10.2	17.1	Material granular denso
	3	700 – 932	12.9	30	Material granular muy denso o roca fracturada
MASW-11	1	444 – 583	3.1	3.1	Material granular denso
	2	793 – 1438	26.9	30	Material granular muy denso o roca fracturada

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Ensayo de microtrepidaciones en arreglo multicanal MAM

Se ejecutó 08 sondajes MAM con los cuales se alcanzó una profundidad máxima de 108 m.

Tabla 57*Descripción geofísica de los ensayos ejecutados MAM.*

Línea	Estrato	Vs(m/s)	Espesor(m)	Prof.(m)	Descripción
	1	490	2.6	2.6	Material granular denso
MAM-01/ MASW-01	2	780 – 1493	65.6	68.2	Material granular muy denso o roca fracturada
	3	1575 – 1870	36.8	105	Roca ligeramente fracturada a roca sana
MAM-02 /MASW-02	1	391 – 698	22.4	22.4	Material granular denso
	2	760 – 1191	47.6	70	Material granular muy denso o roca fracturada
MAM-03 /MASW-03	1	513 - 641	8.9	8.9	Material granular denso
	2	754 – 1496	67.5	76.4	Material granular muy denso o roca fracturada
	3	1514 – 1544	13.6	90	Roca ligeramente fracturada a roca sana
MAM-04 /MASW-04	1	548 - 650	3.1	3.1	Material granular denso
	2	746 – 1426	24.8	27.9	Material granular muy denso o roca fracturada
	3	1503 – 2019	58.1	86	Roca ligeramente fracturada a roca sana
MAM-05 /MASW-05	1	406	1.7	1.7	Material granular denso
	2	755 – 1469	23.3	25	Material granular muy denso o roca fracturada
	3	1529 – 2093	31.1	56.1	Roca ligeramente fracturada a roca sana
	4	2243 – 2845	39.9	96	Roca sana
MAM-06 /MASW-06	1	485	1.9	1.9	Material granular denso
	2	774 – 1508	96.1	98	Material granular muy denso o roca fracturada
MAM-07 /MASW-07	1	316 – 605	7.4	7.4	Material granular denso
	2	701– 1381	52.6	60	Material granular muy denso o roca fracturada
MAM-08 /MASW-11	1	508	2.6	2.6	Material granular denso
	2	775 – 1446	32.3	34.9	Material granular muy denso o roca fracturada
	3	1533 – 2056	25.5	60.4	Roca ligeramente fracturada a roca sana
	4	2166 – 3040	41.6	102	Roca sana

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Tomografía eléctrica

Se ejecutó 07 ensayos de tomografía eléctrica ejecutados con una separación entre electros de 13 m, ver Tabla 58.

Tabla 58*Distribución de las líneas del ensayo de tomografía eléctrica.*

LÍNEA	SEPARACIÓN (m)	NÚMERO DE ESTACIONES	LONGITUD (m)
TE22-01 TE22-02	13	56	715
TE22-03	13	56	715
TE22-04	13	56	715
TE22-05	13	19	234
TE22-06	13	19	234
TE22-07	13	23	286
Total			2899

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

En la zona de estudio de la presente investigación se tiene por objetivo evaluar las condiciones, geotécnicas y geofísicas en donde se tiene proyectado la factibilidad del nuevo depósito de relaves.

En base a la información revisada y debidamente interpretada, y fundamentalmente en base a los resultados de las investigaciones de campo y laboratorio, se analizan y discuten los resultados que a continuación se sintetizan:

4.1 Evaluación geológica del depósito de relaves

4.1.1 Evaluación geológica

El presente proyecto está ubicado en el flanco izquierdo de la laguna Naticocha Centro sobre las terrazas lacustrinas glaciares y ladera de fuerte pendiente. Las principales fallas observadas son de rumbo Este - Oeste, las cuales han sido rellenada por soluciones mineralizantes, formando la veta principal y sus ramales. En la zona de la cimentación y áreas aledañas se ha registrado evidencias de eventos de fenómenos naturales como: desprendimiento de roca, zonas de derrumbes locales, zonas de erosión en cárcavas, zonas de deslizamientos locales y fenómenos de subsidencia por efecto de laboreo minero, ver Figura 29; por otro lado a través de los sondajes de perforación se identificó tramos vacíos y/o rellenos con material de madera, lo cual evidencia antiguas labores mineras a inteceptadas a diferentes niveles de profundidad, ver Figura 30.

En cuanto a las unidades hidrogeológicas evidenciadas cuenta con depósitos cuaternarios y basamento rocoso estratificado de la Formación Casapalca compuesto por margas y lutitas de color rojo que afloran en las partes bajas de la altiplanicie, en las montañas altas afloran areniscas y calizas, e intrusiones de diques ígneos y subvolcánicos, estos controlan la recarga y el flujo del agua subterránea.

El análisis y evaluación de las condiciones hidrogeológicas de la zona de proyecto evidencian anomalías estructurales que controlan la infiltración y el movimiento de las

aguas subterráneas en el subsuelo, los cuales pasan a formar parte de las aguas profundas que descargan en el frente de las labores subterráneas de mina.

Figura 29

Zonas de deslizamiento identificadas



Fuente: Google Earth, 2023.

Figura 30

Tramos vacíos interceptados a través de los sondajes








Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Evaluación de labores mineros existentes

Se describe las condiciones geológicas y geomecánicas de la bocamina y las chimeneas identificadas dentro del área del proyecto. La caracterización geomecánica del macizo rocoso se ha efectuado solo en portal de ingreso de la bocamina y en caso de las chimeneas en afloramientos rocosos cercanos.

Tabla 59

Caracterización de labores mineras identificadas

CÓDIGO	CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMECÁNICAS	FOTOGRAFÍAS
B2	<p>Geología; está construida en roca al 100% en marga rojiza. La dirección de la bocamina es de N235° y luego muestra un quiebre en dirección N103°. La bocamina al momento de la inspección se encuentra con marco de cimbra, muros de concreto, concreto lanzado y al acceder al interior galería estable con algunas goteras de agua. Es posible en época de lluvia se registre flujos de agua.</p> <p>Geomecánica; En el portal de la bocamina se registró tres sistemas de diaclasas cuyo buzamiento/dirección de buzamiento: 15°/132, 70°/270° y 45°/147°. El estimado de los índices del macizo rocoso son: RQD=55%, RMR89=58, RMR'89=55, RMR'76=51, el índice Q=12 y GSI=54.</p>	
CH4-RB05	<p>Geología; está construida en roca al 100% en marga rojiza. Chimenea vertical y está cubierto por un muro de concreto.</p> <p>Geomecánica; En la chimenea se registró tres sistemas de diaclasas cuyo buzamiento/dirección de buzamiento: 62°/347, 72°/275° y 32°/147°. El estimado de los índices del macizo rocoso son: RQD=54%, RMR89=56, RMR'89=58, RMR'76=51, el índice Q=12.07 y GSI=55.</p>	
B1	<p>Geología; está construida en roca al 100% en marga rojiza. Chimenea vertical y está cubierto por una losa de concreto armado.</p> <p>Geomecánica; En la chimenea se registró tres sistemas de diaclasas cuyo buzamiento/dirección de buzamiento: 36°/110, 86°/348° y 81°/261°. El estimado de los índices del macizo rocoso son: RQD=42%, RMR89=53, RMR'89=55, RMR'76=50, el índice Q=9.32 y GSI=57.5.</p>	
CH1-RB46	<p>Geología; está construida en roca al 100% en marga rojiza. Chimenea vertical operativa y está protegido por muro con bloques de concreto.</p> <p>Geomecánica; En la chimenea se registró tres sistemas de diaclasas cuyo buzamiento/dirección de buzamiento: 57°/268, 42°/303° y 82°/027°. El estimado de los índices del macizo rocoso son: RQD=34%, RMR89=51, RMR'89=53, RMR'76=48, el índice Q=7.6 y GSI=45.</p>	
CH2-RB42	<p>Geología; está construida en roca al 100% en marga rojiza. Ambas chimeneas circulares vertical operativa y está protegido por muro de concreto y plancha metálica.</p> <p>Geomecánica; En la chimenea se registró tres sistemas de diaclasas cuyo buzamiento/dirección de buzamiento: 82°/2, 32°/272° y 55°/237°. El estimado de los índices del macizo rocoso son: RQD=45%, RMR89=53, RMR'89=55, RMR'76=50, el índice Q=9.95 y GSI=43.</p>	

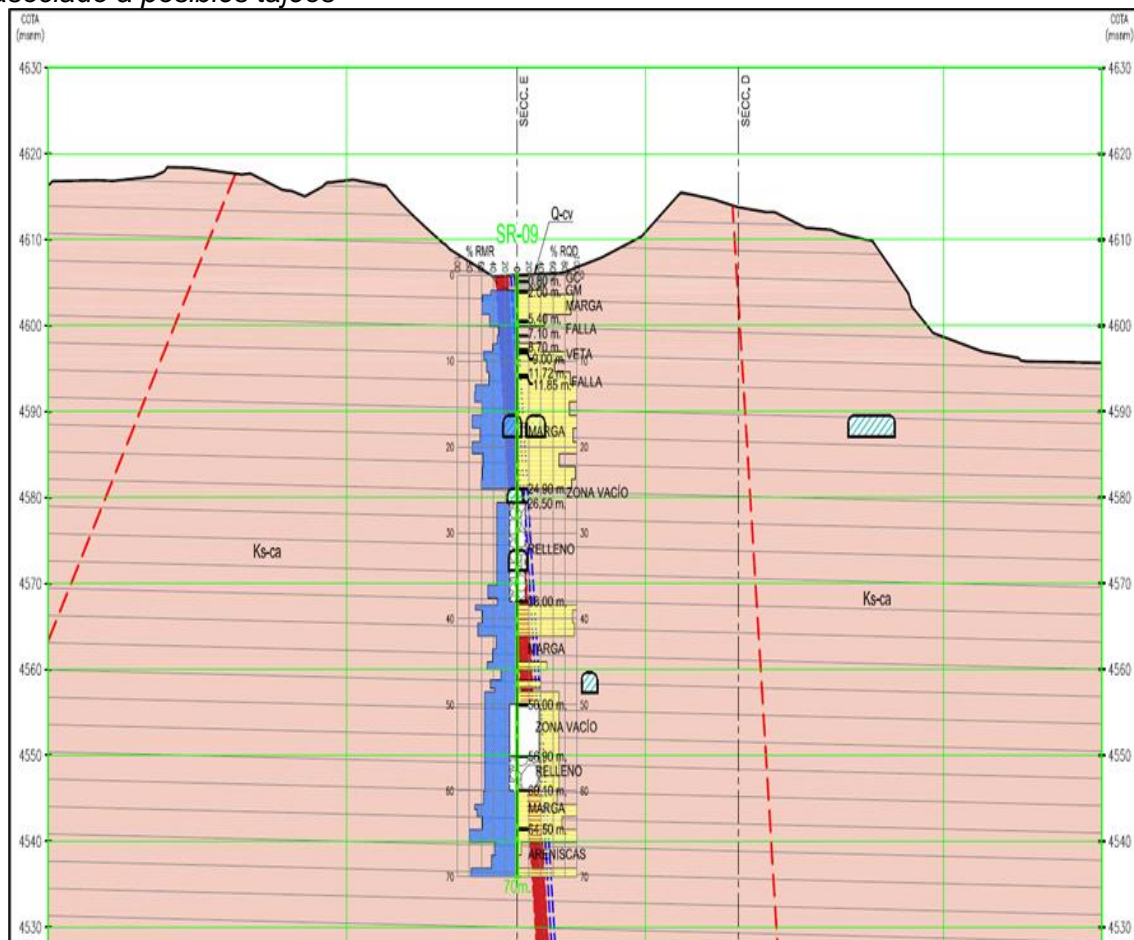
Nota: RQD= Índice de calidad de la roca (Deere, 1964); RMR89= Rock Mass Rating (Bieniawski, 1989); RMR'89= Rock Mass Rating (Bieniawski, 1989) en condición seco; RMR'76= Rock Mass Rating (Bieniawski, 1976) en condición seco Q= Rock Tunneling Quality Index (Barton, 1974); GSI= Geological Strength Index (Hoek, 2000)

Fuente: (Deere, 1964); (Bieniawski, 1989); (Bieniawski, 1976); (Barton, 1974); (Hoek, 2000).

Las perforaciones SR-08, SR-09 y SR-11, han interceptado posibles zonas tajeo de la veta Principal con relleno de detrito o desmante de mina. La perforación SR-09 se ha ejecutado sobre la estructura mineralizada y han interceptado dos tramos de posibles zonas de tajeo entre las profundidades 26.50 a 38.00 m y 56.90 a 60.10 m y además se registró dos posibles zonas vacíos o labores subterráneas escasamente rellenas entre las profundidades 24.90 a 26.50 m y 50.00 a 56.90 m.

Figura 31

Perfil geotécnico del sondaje SR-09 interceptando zonas de vacío y material de relleno asociado a posibles tajeos



Fuente: Elaboración propia.

4.2 Evaluación geotécnica del depósito de relaves

4.2.1 Evaluación geotécnica del suelo

De acuerdo con lo evidenciado, el proyecto de depósito de relaves de Rinconada será cimentado principalmente sobre roca. Sin embargo, existen sectores del proyecto donde se hallan depósitos de suelos sobre el área que ocupará y alrededor a esta que pueden alcanzar los 15 m de espesor, y que están asociadas a potentes horizontes de arcillas.

El suelo de origen antropogénico, que corresponde a un relleno de plataforma de los campamentos abarca la tercera parte del área del proyecto, tiene espesores variables, cubren suelos glaciares, eluviales, coluviales y roca. Se extiende desde el pie del futuro depósito, alcanza un máximo de 3.80 metros (SR-03) de espesor en este sector, más al norte su potencia llega a los 8.00 m (SR-04), como material de relleno. Estos suelos son de alta densidad y presentan una granulometría polimíctica en poca matriz areno limosa (GP), presentan un V_p de 700 m/s a 1000 m/s.

Los suelos de origen coluvial (Q-cv) situados dentro de la zona del depósito generalmente son sueltos, secos a húmedos, formados por efecto de la meteorización de los taludes, se acumulan como conos de poco espesor, de fácil remoción; cubren áreas pequeñas, están conformados por fragmentos muy angulosos de margas rojas y grises, en una matriz de arena (GP), algunos están afectados por pequeños deslizamientos superficiales. Otros coluvios, cubiertos por una incipiente vegetación y de mayor densidad, colindan al norte del proyecto, están conformados material de grava con matriz de arena.

Al pie del depósito se ha encontrado suelos de origen lacustre asociados a la laguna Naticocha que han sido reconocidos mediante las perforaciones SR-02 y SR-15 en ellas se observan suelos arcillosos de mediana plasticidad alcanzan los 15 m de profundidad, hasta 8 m de espesor, es de forma lenticular en sus extremos, se encuentran debajo y por encima del suelo glaciar.

El suelo glaciar es el de mayor extensión en la zona de estudio, se sitúan aguas abajo del futuro depósito, puede alcanzar hasta los 16 m de espesor, se encuentra

conformada una grava redondeada en matriz arcillosa de plasticidad media, muy densa a compacta, pardo amarillento.

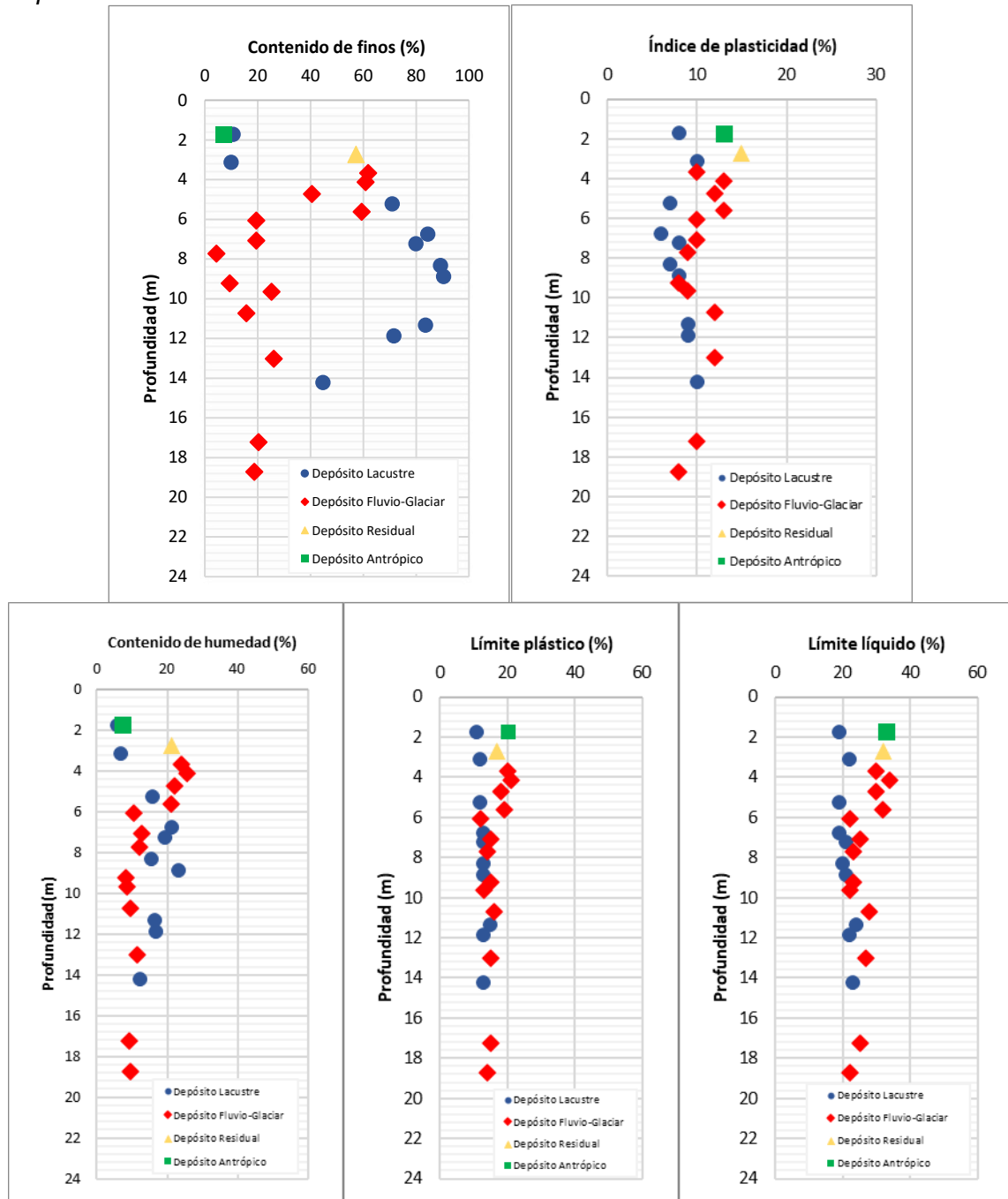
En algunos sectores se han encontrado en los extremos de la laguna grandes bloques de hasta 12", de naturaleza monzonita (SR-15), son de alta compactación, presentan una permeabilidad baja a media ($k=10^{-5}$ m/s), los estudios geofísicos han determinado V_p de 15000 m/s. Estos depósitos están asociados a napas colgantes por influencia de la laguna Naticocha Centro. Horizontes de suelo gravo arenoso también fueron registrados a 6.45 m de profundidad en el sondaje SR-15 de 2.0 m de potencia en los cuales se observa que presentan un alto porcentaje de arena media, estos se registraron en este sector.

Asimismo, se ha observado suelo residual (descomposición de la roca madre) en los sondajes SR-03 y SR 05, los que son de composición arcillosa como resultado de la meteorización de las margas rojizas, generalmente son de mediana a baja plasticidad y tienen espesores de 3.0 a 5.0 m.

Los resultados mostrados a continuación han sido analizados a partir de los ensayos de laboratorio en las muestras de suelo, donde se han analizado contenido de humedad, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y contenido de finos; dichos parámetros se han agrupado de acuerdo al tipo de suelo caracterizados en los sondajes como: depósito lacustre, depósito fluvio-glaciar, depósito residual y depósito antrópico; los cuales alcanzan a indicar las propiedades físicas tal como se encuentra el terreno in situ, ver Figura 32.

Figura 32

Propiedades físicas de los materiales de suelo



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Evaluación geotécnica del macizo rocoso

Roca intacta

Se identificaron diversas litologías en la zona del proyecto, la más abundante es la margas (tonalidad rojiza y gris), luego en menor proporción las brechas seguidas por la arenisca y finalmente, solo en la parte superior del área de proyecto, la lutita. Las

características geomecánicas de la roca intacta que se identificaron para cada litología es la siguiente:

- Margas: estas rocas se presentan generalmente masivas, en estratos de 50 cm presentan en algunos sectores una estructura estratificada o bandeada, cercanos a fallas presentan vetillas y oquedades (por lixiviación) a modo de microdefectos. Cerca de superficie y en superficie presentan generalmente una ligera meteorización con pátinas de óxidos. Tiene una coloración rojiza en forma inalterada, por efectos de la mineralización y tectonismo generalmente se presenta gris, masiva o con microdefectos, tienen menor resistencia a las margas rojas, sobre todo en condiciones de humedad o saturación pues son medianamente alterables. La densidad de la roca rojiza es en promedio de 2.50 g/cm³, la marga gris es 2.40 g/cm³, generalmente la porosidad es variable ya que la marga rojiza es inferior al 10% y la que se presenta gris es de 25% por efecto de las oquedades que las afectan, así como las microvenillas. La resistencia a la compresión simple de la marga roja es de 39 MPa y de la marga gris es de 20 MPa.
- Brecha de origen tectónico, en la zona de cimentación de los depósitos, el macizo rocoso de margas ha sufrido modificaciones en sus características físicas y mecánicas e inclusive se transformaron a brechas de fallas debido a los diferentes eventos tectónicos y de mineralización. Las brechas se asocian directamente a la zona de falla y veta-fallas, se presenta afectado conformado de clastos de estas litologías con bajo grado de silicificación en una matriz fina, esta meteorizada y con bastantes fisuras y microdefectos propios de su formación, generalmente presenta una mayor resistencia a la de la marga, se le confiere un RCS de 42 MPa
- En otras litologías se presenta la lutita y areniscas, de manera puntual como horizontes delgados en algunos sondeos y en superficie, sin tener mayor relevancia en las características geomecánicas del macizo rocoso.

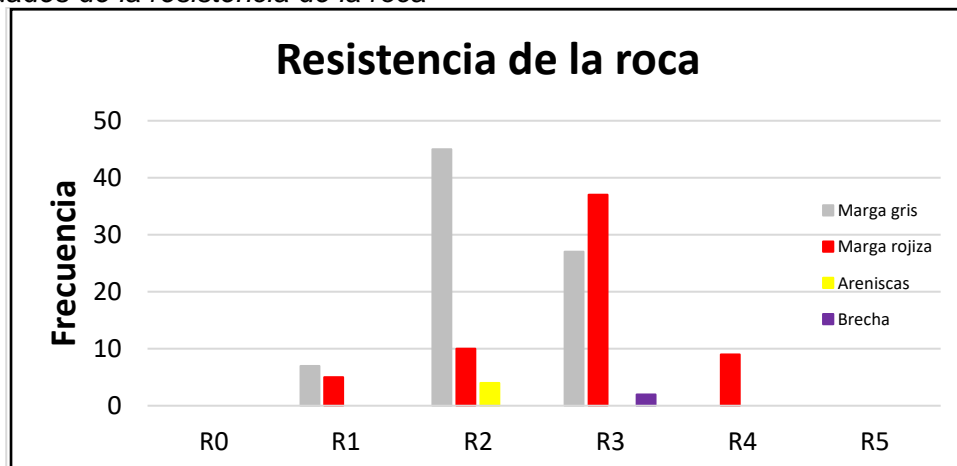
La determinación de las propiedades físicas de las rocas y minerales se realizaron con ensayos de laboratorio.

Tabla 60*Propiedades físicas de la roca intacta*

SONDAJE	CÓDIGO DE MUESTRA	DESDE (m)	HASTA (m)	POROSIDAD (%)	DENSIDAD (g/cm ³)	LITOLOGÍA
SR-01	SR-01 CD-01	2.98	3.20	24.57	2.42	Marga rojiza
SR-01	SR-01 TI-01	12.22	12.54	25.60	2.54	Marga rojiza
SR-01	SR-01 TX-A	38.48	38.67	23.83	2.35	Marga gris
SR-01	SR-01 TX-B	38.70	39.03	25.97	2.59	Marga gris
SR-11	SR-11 29.2 - 29.48	29.20	29.48	9.31	2.32	Marga gris
SR-11	SR-11 36.55 - 36.85	36.55	36.85	3.97	2.76	Marga gris
SR-11	SR-11 56.9 - 57.07	56.90	57.07	4.43	2.56	Marga rojiza

Fuente: Elaboración propia

La resistencia a la compresión simple fue hallada por los ensayos de carga puntual se realizaron sobre las margas rojas (4) y marga gris (12), las muestras se tomaron de 02 sondeos diamantinos, se estimó el índice de resistencia promedio para las margas rojizas 3.78 y para las margas gris 1.57. Los ensayos fueron efectuados siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D5731-08. La resistencia a la compresión uniaxial fue estimada con ensayos directos (12) y la estimación de este en los registros de sondajes involucrados en el proyecto. La marga rojiza generalmente presenta una resistencia estimada entre 25 MPa a 50 MPa (R3) y la marga gris presenta un valor entre 10 a 25 MPa (R2).

Figura 33*Propiedades de la resistencia de la roca*

Fuente: Elaboración propia

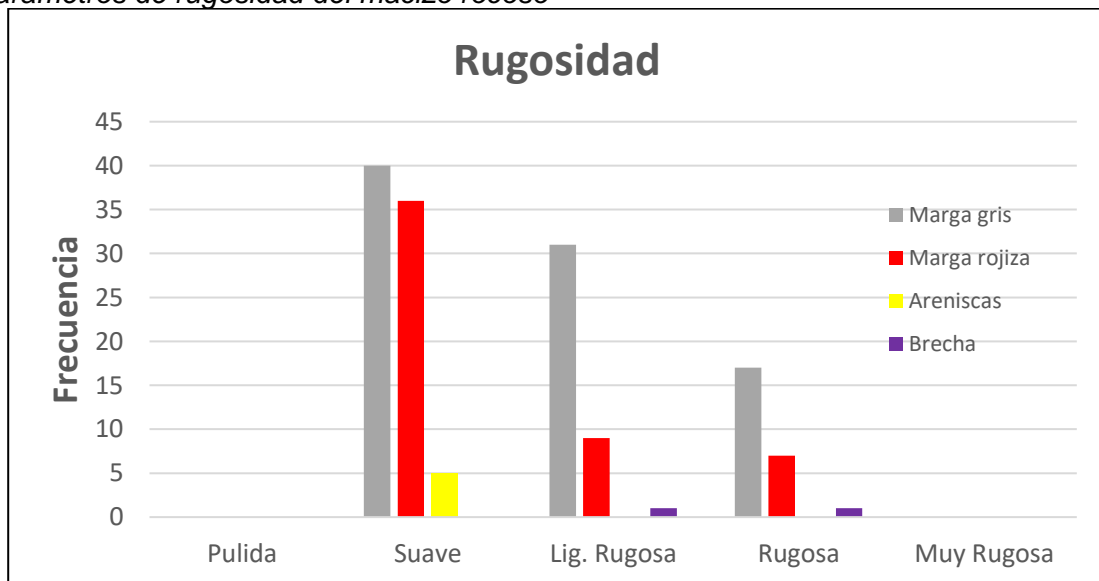
En la zona de contacto entre el suelo y la roca es de notar que en algunos sectores las margas presentan una meteorización alta que la descompone a arcilla, por contrario a profundidad podemos decir que las rocas conservan sus propiedades y están menos fracturadas; sin embargo, es de notar que zonas de alteraciones argílicas de las margas, principalmente, están concentradas en la proximidad de las veta, en superficie se evidencia una extensión irregular de entre 3 a 5 m adyacentes al contacto con la veta.

Parámetros de resistencia.

Las margas se presentan en la superficie con persistencia de los sistemas de juntas de 1 a 3 m; la meteorización es ligera a nula, la alteración por los procesos de mineralización es moderada básicamente en la marga gris. Los parámetros de rugosidad, apertura y relleno para la marga rojiza y marga gris son muy similares, predominantemente en ambas litologías se presenta una rugosidad suave a ligeramente rugosa (ver Figura 34) lo que corresponde a un JRC de 4 a 6; la apertura es < 1 mm en ambas (ver Figura 35), y el relleno es blando corresponde a arcillas y limonitas con contenido de calcita (ver Figura 36).

Figura 34

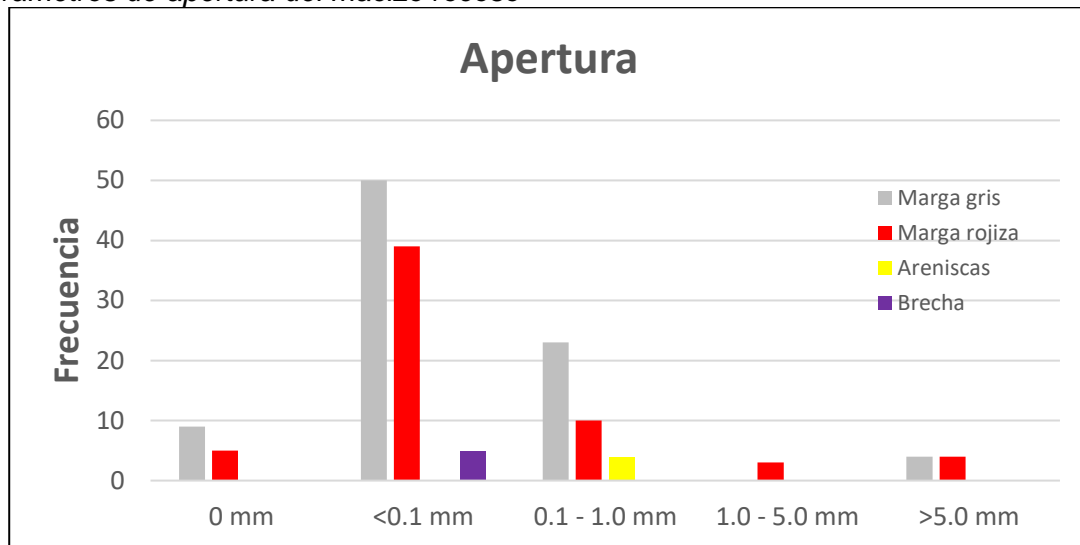
Parámetros de rugosidad del macizo rocoso



Fuente: Elaboración propia.

Figura 35

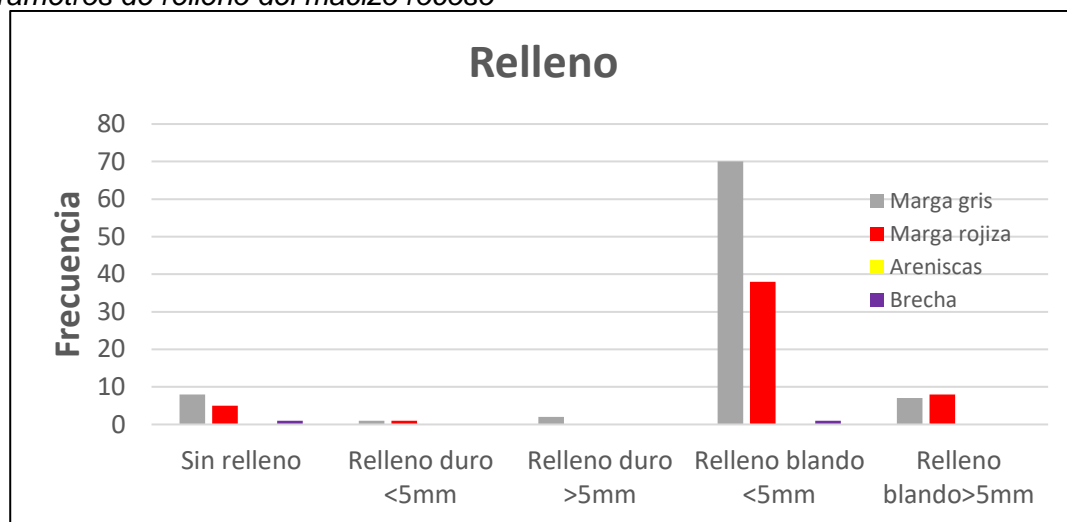
Parámetros de apertura del macizo rocoso



Fuente: Elaboración propia

Figura 36

Parámetros de relleno del macizo rocoso



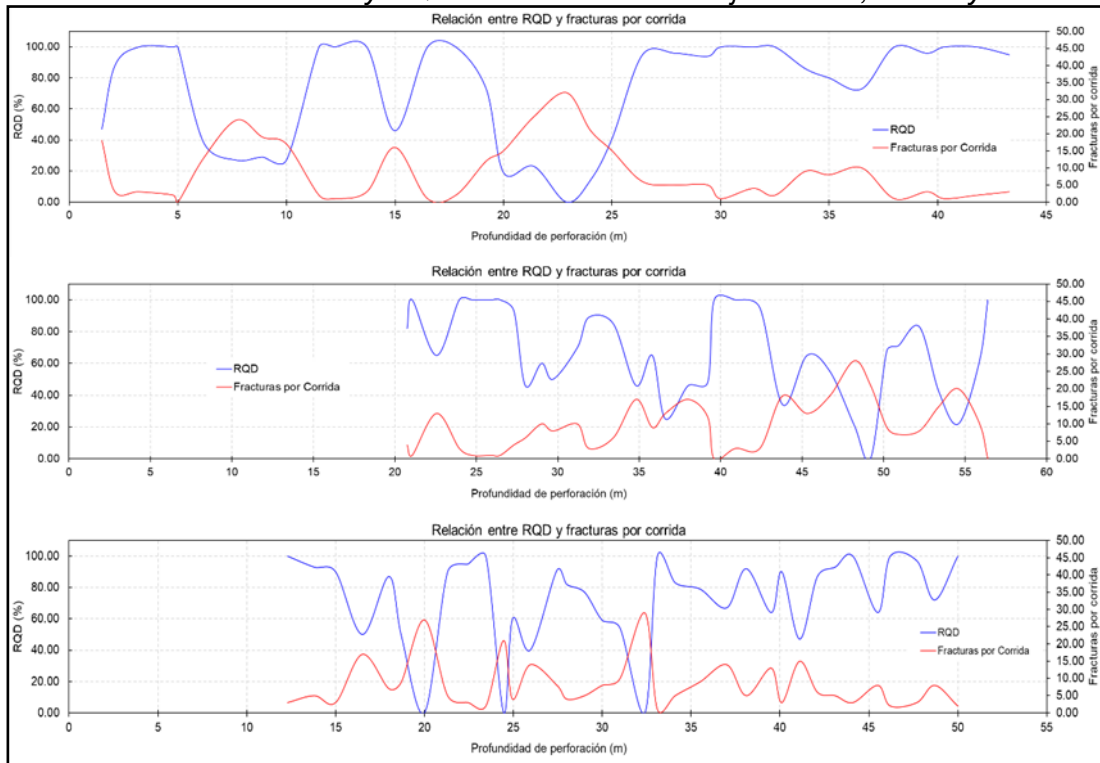
Fuente: Elaboración propia

RQD y grado de fracturamiento.

En la zona del proyecto, las figuras muestran que la marga presenta generalmente un RQD muy variable (10 a 100%), afectado principalmente por las estructuras del sector sur del proyecto por la presencia de vetas y fallas y también la cercanía de la laguna que incide en incremento del grado de fracturamiento y una mayor meteorización, el grado es de 5 a 25 fracturas por metro (ff/m). El sector norte (SR-04) se presenta masivo con RQD de 90-100% y un grado de fracturamiento de 5 (ff/m).

Figura 37

Frecuencia de fracturamiento y RQD medido en los sondajes SR-01, SR-03 y SR-13.



Fuente: Elaboración propia.

En el sector norte, el grado de fracturamiento es menor por estar alejado de la zona de estructuras, el RQD va de 60 a 100 %, la frecuencia de fracturas va de 2 a 10 ff/m.

Figura 38

Frecuencia de fracturamiento y RQD medido en el sondaje SR-04.



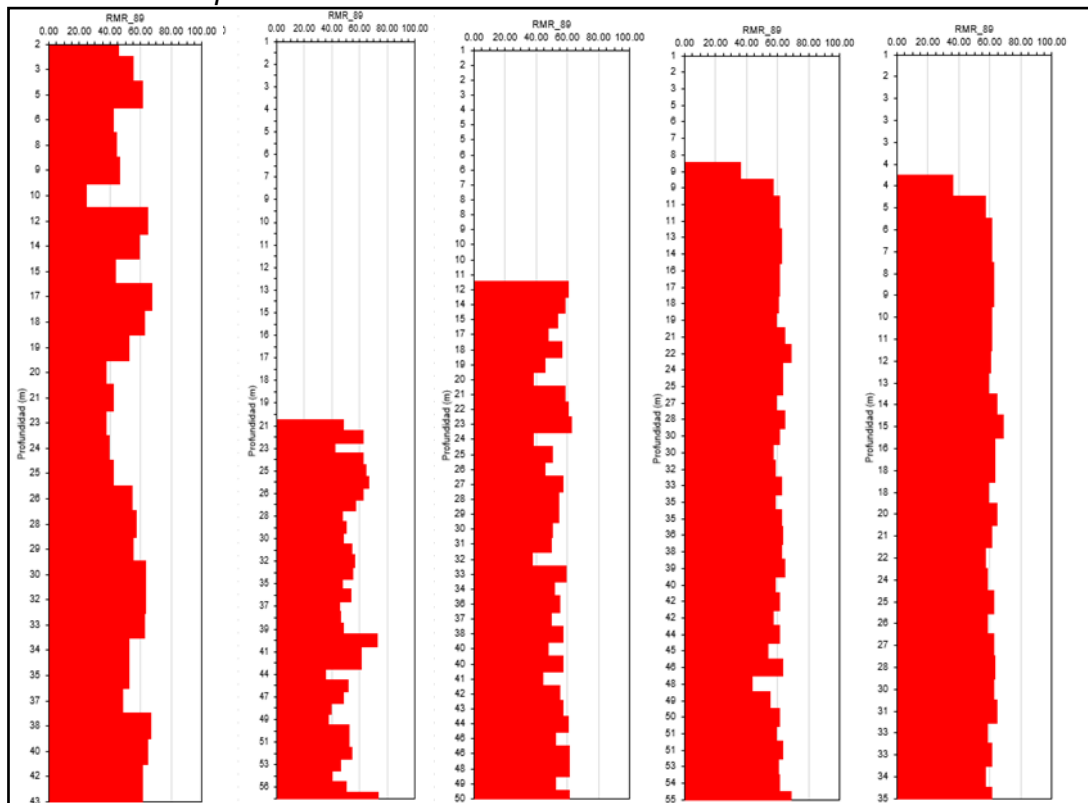
Fuente: Elaboración propia.

Clasificación geomecánica RMR (Bienawski) y GSI.

La clasificación geomecánica realizada muestra que el valor de RMR tiene similar valor al RQD, la Figura 47 muestra los valores de RMR que son muy variables, en la parte sur estos varían desde 40 a 60 (SR-1, SR-03 y SR-13) y en la zona más al norte (SR-04 y SR-05) el RMR es generalmente superior entre 50 a 70.

Figura 39

Análisis del RMR representativo en el área de estudio



Fuente: Elaboración propia

En cuanto al GSI está entre 40 a 50, cerca de las estructuras entre 30 a 40 y en la parte norte el GSI va de 50 a 60 que corresponde a una roca regular a buena, En las zonas de fallas se tiene un valor de 25 a 35.

Parámetros hidrogeológicos.

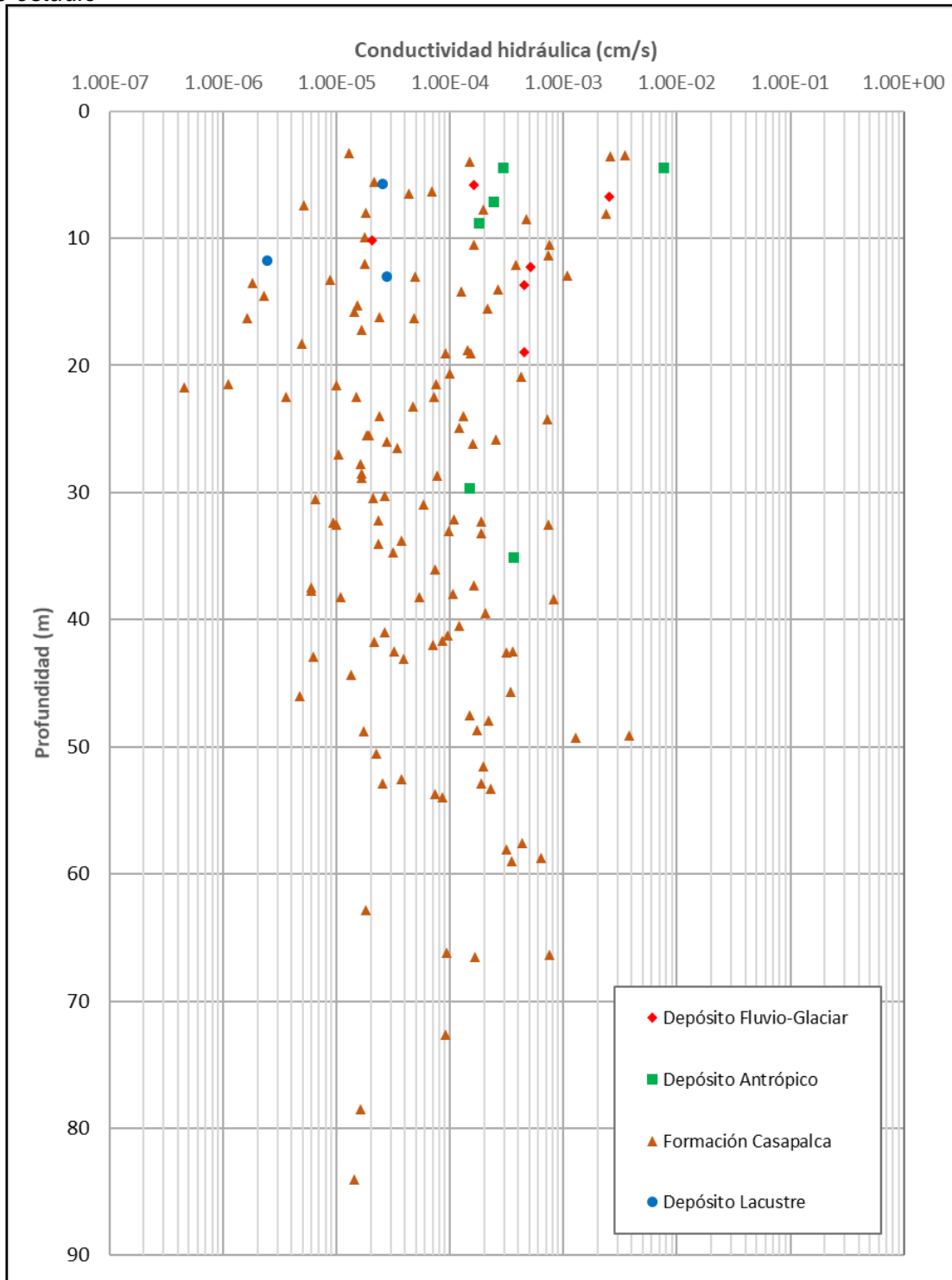
En los 15 sondajes ejecutados, se ha realizado ensayos de conductividad hidráulica con los siguientes resultados para cada tipo de depósito y Formación Geológica identificada:

- Para la Formación Casapalca, compuesta de margas, se registró una conductividad hidráulica variable entre 4.57E-07 a 3.79E-03 cm/s.
- En cuanto a los depósitos interceptados, para el depósito fluvio-glacial presenta valores de conductividad hidráulica entre 2.05E-05 a 2.55E-03, el depósito antrópico presenta valores entre 1.48E-04 a 7.62E-03; por último, el depósito lacustre presenta valores de 2.46E-06 a 2.79E-05.

A continuación, se presenta los valores de conductividad hidráulica obtenido según los ensayos de permeabilidad ejecutados con el avance de perforaciones geotécnicas ejecutadas, ver Figura 40.

Figura 40

Valores de conductividad hidráulica en base al depósito y/o formación geológica del área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

4.3 Evaluación geofísica del depósito de relaves

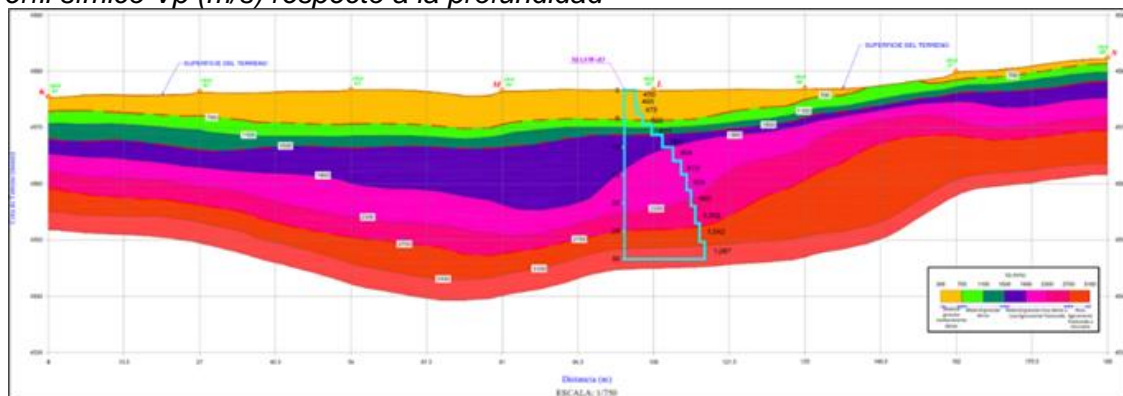
4.3.1 Evaluación geofísica

En base a los registros obtenidos de velocidades de ondas sísmicas de cada línea sísmica, se realizó la interpretación de los perfiles sísmicos del área de estudio. Cada perfil sísmico identificó diferentes velocidades de propagación de ondas (p) lo cual corresponderían estratigráficamente a material denso o roca, detallando el espesor presente.

Se identificó 7 materiales en el área de estudio, en base a la velocidad de propagación de ondas p, en un rango de 300 m/s a 3100 m/s; el material más próximo a la superficie denota características de material granular medianamente denso (color amarillo), seguido de material granular denso (color verde), todo ello hasta la profundidad de 9.0 m; lo cual se correlaciona con los sondeos geotécnicos que evidenciar material de grava denso. A partir de los 14.0 m (V_p :1900 m/s) se caracteriza a un material de roca ligeramente fracturada y a mayor profundidad se evidencia una mayor velocidad de propagación asociada al basamento rocoso de la formación Casapalca. (Ver Figura 41).

Figura 41

Perfil sísmico V_p (m/s) respecto a la profundidad



Fuente: Elaboración propia.

Respecto a los ensayos MAM/MASW realizados en la zona de análisis, se ha determinado una velocidad de propagación hasta la profundidad de 30 m (V_{s30}), con el objetivo de describir la respuesta sísmica del suelo y subsuelo en el perfil y su respectivo valor promedio de velocidad de ondas.

Tabla 61*Descripción de los ensayos de ondas MASW (V_p m/s)*

ENSAYO	INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA
MASW-01	Se identificó un primer estrato con valores de propagación (V_s) entre 509 m/s a 613 m/s con una profundidad de 2.50 m, asociado a un material granular denso. El segundo estrato presenta valores de velocidad de propagación (V_s) entre 761 m/s a 1458 m/s, con una profundidad de 30.0 m y espesor de 27.50 m, asociado a un material granular muy denso o roca ligeramente fracturada.
MASW-02	Se identificó un primer estrato con valores de propagación (V_s) entre 382 m/s a 665 m/s, con una profundidad de 22.40 m, asociado a un material granular denso. El segundo estrato presenta valores de velocidad de propagación (V_s) entre 747 m/s a 939 m/s, con una profundidad de 30.0 m y espesor de 7.60 m, asociado a un material granular muy denso o roca ligeramente fracturada.
MASW-03	Se identificó un primer estrato con valores de propagación (V_s) entre 459 m/s a 611 m/s, con una profundidad de 7.90 m., asociado un material granular denso. El segundo estrato presenta valores de velocidad de propagación (V_s) entre 708 m/s a 1087 m/s, con una profundidad de 30.0 m y espesor de 22.10 m, asociado a un material granular muy denso o roca ligeramente fracturada.
MASW-04	Se identificó un primer estrato con valores de propagación (V_s) entre 511 m/s a 636 m/s, con una profundidad de 3.80 m, asociado un material granular denso. El segundo estrato presenta valores de velocidad de propagación (V_s) entre 701 m/s a 1498 m/s, con una profundidad de 27.70 m y espesor de 23.90 m, asociado a un material granular muy denso o roca ligeramente fracturada. El tercer estrato presenta una velocidad de propagación (V_s) de 1595 m/s, con una profundidad de 30.0 m y espesor de 2.30 m, asociado a una roca ligeramente fracturada a roca sana.
MASW-05	Se identificó un primer estrato con valores de propagación (V_s) entre 401 m/s a 639 m/s, con una profundidad de 2.60 m, asociado un material granular denso. El segundo estrato presenta valores de velocidad de propagación de ondas S (V_s) entre 985 m/s a 1427 m/s, con una profundidad de 26.90 m y espesor de 24.30 m, asociado a un material granular muy denso o roca ligeramente fracturada. El tercer estrato presenta una velocidad (V_s) de 1516 m/s, con una profundidad de 30.0 m y espesor de 3.10 m, asociado a roca ligeramente fracturada a roca sana.
MASW-06	Se identificó un primer estrato con valores de propagación (V_s) de 475 m/s, con una profundidad de 1.10 m, asociado un material granular denso. El segundo estrato presenta valores de velocidad de propagación (V_s) entre 718 m/s a 1505 m/s, con una profundidad de 30.0 m y espesor de 28.90 m, asociado a material granular muy denso o roca ligeramente fracturada.
MASW-07	Se identificó un primer estrato con valores de propagación (V_s) entre 331 m/s a 645 m/s, con una profundidad de 7.70 m, asociado un material granular denso. El segundo estrato presenta valores de velocidad de propagación (V_s) entre 727 m/s a 1370 m/s, con una profundidad de 30.0 m y espesor de 22.30 m, asociado a material granular muy denso o roca ligeramente fracturada.
MASW-08	Se identificó un primer estrato con valores de propagación (V_s) entre 286 m/s a 675 m/s, con una profundidad de 14.10 m, asociado un material granular denso. El segundo estrato presenta valores de velocidad de propagación (V_s) entre 760 m/s a 1236 m/s, con una profundidad de 30.0 m y espesor de 15.90 m, asociado a material granular muy denso o roca ligeramente fracturada.
MASW-09	Se identificó un primer estrato con valores de propagación (V_s) entre 356 m/s a 692 m/s, con una profundidad de 7.90 m, asociado un material granular denso. El segundo estrato presenta valores de velocidad de propagación (V_s) entre 746 m/s a 1065 m/s, con una profundidad de 30.0 m y espesor de 22.10 m, asociado a material granular muy denso o roca ligeramente fracturada.
MASW-10	Se identificó un primer estrato con valores de propagación (V_s) entre 232 m/s a 280 m/s, con una profundidad de 6.90 m, asociado un material granular medianamente denso. El segundo estrato presenta valores de propagación (V_s) entre 317 m/s a 619 m/s, con una profundidad de 17.10 m y espesor de 10.20 m, asociado a material granular denso. El tercer estrato presenta valores de velocidad de propagación (V_s) entre 700 m/s a 932 m/s, con una profundidad de 30.0 m y espesor de 12.90 m, asociado a material granular muy denso o roca ligeramente fracturada.
MASW-11	Se identificó un primer estrato con valores de propagación (V_s) entre 444 m/s a 583 m/s, con una profundidad de 3.10 m, asociado un material granular denso. El segundo estrato presenta valores de propagación (V_s) entre 793 m/s a 1438 m/s, con una profundidad de 30.0 m y espesor de 26.90 m, asociado a material granular muy denso o roca ligeramente fracturada.

Fuente: Elaboración propia.

En base a los resultados obtenidos del área de estudio para los ensayos MASW, se resumen la tabla 65, cuya velocidad de propagación (V_s) del material varía entre 456 m/s y 1240 m/s.

Tabla 62

Velocidad promedio de ondas de corte a 30 m de profundidad

SONDAJE	VS30	TIPO DE SUELO	MATERIAL (IBC,2018)
MASW-01	1082	B	Roca
MASW-02	520	C	Suelo muy denso o roca blanda
MASW-03	760	B	Roca
MASW-04	998	B	Roca
MASW-05	1121	B	Roca
MASW-06	1240	B	Roca
MASW-07	797	B	Roca
MASW-08	589	C	Suelo muy denso o roca blanda
MASW-09	750	C	Suelo muy denso o roca blanda
MASW-10	456	C	Suelo muy denso o roca blanda
MASW-11	1022	B	Roca

Fuente: International Building Code, (2018). Clasificación de tipo de suelo.

En cuanto al ensayo de tomografía eléctrica, se empleó el dispositivo dipolo- dipolo, el cual nos brindó resultados para estudios de superficie, mapeando el subsuelo con detalle vertical y lateral. Teniendo la ventaja al ser un método simétrico de minimiza el desfase de las anomalías y cuerpos.

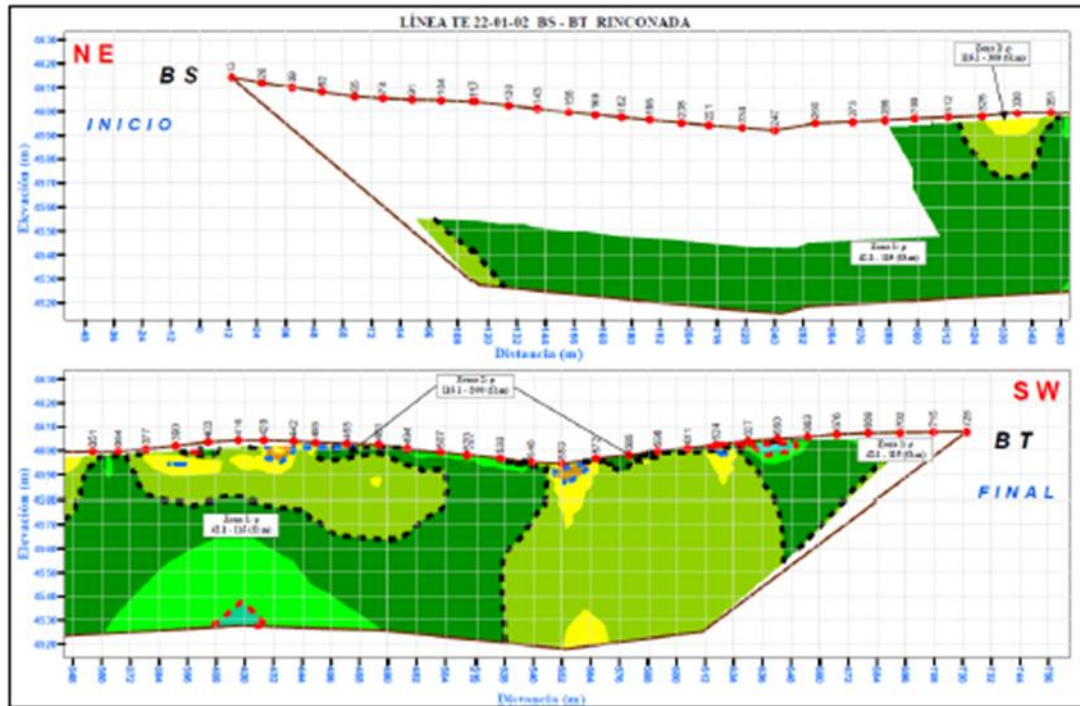
Línea TE22-01 y 02.

El perfil geoelectrónico está conformado por una línea de 715 m, la cual se evidencia dos zonas marcadas: Zona 1, corresponde a una zona de baja resistividad, tiene un rango de valores que van desde 42.1 a 115 ohm.m (color verde claro a verde oscuro); está presente entre las estaciones 91 a 702, de distancia horizontal dx, con un espesor variable de 39 a 76 m, estaría conformado por un material de baja densidad. Zona 2, corresponde a una zona de baja a media resistividad, tiene un rango de valores que van desde 115.1 a 300 ohm.m (color verde a amarillo), está presente entre las estaciones 312 a 650 de

distancia horizontal, con un espesor variable de 23 a 75 m, estaría conformado por un material granular muy denso, ver Figura 42.

Figura 42

Sección de resistividad de la línea TE22-01 y 02



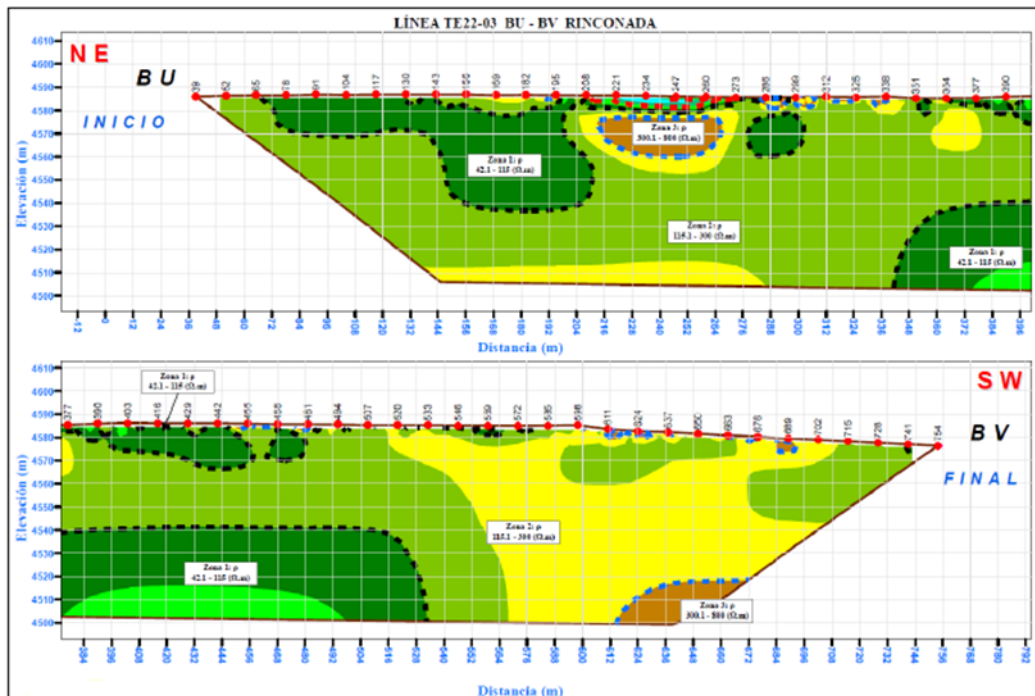
Fuente: Elaboración propia.

LÍNEA TE22 – 03.

El perfil geoelectrico está conformado por una línea de 715 m, la cual muestra 3 zonas marcadas: Zona 1, corresponde a una zona de baja resistividad, tiene un rango de valores que van desde 42.1 a 115 ohm.m (color verde claro a verde oscuro), con un espesor variable de 17 a 40 m; está conformado por un material de baja densidad. Zona 2, corresponde a una zona de baja a media resistividad, tiene un rango de valores que van desde 115.1 a 300 ohm.m (color verde a amarillo), con un espesor variable de 25 a 82 m, está conformado por un material granular muy denso. Zona 3, corresponde a una zona de media a alta resistividad, tiene un rango de valores que van desde 300.1 a 800 ohm.m (color café claro a naranja), con un espesor variable de 11 a 18 m, asociado un material medianamente denso a denso, ver Figura 43.

Figura 43

Sección de resistividad de la línea TE22-03



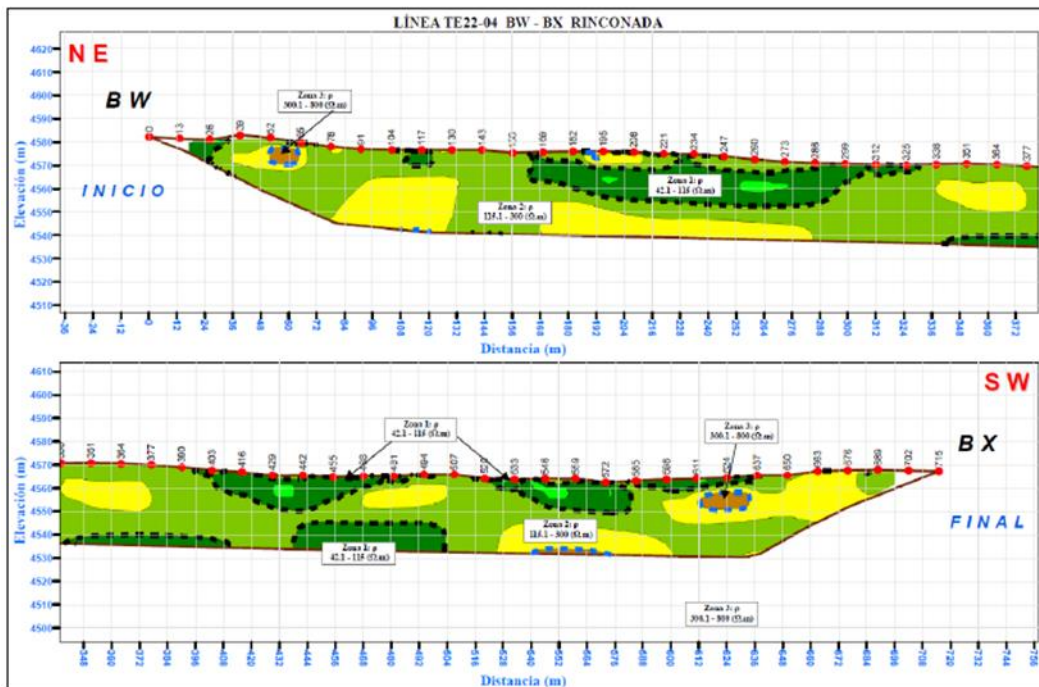
Fuente: Elaboración propia.

LÍNEA TE22 – 04.

El perfil geoelectrico está conformado por una línea de 715 m, la cual muestra 3 zonas marcadas: La zona 1, corresponde a una zona de baja resistividad, tiene un rango de valores que van desde 42.1 a 115 ohm.m (color verde claro a verde oscuro); con un espesor variable de 9 a 19 m, está conformado por un material de baja densidad. La zona 2, corresponde a una zona de baja a media resistividad, tiene un rango de valores que van desde 115.1 a 300 ohm.m (color verde a amarillo), con un espesor variable de 14 a 35 m, está conformado por un material granular muy denso. La zona 3, corresponde a una zona de media a alta resistividad, tiene un rango de valores que van desde 300.1 a 800 ohm.m (color café claro a naranja); con un espesor variable de 5 a 7 m, está conformado por un material medianamente denso a denso, ver Figura 44.

Figura 44

Sección de resistividad de la línea TE22-04



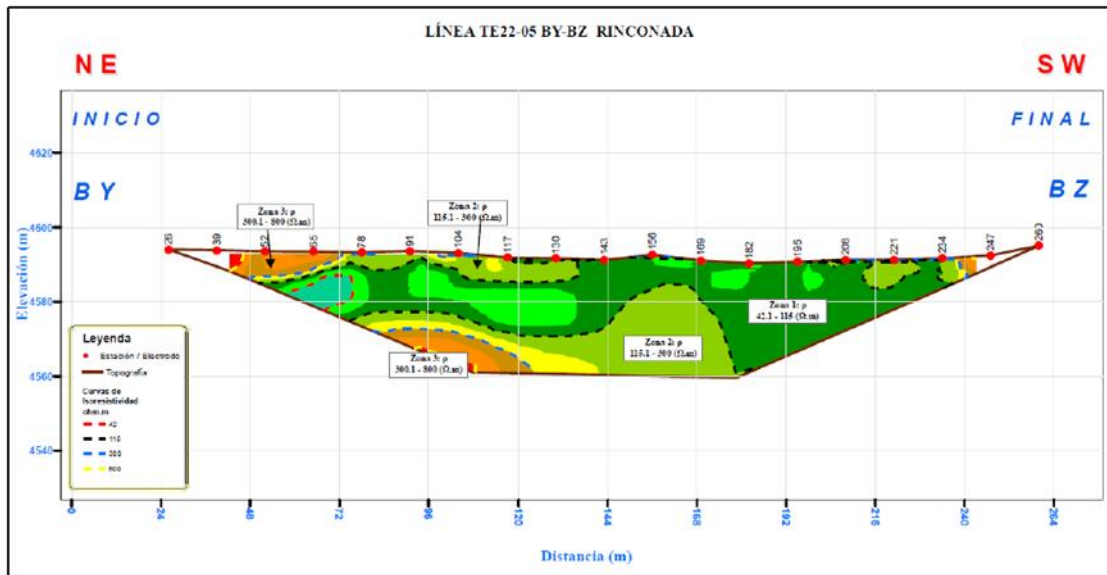
Fuente: Elaboración propia.

LÍNEA TE22 – 05.

El perfil geoelectrico está conformado por una línea de 234 m, la cual muestra 3 zonas marcadas: La zona 1, corresponde a una zona de baja resistividad, tiene un rango de valores que van desde 42.1 a 115 ohm.m (color verde claro a verde oscuro); con un espesor variable de 8 a 28 m, está conformado por un material de baja densidad. La zona 2, corresponde a una zona de baja a media resistividad, tiene un rango de valores que van desde 115.1 a 300 ohm.m (color verde a amarillo), con un espesor variable de 3 a 7 m; está conformado por un material granular muy denso. La zona 3, corresponde a una zona de media a alta resistividad, tiene un rango de valores que van desde 300.1 a 800 ohm.m (color café claro a naranja), con un espesor variable de 4 a 7 m; con un espesor variable de 5 a 10 m, está conformado por un material medianamente denso a denso, ver Figura 45.

Figura 45

Sección de resistividad de la línea TE22-05



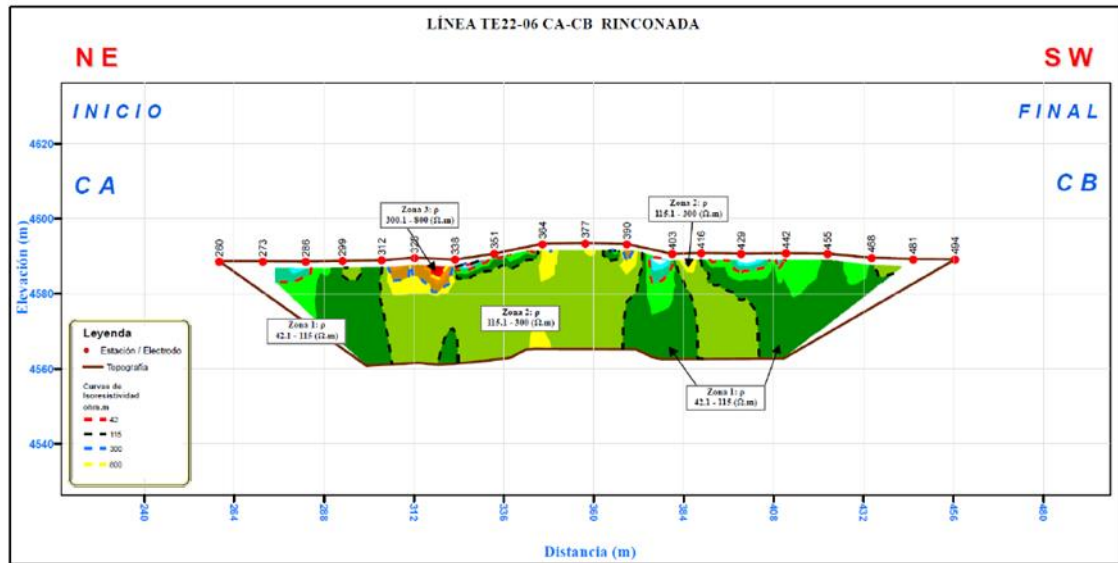
Fuente: Elaboración propia.

LÍNEA TE22 – 06.

El perfil geoelectrónico está conformado por una línea de 234 m, la cual muestra 3 zonas marcadas: La zona 1, corresponde a una zona de baja resistividad, tiene un rango de valores que van desde 42.1 a 115 ohm.m (color verde claro a verde oscuro); con un espesor variable de 10 a 28 m, está conformado por un material de baja densidad. La zona 2, corresponde a una zona de baja a media resistividad, tiene un rango de valores que van desde 115.1 a 300 ohm.m (color verde a amarillo), con un espesor variable de 18 a 28 m, está conformado por un material granular muy denso. La zona 3, corresponde a una zona de media a alta resistividad, tiene un rango de valores que van desde 300.1 a 800 ohm.m (color café claro a naranja), con un espesor variable de 6 a 10 m, está conformado por un material medianamente denso a denso, ver Figura 46

Figura 46

Sección de resistividad de la línea TE22-06



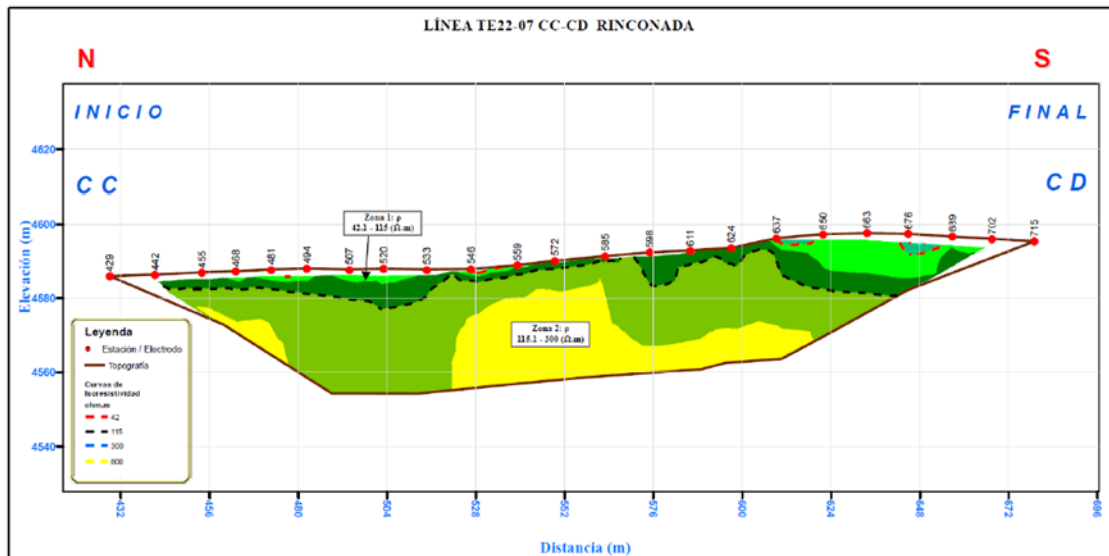
Fuente: Elaboración propia.

LÍNEA TE22 – 07.

El perfil geoelectrico está conformado por una línea de 286 m, la cual muestra 2 zonas marcadas: La zona 1, corresponde a una zona de baja resistividad, tiene un rango de valores que van desde 42.1 a 115 ohm.m (color verde claro a verde oscuro); con un espesor variable de 22 a 30 m, estaría conformado por un material de baja densidad. La zona 2, corresponde a una zona de baja a media resistividad, tiene un rango de valores que van desde 115.1 a 300 ohm.m (color verde a amarillo), con un espesor variable de 18 a 28 m, estaría conformado por un material granular muy denso, ver Figura 47.

Figura 47

Sección de resistividad de la línea TE22-07



Fuente: Elaboración propia.

En resumen, se presenta el cuadro con las capas de resistividad del área de estudio para la evaluación geofísica en base a los ensayos de tomografía eléctrica.

Tabla 63

Resumen de las capas de resistividad del área de estudio

ENSAYO TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA	CAPAS	VALORES DE RESISTIVIDAD (OHM.M)	DESCRIPCIÓN
TE22-01 y TE22-02 TE22-03 TE22-04 TE22-05 TE22-06 TE22-07	Zona 1	42.10 a 115	Conformado por un material de baja densidad, que podría corresponder a un material granular denso, de media permeabilidad
	Zona 2	115.10 a 300	Conformado por un material medianamente denso, que podría corresponder a material granular de elevada densidad o roca levemente fracturada, de media a baja permeabilidad
	Zona 3	300.10 a 800	Conformado por un material medianamente denso a denso, que podría corresponder a roca ligeramente fracturada a roca sana, de baja permeabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El área de estudio de la presente investigación para el depósito de relaves, tiene como basamento rocoso a la Formación Casapalca (Cretácico Superior), litológicamente compuesta de margas, areniscas y brechas, cada material fue interceptado y evaluado por los sondajes geotécnicos. Sobreyacen a este basamento, depósito lacustre, fluvio-glaciar, residual y antrópico del cuaternario. En general, la evaluación geotécnica y geofísica para sus componentes evidencia que la construcción de la relavera es factible.

En cuanto a la inspección de antiguas labores mineras se identificó bocamina y chimeneas; se estimó parámetros geomecánicas en proximidad a afloramientos rocosos, en base a ello los parámetros de RQD entre 40% a 55% (roca regular) de marga de la Formación Casapalca, RMR'89 de 51 a 58 (calidad regular), por otro lado, también se evidencia la presencia de fenómenos geodinámicos que podrían representar un peligro de a tomar en cuenta, como son los deslizamientos en masa, también las zonas de erosión en la terrazas lacustrinas próximas a la laguna Naticocha, y otros deslizamientos de menor riesgo asociado a la reptación del suelo por efectos de fallas próximas al área del proyecto.

En cuanto a la evaluación geotécnica para el presente estudio, se sustenta la estabilidad del suelo y subsuelo en los sectores donde se proyectan las obras de cimentación para el depósito de relaves, en base las propiedades geomecánicas definidas por el RMR, como regulares a buena, valoración de RQD en promedio mayor a 60% y un GSI valorado como regular.

En cuanto a las propiedades geotécnicas del suelo El depósito lacustre se clasifica según SUCS como CL, SC, CL-ML y GW-GM presenta consistencia muy firme a dura y compacidad muy densa, el ángulo de fricción estimada varía de 34° a 37° y de 51° a 55°. Para el depósito fluvio-glaciar, clasificado como CL, SC y GC; la consistencia varía de blanda a dura y la compacidad varía de muy suelta, densa y muy densa, mientras el ángulo de fricción varía de 26° a 40° y de 36° a 46°. El depósito residual, clasificado como CL, presenta consistencia media, y ángulo de fricción 30°. El depósito antrópico se clasifica

como CL, ML, GC y SP-SM, presenta consistencia media a muy firme y compacidad medianamente densa a muy densa, el ángulo de fricción varía de 30° a 43°.

En cuanto a las perforaciones geotécnicas se deduce una irregularidad del contacto suelo-roca que da lugar a zonas de saturación fluctuantes y discontinuas; también se interceptaron posibles zonas de tajeos en 4 sondajes ejecutados (SR-08, SR-09, SR-11 y SR-12) con material de relleno, bolonería y madera encontrada. evidencia de posibles zonas vacíos o labores subterráneas escasamente rellenas entre las profundidades.

En cuanto a las unidades hidrogeológicas, el basamento rocoso exento de la influencia de cuerpos mineralizados es prácticamente impermeable, conductividad hidráulica "k" del orden de 5.45E-06 cm/s, teniendo una permeabilidad muy baja, escasa capacidad de almacenamiento y a la vez restringiendo la circulación y percolación de las aguas pluviales hacia niveles más profundos. Por en cambio la roca más próxima a las estructuras mineralizadas y sus halos de influencia, onde la roca esta más fracturada y afectada por la alteración hidrotermal, presenta valores de conductividad hidráulica en torno a 4.55E-02 cm/s (permeabilidad media).

Al pie del proyecto del depósito se ha encontrado suelos de origen lacustre asociados a la laguna Naticocha que han sido reconocidos mediante las perforaciones SR-02 y SR-15 en ellas se observan suelos arcillosos de mediana plasticidad alcanzan los 15 m de profundidad, hasta 8 m de espesor, es de forma lenticular en sus extremos, se encuentran debajo y por encima del suelo glacial. Su amplitud se extendería hacia la Laguna Naticocha Centro.

El área de investigación presenta condiciones secas para la cimentación en roca, el nivel freático se encuentra por debajo de los 100 m de profundidad, la permeabilidad del macizo rocoso de la Formación Casapalca generalmente es baja con valores de 4.57E-07 cm/s a 9.66E-05 cm/s. En el pie del depósito se tiene niveles freáticos aislados por efecto de la laguna Naticocha Centro asociados a los suelos de origen glacial y lacustrino que presenta un alto contenido de arcillas de baja permeabilidad por los horizontes de arcilla.

Los resultados del ensayo de resistividad de tomografía eléctrica para el área de estudio predominan materiales de baja a media resistividad en profundidad en la parte norte, por en cambio se evidencia anomalías puntuales de media a alta resistividad en el sur del proyecto. En los ensayos MAM/MASW se presentan con velocidad de propagación (V_{s30}) en un rango de 456 m/s a 1240 m/s, lo cual evidencia una mayor proporción de roca o suelo muy rígido.

Recomendaciones

La planificación técnica y diseño de ingeniería para la cimentación del nuevo depósito de relave, debe tener en cuenta toda la caracterización y evaluación geológica, geotécnica y geofísica del presente trabajo de investigación.

Se recomienda estimar volumen y años de proyección de vida del depósito de relaves tomando en cuenta los datos de campo y la producción de la mina.

Se recomienda implementar una campaña de selección de muestras de suelo recuperadas con el objetivo de verificar si son generadoras de ácido.

Se recomienda que, los piezómetros deben ser monitorizados con frecuencia de cada 15 días, y deben ser protegidos con candados de seguridad para evitar daños en la instrumentación. Además, el purgado de los piezómetros se debe realizar anualmente para tener alturas piezométricas relevantes. caso contrario los piezómetros pueden colmatarse de sedimentos finos y dar lecturas erróneas.

Referencias bibliográficas

- Aguirre, R. (2017). *Análisis de la estabilidad física del depósito de relaves N° 5 de la concesión de beneficio Belén de Minera Titán del Perú S.R.L.*
- Ali, M. L. (2016). *Métodos de prospección geofísica aplicados a la investigación geotécnica para estudio del recrecimiento de una presa de relaves en el distrito de Oyolo.*
- Apaza, Y. P. (2016). *Evaluación geológica y geotécnica para la ampliación de la presa Ancascocha en la cuenca Yauca, Ayacucho-Arequipa.* Puno.
- Bieniawski, Z. (1976). *Rock mass classification in rock engineering.* In Exploration for Rock Engineering.
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering rock mass rating.* A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering.
- Das, B. M. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (4.ª ed.). Cengage Learning Editores.
- Burt, G. L. (2007). *Handbook of geotechnical investigation and design tables.* Reino Unido: Taylor & Francis Group.
- Castilla, J., y Herrera, J. (2012). *El Proceso de Exploración Minera Mediante Sondeos.* Laboratorio de Tecnologías Mineras. Universidad Politécnica de Madrid.
- González de Vallejo, Ll., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002), *Ingeniería Geológica.* Pearson Education.
- Houlsby, C. (1976). *Routine interpretation of the Lugeon water-test.* Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology.
- Hunt, R. E. (2007). *Geotechnical investigation methods: A field for geotechnical engineers.* CRC Press.
- International Society for Rock Mechanics. (1981). *Rock characterization, testing and monitoring: ISRM suggested methods* (E. T. Brown, Ed.). Pergamon Press.
- Jiménez, A., De Justo, L., & Serrano, A. (1981). *Geotecnia y cimientos II: Mecánica del suelo y de las rocas* (2.ª ed.). Editorial Rueda.

- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, R. (2005). *Mecánica de suelos*. Tomo 1: Fundamentos de la mecánica de suelos. Limusa.
- Moya, G. et al (2020). *Caracterización de sitio empleando prospección geofísica y geotécnica: Caso de estudio vía principal Troncal Central del Norte (Ruta Nacional 55) a la altura del km 68+500 en el Municipio de Pamplona, Norte de Santander, Colombia*. Revista Boletín de Ciencias de la Tierra.
- Olalla, C., & Sopeña, L. (1991). *Ensayos de campo* (Máster de Ingeniería Geológica, Monografía No. 5). Universidad Complutense de Madrid.
- Oñate, C. C. (2020). *Caracterización geológica y geotécnica para el depósito de relaves en el área Hijuela 10, provincia de Huasco, región de Atacama, Chile* (Tesis de pregrado, Universidad de Concepción).
- Ortiz, S. et. al. (2011). *Diseño de disposición conjunta de relaves y desmonte en la mina Yauricocha*. Revista del Instituto de Investigación.
- OSINERGMIN (2017). *Guía de criterio geomecánicos para diseño, supervisión y cierre de las labores subterráneas*. OSINERGMIN.
- Pesántez, A. J. (2014). *Caracterización geológica y geotécnica en el área minea El Corazón, para el diseño de una relavera* (Tesis de pregrado, Escuela Politécnica de Chimborazo).
- Rivas, S. L. (2013). *Evaluación de relavera antigua con propósito de usarlos como botadero de desmonte de mina para un plan de cierre* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería).
- Suarez, L. (2015). *Descripción del macizo rocoso: Introducción a la ingeniería de rocas de superficie y subterránea* (2.ª ed.). Editorial Académicas.

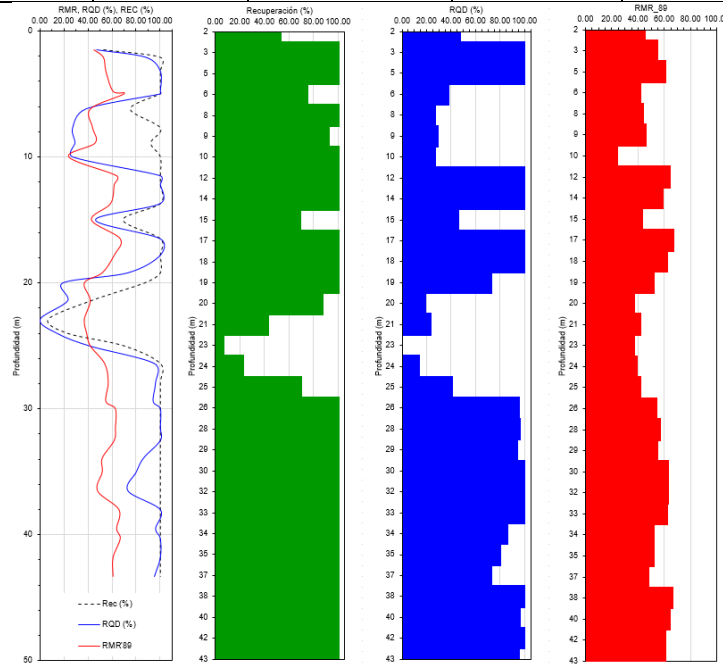
Anexos

	Pág.
Anexo 1: Gráficos de parámetros de recuperación, RQD y RMR para cada sondaje.....	1
Anexo 2: Registro fotográfico de los sondajes	9

Anexo 1: Gráficos de parámetros de recuperación, RQD y RMR para cada sondaje

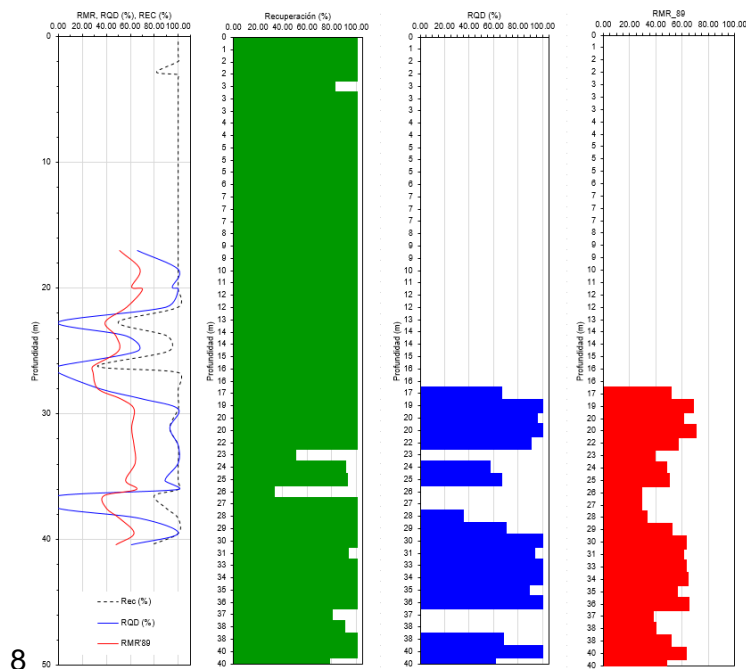
Sondaje SR-01

Sondeo	Coordenadas UTM WGS84 zona 18S			Profundidad (m)	Azimut (°)	Inclinación (°)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)			
SR-01	344420.18	8780354.03	4600.93	43.30	---	-90°



Sondaje SR-02

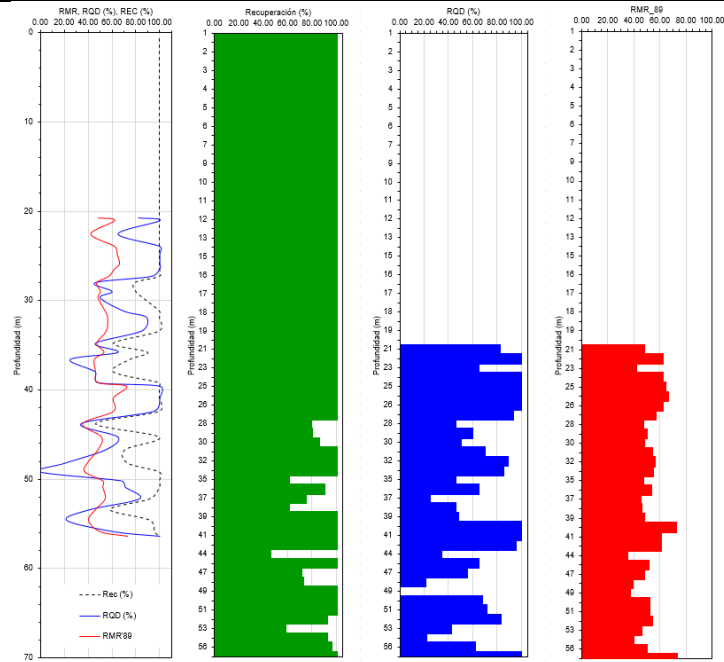
Sondeo	Coordenadas UTM WGS84 zona 18S			Profundidad (m)	Azimut (°)	Inclinación (°)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)			
SR-02	344406.47	8780499.22	4575.73	40.40	---	-90°



8

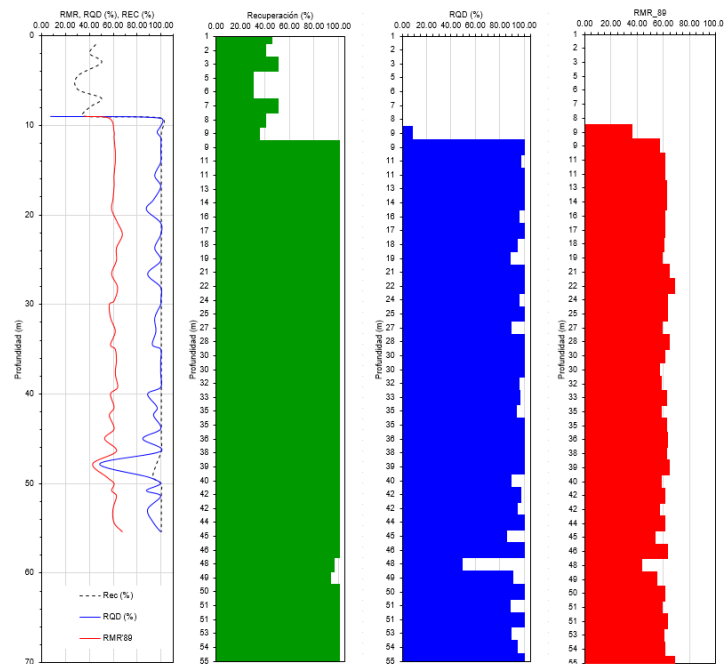
Sondaje SR-03

Sondeo	Coordenadas UTM WGS84 zona 18S			Profundidad (m)	Azimut (°)	Inclinación (°)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)			
SR-03	344472.74	8780487.16	4589.79	56.40	---	-90°



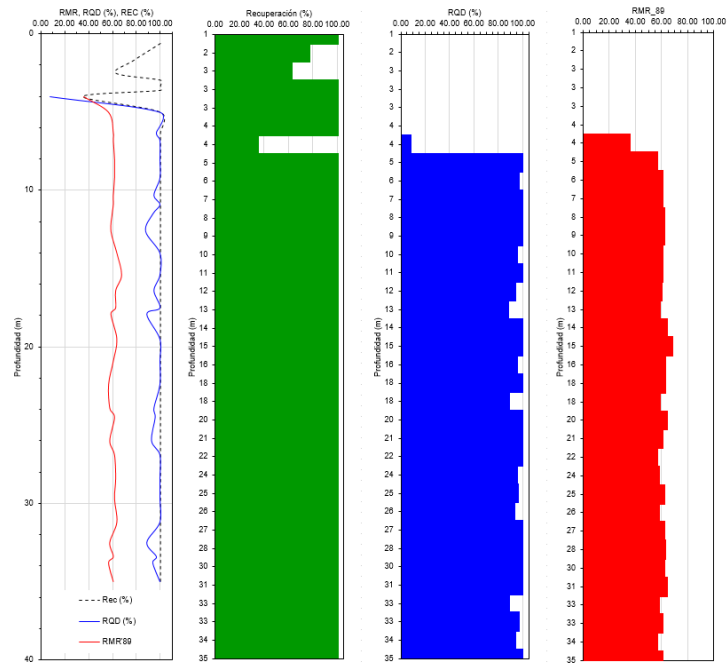
Sondaje SR-04

Sondeo	Coordenadas UTM WGS84 zona 18S			Profundidad (m)	Azimut (°)	Inclinación (°)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)			
SR-04	344585.35	8780551.33	4594.47	55.40	---	-90°



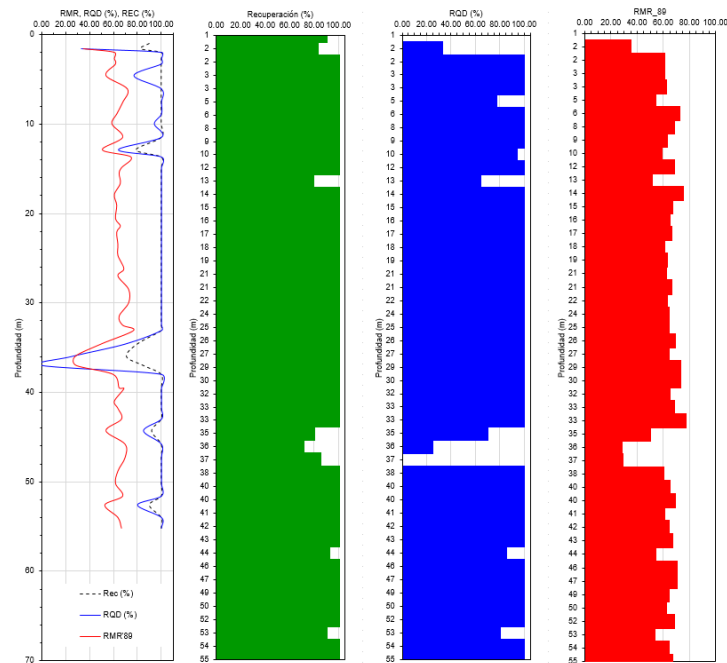
Sondaje SR-05

Sondeo	Coordenadas UTM WGS84 zona 18S			Profundidad (m)	Azimut (°)	Inclinación (°)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)			
SR-05	344600.72	8780488.61	4604.64	35.00	---	-90°



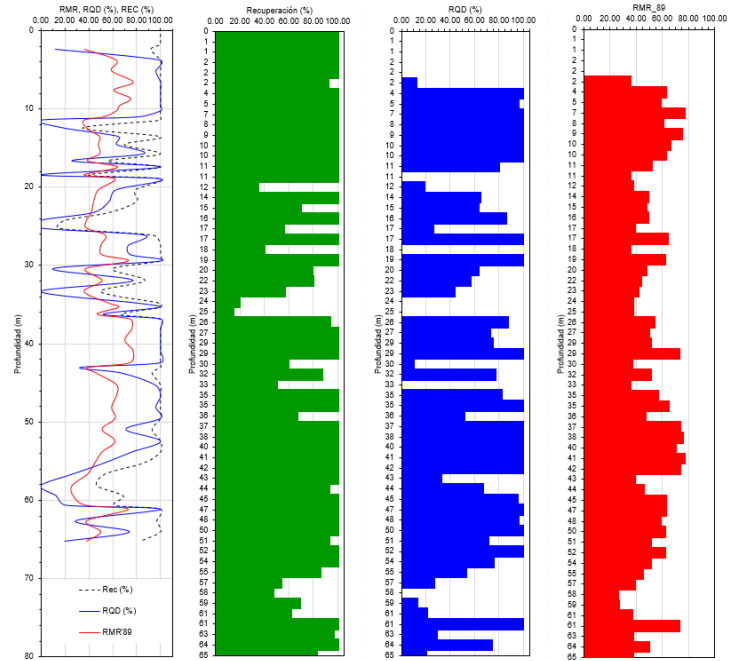
Sondaje SR-06

Sondeo	Coordenadas UTM WGS84 zona 18S			Profundidad (m)	Azimut (°)	Inclinación (°)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)			
SR-06	344568.13	8780402.64	4597.92	55.2	---	-90°



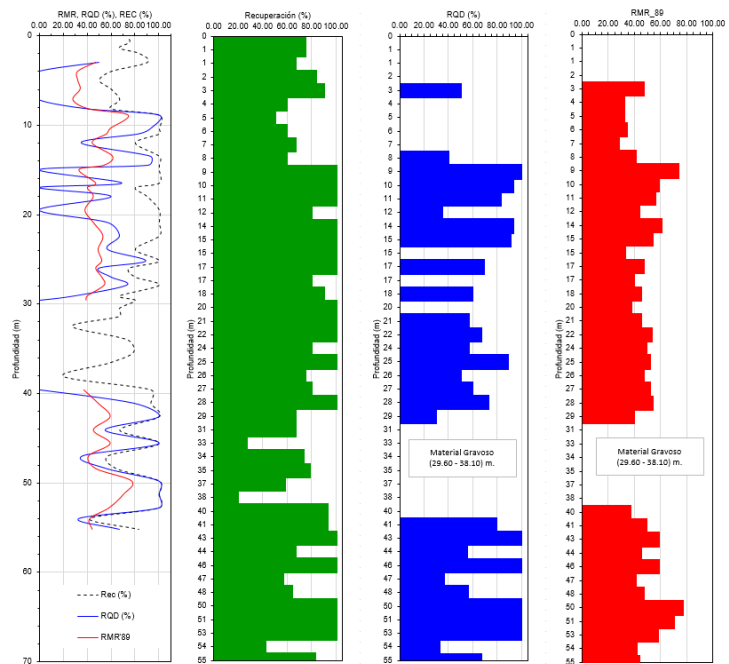
Sondaje SR-07

Sondeo	Coordenadas UTM WGS84 zona 18S			Profundidad (m)	Azimut (°)	Inclinación (°)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)			
SR-07	344547.38	8780237.36	4646.22	65.20	210°	-75°



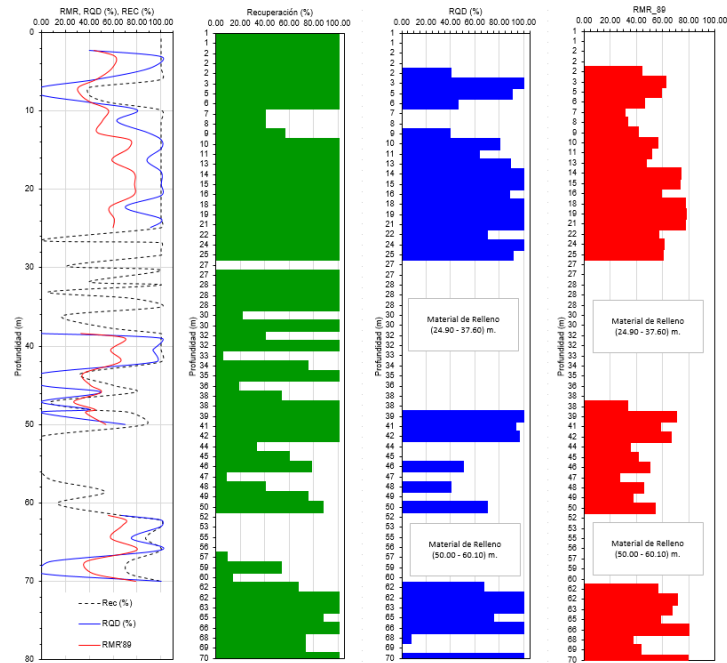
Sondaje SR-08

Sondeo	Coordenadas UTM WGS84 zona 18S			Profundidad (m)	Azimut (°)	Inclinación (°)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)			
SR-08	344361.35	8780336.78	4594.10	55.20	210°	-75°



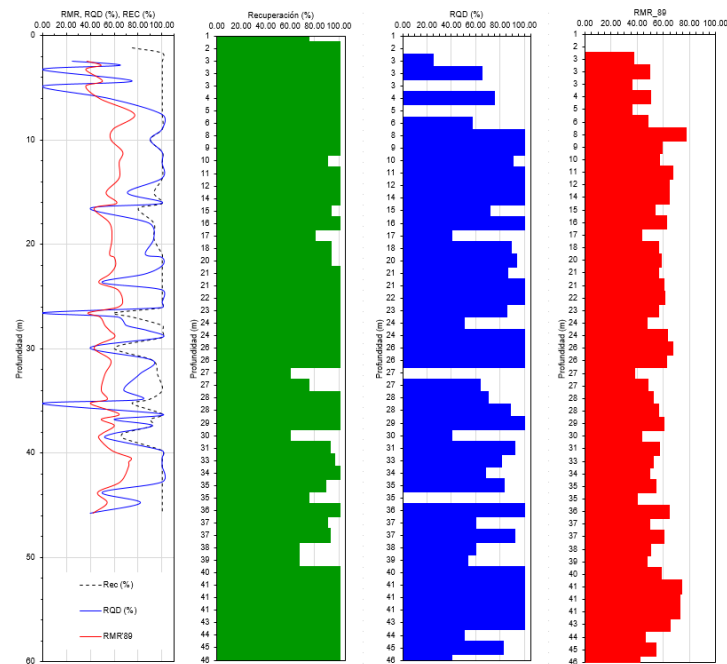
Sondaje SR-09

Sondeo	Coordenadas UTM WGS84 zona 18S			Profundidad (m)	Azimut (°)	Inclinación (°)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)			
SR-09	344424.01	8780300.20	4605.90	70.00	---	-90°



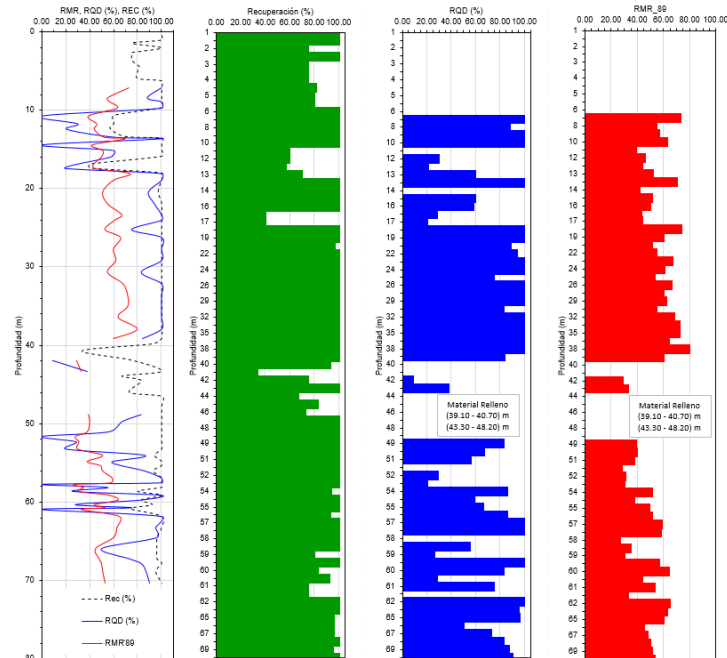
Sondaje SR-10

Sondeo	Coordenadas UTM WGS84 zona 18S			Profundidad (m)	Azimut (°)	Inclinación (°)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)			
SR-10	344564.75	8780479.95	4596.14	45.80	---	-90°



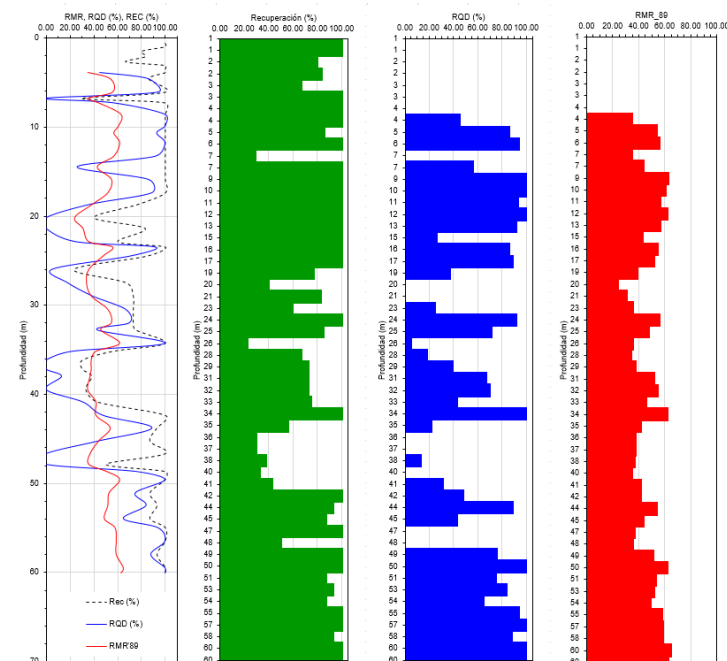
Sondaje SR-11

Sondeo	Coordenadas UTM WGS84 zona 18S			Profundidad (m)	Azimut (°)	Inclinación (°)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)			
SR-11	344501.69	8780266.63	4639.09	70.30	210°	-75°



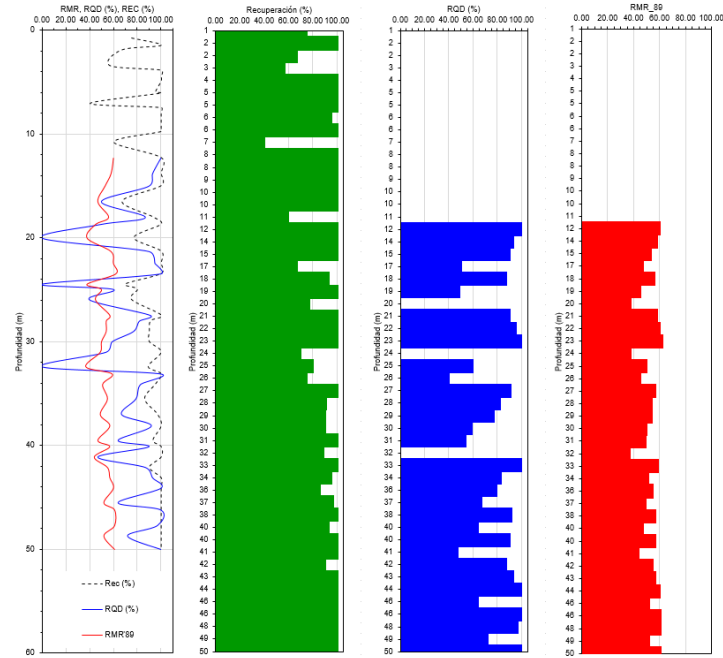
Sondaje SR-12

Sondeo	Coordenadas UTM WGS84 zona 18S			Profundidad (m)	Azimut (°)	Inclinación (°)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)			
SR-12	344327.23	8780361.44	4586.08	60.10	210°	-60°



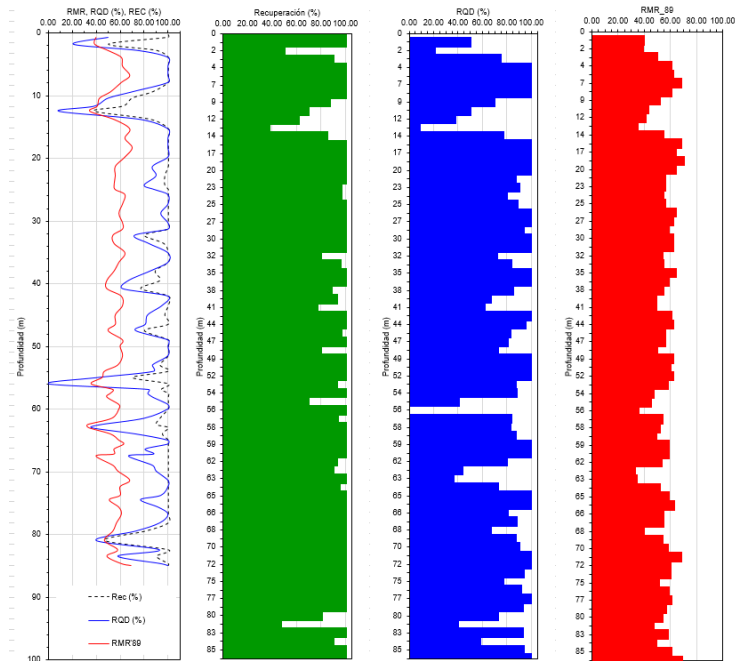
Sondaje SR-13

Sondeo	Coordenadas UTM WGS84 zona 18S			Profundidad (m)	Azimut (°)	Inclinación (°)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)			
SR-13	344432.95	8780443.32	4588.58	50.0	---	-90°



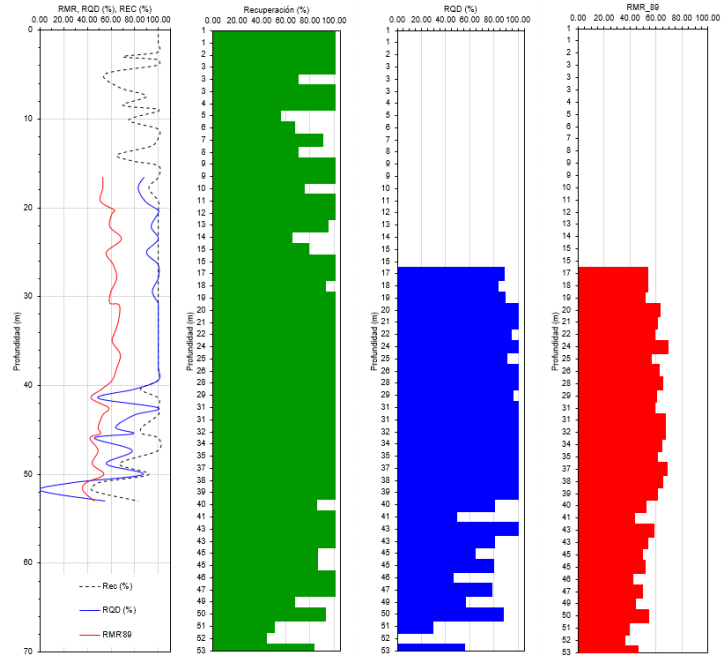
Sondaje SR-14

Sondeo	Coordenadas UTM WGS84 zona 18S			Profundidad (m)	Azimut (°)	Inclinación (°)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)			
SR-14	344499.00	8780396.00	4594.55	85.0	177°	-60°






Sondaje SR-15

Sondeo	Coordenadas UTM WGS84 zona 18S			Profundidad (m)	Azimut (°)	Inclinación (°)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)			
SR-15	344499.00	8780566.00	4584.70	53.0	---	-90°





Anexo 2: Registro fotográfico de los sondeos

Sondaie SR-01

<p>Sondeo: SR-01 Caja: 1 de 11</p> <p>Profundidad: 0.00 – 4.40 m</p>	
<p>Sondeo: SR-01 Caja: 2 de 11</p> <p>Profundidad: 4.40 – 9.00 m</p>	
<p>Sondeo: SR-01 Caja: 3 de 11</p> <p>Profundidad: 9.00 – 12.80 m</p>	




<p>Sondeo: SR-01 Caja: 4 de 11</p> <p>Profundidad: 12.80 – 17.00 m</p>	
<p>Sondeo: SR-01 Caja: 5 de 11</p> <p>Profundidad: 17.00 – 22.90 m</p>	
<p>Sondeo: SR-01 Caja: 6 de 11</p> <p>Profundidad: 22.90 – 27.90 m</p>	




<p>Sondeo: SR-01 Caja: 7 de 11</p> <p>Profundidad: 27.90 – 31.75m</p>	
<p>Sondeo: SR-01 Caja: 8 de 11</p> <p>Profundidad: 31.75 – 35.30 m</p>	
<p>Sondeo: SR-01 Caja: 9 de 11</p> <p>Profundidad: 35.30 – 39.20 m</p>	

<p>Sondeo: SR-01 Caja: 10 de 11</p> <p>Profundidad: 39.20 – 42.90 m</p>	
<p>Sondeo: SR-01 Caja: 11 de 11</p> <p>Profundidad: 42.90 – 43.30 m</p>	

Sondaje SR-02

<p>Sondeo: SR-02 Caja: 1 de 11</p> <p>Profundidad: 0.00 – 3.25 m</p>	
<p>Sondeo: SR-02 Caja: 2 de 11</p> <p>Profundidad: 3.25 – 7.45 m</p>	
<p>Sondeo: SR-02 Caja: 3 de 11</p> <p>Profundidad: 7.45 – 11.65 m</p>	

<p>Sondeo: SR-02 Caja: 4 de 11</p> <p>Profundidad: 11.65 – 15.50 m</p>	
<p>Sondeo: SR-02 Caja: 5 de 11</p> <p>Profundidad: 15.50 – 19.40 m</p>	
<p>Sondeo: SR-02 Caja: 6 de 11</p> <p>Profundidad: 19.40 – 23.80 m</p>	

<p>Sondeo: SR-02 Caja: 7 de 11</p> <p>Profundidad: 23.80 – 28.35m</p>	
<p>Sondeo: SR-02 Caja: 8 de 11</p> <p>Profundidad: 28.35 – 32.10 m</p>	
<p>Sondeo: SR-02 Caja: 9 de 11</p> <p>Profundidad: 32.10 – 35.80 m</p>	

Sondeo: SR-02
Caja: 10 de 11

Profundidad:
35.80 – 39.50 m




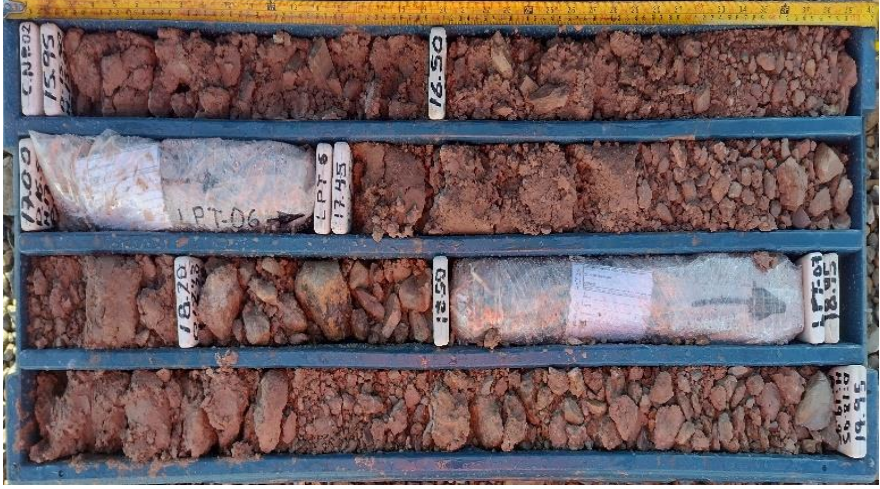

Sondeo: SR-02
Caja: 11 de 11




Profundidad:
39.50 – 40.40 m


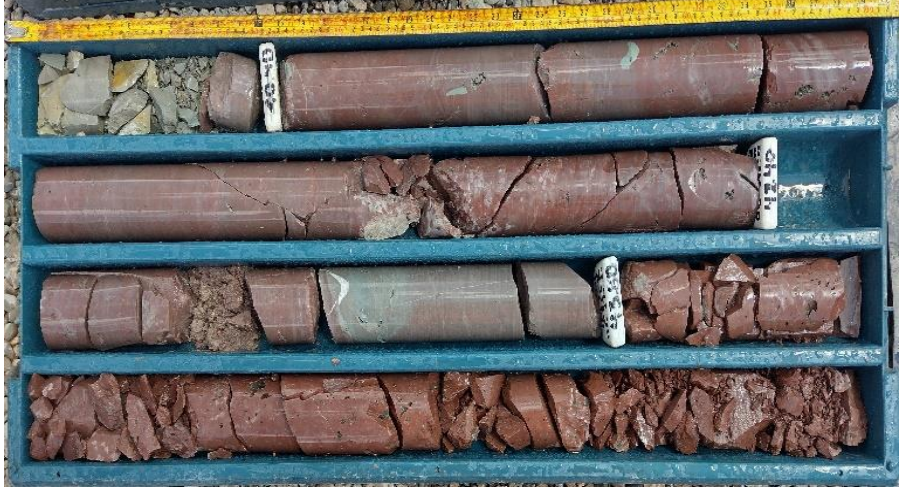



Sondaje SR-03

<p>Sondeo: SR-03 Caja: 1 de 14</p> <p>Profundidad: 0.00 – 3.90 m</p>	
<p>Sondeo: SR-03 Caja: 2 de 14</p> <p>Profundidad: 3.90 – 7.30 m</p>	
<p>Sondeo: SR-03 Caja: 3 de 14</p> <p>Profundidad: 7.30 – 10.95 m</p>	

<p>Sondeo: SR-03 Caja: 4 de 14</p> <p>Profundidad: 10.95 – 15.50 m</p>	
<p>Sondeo: SR-03 Caja: 5 de 14</p> <p>Profundidad: 15.50 – 19.95 m</p>	
<p>Sondeo: SR-03 Caja: 6 de 14</p> <p>Profundidad: 19.95 – 23.60 m</p>	

<p>Sondeo: SR-03 Caja: 7 de 14</p> <p>Profundidad: 23.60 – 27.45 m</p>	
<p>Sondeo: SR-03 Caja: 8 de 14</p> <p>Profundidad: 27.45 – 31.60 m</p>	
<p>Sondeo: SR-03 Caja: 9 de 14</p> <p>Profundidad: 31.60 – 36.00 m</p>	

<p>Sondeo: SR-03 Caja: 10 de 14</p> <p>Profundidad: 36.00 – 40.60 m</p>	
<p>Sondeo: SR-03 Caja: 11 de 14</p> <p>Profundidad: 40.60 – 45.05 m</p>	
<p>Sondeo: SR-03 Caja: 12 de 14</p> <p>Profundidad: 45.05 – 49.80 m</p>	

Sondeo: SR-03
Caja: 13 de 14

Profundidad:
49.80 – 54.00 m

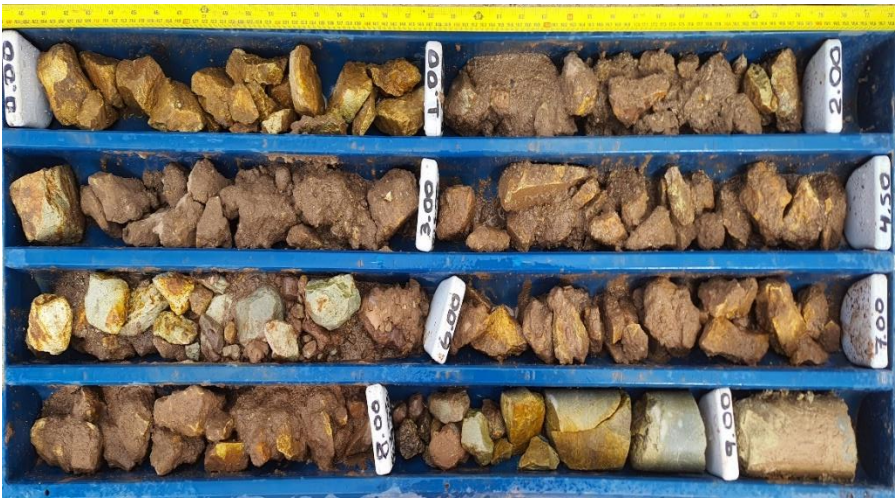







Sondeo: SR-03
Caja: 14 de 14




Profundidad:
54.00 – 56.40 m






Sondaje SR-04

<p>Sondeo: SR-04 Caja: 1 de 14</p> <p>Profundidad: 0.00 – 9.10 m</p>	
<p>Sondeo: SR-04 Caja: 2 de 14</p> <p>Profundidad: 9.10 – 12.90 m</p>	
<p>Sondeo: SR-04 Caja: 3 de 14</p> <p>Profundidad: 12.90 – 16.60 m</p>	

<p>Sondeo: SR-04 Caja: 4 de 14</p> <p>Profundidad: 16.60 – 20.30 m</p>	
<p>Sondeo: SR-04 Caja: 5 de 14</p> <p>Profundidad: 20.30 – 24.10 m</p>	
<p>Sondeo: SR-04 Caja: 6 de 14</p> <p>Profundidad: 24.10 – 28.00 m</p>	

<p>Sondeo: SR-04 Caja: 7 de 14</p> <p>Profundidad: 28.00 – 31.70 m</p>	
<p>Sondeo: SR-04 Caja: 8 de 14</p> <p>Profundidad: 31.70 – 35.40 m</p>	
<p>Sondeo: SR-04 Caja: 9 de 14</p> <p>Profundidad: 35.40 – 39.10 m</p>	

<p>Sondeo: SR-04 Caja: 10 de 14</p> <p>Profundidad: 39.10 – 42.90 m</p>	
<p>Sondeo: SR-04 Caja: 11 de 14</p> <p>Profundidad: 42.90 – 46.80 m</p>	
<p>Sondeo: SR-04 Caja: 12 de 14</p> <p>Profundidad: 46.80 – 50.60 m</p>	

Sondeo: SR-04
Caja: 13 de 14

Profundidad:
50.60 – 54.40 m






Sondeo: SR-04
Caja: 14 de 14




Profundidad:
54.40 – 55.40 m






Sondaje SR-05



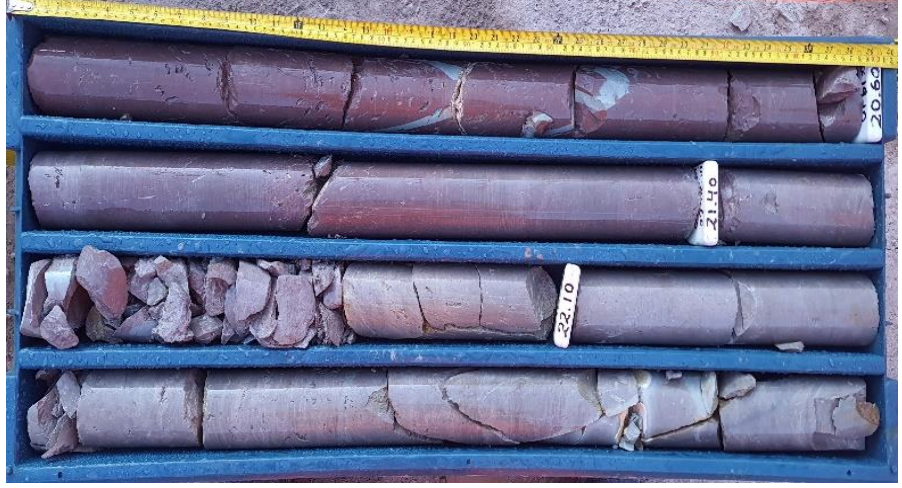
<p>Sondeo: SR-05 Caja: 1 de 9</p> <p>Profundidad: 0.00 – 4.30 m</p>	
<p>Sondeo: SR-05 Caja: 2 de 9</p> <p>Profundidad: 4.30 – 8.15 m</p>	
<p>Sondeo: SR-05 Caja: 3 de 9</p> <p>Profundidad: 8.15 – 11.80 m</p>	




<p>Sondeo: SR-05 Caja: 4 de 9</p> <p>Profundidad: 11.80 – 15.50 m</p>	
<p>Sondeo: SR-05 Caja: 5 de 9</p> <p>Profundidad: 15.50 – 20.30 m</p>	
<p>Sondeo: SR-05 Caja: 6 de 9</p> <p>Profundidad: 20.30 – 24.05 m</p>	

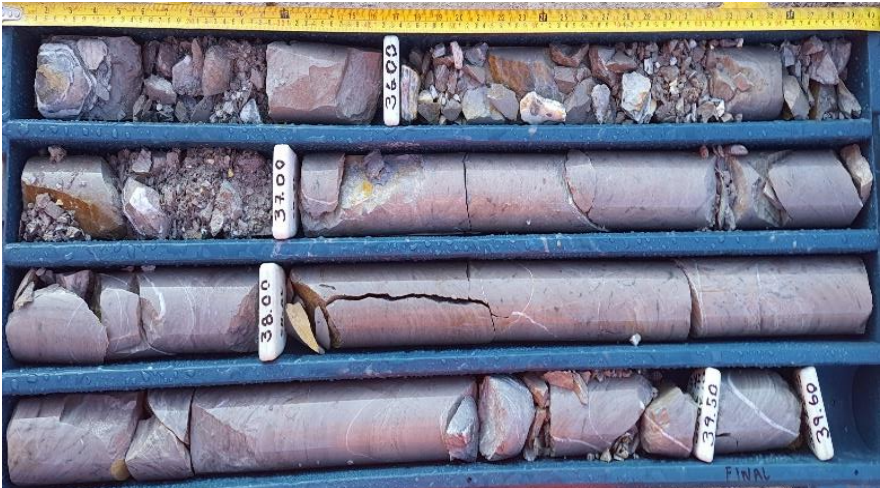


<p>Sondeo: SR-05 Caja: 7 de 9</p> <p>Profundidad: 24.05 – 27.85 m</p>	
<p>Sondeo: SR-05 Caja: 8 de 9</p> <p>Profundidad: 27.85 – 31.50 m</p>	
<p>Sondeo: SR-05 Caja: 9 de 9</p> <p>Profundidad: 31.50 – 35.00 m</p>	

Sondaje SR-06

<p>Sondeo: SR-06 Caja: 1 de 14</p> <p>Profundidad: 0.00 – 4.00 m</p>	
<p>Sondeo: SR-06 Caja: 2 de 14</p> <p>Profundidad: 4.00 – 7.90 m</p>	
<p>Sondeo: SR-06 Caja: 3 de 14</p> <p>Profundidad: 7.90 – 11.90 m</p>	




<p>Sondeo: SR-06 Caja: 4 de 14</p> <p>Profundidad: 11.90 – 15.90 m</p>	
<p>Sondeo: SR-06 Caja: 5 de 14</p> <p>Profundidad: 15.90 – 19.60 m</p>	
<p>Sondeo: SR-06 Caja: 6 de 14</p> <p>Profundidad: 19.60 – 23.50 m</p>	




<p>Sondeo: SR-06 Caja: 7 de 14</p> <p>Profundidad: 23.50 – 27.20 m</p>	
<p>Sondeo: SR-06 Caja: 8 de 14</p> <p>Profundidad: 27.20 – 31.10 m</p>	
<p>Sondeo: SR-06 Caja: 9 de 14</p> <p>Profundidad: 31.10 – 35.20 m</p>	

<p>Sondeo: SR-06 Caja: 10 de 14</p> <p>Profundidad: 35.20 – 39.60 m</p>	
<p>Sondeo: SR-06 Caja: 11 de 14</p> <p>Profundidad: 39.60 – 43.40 m</p>	
<p>Sondeo: SR-06 Caja: 12 de 14</p> <p>Profundidad: 43.40 – 47.40 m</p>	

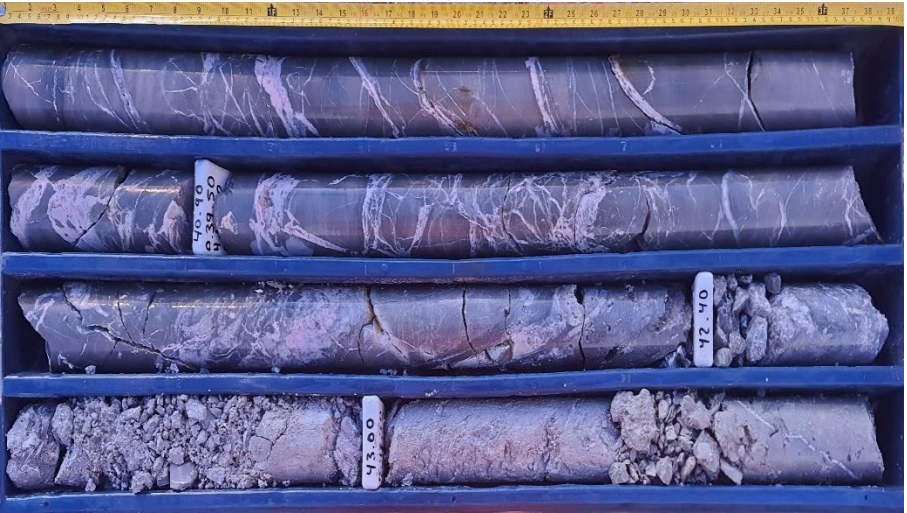
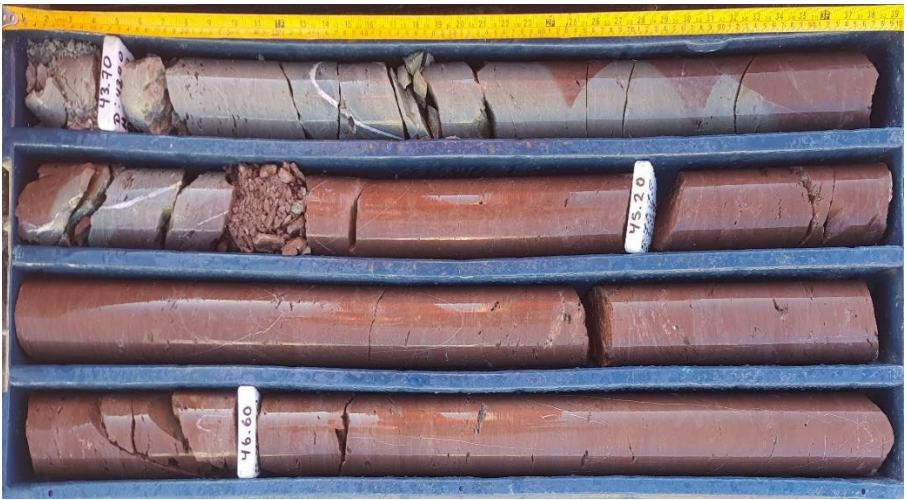

<p>Sondeo: SR-06 Caja: 13 de 14</p> <p>Profundidad: 47.40 – 51.20 m</p>	
<p>Sondeo: SR-06 Caja: 14 de 14</p> <p>Profundidad: 51.20 – 55.20 m</p>	

Sondaje SR-07

<p>Sondeo: SR-07 Caja: 1 de 15</p> <p>Profundidad: 0.00 – 4.00 m</p>	
<p>Sondeo: SR-07 Caja: 2 de 15</p> <p>Profundidad: 4.00 – 7.55 m</p>	
<p>Sondeo: SR-07 Caja: 3 de 15</p> <p>Profundidad: 7.55 – 11.20 m</p>	

<p>Sondeo: SR-07 Caja: 4 de 15</p> <p>Profundidad: 11.20 – 15.85 m</p>	
<p>Sondeo: SR-07 Caja: 5 de 15</p> <p>Profundidad: 15.85 – 20.90 m</p>	
<p>Sondeo: SR-07 Caja: 6 de 15</p> <p>Profundidad: 20.90 – 27.10 m</p>	

<p>Sondeo: SR-07 Caja: 7 de 15</p> <p>Profundidad: 27.10 – 31.40 m</p>	
<p>Sondeo: SR-07 Caja: 8 de 15</p> <p>Profundidad: 31.40 – 36.20 m</p>	
<p>Sondeo: SR-07 Caja: 9 de 15</p> <p>Profundidad: 36.20 – 39.80 m</p>	

<p>Sondeo: SR-07 Caja: 10 de 15</p> <p>Profundidad: 39.80 – 43.60 m</p>	
<p>Sondeo: SR-07 Caja: 11 de 15</p> <p>Profundidad: 43.60 – 47.30 m</p>	
<p>Sondeo: SR-07 Caja: 12 de 15</p> <p>Profundidad: 47.30 – 51.10 m</p>	

Sondeo: SR-07
Caja: 13 de 15

Profundidad:
51.10 – 55.10 m



Sondeo: SR-07
Caja: 14 de 15

Profundidad:
55.10 – 61.35 m









Sondeo: SR-11
Caja: 15 de 15




Profundidad:
61.35 – 65.20 m

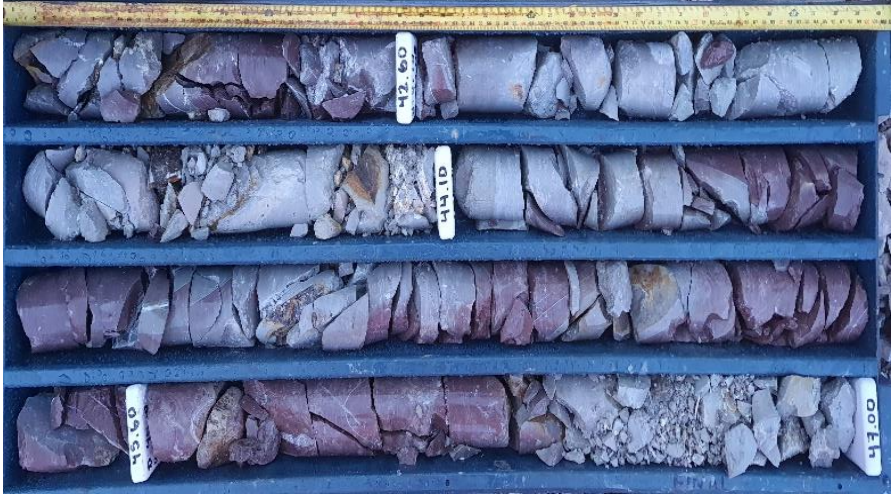




Sondaje SR-08




<p>Sondeo: SR-08 Caja: 1 de 12</p> <p>Profundidad: 0.00 – 5.40 m</p>	
<p>Sondeo: SR-08 Caja: 2 de 12</p> <p>Profundidad: 5.40 – 10.40 m</p>	
<p>Sondeo: SR-08 Caja: 3 de 12</p> <p>Profundidad: 10.40 – 14.30 m</p>	


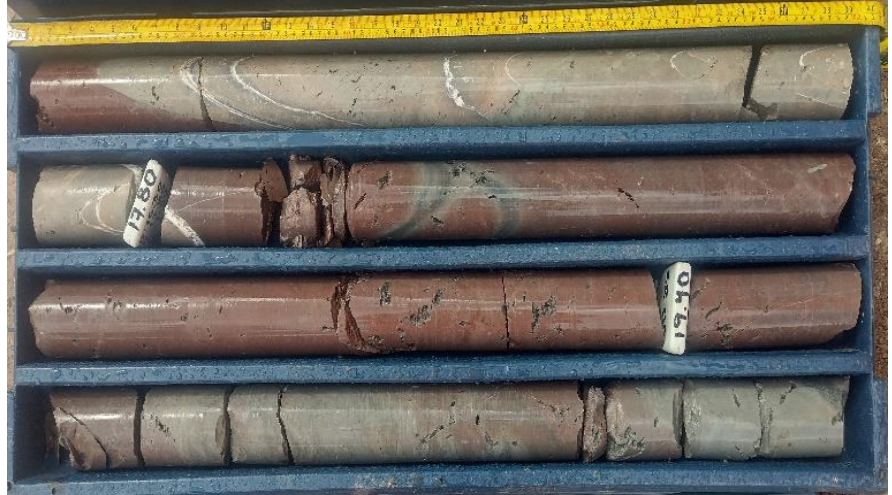

<p>Sondeo: SR-08 Caja: 4 de 12</p> <p>Profundidad: 14.30 – 18.00 m</p>	
<p>Sondeo: SR-08 Caja: 5 de 12</p> <p>Profundidad: 18.00 – 21.90 m</p>	
<p>Sondeo: SR-08 Caja: 6 de 12</p> <p>Profundidad: 21.90 – 26.00 m</p>	

<p>Sondeo: SR-08 Caja: 7 de 12</p> <p>Profundidad: 26.00 – 30.90 m</p>	
<p>Sondeo: SR-08 Caja: 8 de 12</p> <p>Profundidad: 30.90 – 36.90 m</p>	
<p>Sondeo: SR-08 Caja: 9 de 12</p> <p>Profundidad: 36.90 – 42.10 m</p>	

<p>Sondeo: SR-08 Caja: 10 de 12</p> <p>Profundidad: 42.10 – 47.00 m</p>	
<p>Sondeo: SR-08 Caja: 11 de 12</p> <p>Profundidad: 47.00 – 51.30 m</p>	
<p>Sondeo: SR-08 Caja: 12 de 12</p> <p>Profundidad: 51.30 – 55.20 m</p>	

Sondaje SR-09

<p>Sondeo: SR-09 Caja: 1 de 13</p> <p>Profundidad: 0.00 – 3.60 m</p>	
<p>Sondeo: SR-09 Caja: 2 de 13</p> <p>Profundidad: 3.60 – 9.10 m</p>	
<p>Sondeo: SR-09 Caja: 3 de 13</p> <p>Profundidad: 9.10 – 13.00 m</p>	

<p>Sondeo: SR-09 Caja: 4 de 13</p> <p>Profundidad: 13.00 – 16.65 m</p>	
<p>Sondeo: SR-09 Caja: 5 de 13</p> <p>Profundidad: 16.65 – 20.60 m</p>	
<p>Sondeo: SR-09 Caja: 6 de 13</p> <p>Profundidad: 20.60 – 24.30 m</p>	

Sondeo: SR-09
Caja: 7 de 13

Profundidad:
24.30 – 31.80 m



Sondeo: SR-09
Caja: 8 de 13

Profundidad:
31.80 – 38.10 m



Sondeo: SR-09
Caja: 9 de 13

Profundidad:
38.10 – 41.70 m





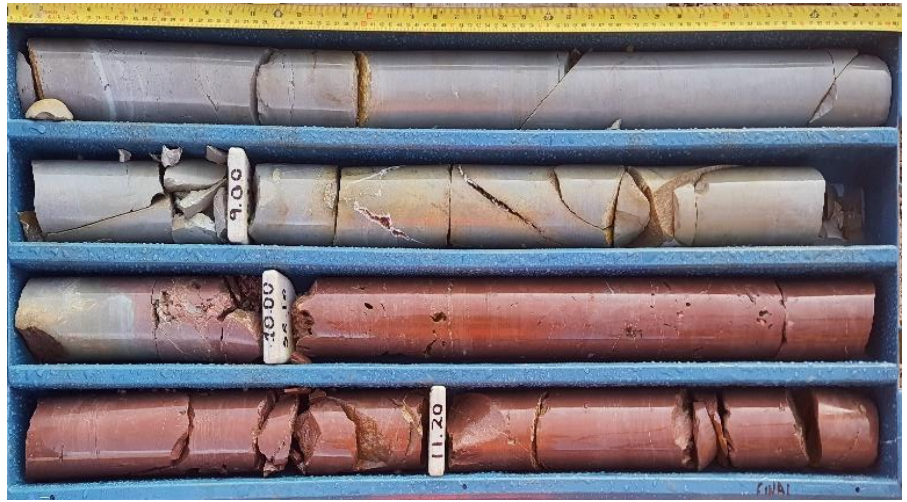
<p>Sondeo: SR-09 Caja: 10 de 13</p> <p>Profundidad: 41.70 – 49.00 m</p>	
<p>Sondeo: SR-09 Caja: 11 de 13</p> <p>Profundidad: 49.00 – 62.20 m</p>	
<p>Sondeo: SR-09 Caja: 12 de 13</p> <p>Profundidad: 62.20 – 66.20 m</p>	




Sondeo: SR-09
Caja: 13 de 13

Profundidad:
66.20 – 70.00 m



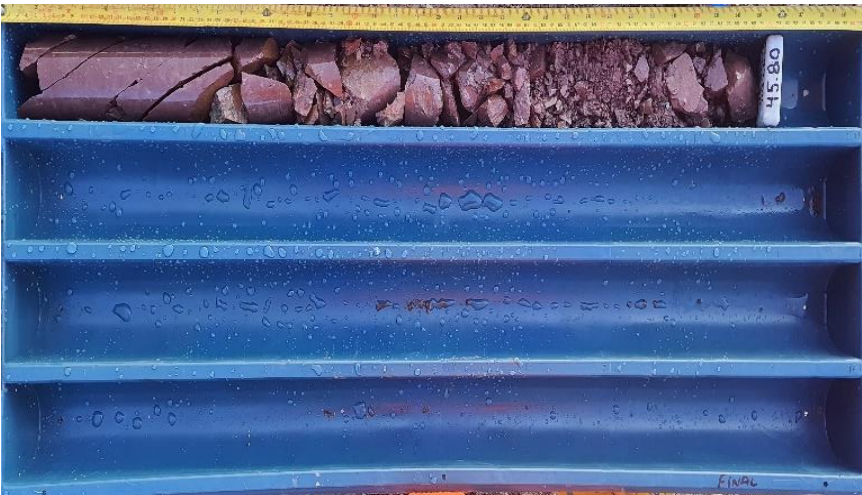


Sondaje SR-10




<p>Sondeo: SR-10 Caja: 1 de 12</p> <p>Profundidad: 0.00 – 3.90 m</p>	
<p>Sondeo: SR-10 Caja: 2 de 12</p> <p>Profundidad: 3.90 – 7.80 m</p>	
<p>Sondeo: SR-10 Caja: 3 de 12</p> <p>Profundidad: 7.80 – 11.70 m</p>	




<p>Sondeo: SR-10 Caja: 4 de 12</p> <p>Profundidad: 11.70 – 15.60 m</p>	
<p>Sondeo: SR-10 Caja: 5 de 12</p> <p>Profundidad: 15.60 – 19.60 m</p>	
<p>Sondeo: SR-10 Caja: 6 de 12</p> <p>Profundidad: 19.60 – 23.90 m</p>	




<p>Sondeo: SR-10 Caja: 7 de 12</p> <p>Profundidad: 23.90 – 28.10m</p>	
<p>Sondeo: SR-10 Caja: 8 de 12</p> <p>Profundidad: 28.10 – 32.50 m</p>	
<p>Sondeo: SR-10 Caja: 9 de 12</p> <p>Profundidad: 32.50 – 36.70 m</p>	

<p>Sondeo: SR-10 Caja: 10 de 12</p> <p>Profundidad: 36.70 – 40.90 m</p>	
<p>Sondeo: SR-10 Caja: 11 de 12</p> <p>Profundidad: 40.90 – 44.90 m</p>	
<p>Sondeo: SR-10 Caja: 12 de 12</p> <p>Profundidad: 44.90 – 45.80 m</p>	

Sondaje SR-11

<p>Sondeo: SR-11 Caja: 1 de 18</p> <p>Profundidad: 0.00 – 4.50 m</p>	
<p>Sondeo: SR-11 Caja: 2 de 18</p> <p>Profundidad: 4.50 – 8.45 m</p>	
<p>Sondeo: SR-11 Caja: 3 de 18</p> <p>Profundidad: 8.45 – 13.40 m</p>	

<p>Sondeo: SR-11 Caja: 4 de 18</p> <p>Profundidad: 13.40 – 18.05 m</p>	
<p>Sondeo: SR-11 Caja: 5 de 18</p> <p>Profundidad: 18.05 – 21.90 m</p>	
<p>Sondeo: SR-11 Caja: 6 de 18</p> <p>Profundidad: 21.90 – 25.60 m</p>	

<p>Sondeo: SR-11 Caja: 7 de 18</p> <p>Profundidad: 25.60 – 29.15 m</p>	
<p>Sondeo: SR-11 Caja: 8 de 18</p> <p>Profundidad: 29.15 – 32.90 m</p>	
<p>Sondeo: SR-11 Caja: 9 de 18</p> <p>Profundidad: 32.90 – 36.60 m</p>	

Sondeo: SR-11
Caja: 10 de 18

Profundidad:
36.60 – 41.00 m



Sondeo: SR-11
Caja: 11 de 18

Profundidad:
41.00 – 45.85 m



Sondeo: SR-11
Caja: 12 de 18
Profundidad:
45.85 – 49.75 m



Sondeo: SR-11
Caja: 13 de 18

Profundidad:
49.75 – 53.60 m



Sondeo: SR-11
Caja: 14 de 18




Profundidad:
53.60 – 57.40 m






Sondeo: SR-11
Caja: 15 de 18

Profundidad:
57.40 – 61.35 m



<p>Sondeo: SR-11 Caja: 16 de 18</p> <p>Profundidad: 61.35 – 65.30 m</p>	
<p>Sondeo: SR-11 Caja: 17 de 18</p> <p>Profundidad: 65.30 – 69.30 m</p>	
<p>Sondeo: SR-11 Caja: 18 de 18</p> <p>Profundidad: 69.30 – 70.30 m</p>	

Sondaje SR-12

<p>Sondeo: SR-12 Caja: 1 de 13</p> <p>Profundidad: 0.00 – 4.30 m</p>	 <p>This photograph shows four horizontal trays of soil samples from box 1. The samples are arranged in four rows, each with a white depth label. The top row (0.00-0.10 m) shows light brown, crumbly soil. The second row (0.10-0.20 m) shows similar soil with some clumps. The third row (2.10-2.20 m) shows a more cohesive, reddish-brown soil. The bottom row (3.50-3.60 m) shows reddish-brown soil with some larger clumps.</p>
<p>Sondeo: SR-12 Caja: 2 de 13</p> <p>Profundidad: 4.30 – 8.60 m</p>	 <p>This photograph shows four horizontal trays of soil samples from box 2. The samples are arranged in four rows, each with a white depth label. The top row (4.30-4.40 m) shows reddish-brown soil with some clumps. The second row (5.10-5.20 m) shows reddish-brown soil with some clumps. The third row (6.80-6.90 m) shows reddish-brown soil with some clumps. The bottom row (8.50-8.60 m) shows reddish-brown soil with some clumps.</p>
<p>Sondeo: SR-12 Caja: 3 de 13</p> <p>Profundidad: 8.60 – 12.40 m</p>	 <p>This photograph shows four horizontal trays of soil samples from box 3. The samples are arranged in four rows, each with a white depth label. The top row (8.60-8.70 m) shows reddish-brown soil with some clumps. The second row (9.40-9.50 m) shows reddish-brown soil with some clumps. The third row (10.10-10.20 m) shows reddish-brown soil with some clumps. The bottom row (11.80-11.90 m) shows reddish-brown soil with some clumps.</p>

Sondeo: SR-12
Caja: 4 de 13

Profundidad:
12.40 – 16.25 m



Sondeo: SR-12
Caja: 5 de 13

Profundidad:
16.25 – 21.50 m



Sondeo: SR-12
Caja: 6 de 13

Profundidad:
21.50 – 27.50 m



Sondeo: SR-12
Caja: 7 de 13

Profundidad:
27.50 – 32.70 m



Sondeo: SR-12
Caja: 8 de 13

Profundidad:
32.70 – 39.80 m



Sondeo: SR-12
Caja: 9 de 13

Profundidad:
39.80 – 44.50 m



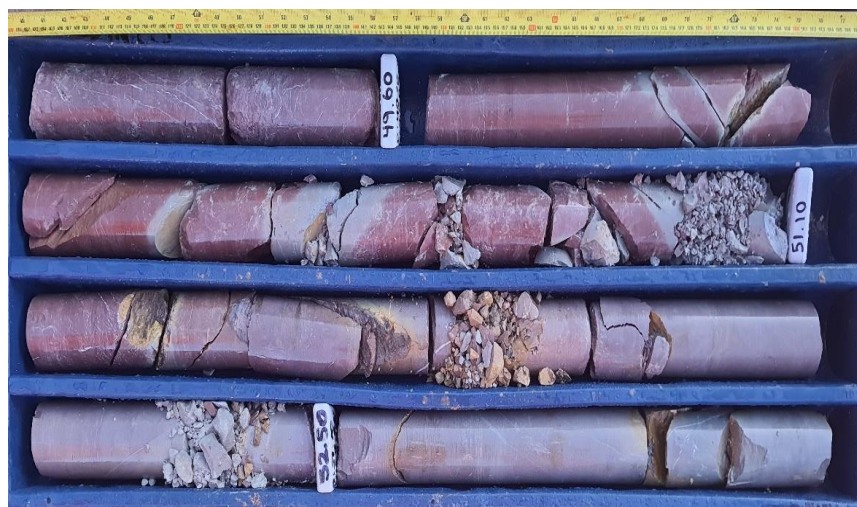
Sondeo: SR-12
Caja: 10 de 13

Profundidad:
44.50 – 49.20 m



Sondeo: SR-12
Caja: 11 de 13

Profundidad:
49.20 – 53.10 m



Sondeo: SR-12
Caja: 12 de 13

Profundidad:
53.10 – 56.80 m



Sondeo: SR-12
Caja: 13 de 13

Profundidad:
56.80 – 60.10 m



Sondaje SR-13

<p>Sondeo: SR-13 Caja: 1 de 12</p> <p>Profundidad: 0.00 – 4.95 m.</p>	
<p>Sondeo: SR-13 Caja: 2 de 12</p> <p>Profundidad: 4.95 – 9.50 m.</p>	
<p>Sondeo: SR-13 Caja: 3 de 12</p> <p>Profundidad: 9.50 – 13.80 m.</p>	

Sondeo: SR-13
Caja: 4 de 12

Profundidad:
13.80 – 18.25 m.



Sondeo: SR-13
Caja: 5 de 12

Profundidad:
18.25 – 22.45 m.



Sondeo: SR-13
Caja: 6 de 12

Profundidad:
22.45 – 26.95 m.



Sondeo: SR-13
Caja: 7 de 12

Profundidad:
26.95 – 31.00 m.



Sondeo: SR-13
Caja: 8 de 12

Profundidad:
31.00 – 35.20 m.



Sondeo: SR-13
Caja: 9 de 12

Profundidad:
35.20 – 39.10 m.



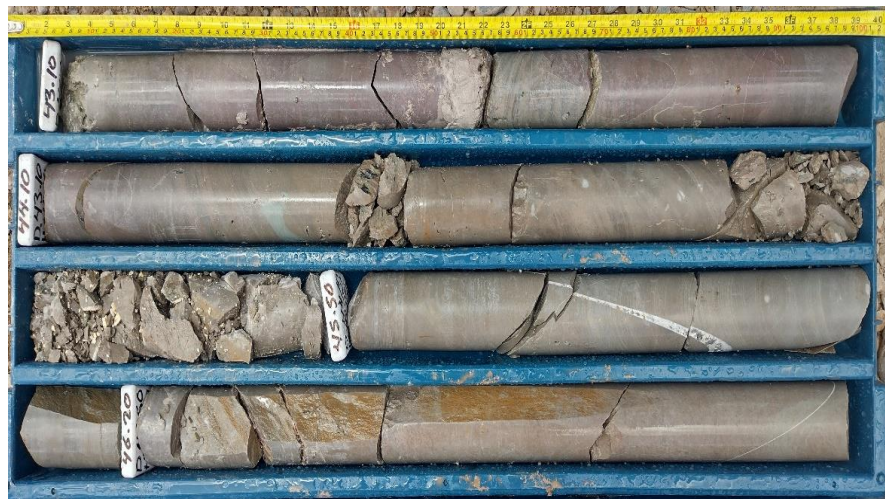
Sondeo: SR-13
Caja: 10 de 12

Profundidad:
39.10 – 43.10 m.



Sondeo: SR-13
Caja: 11 de 12

Profundidad:
43.10 – 47.00 m.






Sondeo: SR-13
Caja: 12 de 12

Profundidad:
47.00 – 50.00 m.

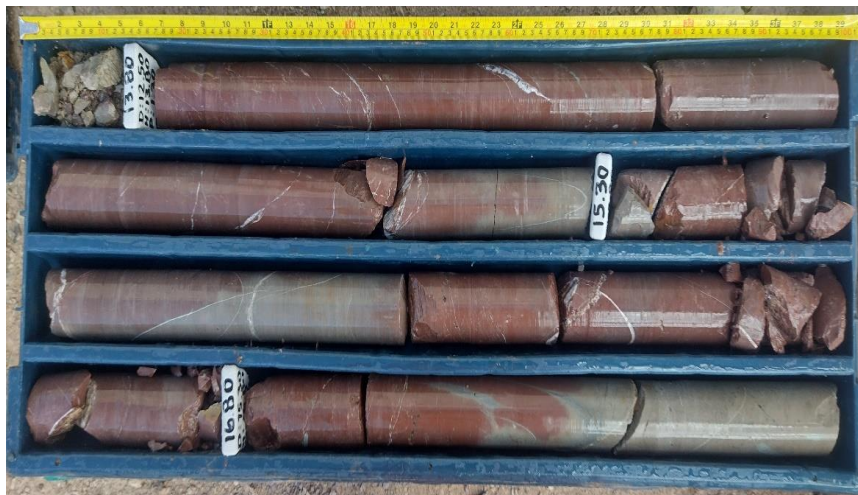


Sondaje SR-14

<p>Sondeo: SR-14 Caja: 1 de 21</p> <p>Profundidad: 0.00 – 4.30 m</p>	
<p>Sondeo: SR-14 Caja: 2 de 21</p> <p>Profundidad: 4.30 – 8.40 m</p>	
<p>Sondeo: SR-14 Caja: 3 de 21</p> <p>Profundidad: 8.40 – 13.65 m</p>	

Sondeo: SR-14
Caja: 4 de 21

Profundidad:
13.65 – 17.40 m



Sondeo: SR-14
Caja: 5 de 21

Profundidad:
17.40 – 21.80 m



Sondeo: SR-14
Caja: 6 de 21

Profundidad:
21.80 – 25.80 m



Sondeo: SR-14
Caja: 7 de 21

Profundidad:
25.80 – 29.80 m



Sondeo: SR-14
Caja: 8 de 21




Profundidad:
29.80 – 33.80 m


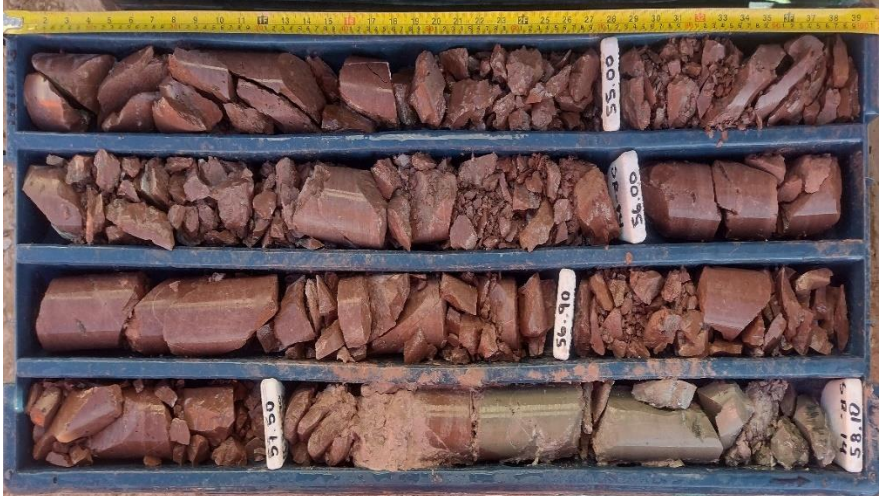



Sondeo: SR-14
Caja: 9 de 21

Profundidad:
33.80 – 37.80 m



<p>Sondeo: SR-14 Caja: 10 de 21</p> <p>Profundidad: 37.80 – 42.00 m</p>	
<p>Sondeo: SR-14 Caja: 11 de 21</p> <p>Profundidad: 42.00 – 45.80 m</p>	
<p>Sondeo: SR-14 Caja: 12 de 21</p> <p>Profundidad: 45.80 – 50.00 m</p>	

<p>Sondeo: SR-14 Caja: 13 de 21</p> <p>Profundidad: 50.00 – 54.00 m</p>	
<p>Sondeo: SR-14 Caja: 14 de 21</p> <p>Profundidad: 54.00 – 58.10 m</p>	
<p>Sondeo: SR-14 Caja: 15 de 21</p> <p>Profundidad: 58.10 – 62.00 m</p>	

Sondeo: SR-14
Caja: 16 de 21

Profundidad:
62.00 – 65.95 m



Sondeo: SR-14
Caja: 17 de 21

Profundidad:
65.95 – 69.80 m



Sondeo: SR-14
Caja: 18 de 21

Profundidad:
69.80 – 73.55 m



<p>Sondeo: SR-14 Caja: 19 de 21</p> <p>Profundidad: 73.55 – 77.35 m</p>	
<p>Sondeo: SR-14 Caja: 20 de 21</p> <p>Profundidad: 77.35 – 82.15 m</p>	
<p>Sondeo: SR-14 Caja: 21 de 21</p> <p>Profundidad: 82.15 – 85.00 m</p>	

Sondaje SR-15

<p>Sondeo: SR-15 Caja: 1 de 13</p> <p>Profundidad: 0.00 – 3.95 m</p>	
<p>Sondeo: SR-15 Caja: 2 de 13</p> <p>Profundidad: 3.95 – 9.15 m</p>	
<p>Sondeo: SR-15 Caja: 3 de 13</p> <p>Profundidad: 9.15 – 14.05 m</p>	

<p>Sondeo: SR-15 Caja: 4 de 13</p> <p>Profundidad: 14.05 – 18.25 m</p>	
<p>Sondeo: SR-15 Caja: 5 de 13</p> <p>Profundidad: 18.25 – 22.10 m</p>	
<p>Sondeo: SR-15 Caja: 6 de 13</p> <p>Profundidad: 22.10 – 25.80 m</p>	

Sondeo: SR-15
Caja: 7 de 13

Profundidad:
25.80 – 29.60 m



Sondeo: SR-15
Caja: 8 de 13




Profundidad:
29.60 – 33.30 m



Sondeo: SR-15
Caja: 9 de 13

Profundidad:
33.30 – 36.90 m



<p>Sondeo: SR-15 Caja: 10 de 13</p> <p>Profundidad: 36.90 – 40.90 m</p>	
<p>Sondeo: SR-15 Caja: 11 de 13</p> <p>Profundidad: 40.90 – 45.00 m</p>	
<p>Sondeo: SR-15 Caja: 12 de 13</p> <p>Profundidad: 45.00 – 49.55 m</p>	

Sondeo: SR-15
Caja: 13 de 13

Profundidad:
49.55 – 53.00 m

