

Antofagasta, 28 de abril de 2022

Señor
Emanuel Ibarra Soto
Superintendente (S) del Medio Ambiente
Ministerio del Medio ambiente
Teatinos 280-Piso 8
Santiago de Chile
PRESENTE

Carta: S-MC-MB202-0422-0661

REF.: Res Ex. 1538, de fecha 6 de julio de 2021, de la Superintendencia del Medio Ambiente, por la cual se ordenan Medidas Urgentes y Transitorias y requiere información según se indica.

MAT: Informe final del estudio de ingeniería que dé cuenta de las condiciones geológicas-geotécnicas de los suelos colindantes a la faena minera Mantos Blancos, que evalúe la(s) causa(s) de las deformaciones y grietas visibles en el tramo comprendido entre el km 1406.300 y el km 1407.125 aproximadamente. Medida c).

De mi consideración:

Giancarlo Bruno Lagomarsino, en representación de Mantos Copper S.A., me dirijo a usted en relación a las Res Ex. N°1538, de 6 de julio de 2021, que estableció medidas urgentes y transitorias a la faena minera Mantos Blancos, y lo señalado en la Res. Ex. N°2127, de 1 de octubre de 2021, que aclara las medidas urgentes y transitorias según se indica, respecto del plazo para presentar el informe final sobre la medida letra c), el que vence a fines del mes de abril de 2022.

En atención a lo anterior, respecto de la medida c), relativa a *“Realizar un estudio de ingeniería que dé cuenta de las condiciones geológicas- geotécnicas de los suelos colindantes a la faena minera Mantos Blancos, que evalúe la(s) causa(s) de las deformaciones y grietas visibles en el tramo comprendido entre el km 1406.300 y el km 1407.125 aproximadamente, debiendo utilizar tecnología ad hoc para dicho objetivo, tales como sondajes SPT, Tomografía eléctrica, entre otras. Dicho estudio deberá ser gestionado y ejecutado por profesionales competentes y se deberá entregar un informe técnico con las primeras gestiones dentro del plazo entregado, informando en dicho documento la fecha estimada de la presentación de los resultados finales”*; vengo en presentar el último informe, dentro del plazo conferido.

Dicho informe da cuenta de las etapas de desarrollo que fueron llevadas a cabo; una primera etapa 1 sobre revisión y análisis de la información existente en nuestra compañía sobre el modelo geológico de la faena Mantos Blancos, entre otros antecedentes

geotécnicos, cuyo reporte fue presentado el 4 de septiembre de 2021; y una segunda etapa, de la cual se presentó un avance el día 30 de diciembre de 2021 respecto de los trabajos en curso a esa fecha, que contempla el desarrollo de sondajes, calicatas y perfiles geodésicos para lograr establecer las causas de la deformación del suelo en el tramo identificado.

En virtud de lo anterior, adjunto, en formato digital, el informe denominado “**Caracterización de Suelos Colindantes a Mina Mantos Blancos**”, Elaborado por la consultora Wood.

Las principales conclusiones de este informe indican que las causas de agrietamiento principales son dos:

- Causas directas; presencia de agua y composición de suelos y,
- Factores Concomitantes; conjunción de aspectos relativos a la geología, geomorfología (paleo-geomorfología) y topografía, que concurren o aportan a que el fenómeno de agrietamiento y deformación de la carretera se presente.

En resumen, los agrietamientos evidenciados son generados por la disolución de sales presentes en este tipo de suelos a consecuencia de la presencia de agua. (Capítulo 4.3 del informe adjunto).

De conformidad a ello, **se cumple con lo comprometido para verificar el cumplimiento de lo ordenado por la SMA en su Res. Ex. N° 1538, ya citada.**

Adicionalmente, cabe señalar que nuestra compañía seguirá profundizando este análisis para lo cual se mantendrá llevando a cabo ensayos de laboratorio, interpretación de resultados, revisión de informes, entre otros.

Finalmente, dentro del contexto de los factores directos del agrietamiento (presencia de agua), es preciso mencionar que en el marco del proceso administrativo llevado a cabo por el SERNAGEOMIN, la compañía ha desarrollado el estudio técnico sobre análisis de la estabilidad física de la Cubeta N°1, denominado “Estudios Geotécnicos Cubeta 1 Mina Mantos Blancos”, el cual menciona dentro de sus principales conclusiones, ausencia de nivel freático en dicha cubeta, evidenciadas por las perforaciones sónicas y diamantinas, lo cual se encuentra indicado en el Capítulo 7.4 del estudio mencionado. Dicho informe se adjunta a esta presentación.

Sin otro particular, le saluda atentamente,



GIANCARLO BRUNO LAGOMARSINO

Pp. Mantos Cooper S.A.

Se adjunta: Lo indicado

MANTOS COPPER
PROYECTO N° E40242
CARACTERIZACIÓN SUELOS COLINDANTES
A MINA MANTOS BLANCOS

ETAPA 2

INFORME N° 2

E40242-1000-DT30-RPT-0004

Preparado por

Amec Foster Wheeler

Aprobado por

Jefe de Proyecto: Cecilia Braem (CB)
Administrador del Contrato: José A. Rodríguez (JARP)

| Rev. | Fecha | Revisión | Preparado | Revisado | Aprobado |
|------|-------------|----------------------|-----------|----------|----------|
| A | 12-abr-2022 | Coordinación Interna | CB | FC | FC |
| B | 14-abr-2022 | Revisión Cliente | CB | FC | FC |
| P | 26-abr-2022 | Para Uso | CB | FC | FC |

AVISO IMPORTANTE

Este documento contiene la expresión de la opinión profesional de Amec Foster Wheeler, una empresa Wood plc. (Consultor), en las materias definidas en éste, usando su juicio profesional y el razonable cuidado, y está basado, en parte, en supuestos, datos, e información entregada por terceros. Este documento debe ser leído en el contexto del contrato entre el Consultor y el Cliente (Dueño) y la metodología, procedimientos y técnicas usadas, las hipótesis del Consultor, y las circunstancias y restricciones bajo las cuales este mandato fue ejecutado. Este documento fue escrito sólo para el propósito definido en el contrato del Servicio y está orientado a ser leído como un todo, por lo tanto, secciones o partes no deben ser leídos o interpretados fuera de contexto. Cualquier uso que terceras partes hagan de este documento o tomen decisiones basados en éste, será a su solo riesgo y responsabilidad.

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|------------|---------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.0 | INTRODUCCIÓN | 6 |
| 1.1 | Generalidades..... | 6 |
| 1.2 | Objetivos..... | 7 |
| 1.3 | Referencias..... | 8 |
| 2.0 | ETAPAS DEL ESTUDIO | 9 |
| 2.1 | Generalidades..... | 9 |
| 2.2 | Informe Etapa 1 - Resumen | 9 |
| 2.3 | Informe de Continuidad de Etapa 1 a Etapa 2 - Resumen | 10 |
| 2.4 | Estado de Avance de las Investigaciones de la Etapa 2..... | 11 |
| 3.0 | RESULTADOS PRELIMINARES AVANCE DE LA ETAPA 2..... | 12 |
| 3.1 | Geofísica | 12 |
| 3.1.1 | Programa de Trabajo..... | 12 |
| 3.1.2 | Métodos Empleados | 14 |
| 3.1.2.1. | Refracción Sísmica..... | 14 |
| 3.1.2.2. | MASW..... | 15 |
| 3.1.2.3. | TEM y NanoTEM | 15 |
| 3.1.3 | Resultados..... | 16 |
| 3.1.3.1. | Refracción sísmica (Vp)..... | 16 |
| 3.1.3.2. | Resultados MASW (Vs) | 17 |
| 3.1.3.3. | Resultados NanoTEM y TEM..... | 17 |
| 3.2 | Calicatas..... | 20 |
| 3.2.1 | Programa de Trabajo..... | 20 |
| 3.2.2 | Descripción de los suelos | 23 |
| 3.2.3 | Resultados de Laboratorio | 24 |
| 3.2.3.1. | Clasificación de los suelos e índice de plasticidad (IP)..... | 25 |
| 3.2.3.2. | Compactación Proctor | 26 |
| 3.2.3.3. | Contenido de Sales | 27 |
| 3.2.3.4. | Hinchamiento Libre o Potencial de Expansión..... | 28 |
| 3.2.3.5. | Difracción de Rayos X..... | 29 |
| 3.2.3.6. | Densidad de Terreno (Cono de Arena) | 31 |
| 3.3 | Sondajes | 32 |
| 3.3.1 | Programa de Trabajo..... | 32 |
| 3.3.2 | Aspectos Geológicos y Geomorfológicos | 33 |
| 3.3.2.1. | Unidades Geológicas Generales..... | 33 |
| 3.3.2.2. | Geomorfología | 37 |
| 3.3.3 | Aspectos Geotécnicos | 39 |
| 3.3.3.1. | Ensayos de Penetración Estándar (SPT) | 40 |
| 3.3.3.2. | Calidad Geotécnica (RMR)..... | 41 |
| 3.3.4 | Condición de Niveles de Agua | 41 |
| 4.0 | RESUMEN Y CONCLUSIONES..... | 42 |

| | | |
|-------|------------------------------------------------------|----|
| 4.1 | Resumen | 42 |
| 4.1.1 | De las Exploraciones y Programa de Laboratorio | 42 |
| 4.1.2 | Nuevos Antecedentes | 43 |
| 4.2 | Conclusiones | 45 |

TABLAS

| | | |
|-------------|-------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3-1. | Características de los perfiles geofísicos..... | 14 |
| Tabla 3-2. | Ubicaciones de las calicatas | 21 |
| Tabla 3-3. | Características principales de las calicatas..... | 24 |
| Tabla 3-4. | Programa de laboratorio en muestras de calicatas..... | 25 |
| Tabla 3-5. | Clasificación USCS e Índice de Plasticidad..... | 26 |
| Tabla 3-6. | Proctor Modificado | 26 |
| Tabla 3-7. | Contenido de sales | 28 |
| Tabla 3-8. | Hinchamiento | 28 |
| Tabla 3-9. | Difracción de rayos X..... | 29 |
| Tabla 3-10. | Ensayo Cono de arena..... | 31 |
| Tabla 3-11. | Ubicaciones de los sondajes | 32 |

FIGURAS

| | | |
|-------------|-------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-1. | Ubicación del sector de las obras y áreas sujetas a estudio | 7 |
| Figura 3-1. | Ubicaciones de las exploraciones geofísicas..... | 13 |
| Figura 3-2. | “Puntos calientes” de muy bajas resistividades..... | 20 |
| Figura 3-3. | Ubicaciones de las calicatas geotécnicas..... | 22 |
| Figura 3-4. | Ubicaciones de los sondajes geotécnicos | 33 |
| Figura 3-5. | Perfil Geológico W-E (mod. de Ref. 10)..... | 34 |
| Figura 3-6. | Perfil Perfil Hidrogeológico E-W (Ref. 11) | 35 |
| Figura 3-7. | Secuencia histórica de imágenes | 39 |

ANEXOS

Anexo A: Informe Estudio Geofísico Geoeléctrico, Refracción Sísmica y MASW

Anexo B: Logs Calicatas

Anexo C: Ensayos Cono de Arena

Anexo D: Ensayos de Laboratorio Calicatas

Anexo E: Fotografías de los Testigos de Sondajes

Anexo F: Ensayos SPT

1.0 INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

La operación Mantos Blancos (MB) es una mina a rajo abierto de cobre, mediante tratamiento de sulfuros y tratamiento de minerales oxidados, que comenzó su producción en 1960. La faena se ubica en la región de Antofagasta, a 45 km al norte de la ciudad de Antofagasta, en la provincia y comuna del mismo nombre, a una altura promedio de 900 m s.n.m.

Actualmente, la operación de MB procesa 4,2 Mton/año de mineral sulfurado y clasifica el relave con hidrociclones en relaves gruesos y relaves finos. Los relaves gruesos son conducidos a filtros de banda e hidro-escurridores, donde alcanzan una concentración de sólidos en peso de aproximadamente el 80%.

El diseño y operación de MB fue evaluado ambientalmente en el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) del Proyecto Santa Bárbara, aprobado ambientalmente de acuerdo con la RE-N° 165/95, el cual consideraba dos depósitos de relaves finos, denominados Cubeta 1 y Cubeta 2, y un depósito de relaves gruesos. A partir del año 2017, MB inicia la operación del proyecto Optimización Disposición de Relaves Mantos Blancos, aprobado por la RCA N° 101/2016, el cual considera la implementación de un nuevo depósito de relaves de material fino en reemplazo de la Cubeta 2, ubicado en el ex rajo (pit) de la Fase 8, el que se encuentra dentro de la operación, en una zona intervenida, a una distancia de 1.300 m de la Ruta 5 Norte.

Debido a la presencia de deformaciones y grietas que han aparecido en el sector de la Ruta 5 Norte aledaño a los antiguos depósitos de relave, en julio de 2021, Mantos Copper (MC) encargó a Wood un estudio denominado "Caracterización Geológica y Geotécnica de los Suelos Colindantes a la Faena Minera Mantos Blancos", cuyos objetivos de detallan en la siguiente sección.

1.2 Objetivos

El objetivo final del estudio pretende evaluar la(s) causa(s) de las deformaciones y grietas presentados en la zona ubicada aproximadamente entre el km 1.406,300 y el km 1.407,125 de la Ruta 5 Norte a la altura del Distrito Minero Mantos Blancos, en el sector del pie del talud de los depósitos de relaves (Figura 1-1), y, con lo anterior, responder a la Res. Ex. 1538 Letra C de las MUT SMA (Ref. 1) y aclaración MUT SMA (Ref. 2).

El estudio se está efectuando por etapas, las cuales se explican con mayor detalle en el capítulo 2. El presente documento contiene un breve resumen del informe emanado con motivo de la finalización de la Etapa 1 (Ref. 3 y Ref. 4) y de los avances del proyecto emitidos en el Informe de Avance 1 (Ref. 5) de la Etapa 2, los cuales ahora se complementan con el estado de avance de las investigaciones de terreno y el programa de ensayos de laboratorio subsecuente.



Figura 1-1. Ubicación del sector de las obras y áreas sujetas a estudio

1.3 Referencias

- Ref. 1 Resolución Exenta N°1538, MUT (Medidas Urgentes y Transitorias), Superintendencia de Medio Ambiente, Gobierno de Chile. 6 de julio de 2021.
- Ref. 2 Resolución Exenta N°1819, Aclara Medidas Urgentes y Transitorias, Superintendencia de Medio Ambiente, Gobierno de Chile. 17 de agosto de 2021.
- Ref. 3 Caracterización Geológica-Geotécnica de Suelos Sector Ruta 5 Norte Frente a Mina Mantos Blancos. ETAPA 1. Documento N° E40242-1000-DT30-RPT-0001, Amec Foster Wheeler, 5/sep/2021, rev. 0.
- Ref. 4 ETAPA 2. Definición de Alcances. Caracterización Geológica-Geotécnica de Suelos Sector Ruta 5 Norte Frente a Mina Mantos Blancos. Documento N° E40242-1000-DT30-RPT-0002, Amec Foster Wheeler, 13/oct/2021, rev. C.
- Ref. 5 ETAPA 2. Informe de Avance Nro. 1. Caracterización Geológica-Geotécnica de Suelos Sector Ruta 5 Norte Frente a Mina Mantos Blancos. Documento N° E40242-1000-DT30-RPT-0003, Amec Foster Wheeler, 23/dic/2021, rev. D.
- Ref. 6 Estudio Geofísico Geoeléctrico, Refracción Sísmica y MASW Sector Sur Tranque de Relaves Mantos Blancos, Región de Antofagasta, Chile. Geodatos. Marzo 2022.
- Ref. 7 Informe de Resultados de Laboratorio. Ensayos de Laboratorio Mantos Blancos. Orden de Trabajo N°1 – Calicatas. Documento FCSA-LAN-LAB-RPT-206070 [00]. FUGRO. 8 marzo 2022.
- Ref. 8 Ordinario N° 336. Solicitud de antecedentes sobre acuífero existente en el sector de la faena minera "Mantos Blancos". Director Regional, Dirección General de Aguas, Región de Antofagasta. 10 de agosto 2020.
- Ref. 9 Infanta Paredes, José Antonio. Geología y Mineralización del Prospecto Argentina. Su implicancia en la exploración del Distrito Minero Mantos Blancos, Antofagasta, II Región. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad Católica del Norte. Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Departamento de Ciencias Geológicas. Antofagasta, diciembre 2001.
- Ref. 10 Modelo Litológico. Superintendencia de Geología, Mantos Copper. Julio 2021.
- Ref. 11 Respuesta Técnica Mantos Copper Resolución Exenta AFTA N°49/202. Requiere información que indica e instruye la forma y el modo de presentación de los antecedentes a Mantos Copper. Documento 1028_MANCOPP_MB_SMA_vC. Amphos 21 Consulting Chile Ltda. 10 de junio de 2021.

Ref. 12 Análisis de Riesgo Geológico Instalaciones de Mina Mantos Blancos II Región.
Actualización marzo 2016. INVEREX Ltda.

2.0 ETAPAS DEL ESTUDIO

2.1 Generalidades

El estudio de caracterización de suelos ha sido dividido en las siguientes dos etapas:

- Etapa 1: Revisión de antecedentes aportados por Mantos Blancos (MB) para caracterizar los suelos colindantes a la faena minera Mantos Blancos y planteamiento de hipótesis que permitieran preliminarmente identificar la(s) causa(s) y/o mecanismos de las deformaciones y agrietamientos que actualmente son visibles en el tramo comprendido aproximadamente entre el km 1.406,300 al km 1.407,125 de la Ruta 5 Norte.
- Etapa 2: En consideración a que la Etapa 1 correspondió a una investigación de carácter bibliográfico, la Etapa 2 considera la ejecución de exploraciones adicionales, en concordancia con el programa de trabajo presentado en el primer informe (Etapa 1) de respuesta a las MUT anteriormente señaladas.

2.2 Informe Etapa 1 - Resumen

Para la confección del Informe Etapa 1 en total se tuvieron a la vista un conjunto de archivos y/o antecedentes, los cuales fueron revisados con la perspectiva del estudio, siendo finalmente seleccionados 93 de ellos, los que se encuentran detallados en la Ref. 3. Los antecedentes, en su mayor parte, fueron aportados por MC, en tanto que otros fueron obtenidos de fuentes públicas, como también internas de proyectos desarrollados por Wood con anterioridad.

Los antecedentes acogidos fueron ordenados por áreas temáticas y, dentro de ellas, en orden cronológico, agrupándose en temáticas tales como: documentos técnicos y administrativos generados a partir de mayo de 2020, que constituyen el núcleo de central que generó el comienzo del presente estudio; hidrogeología; hidroquímica; registros meteorológicos; geología y geotecnia; geofísica; fotografías históricas; topografía y estudios medioambientales.

Lo anterior permitió desarrollar diversas líneas descriptivas, detalladas en el Informe de la Etapa 1, las cuales correspondieron, en lo principal a definir un contexto geológico y geomorfológico (Unidades Geológicas, Estructuras Geológicas y Geomorfología), un contexto hidrogeológico (Hidrología, Hidroquímica, Isotopía, Piezometría y Unidades Hidrogeológicas) y finalmente un contexto geotécnico por medio de información proveniente de 24 sondajes con indicación de litología y techo de roca, registros de 161 ensayos de Penetración estándar (SPT), ensayos de permeabilidad (Lefranc) en dos sondajes y registros estratigráficos de 22 calicatas, algunas con ensayos de densidad in situ e infiltración Porchet.

2.3 Informe de Continuidad de Etapa 1 a Etapa 2 - Resumen

En base a los resultados de los análisis de antecedentes emanados al término de la Etapa 1, y con el mérito de la información analizada, se diseñó la ejecución de una segunda etapa (Etapa 2) de estudios que considera un programa de exploraciones, de ensayos de laboratorio y de terreno, para obtener los antecedentes necesarios que permitan determinar las causas de las grietas y deformaciones de la autopista en el lineamiento de las MUT:

- I. Res. Ex. 1538 Letra C de las MUT SMA (Ref. 1): "Realizar un estudio de ingeniería que dé cuenta de las condiciones geológicas-geotécnicas de los suelos colindantes a la faena minera Mantos Blancos, que evalúe la(s) causa(s) de las deformaciones y grietas visibles en el tramo comprendido entre el Km 1406.300 y el Km 1407.125 aproximadamente, debiendo utilizar tecnología ad hoc para dicho objetivo, tales como sondajes SPT, tomografía eléctrica, entre otras".
- II. Aclaración MUT SMA (Ref. 2): "...respecto a la letra c) del resuelvo primero de la Res. Ex. N°1538/2021, ...la empresa sostiene que dicho estudio comprende dos etapas, una de las cuales es eventual. La primera etapa consiste en revisar información existente, análisis y actualización, para lo cual requiere de un plazo de 30 días corridos comenzando el 4 de agosto de 2021, finalizando el 4 de septiembre de 2021 y concluyendo con un informe final Etapa 1. En caso de estimarse que se requiere una segunda etapa, en que se generaría nueva información a través de sondajes y ensayos geotécnicos, de ser necesaria, implicaría un plazo de entre 6 a 7 meses desde el término de la primera etapa. Sostiene, además, que elaborará un análisis de resultados con la determinación de las causas del agrietamiento, e irá reportando los antecedentes a la SMA".

Así, el informe para avanzar desde la Etapa 1 hacia la Etapa 2 (Ref. 4) presenta el programa de investigaciones de terreno mediante la perforación de sondajes, la excavación de calicatas y el levantamiento de perfiles geofísicos, además de un programa de laboratorio sobre muestras provenientes tanto de los testigos de sondajes como de la excavación de calicatas.

Entre otros, los siguientes parámetros resistentes o geotécnicos y químicos están contemplados de analizar:

- Clasificación USCS completa y Límites de Atterberg
- Contenido de sales, cloruros y sulfatos
- Densidad de partículas sólidas
- Densidad *in situ* (cono de arena)
- Difracción por rayos X (DRX)
- Ensayo de (potencial) de hinchamiento de arcillas
- Proctor Modificado
- Sales solubles totales
- SPT (*in situ*)

2.4 Estado de Avance de las Investigaciones de la Etapa 2

Para la consecución de los objetivos señalados, las exploraciones consideradas a ejecutar durante la Etapa 2 del proyecto y su actual estado de avance, son los siguientes:

- a) Ejecución de geofísica combinada MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) con determinación de V_{S30} y perfilaje TEM/NanoTEM.

Estado: 100% (levantamiento terminado e informe emitido Ref. 6).

- b) Perforación de 5 sondajes de carácter geotécnico (DDH).

Estado: 100% (perforaciones terminadas el 07 de abril de 2022)

- c) Excavación de 9 calicatas para caracterizar la estratigrafía de los suelos y efectuar ensayos geotécnicos *in situ* y/o de laboratorio a muestras seleccionadas.

Estado: 100% (excavaciones terminadas)

- d) Programa de muestreo y laboratorio de muestras provenientes de la excavación de calicatas:

Estado: 100% (con resultados recibidos)

- e) Programa de muestreo y ensayos de laboratorio de muestras provenientes de sondajes:

Estado: 60%

El detalle de la información y el análisis preliminar de los resultados se desarrolla en el capítulo siguiente.

3.0 RESULTADOS PRELIMINARES AVANCE DE LA ETAPA 2

3.1 Geofísica

3.1.1 Programa de Trabajo

Se estructuró un programa de investigaciones geofísicas con la finalidad de reconocer la profundidad, extensión e identificación de los tipos de materiales que componen el subsuelo, como así también, determinar los valores de resistividades a efectos de estudiar la distribución del agua subterránea o los contenidos de humedad de los materiales que conforman el subsuelo.

La investigación se ejecutó por medio de tres líneas geofísicas, totalizando aproximadamente 17.000 metros de investigación, que se extendieron transversalmente al valle, es decir, en dirección aproximada norte-sur, desde el sector de la Ruta 5 por el norte hasta la quebrada San Cristóbal por el sur (Figura 3-1).

La disposición de las líneas geofísicas se muestra en la Figura 3-1; cabe señalar que el trazado mostrado en la figura es aproximado pues corresponde a un promedio de los 3 tendidos topográficos paralelos levantados para investigación (Refracción sísmica/MASW, TEM y NanoTEM). Las características de las exploraciones geofísicas tales como el identificador de cada línea, el tipo de prospección, las coordenadas iniciales y finales de los vértices y la longitud de cada perfil se muestran la Tabla 3-1.



Figura 3-1. Ubicaciones de las exploraciones geofísicas

Tabla 3-1. Características de los perfiles geofísicos

| Línea ID. | Vértice Inicial No. | Coordenadas UTM WGS84 | | Vértice Final No. | Coordenadas UTM WGS84 | | Longitud (m) |
|--------------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------|-------------------------|-----------------------|--------------|-----------------|
| | | m E | m S | | m E | m S | |
| | | Inicio | | Término | | | |
| Refracción Sísmica/MASW | | | | | | | |
| L1 | V1 | 399.448,00 | 7.409.993,00 | V2 | 400.730,00 | 7.408.397,00 | 2.047 |
| L2 | V1 | 401.441,00 | 7.407.092,00 | V2 | 401.141,00 | 7.404.650,00 | 2.460 |
| L3 | V1 | 393.365,00 | 7.406.377,00 | V2 | 393.466,00 | 7.404.980,00 | 1.401 |
| NanoTEM | | | | | | | |
| L1 | V1 | 400.775,00 | 7.408.306,00 | V2 | 399.522,00 | 7.409.895,00 | 2.024 |
| L2 | V1 | 401.148,00 | 7.404.757,00 | V2 | 401.445,00 | 7.407.147,00 | 2.408 |
| L3 | V1 | 393.463,00 | 7.404.993,00 | V2 | 393.360,00 | 7.406.317,00 | 1.328 |
| TEM | | | | | | | |
| L1 | V1 | 400.740,00 | 7.408.353,00 | V2 | 399.498,00 | 7.409.891,00 | 1.977 |
| L2 | V1 | 401.163,00 | 7.404.790,00 | V2 | 401.425,00 | 7.406.955,00 | 2.181 |
| L3 | V1 | 393.465,00 | 7.405.011,00 | V2 | 393.402,00 | 7.406.291,00 | 1.282 |

Longitud MASW = 5.908 m
 Longitud NanoTEM = 5.760 m
 Longitud TEM = 5.439 m
 17.107 m

El trabajo en terreno para la refracción sísmica y MASW lo realizó la empresa Geodatos entre los días 11 y 31 de enero de 2022, en tanto que las medidas geo-eléctricas fueron hechas entre los días 02 y 06 de febrero.

3.1.2 Métodos Empleados

3.1.2.1. Refracción Sísmica

Con esta técnica se genera una onda sísmica expansiva que recorre el subsuelo refractándose en las interfaces de los estratos y en la roca basal, y se registra la respuesta del subsuelo a esta perturbación, en términos de los tiempos de recorrido de la onda directa y de las ondas refractadas. El análisis de los datos permite calcular las velocidades longitudinales (V_p) de los diferentes materiales (estratos) que las ondas recorren.

La interpretación de los datos de refracción tiene algunas limitantes, como, por ejemplo, que la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en los diferentes estratos debe

ser creciente con la profundidad. Una capa intercalada de baja velocidad no es detectada y distorsiona los resultados de los restantes estratos en profundidad. Esta condición, a la luz de los resultados obtenidos por la perforación de sondajes, en general se cumple. Adicionalmente, otra limitante es que los estratos deben tener espesores no pequeños para lograr un buen contraste de velocidad, como también, capas de poco contraste de velocidad necesitan un espesor importante para ser diferenciadas.

3.1.2.2. MASW

El método sísmico MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) es una técnica que proporciona una caracterización simplificada de las propiedades elásticas de rocas y sedimentos. El método permite obtener modelos de velocidades de ondas de corte (ondas S o Vs), hasta una profundidad que depende del largo de los tendidos sísmicos, separación y frecuencia de los geófonos, así como también del contenido de frecuencias que se visualicen claramente en el modo fundamental al momento del picado de la curva de dispersión.

Combinando este método con refracción convencional, es posible calcular los módulos de elasticidad, ya que se conocen las velocidades de propagación de ondas P (V_p) y S (V_s). Dentro de las principales ventajas de MASW es posible mencionar que se puede detectar y resolver estratos de baja velocidad subyaciendo a estratos de mayor velocidad no necesariamente velocidades en orden estrictamente crecientes a diferencia de la técnica de refracción sísmica, en este caso, apropiado para la estratigrafía de las Gravas de Atacama, unidad litoestratigráfica que cubre gran parte del valle. Ocasionalmente se pueden hacer correlaciones con el índice SPT, RQD u otros ensayos in situ en suelos y rocas.

En virtud de las características que proporciona la técnica de MASW combinada con la refracción convencional, es que se privilegió su uso para evaluar la estratigrafía del área estudiada.

3.1.2.3. TEM y NanoTEM

TEM es un método electromagnético inductivo en el dominio del tiempo. Mediante espiras metálicas instaladas en el suelo se generan corrientes de conducción en el subsuelo y se mide el campo magnético transiente producido por el decaimiento de

estas corrientes al detener la transmisión. Este proceso se repite usando corrientes del tipo “positiva-nula-negativa-nula”, con frecuencias (de ‘repetición’) que usualmente varían entre 0,5 y 32 Hz, con paso binario, en el TEM normal.

En el modo de NanoTEM se usan las frecuencias de 32 y 64 Hz mediante circuitos electrónicos de muy alta velocidad que permiten muestrear las curvas transientes con mayor detalle. Con esto se logra una mejor resolución de la estructura geoelectrica más somera.

La corriente inducida se distribuye por difusión y su comportamiento depende de la resistividad, tamaño y forma de las estructuras geoelectricas.

Importante resulta destacar que al ser el TEM una técnica inductiva, evita el problema que enfrentan los métodos galvánicos al intentar inyectar corriente directamente al subsuelo en terrenos de muy alta resistencia de contacto, que es el caso del área de estudio, puesto que las costras salinas secas superficiales (caliche) son altamente resistivas.

Con NanoTEM se obtienen resistividades del terreno hasta 70 a 80 m de profundidad. Con los sondeos TEM el alcance en profundidad fue de 200 a 250 m.

3.1.3 Resultados

Originalmente se había planteado realizar una tomografía eléctrica, no obstante, la alta resistencia eléctrica del terreno superficial, con valores mayores a 1 Mega Ohm, no permitieron hacer este tipo de medición, ante la imposibilidad de inyectar corriente al terreno, por lo que finalmente se midió resistividad aplicando los métodos NanoTEM y TEM. Esto constituye, per se, un primer dato de la exploración.

A continuación, se resumen los principales resultados de las interpretaciones geofísicas contenidas en el informe geofísico, el cual se adjunta íntegramente en el Anexo A.

3.1.3.1. Refracción sísmica (Vp)

Los resultados del proceso de refracción sísmica se presentan en secciones geosísmicas con una profundidad máxima de investigación de alrededor de 20 metros, siendo

definidos dominios geosísmicos que representan claramente 2 unidades características de acuerdo con sus velocidades de propagación de ondas de compresión (V_p):

- a) Unidad de velocidad media-baja: Corresponde a una unidad superficial que se observa en todos perfiles como un espesor variable, pero de alrededor de 10 metros aproximadamente, y una $V_p = 1.500$ m/s. Este dominio se interpreta como Sedimentos de baja a regular consolidación.
- b) Unidad de velocidad media-alta: Este segundo estrato subyace al dominio anteriormente descrito, con $V_p = 2.500$ m/s. Este dominio se interpreta como sedimentos de regular a alta consolidación.

3.1.3.2. Resultados MASW (V_s)

Las secciones de velocidades de ondas de corte V_s alcanzan para este proyecto profundidades de investigación de alrededor de 175 m. Con los resultados del método MASW se distinguen básicamente tres unidades geo-sísmicas:

- a) Unidad somera: Con $900 < V_s < 1.500$ m/s y una potencia variable entre 15 y 60 metros. Esta unidad correspondería una zona de sedimentos de regular consolidación.
- b) Unidad de velocidad media-alta: Con $1.500 < V_s < 2.500$ m/s y un espesor variable entre 10 y 30 metros. Se interpreta como sedimentos consolidados y/o roca alterada/fracturada.
- c) Unidad de Alta Velocidad: Con $V_s > 2.500$ m/s y se localiza a partir de los 60 a 80 metros de profundidad aproximadamente. Ha sido interpretado como roca de basamento.

3.1.3.3. Resultados NanoTEM y TEM

Los resultados obtenidos de las mediciones de TEM y NanoTEM indican que el relleno sedimentario tiene un espesor máximo de aproximadamente 80 metros, por lo que las mediciones de TEM, que están orientadas a profundidades de hasta 300 metros, no aportan a la definición de la litología del relleno. Por otro lado, los resultados de las

mediciones de NanoTEM permiten una buena definición estratigráfica del relleno hasta su contacto con la roca. En la interpretación se pueden apreciar cinco unidades geoelectricas principales, según el contraste de resistividades laterales y en profundidad:

- a) Unidad superficial: Esta unidad se encuentra como horizonte superficial en todas las estaciones con un espesor promedio variable entre 20 y 40 metros. Los valores de resistividad registrados son superiores a 200 Ohm-m aproximadamente y se ha interpretado como sedimentos gruesos a medios y secos.
- b) Unidad de baja resistividad: Esta unidad se encuentra subyaciendo a la unidad superficial en distintos sectores de todos los perfiles de resistividad. Se caracteriza por poseer una resistividad inferior a 15 ohm-m aproximadamente y su techo se ubica a una profundidad variable entre 20 y 40 metros aproximadamente. Posee un espesor entre 20 y 40 metros y se ha interpretado como sedimentos medios a finos, húmedos o saturados.
- c) Unidad de media resistividad: Esta unidad se encuentra subyaciendo a la unidad superficial en distintos sectores de todos los perfiles de resistividad. Se caracteriza por poseer una resistividad entre 10 y 25 ohm-m aproximadamente y su techo se ubica a una profundidad variable entre 20 y 40 metros aproximadamente. Posee un espesor variable entre 20 y 80 metros y se ha interpretado como sedimentos gruesos a medios, húmedos.
- d) Unidad de resistividad media a alta: Se detecta en todas las estaciones con su techo a una profundidad variable entre 20 y 60 m. Su valor de resistividad es variable entre 40 y 100 ohm-m y ha sido interpretado como roca fracturada.
- e) Unidad resistiva profunda: Se detecta en todas las estaciones con su techo a una profundidad variable entre 50 y 80 m. Su valor de resistividad es superior a 100 ohm-m y ha sido interpretado como roca de basamento o roca sana.

Los resultados geofísicos generales mencionados corresponden a respuestas geosísmicas y geo-eléctricas que pueden ser asociadas a diversos materiales constituyentes del subsuelo, o bien, a un mismo material que presenta diferentes condiciones (grado de consolidación, granulometría, alteración, fracturamiento, meteorización, etc.), por lo que necesariamente estas interpretaciones de los resultados deben ser aún "calibrados" con la información proveniente de los sondajes.

En lo particular, los perfiles de velocidad de onda de corte Vs muestra paleo relieves negativos (“valles”) en sectores donde actualmente hay relieves relativamente positivos, los que pueden relacionarse con antiguas vías activas de escurrimiento de aguas.

En línea con lo anterior, interesante resulta destacar que los perfiles TEM/NanoTEM no solo muestran las principales unidades estratigráficas señaladas anteriormente, una costra de caliche superficial, un sector subyacente de relativamente bajas resistividades para, en profundidad, retomar las altas resistividades, sino que en todos los perfiles se evidencian, de manera dispersa y frecuente, sectores de muy bajas resistividades, en general <10 ohm-m y a menudo incluso <5 ohm-m, lo que indudablemente estaría representando la presencia de agua o al menos de sectores saturados. Estos sectores están ubicados dentro de la segunda capa estratigráfica y normalmente inmediatamente debajo de la capa superficial. Como referencia se pueden consultar las Figuras NT1, NT2 y NT3 del Anexo A. En base a lo anterior, en la Figura 3-2 se muestra una planta esquemática donde se ubican estos sectores subsuperficiales, proyectados a la superficie, de muy bajas resistividades.



Figura 3-2. "Puntos calientes" de muy bajas resistividades

3.2 Calicatas

3.2.1 Programa de Trabajo

El objetivo de estas excavaciones es caracterizar la estratigrafía de los suelos y efectuar ensayos geotécnicos *in situ* y de laboratorio a muestras seleccionadas.

Se excavaron en total 9 calicatas. Las coordenadas, elevaciones y profundidades se muestran en la Tabla 3-2 y sus ubicaciones en la Figura 3-3.

La nomenclatura de las calicatas propuestas corresponde a:

- CLA = Calicata en la quebrada Los Arrieros
- CSC = Calicata en la quebrada San Cristóbal
- D = Margen derecho de la quebrada
- I = Margen izquierdo de la quebrada
- I (D) = Programada en el margen izquierdo pero excavada en el derecho

En el Anexo B se adjuntan todos los registros geológico-geotécnicos de cada calicata, y en el Anexo C, los resultados de los ensayos de densidad in situ mediante el método del cono de arena.

En cada calicata se realizó una descripción de la estratigrafía incluyendo el fotografiado de las paredes con escala de colores y regleta graduada, la ejecución de ensayos in situ en calicatas (densidad por el método del cono de arena) y el muestreo de los horizontes de suelos representativos para hacer ensayos de laboratorio.

Tabla 3-2. Ubicaciones de las calicatas

| Calicatas No. | Coordenadas UTM WGS84 | | Elevación [m s.n.m.] | Profundidad [m] |
|------------------|-----------------------|---------|-------------------------|--------------------|
| | m S | m E | | |
| CLA-02-I | 7.406.077 | 392.043 | 808,79 | 3,2 |
| CLA-04-I | 7.406.094 | 392.825 | 800,48 | 3,8 |
| CLA-05-D | 7.406.534 | 393.108 | 811,78 | 2,1 |
| CLA-06-I | 7.405.883 | 393.301 | 833,63 | 3,3 |
| CLA-07-D | 7.406.855 | 394.105 | 818,86 | 3,8 |
| CLA-09-I | 7.407.269 | 396.100 | 827,84 | 1,3 |
| CLA-10-D | 7.409.760 | 398.911 | 859,70 | 3,2 |
| CSC-01-D | 7.405.552 | 396.473 | 852,43 | 3,6 |
| CSC-02-I (D) | 7.406.315 | 400.879 | 893,00 | 2,8 |

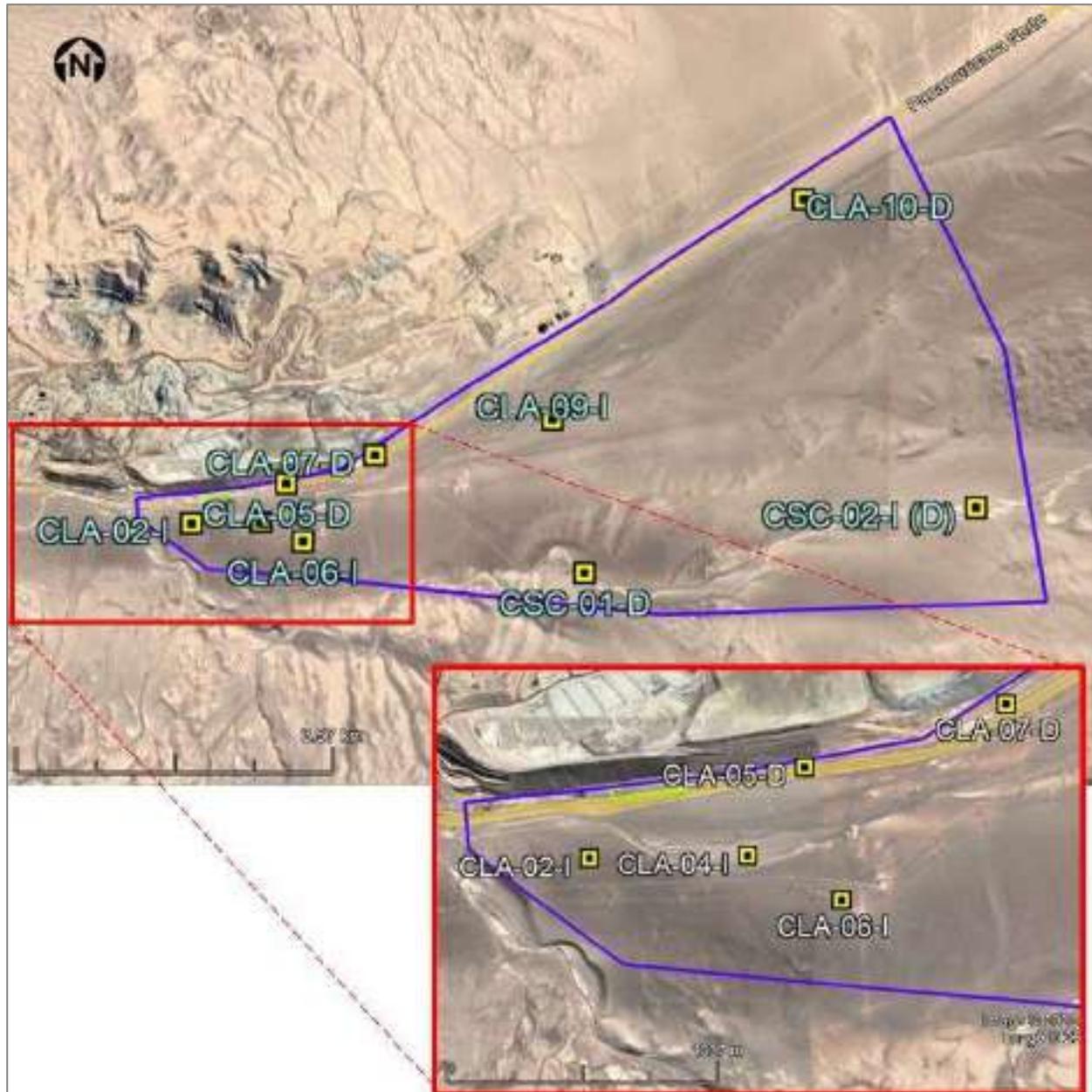


Figura 3-3. Ubicaciones de las calicatas geotécnicas

3.2.2 Descripción de los suelos

Se excavaron un total de 9 calicatas, de las cuales 7 se ubicaron en la quebrada Los Arrieros (calicatas CLA) y 2 en la quebrada San Cristóbal (calicatas CSC). Es importante mencionar que al momento de ejecutar las excavaciones no había escurrimiento superficial de agua.

En la quebrada Los Arrieros, las profundidades de las calicatas variaron entre 1,30 m y 3,8 m. La profundidad promedio fue de 2,90 m; sin embargo, la mayoría sobrepasó los 3,0 m de profundidad, reconociéndose entre 1 y 3 horizontes o estratos con variada potencia (espesor), en su mayoría de origen aluvial. En general, en todas las calicatas se registró un primer estrato con un espesor promedio de 1,6 m compuesto por arena limosa, contenido salino visible y con una cementación variable de no cementado a fuerte y compacidad media a alta, lo que dificultó la profundización de las calicatas. El segundo estrato, identificado en las calicatas ubicadas al sureste (CLA-02-I y CLA-06-I), está formado por gravas mal gradada a grava limosa, con cementación media a fuerte, con sales visibles y alta compacidad. En las calicatas ubicadas al noreste no se identificó claramente este segundo estrato, lo que podría indicar que las gravas podrían eventualmente encontrarse a una profundidad mayor. La calicata CLA-04-I es la única formada por 3 estratos de gravas con diferentes contenidos de limos y sin cementación y sales visibles en los metros superficiales; sólo a partir de los 2,8 m se encuentra con fuerte cementación. Los finos identificados no presentan plasticidad.

En la quebrada San Cristóbal se excavaron 2 calicatas, ubicadas una en la margen derecha del cauce (sin escurrimiento superficial) y una en la margen izquierda. Las profundidades de las calicatas fueron de 3,6 m para la CSC-01-D y 2,8 m para la CSC-02-I (D). Esta última excavación estaba proyectada en la margen izquierda (CSC-02-I), pero por problemas de acceso se ejecutó en la margen derecha de la quebrada. En ambas calicatas CSC se registraron dos estratos. El más superficial, con una potencia promedio de 0,35 m, está compuesto por arena limosa con contenido salino visible solo en la CSC-01-D, no cementado y compacidad baja a media. El segundo y más profundo de los estratos, está formado por gravas mal gradadas (y arenas con gravas), con cementación baja a fuerte aumentando en profundidad, sin sales visibles y una alta compacidad, característica que también dificultó la profundización de las calicatas. Los finos identificados no presentan plasticidad.

Las principales características de las 9 calicatas excavadas se muestran en la Tabla 3-3 (con indicación ✓ donde se observó la condición señalada) y los registros correspondientes (loggeos) se encuentran en el Anexo B.

Tabla 3-3. Características principales de las calicatas

| Calicata [ID] | Profundidad [m] | Horizonte [Nro.] | Desde [m] | Hasta [m] | Clasificación USCS | Espesor [m] | Salas visibles | Cementación |
|---------------|-----------------|------------------|-----------|-----------|--------------------|-------------|----------------|-------------|
| CLA-02-I | 3,2 | 2 | 0,0 | 1,0 | SM | 1,0 | ✓ | n/a |
| | | | 1,0 | 3,2 | GP-GM | 2,2 | ✓ | ✓ |
| CLA-04-I | 3,8 | 2 | 0,0 | 1,0 | GM | 1,0 | n/a | n/a |
| | | | 1,0 | 2,8 | GP-GM | 1,8 | n/a | n/a |
| | | | 2,8 | 3,8 | GP-GM | 1,0 | ✓ | ✓ |
| CLA-05-D | 2,1 | 1 | 0,0 | 2,1 | SM | 2,1 | ✓ | ✓ |
| CLA-06-I | 3,3 | 2 | 0,0 | 0,9 | SM | 0,9 | ✓ | n/a |
| | | | 0,9 | 3,3 | GM | 2,4 | ✓ | ✓ |
| CLA-07-D | 3,8 | 2 | 0,0 | 1,4 | SM | 1,4 | ✓ | n/a |
| | | | 1,4 | 3,8 | SM | 2,4 | ✓ | ✓ |
| CLA-09-I | 1,3 | 1 | 0,0 | 1,3 | SM | 1,3 | ✓ | ✓ |
| CLA-10-D | 3,2 | 1 | 0,0 | 3,2 | SM | 3,2 | ✓ | ✓ |
| CSC-01-D | 3,6 | 2 | 0,0 | 0,4 | SM | 0,4 | ✓ | n/a |
| | | | 0,4 | 3,6 | GP | 3,2 | n/a | ✓ |
| CSC-02-I (D) | 2,8 | 2 | 0,0 | 0,3 | SM | 0,3 | n/a | n/a |
| | | | 0,3 | 2,8 | GP-GM | 2,2 | n/a | ✓ |

3.2.3 Resultados de Laboratorio

En esta sección se resumen los principales resultados del programa de laboratorio realizado sobre muestras seleccionadas de las nueve calicatas excavadas, el cual se presenta en la Tabla 3-4. El informe completo (Ref. 7) se incluye en el Anexo D.

Tabla 3-4. Programa de laboratorio en muestras de calicatas

| ID | Clasif. UCSC | IP | Densidad Partículas | Contenido Humedad | Compactación Proctor | Cloruros y Sulfatos | Hinchamiento | Difracción Rx |
|--------------|--------------|----|---------------------|-------------------|----------------------|---------------------|--------------|---------------|
| CLA-02-I | Sí | Sí | Sí | Sí | No | No | No | No |
| CLA-04-I | Sí | Sí | Sí | Sí | No | No | No | No |
| CLA-05-D | Sí | Sí | Sí | Sí | No | No | No | No |
| CLA-06-I | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | No |
| CLA-07-D | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | No |
| CLA-09-I | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| CLA-10-D | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| CSC-01-D | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| CSC-02-I (D) | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |

3.2.3.1. Clasificación de los suelos e índice de plasticidad (IP)

Los principales resultados respecto de la clasificación granulométrica de los suelos (USCS), y los índices de plasticidad (IP) se muestran en la Tabla 3-5 y se pueden resumir en los siguientes puntos:

- a) Todas las muestras de suelo clasifican como arenas limosas (SM).
- b) El contenido de arenas, su principal componente granulométrico, varía de 51% a 80%, con un promedio de 62%
- c) El contenido de finos varía entre un 9% y un 35%, con un promedio de 20%
- d) El contenido de gravas varía de 4% a 33%, con un promedio de 18%
- e) El contenido de humedad es bajo (<3%); sólo un caso es cercano al 7% (calicata CLA-09-I)
- f) Todos los suelos son no plásticos.

Tabla 3-5. Clasificación USCS e Índice de Plasticidad

| ID Pozo | Muestra | | Clasificación USCS | | | | | | | | | |
|--------------|---------|-------|--------------------|-------------------------------------|-----|----|----|----|--------|--------|-------|--|
| | Desde | Hasta | Símbolo | Nombre | w | LL | PL | PI | Gravas | Arenas | Finos | |
| | | | | | % | % | % | % | % | % | % | |
| CLA-02-I | 1,00 | 3,20 | (SM)g | Arena limosa con grava | 0,6 | 0 | 0 | NP | 28 | 51 | 21 | |
| CLA-04-I | 1,00 | 2,80 | (SW-SM)g | Arena bien gradada con limo y grava | - | 0 | 0 | NP | 31 | 61 | 9 | |
| CLA-05-D | 0,00 | 2,10 | SM | Arena limosa | 1,6 | 0 | 0 | NP | 7 | 58 | 35 | |
| CLA-06-I | 0,90 | 3,30 | (SM)g | Arena limosa con grava | 1,3 | 0 | 0 | NP | 25 | 51 | 24 | |
| CLA-07-D | 0,00 | 1,40 | SM | Arena limosa | - | 0 | 0 | NP | 5 | 80 | 15 | |
| CLA-09-I | 0,00 | 1,30 | SM | Arena limosa | 7,1 | 0 | 0 | NP | 6 | 68 | 27 | |
| CLA-10-D | 0,00 | 3,20 | SM | Arena limosa | - | 0 | 0 | NP | 4 | 69 | 27 | |
| CSC-01-D | 0,40 | 3,60 | (SW-SM)g | Arena bien gradada con limo y grava | 0,9 | 0 | 0 | NP | 33 | 56 | 11 | |
| CSC-02-I (D) | 0,00 | 2,80 | (SM)g | Arena limosa con grava | 2,6 | 0 | 0 | NP | 23 | 64 | 13 | |

3.2.3.2. Compactación Proctor

El ensayo Compactación en Laboratorio con Esfuerzo Modificado o Proctor Modificado construye una curva que permite determinar de un modo gráfico y sencillo, cual es la densidad seca o peso unitario seco que se puede alcanzar para un determinado valor de humedad o contenido de agua óptimo estándar. Los resultados resumidos se muestran en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Proctor Modificado

| Calicata [ID] | Peso unitario seco máximo estándar [KN/m ³] | Contenido de agua óptimo estándar [%] |
|------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| CLA-06-I | 20 | 8 |
| CLA-07-D | 9 | 9 |
| CLA-09-I | 17 | 19 |
| CLA-10-D | 19 | 12 |
| CSC-01-D | 22 | 6 |
| CSC-02-I (D) | 21 | 6 |

De la tabla anterior, se observa una distinta respuesta entre las muestras extraídas en la quebrada Los Arrieros (CLA) respecto de las extraídas en la quebrada San Cristóbal (CSC). Así, para la quebrada Los Arrieros, el peso unitario seco máximo estándar es de 16 KN/m³ para un contenido de agua óptimo estándar de 12%, en tanto que para la quebrada San Cristóbal, el peso unitario seco máximo estándar es de 21 KN/m³ para un contenido de agua óptimo estándar de sólo 6%. Esto significa que, en términos muy generales, que los valores de la quebrada San Cristóbal corresponderían a un terreno más bien compuesto por gravas, en tanto que los de la quebrada Los Arrieros compuesto por arenas, ambos con diferentes respuestas a sollicitaciones estructurales.

3.2.3.3. Contenido de Sales

El contenido de sales determinado en laboratorio se refiere tanto a cloruros como a sulfatos. En la Tabla 3-7 se adjuntan los resultados obtenidos para las 6 calicatas donde se realizó este ensayo, a partir de los cuales se pueden extraer las siguientes consideraciones:

- a) El mínimo contenido de sales es un 2,6% y el máximo un 11,2%, con un promedio cercano al 6%.
- b) En todos los ensayos el contenido de cloruros es mayor que el contenido de sulfatos.
- c) Los valores más bajos de contenidos de sales, en las calicatas donde se hizo este ensayo, corresponden a las calicatas CLA-07-D y CLA-09-I (quebrada Los Arrieros) y CSC-02-I (D) (quebrada San Cristóbal).

Tabla 3-7. Contenido de sales

| Calicata [ID] | Contenido Sales Totales [%] |
|------------------|--------------------------------|
| CLA-06-I | 6,8 |
| CLA-07-D | 3,6 |
| CLA-09-I | 3,0 |
| CLA-10-D | 11,2 |
| CSC-01-D | 8,4 |
| CSC-02-I (D) | 2,6 |

3.2.3.4. Hinchamiento Libre o Potencial de Expansión

El ensayo de hinchamiento libre o potencial de expansión entrega la magnitud de la actividad potencial de suelo expansivo y es aplicable a suelos con contenido de arcillas.

En la Tabla 3-8 se adjuntan los resultados obtenidos, a partir de los cuales se puede extraer la conclusión evidente y que es que las arcillas no exhiben ninguna capacidad para expandirse, aspecto que se complementará con los resultados de los análisis de difracción de rayos X que se comentan en la sección siguiente.

Tabla 3-8. Hinchamiento

| Calicata [ID] | Potencial de Expansión [%] |
|------------------|-------------------------------|
| CLA-06-I | Sin expansión |
| CLA-07-D | Muy bajo (<1%) |
| CLA-09-I | Sin expansión |
| CLA-10-D | Sin expansión |
| CSC-01-D | Muy bajo (<1%) |
| CSC-02-I (D) | Sin expansión |

3.2.3.5. Difracción de Rayos X

Los ensayos de difracción de rayos X se realizan específicamente para determinar la mineralogía precisa presente en las muestras.

Estos ensayos comparativos se realizaron en muestras de dos calicatas de la quebrada Los Arrieros (CLA-09-I y CLA-10-D) y dos de la quebrada San Cristóbal (CSC-01-D y CSC-02-I (D)).

En la Tabla 3-9 se presentan los resultados, los cuales han sido agrupados por cada quebrada. Los minerales identificados han sido tabulados de manera porcentualmente descendente para el caso de la quebrada Los Arrieros y así poder facilitar comparaciones entre los resultados de ambas quebradas.

Tabla 3-9. Difracción de rayos X

| Mineralogía | QLA (%) | QSC (%) |
|----------------------|---------|---------|
| Anhidrita | 48 | 1 |
| Halita | 21 | 6 |
| Yeso | 17 | 1 |
| Nitratina | 5 | 0 |
| Laumontita | 3 | 3 |
| Fairchildita | 3 | 0 |
| Cuarzo | 3 | 23 |
| K-Feld (Ortoclasa) | 0 | 25 |
| Plagioclasa (Albita) | 0 | 35 |
| Caolinita | 0 | 3 |
| Hematita | 0 | 3 |
| Montmorillonita | 0 | 0 |
| Calcita | 0 | 0 |

Los principales resultados se exponen a continuación:

- a) Las muestras provenientes de la quebrada Los Arrieros son similares entre sí y diferentes a las dos muestras de la quebrada San Cristóbal, que también son similares entre sí.
- b) El 87% de la mineralogía de las muestras de la quebrada Los Arrieros está compuesta por anhidrita, halita y yeso. Solamente el 8% de estos minerales está presente en las muestras de la quebrada San Cristóbal.
- c) Respecto de estos 3 minerales señalados, la halita es altamente soluble en agua, en tanto que el yeso y la anhidrita presentan una moderada a baja solubilidad. La anhidrita aparece de la misma forma que el yeso (que es el sulfato más común) y frecuentemente están ambos asociados: normalmente estos minerales se desarrollan bajo los depósitos de sal por ser uno de los primeros minerales que cristalizan por la evaporación de aguas salinas. Cabe señalar que el yeso mineralógicamente es una anhidrita hidratada, donde la anhidrita, en su transformación a yeso, aumenta su volumen debido a la absorción de agua.
- d) La halita (NaCl – sal común) es un cloruro de sodio que, por su contenido de sal, hace bajar drásticamente el índice de plasticidad de los suelos, volviéndolos no plásticos, como se confirma en la sección 3.2.3.1. Además, al ser altamente soluble, el ion sodio al hidratarse produce cambios estructurales en las partículas del suelo donde está presente, ya que aumenta 7 veces su volumen. De manera inversa, una vez que el sodio pierde humedad disminuye su volumen atrayendo las partículas finas y ejerciendo una acción cementadora en un proceso de floculación salina.
- e) La nitratina es un nitrato de sodio también soluble, aunque solo se presentó en una de las dos muestras de la quebrada Los Arrieros.
- f) El único mineral que se mantiene en las mismas proporciones en todas las muestras analizadas es la Laumontita, que es un aluminosilicato hidratado de calcio.
- g) Como se señaló, las muestras de la quebrada San Cristóbal son radicalmente diferentes en mineralogía respecto de las muestras de la quebrada Los Arrieros.

En estas muestras, el 82% del contenido mineral se distribuye entre Cuarzo, Feldespato de Potasio (Ortoclasa) y Plagioclasa. Estos 3 minerales son prácticamente inexistentes en las muestras de la quebrada Los Arrieros.

- h) Importante también resulta destacar la inexistencia de Montmorillonita en todas las muestras. La Montmorillonita es una arcilla altamente expansiva y qué, como fue señalado anteriormente, comprueba la inexistencia de arcillas con potencial de expansión según fue determinado por los ensayos de hinchamiento libre.

3.2.3.6. Densidad de Terreno (Cono de Arena)

Aunque estrictamente el ensayo de determinación de la densidad en terreno, llamado también ensayo de cono de arena no es un producto del laboratorio, sino que se realiza directamente dentro de la excavación de cada calicata, se ha preferido incluirlo en esta sección debido a los resultados numéricos que este ensayo aporta.

La campaña de exploraciones consideró la ejecución de ensayos con cono de arena para la determinación de la densidad *in situ* de los materiales expuestos por la excavación de las calicatas.

Para la ejecución de los ensayos de densidad *in situ* se utilizó un cono de arena de 6" de diámetro (15 cm) y arena normalizada bajo la norma NCh 1516. En la Tabla 3-10 se resumen los resultados obtenidos. Los registros en detalle se encuentran en el Anexo C.

Tabla 3-10. Ensayo Cono de arena

| Calicata [Nro.] | Profundidad del ensayo [m] | D.C.H. [gr/cm ³] | D.C.S. (1% W) [gr/cm ³] |
|--------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|
| CLA-04-I | 1,70 | 2,10 | 2,05 |
| CLA-07-D | 1,20 | 1,43 | 1,42 |
| CLA-10-D | 1,50 | 1,81 | 1,80 |

3.3 Sondajes

3.3.1 Programa de Trabajo

La semana del 7 de abril de 2022 fue concluida la perforación del último sondaje geotécnico considerado a perforar según programa en el área de estudio.

En total se perforaron 5 (cinco) sondajes diamantinos (SLMB-01 a SLMB-05) con recuperación de testigos, totalizando 315,80 m de perforación.

La perforación de los sondajes tiene un carácter principalmente geotécnico, que tienen por objeto describir geológica y geotécnicamente la columna de perforación prospectada, muestrear los suelos y/o rocas del valle para la ejecución de diversos ensayos de laboratorio y la ejecución de ensayos geotécnicos (SPT) *in situ* conforme se avanzaba con perforación (profundización) del sondaje. Finalmente, tres de los sondajes tienen el objetivo adicional de calibrar las líneas geofísicas.

Las coordenadas, elevaciones y longitud de los sondajes perforados se muestran en la Tabla 3-11 y sus ubicaciones en la Figura 3-4.

Tabla 3-11. Ubicaciones de los sondajes

| Sondaje No. | Coordenadas UTM WGS84 | | Elevaciones | | Longitud [m] |
|----------------|-----------------------|------------|----------------------|---------------------|-----------------|
| | m S | m E | Collar [m s.n.m.] | Fondo [m s.n.m.] | |
| SLMB-01 | 7.409.783,66 | 399.611,31 | 872,81 | 789,81 | 83,00 |
| SLMB-02 | 7.405.928,78 | 401.296,61 | 899,88 | 824,78 | 75,10 |
| SLMB-03 | 7.405.802,77 | 393.399,04 | 842,30 | 792,30 | 50,00 |
| SLMB-04 | 7.407.500,01 | 396.685,00 | 834,76 | 759,26 | 75,50 |
| SLMB-05 | 7.406.355,40 | 391.768,20 | 791,46 | 759,26 | 32,20 |



Figura 3-4. Ubicaciones de los sondajes geotécnicos

3.3.2 Aspectos Geológicos y Geomorfológicos

3.3.2.1. Unidades Geológicas Generales

De manera resumida, en el distrito minero Mantos Blancos afloran rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas de edad mesozoica (Ref. 8).

Estas rocas corresponden principalmente a rocas volcánicas pertenecientes a la secuencia volcánica de Mantos Blancos (SVMB) y a la Formación La Negra (FLN), las cuales son un relicto de un paleo-arco volcánico desarrollado durante el Jurásico. Estas rocas están atravesadas por cuerpos granodioríticos, monzograníticos y tonalíticos conocidos bajo el nombre de Complejo Plutónico Alibaud-Esperanza (Ref. 9), y cuerpos de rocas intrusivas de algunas decenas de metros que afloran típicamente dentro del yacimiento mismo de Mantos Blancos, denominadas localmente como Pórfido Andesítico y Diorita

(o Andesita Porfídica) y unidades intrusivas que cortan toda la secuencia, que corresponden a diques de composición fundamentalmente diorítica.

En la Figura 3-5 se muestra un perfil geológico general de dirección aproximada Oeste-Este (A-A'), donde se puede observar el contacto relleno sedimentario con el basamento andesítico, apreciándose, además, los importantes espesores de los rellenos sedimentarios ubicados especialmente en el área de estudio y hacia el oriente (rectángulo rojo en dicha figura). También se aprecia claramente la elevación que presenta el fondo del basamento en el sector inmediatamente aguas abajo del área de estudio, lo que se ilustra de mejor manera en el perfil que se muestra en la Figura 3-6.

En base a los resultados de la actual campaña de exploraciones, las unidades litológicas en general son bastante regulares en su extensión areal, lo cual es en suficiencia confirmado por las exploraciones geofísicas.

En efecto, la unidad superficial corresponde normalmente a una costra salina de hasta unos 2 m de profundidad, generalmente menor a un metro, bajo la cual se dispone una unidad estratigráfica que normalmente corresponde a la denominada Gravas de Atacama (GAT), para finalmente alcanzar la roca fundamental de composición andesítica (AND).

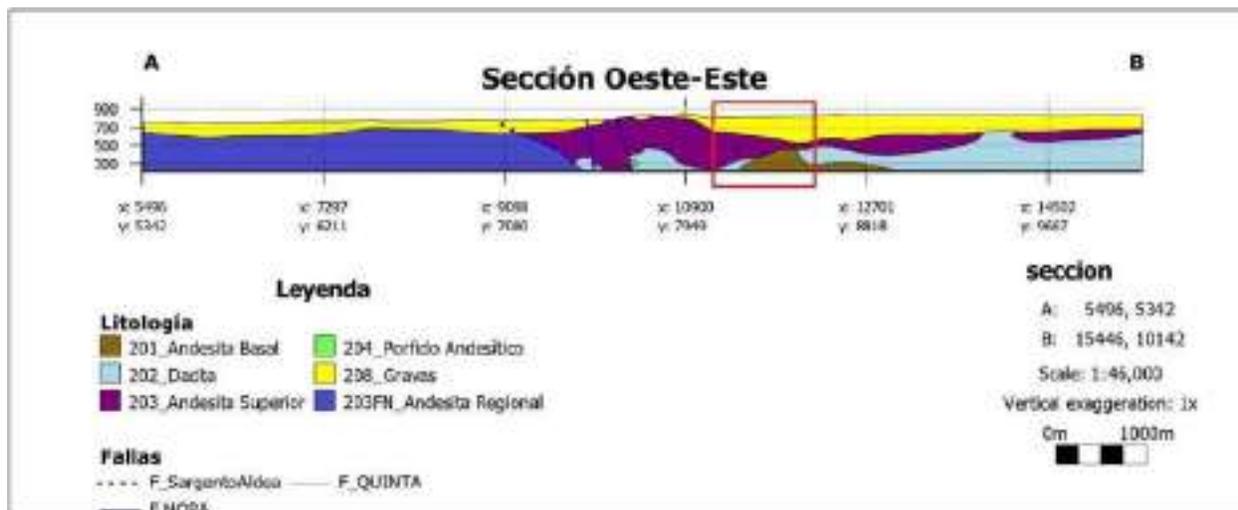


Figura 3-5. Perfil Geológico W-E (mod. de Ref. 10)

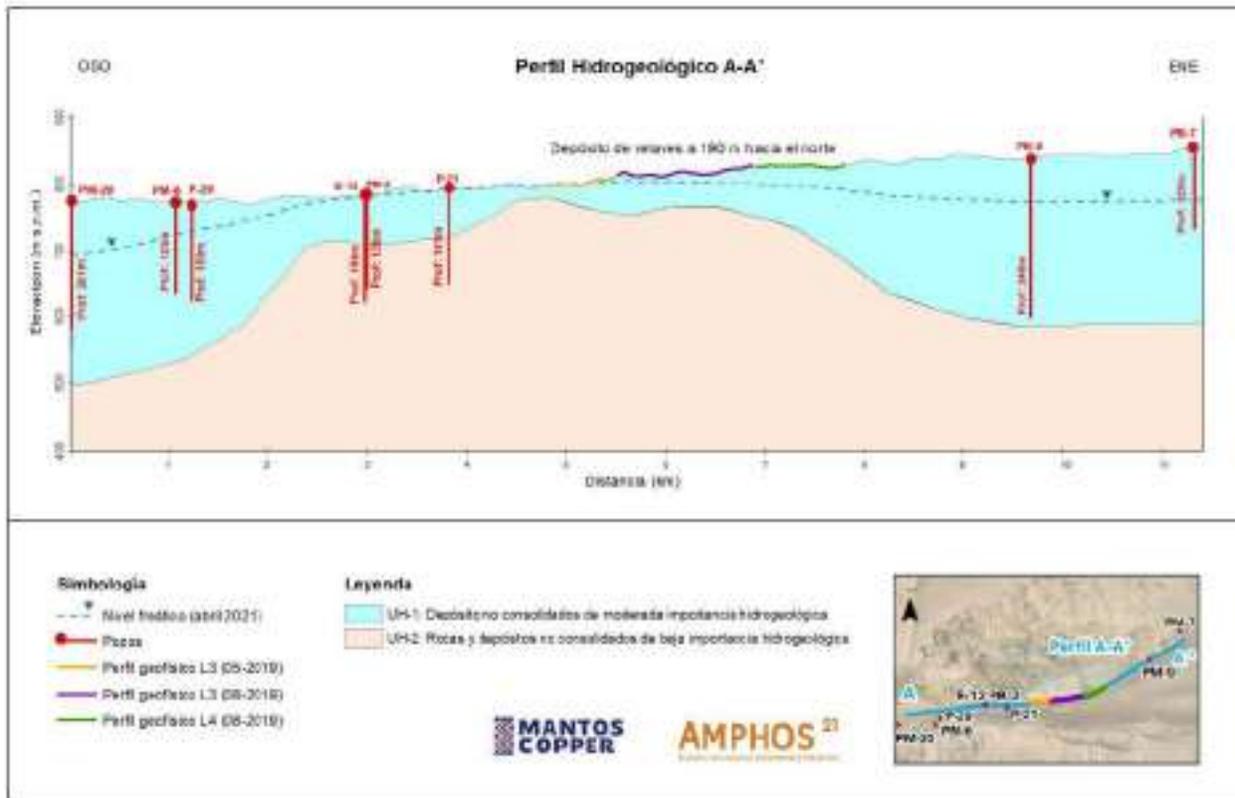


Figura 3-6. Perfil Perfil Hidrogeológico E-W (Ref. 11)

Las Gravas de Atacama (GAT) constituyen una unidad que en parte puede ser considerada como suelo y en parte puede ser considerada como roca (más adelante denominada "pauta roca"), esto en razón a que esta unidad, aunque en rigor geológicamente corresponde a rellenos sedimentarios antiguos, normalmente aumenta su dureza (resistencia) gradual y continuamente con la profundidad. De esta forma, el límite entre suelo y roca en variadas ocasiones es muy difícil de determinar, puesto que no hay un punto exacto (valor de resistencia único) que lo señale, sino que normalmente es un rango de dureza y, por lo tanto, de profundidad. Lo anterior, sin embargo, tiene más implicancias desde el punto de vista geotécnico que desde el punto de vista geológico.

Para efectos de visualización práctica, en el mérito que otorgan las fotografías de las cajas de los testigos de sondajes (que se incluyen en el Anexo E), la columna estratigráfica

para cada uno de los sondajes, a verificar con los resultados de los mapeos una vez se terminen, se puede resumir como sigue:

- Sondaje SLMB-01 (Quebrada Los Arrieros): Con una longitud de 83,00 m, presenta un perfil de suelo hasta los 29,05 m, para luego la unidad GAT exhibir pauta de roca hasta los 46,00 m (826 m s.n.m.), profundidad a la cual se encuentra la andesita que constituye la roca basal.
- Sondaje SLMB-02 (Quebrada San Cristóbal): Con una longitud de 75,10 m, presenta una cubierta de suelo solo en sus 2 m superficiales. Todo el resto del sondaje está conformado por la roca basal, en distintos tipos, variaciones texturales, alteración y meteorización, hasta el término del sondaje.
- Sondaje SLMB-03 (Quebrada Los Arrieros): Con una longitud de 50 m, presenta un perfil de suelo hasta los 28,60 m, para luego pasar a pauta de roca en el resto de la perforación. El perfil de suelo está compuesto por unos 3,2 m de costra salina superficial para luego dar paso a la unidad GAT hasta los 28,60 m. En este tramo, sin embargo, hay varios sectores que pueden ser considerados como roca, pero se ha preferido dejarlo como suelo en consideración a la presencia de otras interestratificaciones que este paquete contiene, algunos estratos claramente sedimentarios arenosos. Como se señaló, a esta profundidad de 28,60 m (813,70 m s.n.m.) se encuentra la roca andesítica basal, la que exhibe diferentes texturas, desde porfídica hasta afanítica, y estados de alteración y oxidación en parte muy avanzados.
- Sondaje SLMB-04 (Quebrada Los Arrieros): Con una longitud de 75,50 m, presenta un perfil de suelo en toda su extensión, hasta el fondo del sondaje (759,26 m s.n.m.). Es el único sondaje que no encontró roca fundamental de los cinco sondajes perforados en el llano. La longitud de este sondaje se calculó para alcanzar la misma elevación del fondo del sondaje SLMB-05, para efectos de correlación.
- Sondaje SLMB-05 [D-CU1-04] (Quebrada Los Arrieros): Con una longitud de 32,20 m, presenta un relleno de suelos de 5,50 m, para luego, dentro de la misma pauta de suelos, pasar a la unidad GAT hasta los 14,40 m (777,06 m s.n.m.), profundidad a la que se encuentra la andesita que constituye la roca basal.

3.3.2.2. Geomorfología

El Distrito Minero Mantos Blancos se ubica en la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa, unos 45 km al noreste de Antofagasta. Se ubica en la base y extremo poniente de una ladera coronada por un cordón rocoso que se despliega hacia el sureste, rematando en una quebrada relativamente amplia, por donde pasa la Ruta 5 Norte.

La faena minera y sus instalaciones se ubican en el extremo poniente de la ladera, en la intersección con el eje del cordón rocoso anteriormente citado y orientado hacia el noreste, desplegando un arco de gran radio de curvatura abierto hacia el sureste (Ref. 12). Esta cresta rocosa, cuya altura máxima es 1.410 m s.n.m., genera otra ladera orientada hacia el poniente y limitada en esta misma dirección, por una quebrada de dirección meridiana, que constituye el límite occidental del área.

Gran parte de la superficie es surcada por quebradas de cursos sinuosos, labradas en sedimentos originados por la meteorización del basamento, ocasionalmente rectilíneos debido a un control geológico estructural, presentando ramificaciones y afluentes, especialmente en el caso de las quebradas mayores. Se trata en general, de quebradas que constituyen un sistema de drenaje consecuente, es decir, que sigue la pendiente natural del terreno.

La costra superficial y sub-superficial salina dura y resistente, corresponde a un material detrítico proveniente de la meteorización del basamento rocoso cementado con sales precipitadas por evaporación de aguas superficiales de períodos húmedos (pluviales) pleistocénicos.

El sistema de drenaje presente corresponde principalmente a la quebrada Los Arrieros (o Salar del Carmen o Los Sacos) y a la quebrada San Cristóbal (también denominada Mantos Blancos), ubicada hacia el sur. La quebrada San Cristóbal, a diferencia de la quebrada Los Arrieros, se labra aguas arriba en afloramientos rocosos. Tras el último aluvión de marzo 2015, fue observado en terreno (Ref. 12) que el flujo de agua principal consecuencia de las precipitaciones se producía en la quebrada de San Cristóbal y no en la quebrada Los Arrieros.

Interesante resulta observar que parte del desarrollo de la actividad minera, como también el trazado de la ruta, es decir, en el sector de los agrietamientos y deformaciones, se ha obrado sobre un meandro de la quebrada Los Arrieros justo antes

de su confluencia con la quebrada San Cristóbal. Este sector, además, presenta, por el mismo motivo, un bajo topográfico suave pero perceptible. Si nos remitimos a la fotografía aérea del año 1955 (Lámina 1 de la Figura 3-7), se aprecia claramente que al menos en la parte central del sector en estudio hay un lineamiento, cuyo trazado se proyecta desde el N-NE y recorre el área en dirección S-SW. Este lineamiento/falla se ha dibujado, como referencia, en las cuatro láminas de la Figura 3-7, pero en la Lámina 4 es donde la correlación con otros elementos estructurales mapeados en la región se hace más evidente. Este lineamiento/falla podría ser fácilmente correlacionable con la reconocida falla Quinta, o alguna de sus ramificaciones, ya que este elemento estructural podría ser asimilable con la paleo morfología (bajos topográficos) observada en algunos perfiles geofísicos, como también en algunas formas de baja resistividad que también muestra la geofísica realizada sobre la ruta en este tramo en estudio (Ref. 3).

Hay que destacar finalmente, que el trazado de la ruta en este sector no sólo ocupa parte de un meandro de la quebrada Los Arrieros y sus respectivos depósitos aluviales, sino que también, depósitos coluviales antiguos (Láminas 1 y 2 de la Figura 3-7) en el sector distal de los conos de deyección provenientes del nor-noreste.

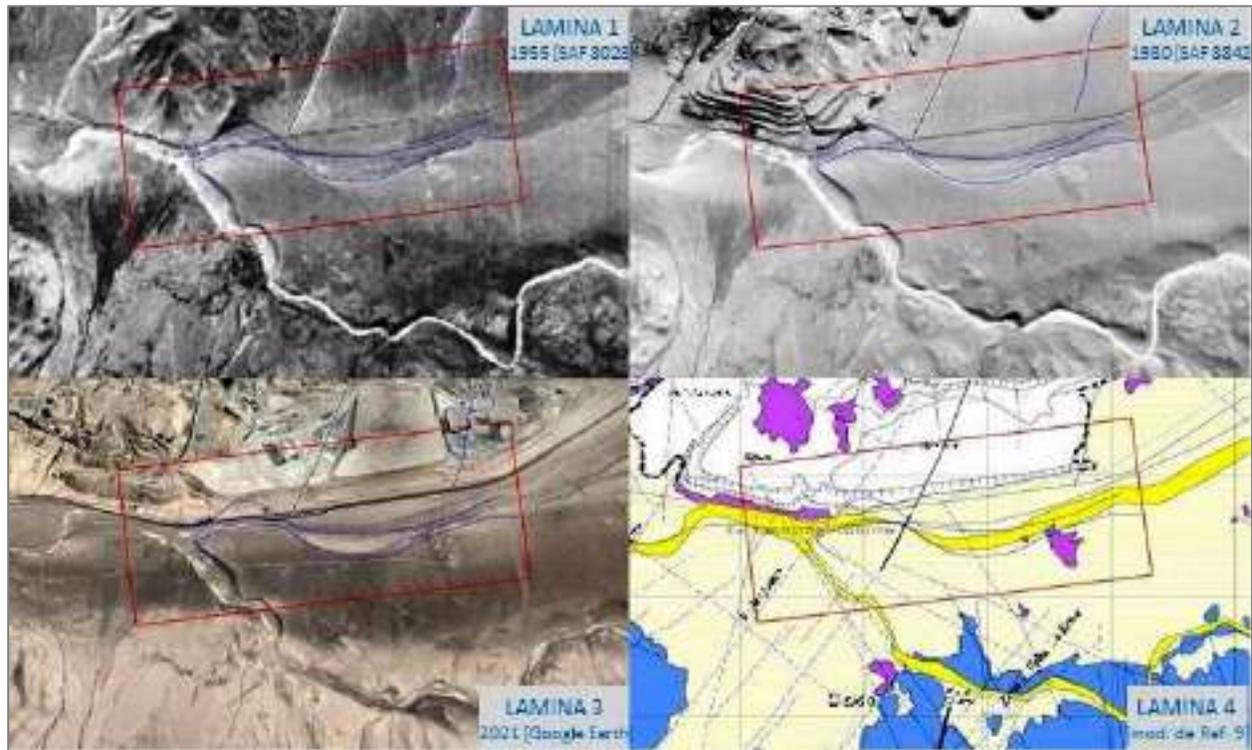


Figura 3-7. Secuencia histórica de imágenes

Como se desprende entonces, el efecto combinado geomorfológico, geológico-estructural y topográfico genera que el estrechamiento que sufre la cuenca en este sector sumado al hecho que el basamento rocoso se alza en su morfología subterránea para alcanzar niveles sub-superficiales, permita, además que los suelos posean características particulares, que la sección por donde debe circular el caudal de agua subterránea se reduzca y, por lo tanto, el nivel freático tienda naturalmente a ascender.

3.3.3 Aspectos Geotécnicos

A la fecha de la emisión del presente informe, el programa de laboratorio de ensayos sobre muestras de testigos seleccionadas está actualmente en desarrollo, con resultados pendientes.

El programa de laboratorio para las muestras de sondajes incluye:

- Clasificación UCSC
- Sales Totales
- Cloruros y Sulfatos
- Hinchamiento
- Difracción Rx
- Contenido de Humedad
- Triaxial CID
- Triaxial CIU
- Colapso
- Proctor
- Permeabilidad

3.3.3.1. Ensayos de Penetración Estándar (SPT)

El ensayo de penetración estándar o SPT (*Standard Penetration Test*), constituye uno de los ensayos o pruebas más utilizados durante la perforación de sondajes geotécnicos, realizándose a intervalos en el fondo de la perforación en la medida que ésta avanza. La metodología por la cual se hinca un saca-muestras (cuchara partida) en el subsuelo, es sin duda la más extendida en la disciplina geotécnica, para la determinación in situ de algunas propiedades ingenieriles de los suelos.

Este ensayo se ejecuta normalmente en terrenos granulares, finos o arenosos (gravas finas, arenas, limos, arcillas y sus mezclas). Cuando el terreno contiene gravas o bloques, o tienen un alto grado de dureza, la cuchara o muestreador no puede hincarse, dando lugar al rechazo de la penetración (uno de los tres criterios de rechazo que establece la norma).

Para este proyecto se consideró un programa de ejecución de ensayos de penetración estándar en los primeros 20 m de cada sondaje a intervalos de 50 cm cada uno. En el Anexo F se incluyen los resultados de los ensayos ejecutados.

En total, considerando los sondajes SLMB-01 a SLMB-05, se ejecutaron 143 ensayos SPT, de los cuales, solo en solo 6 ocasiones fue posible obtener un valor-N (NSPT), y en todos ellos, con NSPT > 40 y dentro de los primeros 6 m de perforación. Sólo en un caso se

obtuvo un valor-N a los 11 m de profundidad. En el resto de los ensayos, 137 en total, se aplicaron los siguientes criterios de rechazo:

- 71 ensayos con rechazo por mayor a 50 golpes por incremento (N_1 , N_2 o N_3)
- 65 ensayos por no presentar avances en 10 golpes consecutivos dentro de cualquiera de los incrementos (N_1 , N_2 o N_3)
- 1 ensayo por sumar 100 golpes en la suma de los incrementos ($N_1+N_2+N_3$)

De lo anterior se colige que de los pocos N_{SPT} obtenidos, el suelo clasifica como de una densidad relativa clasificada como densa a muy densa, lo que, sumado a los criterios de rechazo, confirma que el escenario, en general a partir de los 12 m de profundidad, es que todos los valores N_{SPT} dan rechazo, es decir, se corresponde con un sustrato muy denso (duro).

3.3.3.2. Calidad Geotécnica (RMR)

En proceso de análisis de la información.

3.3.4 **Condición de Niveles de Agua**

Los sondajes diamantinos necesitan de agua para el proceso de perforación, cuya inyección en volumen y presión, se hace controladamente al objeto de detectar la eventual presencia de agua subterránea.

En los sondajes SLMB-01, SLMB-03, SLMB-04 y SLMB-05, todos ellos ubicados en la quebrada Los Arrieros, no se observaron cambios evidentes en las dos variables señaladas, durante el proceso de perforación.

Sin embargo, el sondaje SLMB-02, perforado en la quebrada San Cristóbal, perforó un acuífero en un medio fracturado (roca), aproximadamente a los 52,40 m de profundidad, lo que provocó una surgencia de agua por la boca del pozo, es decir, agua en contrapresión de acuífero confinado. Aunque se requiere de información sistemática en un período de tiempo y consciente que es un dato puntual, como dato misceláneo el aforo del agua surgente fue de aproximadamente 1,3 l/min, caudal que se mantuvo por

aproximadamente 1 día. Una vez se siguió profundizando el pozo hasta la profundidad final de 75,10 m, el caudal fue disminuyendo y el nivel de agua descendiendo; en la actualidad presenta una tendencia a la estabilización, alrededor de la profundidad de 45 m.

El nivel de aguas de los pozos SLMB-01 y SLMB-02 estaría alojado dentro de un medio fracturado, en tanto que en los restantes pozos lo hace en la unidad sedimentaria superior.

4.0 RESUMEN Y CONCLUSIONES

4.1 Resumen

4.1.1 De las Exploraciones y Programa de Laboratorio

A la fecha, el estado de avance del estudio es el siguiente:

- La campaña de exploraciones en terreno correspondiente a la Etapa 2 y compuesta por la ejecución de levantamientos geofísicos, la excavación de calicatas y la perforación de sondajes geotécnicos ha sido concluida el día 7 de abril de 2022 en su totalidad.
- En total se excavaron 9 calicatas, se perforaron 5 sondajes diamantinos (DDH) con ensayos SPT, totalizando 315,8 m de perforaciones, y se levantaron 5.090 m de perfiles geoelectricos TEM y NanoTEM y 6.030 m de Refracción Sísmica (Vp) y MASW (ondas de corte (Vs). Como algunos de los perfiles geofísicos son sobreimpuestos, el total de perfiles interpretados corresponde aproximadamente a 17 mil metros lineales.
- El programa de 58 ensayos de laboratorio para las calicatas está terminado y los resultados recibidos; el programa de muestreo y ensayos en sondajes está avanzado en un 60%. Según el cronograma entregado por el laboratorio, durante los próximos días se empezarán a emitir los primeros resultados (a la fecha se tienen 47 ensayos solicitados correspondientes a 3 de los 5 sondajes) para concluir máximo la primera quincena de junio. Se estima que los nuevos datos no deberían modificar sustancialmente las actuales tendencias de resultados.

- Con el programa de exploraciones y de laboratorio finalizados, en conjunto con los estudios documentales y el análisis de la información permiten identificar, desde la óptica geológica, geotécnica y geomorfológica, las causas de grietas y deformaciones de la autopista en la zona de estudio. Con la nueva información hasta ahora analizada, se pueden formular los comentarios que se desarrollan a continuación.

4.1.2 Nuevos Antecedentes

De los resultados de las exploraciones y análisis de laboratorio hasta ahora obtenidos, los más relevantes son:

1) Los resultados geofísicos permiten adelantar las siguientes conclusiones:

- Los perfiles de velocidad de onda de corte Vs muestra paleo relieves negativos (“valles”) en sectores donde actualmente hay relieves relativamente positivos, los que pueden relacionarse con antiguas vías superficiales de escurrimiento de aguas.
- Los perfiles TEM/NanoTEM muestran bastante regularidad en la extensión lateral de las principales unidades estratigráficas. De manera general: Se identifica una costra de caliche superficial de alta resistividad, un sector subyacente de relativamente bajas resistividades y en profundidad, nuevamente altas resistividades. Lo anterior aplicable para ambas cuencas, quebrada Los Arrieros y San Cristóbal.
- Todos los perfiles TEM/NanoTEM evidencian sectores de muy bajas resistividades, en general <10 ohm-m y a menudo incluso <5 ohm-m, lo que indudablemente estaría representando la presencia de agua o al menos de sectores saturados que se extienden tanto aguas arriba de la cuenca de la quebrada Los Arrieros como también hacia la quebrada San Cristóbal. Estos sectores están ubicados normalmente dentro de la segunda capa estratigráfica de relativa baja resistividad, y generalmente, inmediatamente cerca de la base de la capa superficial.

- Lo anterior se comprueba, además, por los resultados de los sondajes. En los sondajes SLMB-01, SLMB-03, SLMB-04 y SLMB-05, todos ellos ubicados en la quebrada Los Arrieros, el monitoreo de los niveles de agua permite actualmente observar la existencia y el comportamiento del agua subterránea en todos los pozos. Caso especial lo constituye el sondaje SLMB-02, perforado en la quebrada San Cristóbal, el cual perforó un acuífero en un medio fracturado (roca), aproximadamente a los 52,40 m de profundidad, lo que provocó una surgencia de agua por la boca del pozo, es decir, agua en contrapresión de acuífero confinado. El acuífero de los pozos SLMB-01 y SLMB-02 estaría alojado dentro de un medio fracturado, en tanto que en los restantes pozos lo hace en la unidad sedimentaria superior.
- 2) Producto de las excavaciones de calicatas, muestreo y ensayos de laboratorio correspondientes habidos a la fecha, se emiten los siguientes comentarios respecto de las características de los suelos:
- El contenido de arenas, su principal componente granulométrico, varía de 51% a 80%, y el contenido de finos entre un 9% y un 35%. El contenido de gravas varía de 4% a 33%. Es decir, los suelos clasifican en general como arenas limosas (SM).
 - Todos los suelos son no plásticos y no hay presencia de arcillas expansivas (se hizo especial análisis de Montmorillonita). Los ensayos de hinchamiento libre o potencial de expansión también demuestran que las arcillas no exhiben ninguna capacidad para expandirse.
 - Tanto el contenido mineralógico como el subsecuente comportamiento geotécnico, comparando los suelos de la quebrada Los Arrieros con la quebrada San Cristóbal son muy diferentes. En lo principal:
 - El máximo contenido de sales es de un 11,2%, siendo siempre el contenido de cloruros mayor que el contenido de sulfatos. Los valores más bajos de contenidos de sales corresponden a las calicatas ubicadas cerca de lugares con reconocida saturación de agua.
 - La difracción de rayos X muestran inequívocamente que las muestras provenientes de la quebrada Los Arrieros son similares entre sí y diferentes a las muestras de la quebrada San Cristóbal, que también son similares entre sí.

- En línea con lo anterior, se destaca que casi el 90% de la mineralogía de las muestras de la quebrada Los Arrieros está compuesta por anhidrita, halita y yeso. Solamente el 7% de estos minerales está presente en las muestras de la quebrada San Cristóbal. Al contrario, las muestras de la quebrada San Cristóbal presentan un 85% del contenido mineral distribuido en Cuarzo, Feldespato de Potasio (Ortoclasa) y Plagioclasa, todos ellos casi insolubles. Estos 3 minerales son prácticamente inexistentes en las muestras de la quebrada Los Arrieros.
- Respecto de los tres minerales sódicos señalados (halita, anhidrita y yeso), la halita es sabidamente de alta solubilidad en agua, en tanto que el yeso y la anhidrita presentan una moderada a baja solubilidad. Sin embargo, el yeso mineralógicamente es una anhidrita hidratada, donde la anhidrita, en su transformación a yeso, aumenta su volumen debido a la absorción de agua. Por otro lado, la halita (NaCl – sal común) es un cloruro de sodio que, por su contenido de sal, hace bajar drásticamente el índice de plasticidad de los suelos, volviéndolos no plásticos, lo que ratifica lo señalado anteriormente por los índices de plasticidad. El ion sodio al hidratarse produce cambios estructurales en las partículas del suelo ya que aumenta 7 veces su volumen. De manera inversa, una vez que el sodio pierde humedad disminuye su volumen atrayendo las partículas finas y ejerciendo una acción cementadora en un proceso de floculación salina.

4.2 Conclusiones

En resumen, con el desarrollo y avances del estudio realizado a la fecha, se puede afirmar que los factores que influyen en las causas de los agrietamientos y deformaciones de la Ruta 5 aledaña a la faena minera Mantos Blancos, tiene su origen en:

- I. Factores Directos: Ellos básicamente corresponden a dos: la presencia de agua y la composición del suelo.
 - a. AGUA: La nueva información geofísica, realizada por primera vez de manera transversal a los valles quebrada Los Arrieros y quebrada San Cristóbal, arroja la presencia de un estrato de bajas resistividades ubicado sub-superficialmente, el cual muestra varios sectores que presentan saturación de agua, lo que además es confirmado por el monitoreo de

niveles de agua que actualmente se está haciendo en los sondajes perforados durante esta campaña. En este sentido, ambas cuencas presentarían aportes importantes de agua, especialmente flujos provenientes desde la quebrada San Cristóbal. Lo anterior debería conducir eventualmente a modificar el dominio del modelo hidrogeológico hasta ahora establecido.

- b. COMPOSICIÓN DEL SUELO: Los suelos presentan un importante contenido de arenas (51% a 80%) con finos hasta un 35%. Todos los suelos son no plásticos y no hay presencia de arcillas expansivas. El contenido de sales es de un hasta un 11,2%, siendo siempre el contenido de cloruros mayor que el de sulfatos. Destaca que casi el 90% de la mineralogía de las muestras de la quebrada Los Arrieros está compuesta por anhidrita, halita y yeso. Solamente el 7% de estos minerales está presente en las muestras de la quebrada San Cristóbal. Respecto de los tres minerales sódicos señalados (halita, anhidrita y yeso), la halita es de alta solubilidad en agua, en tanto que el yeso y la anhidrita presentan una moderada a baja solubilidad. Sin embargo, el yeso mineralógicamente es una anhidrita hidratada, donde la anhidrita, en su transformación a yeso, aumenta su volumen debido a la absorción de agua. Por otro lado, la halita (NaCl – sal común) es un cloruro de sodio que, por su contenido de sal, hace bajar drásticamente el índice de plasticidad de los suelos, volviéndolos no plásticos, lo que ratifica lo señalado anteriormente por los índices de plasticidad. Cabe señalar, que el ion sodio al hidratarse produce cambios estructurales en las partículas del suelo ya que aumenta siete veces su volumen.

- II. Factores Concomitantes: Concierno a la particular conjunción de aspectos relativos a la geología, geomorfología (paleo-geomorfología) y topografía, factores los cuales necesariamente concurren a que el fenómeno de agrietamiento y deformación de la carretera se presente, e incluso se amplifique.

En lo general, es claro que en el área de estudio la cuenca hidrográfica Los Arrieros-San Cristóbal se estrangula aguas abajo del área de estudio, además que el basamento subsuperficial de la roca se acerca a la superficie en dirección

poniente, incluso aflorando. Lo anterior genera que el agua acumulada en esta especie de laguna subsuperficial, ubicado justo en el sector donde se producen los agrietamientos y deformaciones, hace que los niveles de agua se encuentren más cerca de la superficie (considerar que además hay un bajo topográfico o menor cota en este sector por la existencia de un meandro) para posteriormente rebalsar una garganta u obturación con una sección hidráulica (por donde circula un volumen determinado de agua), que al reducirse significativamente, coopera con el alzamiento de los niveles freáticos.

En resumen, los agrietamientos y deformaciones del terreno son principalmente generados por las características mineralógicas presentes en este tipo de suelo, las que reaccionan a consecuencia de la presencia de agua. Coadyuvantemente se presentan elementos geomorfológicos (paleo y actual), topográficos y geológicos, los que en conjunto tienen un evidente impacto en las propiedades geotécnicas de los materiales de fundación.