



# UNIVERSIDAD **DE ATACAMA**

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

## **CALIBRACIÓN DEL MÓDULO BRIGHT BLAST DE ENAEX PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ROCAS EN MINERA LOS PELAMBRES.**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de  
Geólogo.

Profesor Guía: Mg. Francisco Tapia Guerra

Diego Andrés Ávalos Andrade

Copiapó, Chile 2025

## DEDICATORIA

*A mi madre, María Andrade Plaza, por siempre apoyarme y alentarme a ser mejor, gracias a usted y su interminable esfuerzo hoy soy lo que soy.*

*A mi hijo, Alonso Andrade Bravo, gracias por darme la inmensa alegría de ser tu padre y por impulsarme a ser mucho mejor persona de lo que soy.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi mamá, María, que siempre estuvo durante toda mi vida y educación, siempre velando que entregara la mejor versión de mí, siempre aspirando a lo más alto conmigo, incluso cuando ni yo mismo me lo creía, gracias por tanto, la amo infinito. Espero su vida sea larga para que disfrute de las recompensas de todo su esfuerzo puesto en sus hijos.

A mis hermanas, Consuelo y Daniela, y hermano, Matías, gracias por soportarme aún en mis momentos más estresantes, se que no fue fácil. Gracias por siempre alentarme a seguir adelante, ya sea con palabras o pequeñas acciones que me alegraban los días. Los amo.

A mi hijo, Alonso, llegaste cuando menos lo esperaba pero cuando más te necesitaba, mi pilar para sacar todo esto adelante, gracias infinitas por darle luz a mi vida, una sola sonrisa tuya basta y bastará siempre para mejorar cualquier situación que enfrentemos. Te amo de la forma más pura que se puede amar a otra persona, siempre estaré contigo.

A mis mejores amigos, Ivania y Gabriel, gracias por tanto apañe durante todos estos años, por las salidas a carretear, por las tardes de tecito, o por las charlitas que curan todos los males, ojalá esté siendo el amigo que se merecen. Amor infinito a ustedes y sus tonteras.

A mis demás amigos; Joaquín, Felipe, Pablito, Seba, Fabi, coprolitos en general, gracias por su invaluable ayuda durante estos años de carrera. Por cada vez que me ayudaron cuando no lograba entender algo, cuando nos juntábamos antes de las pruebas para repasar tooooda la materia, por pasarme las clases cuando no podía ir. Les deseo éxito en sus vidas, sé que lo merecen.

A Enaex, por brindarme la oportunidad de realizar mi trabajo de memoria en la empresa, después de tanto tiempo buscando una oportunidad. En especial a Wladimir Vidaurre, Ingeniero Geotécnico Senior, por tanto apañe y enseñanzas durante este proceso. Logramos excelentes resultados teniendo una buena comunicación y sincronía. También a Gustavo Aedo y Javier Mendoza, Ingenieros Geotécnicos Senior de otras faenas, que pusieron su confianza en mi para implementar este estudio en otros proyectos mineros.

A la gente de Minera Los Pelambres, Anita, Nabor, JP, Nico, Cristian, Diego, Seba, José, y tantos otros, que siempre me apoyaron con todo lo necesario para cumplir este trabajo.

## TABLA DE CONTENIDOS

|  |    |
|--|----|
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....  | 1  |
| 1.1.Antecedentes generales.....  | 1  |
| 1.2.Problema de investigación.....   | 2  |
| 1.3.Hipótesis.....   | 3  |
| 1.4.Objetivos.....   | 3  |
| 1.4.1. Objetivo general.....   | 3  |
| 1.4.2. Objetivos específicos.....  | 3  |
| 1.5.Ubicación y accesos.....   | 3  |
| CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....   | 5  |
| 2.1.Depósito tipo pórfido.....   | 5  |
| 2.1.1. Alteración hidrotermal en yacimientos tipo pórfido cuprífero.....   | 5  |
| 2.2.Caracterización de roca intacta, discontinuidades y macizo rocoso..... | 6  |
| 2.2.1. Roca intacta.....   | 6  |
| 2.2.2. Discontinuidades.....   | 7  |
| 2.2.3. Macizo rocoso.....  | 7  |
| 2.2.3.1.Propiedades del macizo rocoso.....                                 | 7  |
| 2.2.3.2.Métodos de clasificación del macizo rocoso.....                    | 8  |
| 2.3.Ensayos de resistencia de roca.....                                    | 10 |
| 2.3.1. Ensayos de resistencia a la compresión uniaxial (UCS).....          | 10 |
| 2.3.2. Ensayos de carga puntual ( $I_{s50}$ ).....                         | 11 |
| 2.3.3. Relación entre $I_{s50}$ y UCS.....                                 | 12 |
| 2.4.Módulo <i>Bright Blast</i> de Enaex.....                               | 14 |
| CAPÍTULO 3: MARCO GEOLÓGICO.....   | 18 |
| 3.1.Marco geológico regional.....  | 18 |
| 3.1.1. Rocas estratificadas.....   | 19 |
| 3.1.1.1.Formación Los Pelambres.....                                       | 19 |
| 3.1.1.2.Formación El Pachón.....   | 19 |
| 3.1.2. Rocas intrusivas.....   | 20 |

|  |        |
|--|--------|
| 3.1.2.1. Pórfido Riolítico Los Pelambres.....                                    | 20     |
| 3.1.2.2. <i>Stock</i> Pelambres.....   | 20     |
| 3.1.2.3. Pórfidos de Los Pelambres, El Pachón y El Altar-Piuquenes.....          | 21     |
| 3.1.3. Estructuras.....  | 21     |
| 3.2. Marco geológico local.....  | 22     |
| 3.2.1. Litología.....  | 23     |
| 3.2.2. Alteración.....   | 24     |
| 3.2.3. Unidades geotécnicas (UGT).....   | 26     |
| 3.2.4. Propiedades resistentes de la roca intacta.....                           | 28     |
| <br>CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA DE TRABAJO.....                                      | <br>29 |
| 4.1. Identificar litologías, alteraciones y propiedades resistentes.....         | 29     |
| 4.2. Definición de rangos cuantitativos para el módulo <i>Bright Blast</i> ..... | 38     |
| 4.3. Subdivisión de la unidad geotécnica 3 de Fase 9 SE y Fase 11 W.....         | 41     |
| <br>CAPÍTULO 5: RESULTADOS.....  | <br>43 |
| 5.1. Toma de muestras.....   | 43     |
| 5.1.1. Muestras de UGT 01/02 en Fase 9 SE.....                                   | 45     |
| 5.1.2. Muestras de UGT 03 en Fase 9 SE.....                                      | 46     |
| 5.1.3. Muestras de UGT 03 en Fase 11 W.....                                      | 46     |
| 5.1.4. Muestras de UGT 05 en Fase 11 W.....                                      | 48     |
| 5.1.5. Muestras de UGT 09 en Fase 11 W.....                                      | 48     |
| 5.2. Resultados de ensayos de carga puntual.....                                 | 49     |
| 5.2.1. Cálculo de factor de conversión “K”.....                                  | 50     |
| 5.2.2. Resultados de ensayos PLT en Fase 9 SE.....                               | 55     |
| 5.2.3. Resultados de ensayos PLT en Fase 11 W.....                               | 58     |
| 5.3. Generación de rangos de UCS para <i>Bright Blast</i> .....                  | 61     |
| <br>CAPÍTULO 6: DISCUSIONES.....   | <br>65 |
| 6.1. Subdivisión de la UGT 03.....   | 65     |
| 6.1.1. Comparación de rasgos geológicos y geotécnicos.....                       | 65     |
| 6.1.2. Comparación de valores de UCS estimados.....                              | 67     |

|   |    |
|---|----|
| 6.2.Relevancia de la caracterización geológica.....                               | 70 |
| 6.3.Validez y utilidad del modelo $I_{s50}$ -UCS.....                             | 71 |
| 6.4.Fortalezas y limitaciones del uso de PLT en terreno.....                      | 71 |
| 6.5.Comparación con el modelo geotécnico oficial de MLP.....                      | 72 |
| 6.6.Justificación técnica de los rangos propuestos para <i>Bright Blast</i> ..... | 74 |
| 6.7.Limitaciones y recomendaciones futuras.....                                   | 76 |
| 6.8.Propuesta de integración multidisciplinaria.....                              | 77 |
| <br>  |    |
| CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.....   | 78 |
| <br>  |    |
| BIBLIOGRAFÍA.....   | 80 |
| <br>  |    |
| ANEXO 1.....  | 87 |
| <br>  |    |
| ANEXO 2.....  | 90 |
| <br>  |    |
| ANEXO 3.....  | 92 |

## RESUMEN

Los Pelambres es un yacimiento tipo pórfido de cobre y molibdeno ubicado a 45 km al este de Salamanca, en la Región de Coquimbo, entre los 3100 y 3600 m s.n.m. Actualmente, Minera Los Pelambres (MLP) utiliza un modelo de Unidades Geotécnicas (UGT) para estimar la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de las rocas, el cual presenta limitaciones para su aplicación en el diseño de voladuras. Para subsanar estas limitaciones, Enaex desarrolló el módulo *Bright Blast*, una plataforma que estima UCS a partir de parámetros operacionales de equipos de perforación, como la tasa de penetración, las revoluciones por minuto y la desviación de pozos. Este estudio tuvo como objetivo calibrar el módulo *Bright Blast* mediante la integración de resultados de ensayos de carga puntual (PLT) con datos operacionales. Se implementó una metodología sistemática para mejorar la precisión del modelo a largo plazo, consolidando una base de datos con información clave: coordenadas GPS, UGT, valores estimados de UCS y niveles cualitativos asignados por el módulo. Se aplicaron análisis estadísticos, como la eliminación de valores atípicos mediante el rango intercuartílico (IQR), y análisis gráficos, permitiendo identificar tendencias claras en los valores de UCS. Se definieron rangos de UCS para cada categoría cualitativa del módulo: muy blando (<40 MPa), blando (40–70 MPa), medio (70–105 MPa), duro (105–145 MPa) y muy duro (>145 MPa). Además, se identificaron diferencias en la UGT 03 entre Fase 9 SE (UCS promedio  $74 \pm 4$  MPa) y Fase 11 W ( $61 \pm 8$  MPa), atribuibles a variaciones en la alteración hidrotermal y lixiviación. El estudio confirmó que la resistencia de la roca está influenciada por litología, estructuras secundarias, oxidación y meteorización. Se recomienda aplicar esta metodología en otras fases del yacimiento y considerar variables adicionales como cohesión y ángulo de fricción en futuros estudios.

Palabras clave: ENSAYOS DE CARGA PUNTUAL – MÓDULO BRIGHT BLASAT – UNIDADES GEOTÉCNICAS

## **ABSTRACT**

Los Pelambres is a porphyry copper-molybdenum deposit located 45 km east of Salamanca, Coquimbo region, between 3100 and 3600 m a.s.l. Currently, Minera Los Pelambres (MLP) has a Geotechnical Units model (UGT) to estimate the uniaxial compressive strength (UCS) of rocks, which has limitations for its practical application in blasting designs. Therefore, Enaex developed the Bright Blast module, a platform that allows estimating UCS from operational parameters obtained by drilling rigs, such as drilling rate, revolutions per minute and hole deviation. The objective of this study was to calibrate this module to improve UCS estimation, integrating point load test (PLT) results and correlating them with drilling data. In this work, a systematic methodology was established to enhance the long-term precision of the model, generating a consolidated database containing sample information such as GPS coordinates, UGT, estimated UCS values, and qualitative resistance levels assigned by Bright Blast. In addition, statistical analyses were performed to improve the database accuracy (elimination of outliers using the interquartile range (IQR) and graphical analyses (histograms and dot plots) that allowed identifying clear trends in UCS values. As a result, UCS ranges were defined for each qualitative level of the Bright Blast module: very soft (<40 MPa), soft (40-70 MPa), medium (70-105 MPa), hard (105-145 MPa), and very hard (>145 MPa). Likewise, differences in the PLT results and geological-geotechnical descriptions of UGT 03 were observed between different phases of the reservoir. In Fase 9 SE, the average UCS was  $74 \pm 4$  MPa, consistent with the MLP geotechnical model ( $73.9 \pm 34.6$  MPa). In contrast, in Fase 11 W, the UCS decreased to  $61 \pm 8$  MPa compared to the values found in Fase 9 SE, associated with greater hydrothermal alteration and leaching. The study confirmed that rock strength depends not only on lithology, but also on geological factors such as secondary structures, oxidation, and weathering. Finally, it was recommended to validate this methodology in other sectors of mine, periodically update the data, and consider additional variables such as cohesion and friction angle, to optimize rock strength classification in future studies.

**Keywords: POINT LOAD TEST – BRIGHT BLAST MODULE – GEOTECHNICAL UNITS**

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes generales

Contar con un modelo geotécnico preciso y bien desarrollado es un pilar fundamental para garantizar la seguridad, eficiencia y rentabilidad en una operación minera. Para lograr esto, es esencial evaluar con precisión la resistencia de los materiales, identificar zonas con potenciales inestabilidades y diseñar estrategias adecuadas para su control y mitigación (González de Vallejo, 2002). Además, un buen modelo geotécnico es clave para la optimización del diseño de excavación y tronadura. Conocer con detalle las propiedades mecánicas y estructurales del macizo rocoso permite seleccionar los parámetros óptimos para cada detonación, ajustando la cantidad de explosivos, el espaciamiento de los pozos y los tiempos de retardo. De esta manera, se mejora la fragmentación del material, facilitando su transporte y procesamiento posterior en la planta de beneficio (Herrera, 2013).

El modelo geotécnico permite predecir y gestionar riesgos, asegurando la estabilidad del macizo rocoso y evitando fallas estructurales que podrían comprometer la integridad de la mina, los trabajadores y los equipos. Desde el punto de vista económico, un modelo geotécnico adecuado contribuye significativamente a la reducción de costos operacionales, ya que evita sobreexcavaciones innecesarias, optimiza el uso de explosivos y reduce el consumo de energía, además de minimizar el desgaste y los costos de mantenimiento de equipos. Asimismo, permite definir con precisión las zonas con altas leyes minerales, evitando la dilución y mejorando la recuperación del mineral, lo que se traduce en una explotación más eficiente y rentable (Moraga, 2018).

En este contexto, Enaex, el principal proveedor chileno de servicios integrales de fragmentación de rocas, juega un papel clave en la optimización de las voladuras. A través de su equipo de ingeniería altamente calificado y experimentado, la empresa desarrolla diseños de voladura personalizados, adaptados a las condiciones específicas de cada mina. Además, ofrece formación, asesoramiento y recomendaciones sobre las mejores técnicas y productos para maximizar la eficiencia y seguridad de las operaciones (Enaex, 2025).

Como parte de su compromiso con la innovación y la modernización de sus servicios, Enaex ha desarrollado el módulo *Bright Blast*, una plataforma avanzada que permite estimar la resistencia a la compresión de las rocas utilizando datos proporcionados por las perforadoras. Esta herramienta digital correlaciona la información de resistencia con el modelo geológico, permitiendo optimizar el diseño de las tronaduras y mejorar la precisión de los procesos de fragmentación. Gracias a esta tecnología, las operaciones mineras pueden lograr una mayor eficiencia, reducir costos y minimizar los impactos ambientales (Enaex, 2024b).

## 1.2. Problema de investigación

En Minera Los Pelambres (MLP), actualmente se cuenta con un modelo de Unidades Geotécnicas (UGT) para estimar la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de las rocas en distintas zonas de trabajo (Modelo Macizo Rocosó MLP, 2018). Sin embargo, este modelo presenta ciertas limitaciones, como la falta de datos en algunas áreas, rangos de UCS excesivamente amplios y zonas clasificadas bajo una misma UGT, a pesar de presentar diferencias significativas, lo cual dificulta su aplicación práctica en el diseño de tronaduras. Estas imprecisiones impactan negativamente en la planificación minera, afectando la fragmentación del material y el rendimiento de los procesos posteriores.

Ante esta situación, la implementación de la herramienta *Bright Blast*, que utiliza algoritmos de *Machine Learning* para estimar la resistencia de las rocas (Enaex, 2025), representa un avance clave para mejorar la precisión en el diseño de mallas de perforación y tronadura. No obstante, el módulo *Bright Blast* actualmente solo permite una categorización cualitativa de los bancos (de muy blando a muy duro), sin proporcionar valores estimados de UCS. Por ello, y para mejorar la utilidad del módulo, se requiere generar una correlación entre los niveles cualitativos de *Bright Blast* con valores cuantitativos de resistencia a la compresión uniaxial (UCS), obtenidos mediante la realización de ensayos de carga puntual (*Point Load Test*, PLT), lo que permitirá transformar el módulo *Bright Blast* en una herramienta mucho más robusta y fiable para el diseño de tronadura, mejorando la precisión de la

fragmentación y reduciendo los costos operativos asociados al procesos de tronadura, carguío y molienda.

### 1.3.Hipótesis

En el presente trabajo, se hipotetiza que si se establece una correlación numérica entre los niveles de dureza del módulo *Bright Blast* y los valores de resistencia a la compresión uniaxial obtenidos mediante ensayos de carga puntual, será posible mejorar la precisión del modelo actual de Unidades Geotécnicas (UGT) en Minera Los Pelambres, optimizando el diseño de mallas de perforación y tronadura, y contribuyendo a una mayor eficiencia en los procesos de fragmentación, carguío y molienda.

### 1.4.Objetivos

#### 1.4.1. Objetivo general

- Actualizar el modelo de estimación de resistencia a la compresión uniaxial del módulo *Bright Blast* de Enaex.

#### 1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar litologías, alteraciones y propiedades resistentes relevantes en Fase 9 SE y Fase 11 W del rajo Los pelambres.
- Establecer rangos cuantitativos para el módulo *Bright Blast*.
- Subdividir la unidad geotécnica 3 de Fase 9 SE y Fase 11 W en función de sus propiedades geológicas y resistentes.

### 1.5.Ubicación y accesos

MLP se ubica a 240 km al norte de la ciudad de Santiago, a 670 km al sur de Copiapó y a 45 km al este de Salamanca, provincia de Choapa, al sur de la región de Coquimbo. El rajo actual de la mina se encuentra en plena Cordillera de los Andes a una altitud que varía entre 2.500 a 4.000 m s.n.m. (Figura 1).

Referencialmente se pueden indicar las coordenadas UTM-WGS84 6.490.300 norte y 358.900 este como la parte central del rajo.

Para acceder por tierra, se debe utilizar la Panamericana Norte/Ruta 5 y luego desde Los Vilos tomar la ruta D-85 o bien, desde Huentelauquén la ruta D-75. Ambas rutas conectan con Salamanca, desde aquí, se debe tomar la ruta D-835 que conecta con la ruta D-871, la cual llega a Portones, lugar de acceso a las instalaciones de MLP. Otra alternativa es el acceso mediante avión o helicóptero, ya que la minera cuenta con aeródromo y helipuerto.

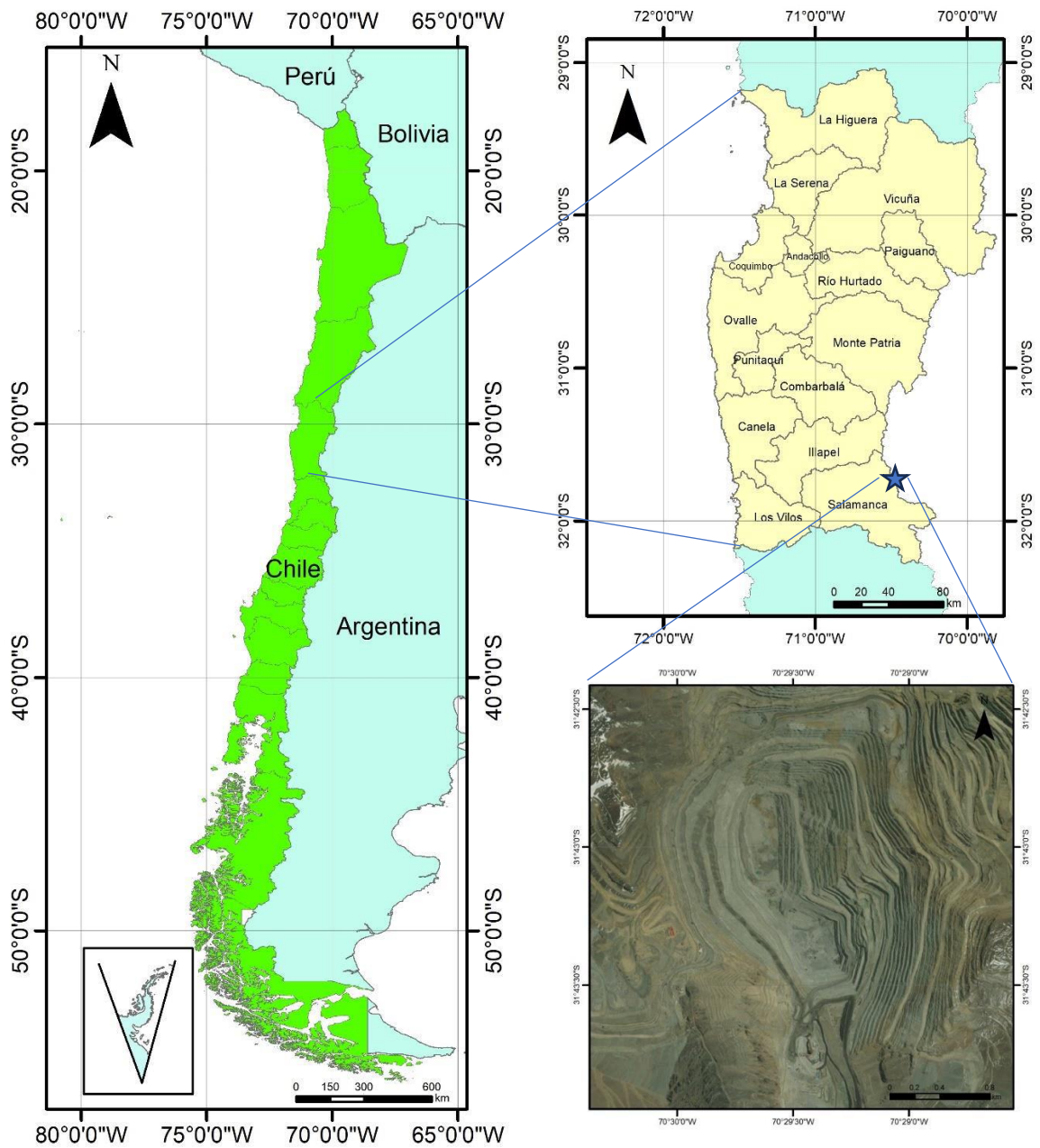


Figura 1: Mapa ubicación de Mina Los Pelambres (Extraída de Saavedra, 2019).

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Depósito tipo pórfido

Los sistemas tipo pórfido constituyen el principal recurso de cobre del mundo y una fuente importante de molibdeno, oro y plata entre otros metales (John, 2010). Estos sistemas son definidos como grandes volúmenes de rocas alteradas hidrotermalmente y mineralizadas con sulfuros primarios de cobre y hierro, centradas en *stocks* o enjambres de diques intrusivos porfídicos félsicos a intermedios (Sillitoe, 2010).

#### 2.1.1. Alteración hidrotermal en yacimientos tipo pórfido cuprífero

En un modelo idealizado de un pórfido de cobre (Figura 2), la distribución de la alteración hidrotermal define una zonación tridimensional alrededor del complejo intrusivo mineralizado. Un núcleo de alteración potásica se forma tempranamente en la evolución del depósito, y puede llegar a albergar la mayor parte de la mineralización. Este núcleo generalmente está rodeado de un halo de alteración propilítica, que se puede extender lateralmente por varios kilómetros de distancia del núcleo potásico (Lowell y Gilbert, 1970).

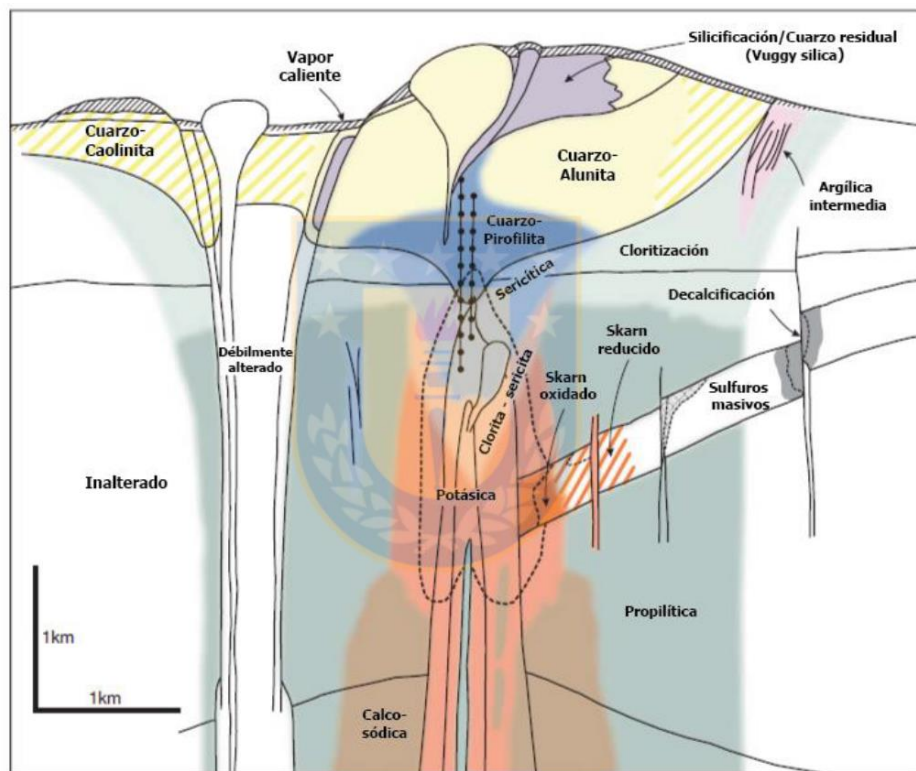


Figura 2: Esquema de la zonación hidrotermal en los sistemas tipo pórfido de cobre (Extraído de Sillitoe, 2010).

La roca caja sobre la que se forma el sistema influye en la composición mineralógica del núcleo potásico (Cooke et al., 2014). En rocas de composición intermedia a félsica la paragénesis típica está reflejada por una asociación de cuarzo, feldespatos potásico, anhidrita,  $\pm$ magnetita, calcopirita y bornita, mientras que en rocas composicionalmente más máficas la asociación está dominada por biotita y magnetita y de manera subordinada cuarzo, feldespatos potásico anhidrita y sulfuros de Cu-Fe (Meyer y Hemley, 1967; Cannell et al., 2005).

Las asociaciones que definen las etapas tardías del sistema incluyen las alteraciones filica (cuarzo, moscovita, piritita y calcopirita), argílica intermedia (illita, clorita, piritita, cuarzo, calcita y hematita y/o caolinita) y argílica avanzada (cuarzo, alunita, pirofilita, dickita, caolinita, piritita,  $\pm$ enargita y  $\pm$ covellita). Estas asociaciones ricas en arcilla por lo general están asociadas a fallas, se desarrollan típicamente en zonas cercanas a la superficie y obliteran gran parte de las alteraciones potásicas y propilíticas formadas con anterioridad (Sillitoe, 2010).

## 2.2. Caracterización de roca intacta, discontinuidades y macizo rocoso

### 2.2.1. Roca intacta

La roca intacta es un concepto más bien teórico debido a la dificultad de encontrarla y analizarla en laboratorio. Según Hoek (1994) y Hudson y Harrison (1997) se define como el volumen de roca a nivel macroscópico ubicado entre las discontinuidades y estructuras geológicas presentes en el macizo rocoso. A pesar de considerarse continua es heterogénea y anisótropa, ligada a la fábrica, textura y estructura mineral. Mecánicamente, la matriz rocosa se caracteriza por su densidad, resistencia y deformabilidad, dadas por parámetros de roca intacta: resistencia a la compresión simple (UCS) y a la tracción, módulo de Young, razón de Poisson, etc. (González de Vallejo, 2002).

Atendiendo a esta definición, encontrar un trozo de material rocoso con estas características es muy difícil. Las rocas, debido a agentes externos (meteorización), estados de tensión o distensión si se produce una excavación

como por ejemplo en un talud, una excavación para una cimentación o un túnel, se encuentran fracturadas, intersectadas por vetas o vetillas de mayor o menor espesor con mineralizaciones secundarias, etc., que provocan planos de debilidad y que puede desembocar en una mala ejecución de los ensayos de laboratorio ya que pueden arrojar resultados que infravaloran la calidad de la roca intacta (Geotecnia Consultores, 2022).

#### 2.2.2. Discontinuidades

Las discontinuidades corresponden a cualquier plano de origen mecánico o sedimentario en un macizo rocoso, con una resistencia a la tracción nula o muy baja y que genera comportamiento no continuo de la matriz rocosa, y normalmente anisótropo. Se describen principalmente en términos de orientación, espaciado, persistencia, rugosidad, apertura, relleno y circulación de agua (González de Vallejo, 2002).

#### 2.2.3. Macizo rocoso

Corresponde al conjunto de bloques de matriz rocoso y discontinuidades geológicas (Hoek, 1980). Es de carácter heterogéneo, comportamiento discontinuo y usualmente anisótropo. Estas características que definen al macizo rocoso condicionan y limitan su comportamiento mecánico e hidráulico, por lo que se debe considerar de forma cautelosa el volumen de éste, tal que represente de forma adecuada el comportamiento a estudiar (González de Vallejo, 2002).

Las características del macizo rocoso no se pueden medir directamente, sino que deben estimarse a partir de las propiedades de la roca intacta y de las características del arreglo blocoso que conforma al macizo rocoso (Casanegra, 2008).

##### 2.2.3.1. Propiedades del macizo rocoso

Las principales propiedades del macizo rocoso son su composición geológica, tipo de textura y cementación de las discontinuidades presentes, estructuras geológicas, porcentaje de humedad contenido en el macizo, porosidad, densidad de la roca, índice de permeabilidad, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, durabilidad, velocidad de propagación

de las vibraciones, frecuencia de fracturas y espaciamiento de discontinuidades (Casanegra, 2008).

Las características más influyentes en la estabilidad del macizo rocoso son la resistencia a la compresión de la roca, la resistencia a la tracción, resistencia al corte de las estructuras en función del ángulo de fricción y cohesión, y las propiedades y orientación de las estructuras presentes en el macizo rocoso (González de Vallejo, 2002).

#### 2.2.3.2. Métodos de clasificación del macizo rocoso

La clasificación del macizo rocoso se basa en una serie de parámetros empíricos que describen la roca, los cuales, en su mayoría, se determinan a partir de observaciones cualitativas, por lo que es de suma relevancia una interpretación correcta de las condiciones en terreno. Estas clasificaciones entregan como resultado una visión de la resistencia del macizo rocoso frente a cambios del entorno, como, por ejemplo, desarrollos y labores mineras, construcción de taludes y eventos sísmicos (Ferrer y González de Vallejo, 1999).

- Método *Geological Strength Index* - GSI (Hoek, 2006)

El GSI estima la reducción de la resistencia del macizo para diferentes condiciones geológica. La caracterización del macizo rocoso es simple y está basada en la impresión visual de la estructura rocosa, en términos de bloques y de la condición superficial de las discontinuidades indicadas por la rugosidad y alteración de las juntas (Figuras 3 y 4). La combinación de estos dos parámetros proporciona una base práctica para describir un rango amplio de tipos de macizos rocosos.

| <b>MAPEO GSI - INDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA DE MACIZO ROCOSO</b> |                |                |              |              |       |         |         |      |                       |         |       |
|---|----------------|----------------|--------------|--------------|-------|---------|---------|------|-----------------------|---------|-------|
| MINA  |                |                |              |              | Fase  |         | Banco   |      |                       |         |       |
| Poligono  |                |                |              |              | Fecha |         |         |      |                       |         |       |
| Tramo   |                |                |              | Roca Intacta |       |         |         |      | GSI Hoek&Marinos 2000 |         | Fotos |
| Celdas  | P <sub>i</sub> | P <sub>f</sub> | Az Talud [°] | UGT          | LITO  | UCS min | UCS max | Agua | GSI min               | GSI max |       |
| 1   |                |                |              |              |       |         |         |      |                       |         | -     |
| 2   |                |                |              |              |       |         |         |      |                       |         | -     |
| 3   |                |                |              |              |       |         |         |      |                       |         | -     |
| 4   |                |                |              |              |       |         |         |      |                       |         | -     |
| 5   |                |                |              |              |       |         |         |      |                       |         | -     |

| UGT        | Valor | UCS Descripción                                 | Condición de Agua |        |
|------------|-------|---|-------------------|--------|
|            |       |   | Tipo              | Código |
| 1 UVI CLO  | R6    | Sólo astillas con golpe de martillo             | Seco              | S      |
| 2 UVI ARG  | R5    | Fracturada con muchos golpes de martillo        | Húmedo            | H      |
| 3 PORF CLO | R4    | Más de un golpe para ser fracturada             | Mojado            | M      |
| 4 PORF ARG | R3    | Un golpe firme para ser fracturada              | Goteo             | G      |
| 5 ZC       | R2    | Hendiduras poco profundas con golpe de martillo | Flujo             | F      |
| 6 ZHAF     | R1    | Desgranable con firme golpe de martillo         | Sin información   | SI     |
| 7 FOSA     | R0    | Hendiduras con uña del pulgar                   |                   |        |
| 8 GRAVA    |       |   |                   |        |

Figura 3: Cartilla de Mapeo GSI (Elaboración interna Enaex).

| <b>INDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA PARA MACIZOS ROCOSOS FRACTURADOS (MARINOS &amp; HOEK, 2000)</b> |  | CONDICIÓN ESTRUCTURAL   |  |   |  |   |
|--|--|---|--|---|--|---|
|  |  | MUY BUENA<br><small>Muy rugosas, cajas frescas o no intemperizadas.</small> | BUENA<br><small>Rugosas, cajas ligeramente intemperizadas y algo oxidadas.</small> | REGULAR<br><small>Lisas, cajas moderadamente intemperizadas y algo alteradas.</small> | MALA<br><small>Pulidas, cajas meteorizadas, con pátinas o con rellenos y/o fragmentos angulosos.</small> | MUY MALA<br><small>Pulidas, cajas muy meteorizadas, con pátinas o con rellenos de arcilla blanda.</small> |
| ESTRUCTURA DEL MACIZO  |  | DISMINUYE LA CALIDAD  |  |   |  |   |
|  | <b>INTACTA o MASIVA</b><br>Probetas de roca intacta. Macizos masivos o con pocas y muy espaciadas estructuras.   | 90  |  |   | N/A  | N/A   |
|  | <b>BLOCOSA</b><br>Macizos con 3 sets de estructuras, que definen bloques cúbicos, bien trabados entre si.  | 80  |  |   | 50   | 40  |
|  | <b>MUY BLOCOSA</b><br>Macizos con 4 sets de estructuras, o más, que definen bloques angulosos y trabados, pero que están parcialmente perturbados.                                       | 70  |  |   |  | 30  |
|  | <b>BLOCOSA VETEADA</b><br>Macizos plegados y con bloques angulosos formados por la intersección de muchas estructuras. Los planos de estratificación y/o esquistosidad son persistentes. | 60  |  |   |  | 20  |
|  | <b>DESINTEGRADA</b><br>Macizo fuertemente fracturado, con una mezcla de bloques angulosos y redondeados, pobremente trabados.  |   |  |   |  | 10  |
|  | <b>LAMINADA / CIZALLADA</b><br>Macizo con planos débiles (cizalte y/o esquistosidad), muy poco espaciados entre si y que no definen bloques.   | N/A   | N/A  |   |  |   |

Figura 4: GSI para macizos rocosos diaclasados (Marinos & Hoek, 2000).

### 2.3. Ensayos de resistencia de roca

El comportamiento mecánico de las rocas está definido por su resistencia y deformabilidad, siendo el primer parámetro el esfuerzo que soporta una roca para determinadas deformaciones. Para determinar este valor existen una serie de ensayos, tanto de laboratorio como de terreno que se realizan bajo ciertos parámetros establecidos y normados. Cuando se mide en probetas de roca sin confinar se denomina resistencia a compresión simple y su valor se emplea para la clasificación geotécnica de las rocas (Saavedra, 2019).

La resistencia es función de las fuerzas cohesivas y friccionales del material (además de otros valores extrínsecos al material rocoso). La cohesión,  $c$ , corresponde a la fuerza de unión entre las partículas minerales que conforman la roca. El ángulo de fricción interna,  $\phi$ , es el ángulo de rozamiento entre dos planos de la misma roca, suele variar entre  $25^\circ$  y  $45^\circ$ . Aparte de los valores antes mencionados, cuan resistente es una roca dependerá de otras condiciones, como la magnitud de los esfuerzos confinantes, la presencia de agua en los poros o la velocidad de aplicación de la carga de rotura. Incluso para rocas aparentemente isótropas y homogéneas, los valores  $c$  y  $\phi$  pueden variar según el grado de cementación o variaciones en la composición mineralógica (González de Vallejo, 2002).

#### 2.3.1. Ensayos de resistencia a la compresión uniaxial (UCS)

Este ensayo permite determinar en laboratorio la resistencia uniaxial no confinada de la roca, o a la compresión simple ( $\sigma_c$ ) (González de Vallejo, 2002).

La relación entre los esfuerzos aplicados en el ensayo es:

$$\sigma_1 \neq 0; \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

En este ensayo se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Razón largo/ancho de la probeta debe ser 2,5:1 a 3:1.
- Los extremos de la probeta deben ser paralelos y pulidos, sin grietas.
- El ancho de muestra debe ser mayor a 10 veces el tamaño medio del grano.

El ensayo trata de la aplicación gradual de una fuerza axial a un cilindro de roca, hasta que se produce su rotura.

El procedimiento consiste en, primeramente, concebir una idea general de la roca en cuanto a su litología y estructuras. Luego de identificar las muestras se miden sus dimensiones para validar si satisfacen las condiciones antes mencionadas. Posterior a esto, se recubre la muestra con una membrana cuyo fin será el de evitar que al momento de fallar la roca no salten fragmentos y dañen a personas u objetos de alrededor.

Se debe situar el testigo de tal forma que el pistón de la máquina quede paralelo a las caras transversales de la muestra.

Una persona se encarga de medir la presión a la cual está siendo sometida la muestra mediante un manómetro conectado a la prensa hidráulica, la presión debe ser medida a cada instante ya que, al momento de fallar, la aguja que indica el valor de la carga vuelve al punto de partida.

Una vez que el testigo falle, se retira y se analizan las condiciones y modo de ruptura.

### 2.3.2. Ensayos de carga puntual ( $I_{s50}$ )

El ensayo de carga puntual o PLT (*Point Load Test*) se utiliza para determinar la resistencia a la compresión simple de fragmentos irregulares de roca, testigos cilíndricos de sondajes o bloques, a partir del índice de resistencia a la carga puntual ( $I_s$ ), de tal forma que el *stress* aplicado se convierte a valores aproximados de UCS según el diámetro de la muestra (Broch y Franklin, 1972). El procedimiento consiste en romper una muestra entre dos puntas metálicas accionadas por una prensa. Las ventajas de este ensayo son que se pueden usar muestras de roca irregulares sin preparación previa alguna y que la máquina es portátil, por lo cual es un ensayo que se puede realizar en terreno (norma ASTM D5731).

Para realizar el ensayo, se debe primero identificar las muestras midiendo sus dimensiones. Dependiendo del tipo de muestra (Figura 5), se sitúa el testigo entre las puntas cónicas de la máquina, resguardando que se cumplan las configuraciones de carga y requerimientos de forma del testigo. La máquina se cubre con una bolsa resistente cuyo fin será el de evitar que, al momento de

fallar la roca, salten fragmentos y dañen a personas u objetos aledaños (Flores y Tinoco, 2019).

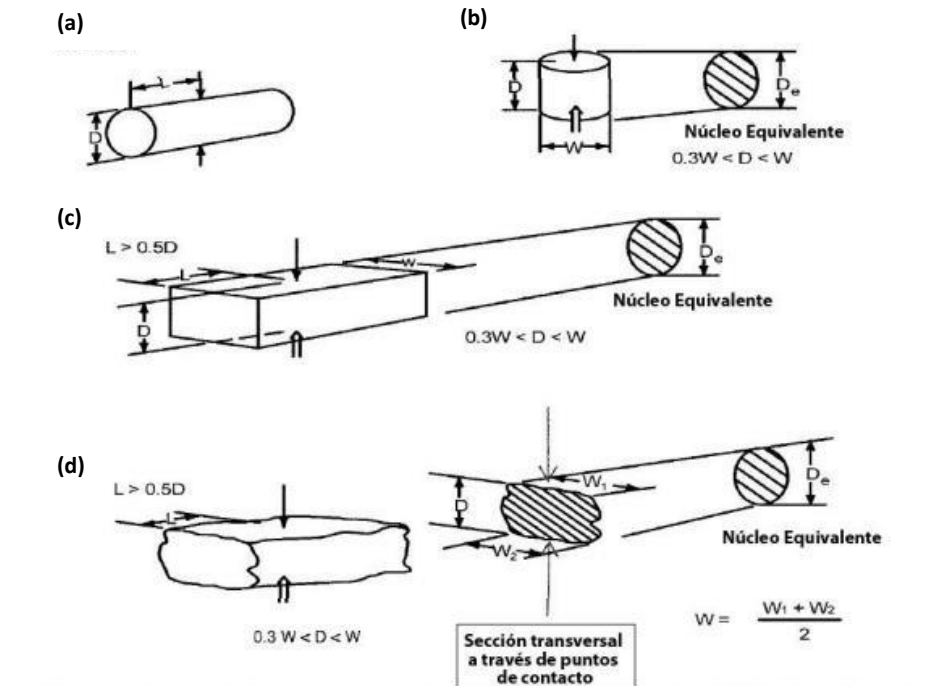


Figura 5: Configuración de carga y requerimientos en la forma de los testigos. (a) Muestra diametral, (b) Muestra axial, (c) Bloque y (d) Muestra irregular (Extraído de Flores y Tinoco, 2019).

Según la norma ASTM D5731, cuando el diámetro (o diámetro equivalente  $D_e$  en probetas no cilíndricas) difiere de 50 mm se debe realizar una corrección por tamaño. Para la corrección de tamaño se utiliza la siguiente ecuación:

$$I_{S50} = F \times I_s$$

Donde F es el factor de corrección por tamaño y se calcula mediante la ecuación a continuación:

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45}$$

### 2.3.3. Relación entre $I_{S50}$ y UCS

La resistencia a la compresión uniaxial (UCS) es un parámetro importante en mecánica de rocas, pero su medición puede ser lenta, difícil, costosa o puede ser difícil de determinar con facilidad. Las pruebas de índice de carga puntual

( $I_{s50}$ ) son mucho más sencillas de realizar porque exigen menos o ninguna preparación de la muestra y el equipo de prueba no es complicado. El uso de la prueba de carga puntual PLT, como prueba de predicción indirecta de UCS, permite estimar el índice de carga puntual o resistencia a la carga puntual ( $I_{s50}$ ), para clasificar las rocas por su fuerza. La PLT usa muestras creadas por fragmentos de rocas regulares e irregulares o muestras cilíndricas provenientes de testigos (Feijoo y Román, 2019).

Una buena correlación entre la UCS y el  $I_{s50}$  puede ser de gran importancia, porque se obtienen beneficios en la realización de ensayos siendo más rápidos y económicos, aportando seguridad en los cálculos para el análisis de macizos rocosos. Estas pruebas son mucho más sencillas de realizar porque exigen menos o ninguna preparación de la muestra y los equipos de prueba no son complicados (Feijoo y Román, 2019).

Para la estimación de UCS a partir del  $I_{s50}$ , se utiliza la siguiente ecuación (según norma ASTM D5731):

$$UCS = I_{s50} \times K$$

En donde K corresponde al factor de conversión de índice a resistencia que depende de la correlación específica del sitio entre UCS e  $I_{s50}$  para una muestra específica con un diámetro de prueba ( $D_e$ ).

En caso de no contar con ensayos UCS previos se utilizarán los valores estandarizados por la norma ASTM D5731 (Figura 6) para núcleos de 50 mm:

| Tamaño del testigo (mm) | Valor de K (generalizado) |
|-------------------------|---------------------------|
| 21.5 (EX Core)          | 18                        |
| 30                      | 19                        |
| 42 (BX Core)            | 21                        |
| 50                      | 23                        |
| 54 (NX Core)            | 24                        |
| 60                      | 24.5                      |

Figura 6: Índice generalizado para conversión de UCS (Extraído de norma ASTM D5731).

#### 2.4. Módulo *Bright Blast* de Enaex

El módulo *Bright Blast* de Enaex corresponde a una herramienta tecnológica desarrollada internamente, orientada a la integración operativa mediante el uso de analítica avanzada y procesamiento de datos en tiempo real. Su principal función es optimizar los procesos de diseño y ejecución de tronaduras, permitiendo una estimación más precisa de la resistencia a la compresión de las rocas a partir de parámetros obtenidos durante la perforación. Esta plataforma contribuye a mejorar la eficiencia operacional, reducir costos asociados a la fragmentación y fortalecer la toma de decisiones estratégicas en función de información georreferenciada y actualizada. Asimismo, representa un avance significativo hacia una minería inteligente, promoviendo la innovación y la transformación digital del sector (Enaex, 2025).

Este módulo tiene como principal objetivo optimizar la calidad de la fragmentación en las tronaduras, a través de la estimación de la resistencia a la compresión de las rocas. Para ello, se basa en la recopilación y análisis de datos generados por los equipos de perforación, considerando variables clave como la velocidad de perforación, el número de revoluciones por minuto del equipo y el tiempo total de perforación de cada pozo. Gracias a la interpretación de estos datos, *Bright Blast* permite identificar la resistencia de las rocas en una escala cualitativa que va desde Muy Blando a Muy Duro. Además, en aquellos sectores donde no se disponga de información suficiente, ya sea por la ausencia de pozos perforados o por la falta de datos provenientes de los equipos, el módulo incorpora un algoritmo avanzado basado en redes neuronales y bases de datos históricas de perforación el cual es capaz de predecir la resistencia de la roca extrapolando información de los pozos más cercanos, lo que permite obtener un modelo más preciso del terreno antes de la tronadura (Enaex Servicios, 2024a).

El funcionamiento de *Bright Blast* comienza con la validación de los datos ingresados, asegurándose de que se encuentran dentro de los parámetros normales o esperables para el sector perforado. Posteriormente, el sistema genera un área de influencia alrededor de cada pozo, lo que facilita la interpretación de los resultados y su aplicación en la planificación de la tronadura. Este proceso puede repetirse hasta tres veces con el fin de generar distintos modelos generalizados de resistencia,

minimizando así la influencia de datos atípicos o inconsistentes con la información histórica del sector (Enaex Servicios, 2024b).

En la figura 7 se puede observar un ejemplo de estimación de resistencias de un banco en MLP:

- a) El Modelo 3D permite una visualización de los pozos en el espacio tridimensional, en donde cada tramo posee una estimación de resistencia a la compresión específica. Este corresponde a la integración de los datos sin ningún tipo de transformación, lo que permite revisar cambios a través del largo del pozo sin perder nada de información (Enaex Servicios, 2024b).
- b) Esta barra informativa nos permite visualizar la leyenda para cada nivel de resistencia expresado en los modelos, pero también otros datos importantes como los equipos de perforación que trabajaron en el sector y el porcentaje de polígono de tronadura con información referente a estos equipos (Enaex Servicios, 2024b).
- c) En esta figura se observa el Modelo de Pozos que posee la información por cada pozo perforado ya extrapolado (es decir, ya habiéndose trabajado los datos del modelo en 3D), así como el área de influencia que tiene cada uno de estos pozos. Este modelo nos permite observar valores atípicos que son poco representativos del sector, así como también aquellos sectores que cuentan con menos información y, por ende, que los pozos poseen más área de influencia (Enaex Servicios, 2024b).
- d) Este modelo se conoce como Modelo Generalizado, y corresponde a un segundo proceso de interpolación de los datos para disminuir valores atípicos y homogenizar las resistencias a la compresión en base a su representatividad en cada sector. Se puede observar cómo desaparecen aquellas resistencias que menos datos poseen (Enaex Servicios, 2024b).

El módulo *Bright Blast*, además de permitirnos predecir la resistencia a la compresión en términos cualitativos del banco actual en que se esté trabajando, posee la opción de generar una predicción de resistencia de bancos inferiores (Figura 8), lo que ayuda a asegurar resultados de fragmentación y excavación y, por ende, optimizar los costos de perforación y tronadura (Enaex Servicios, 2024a).

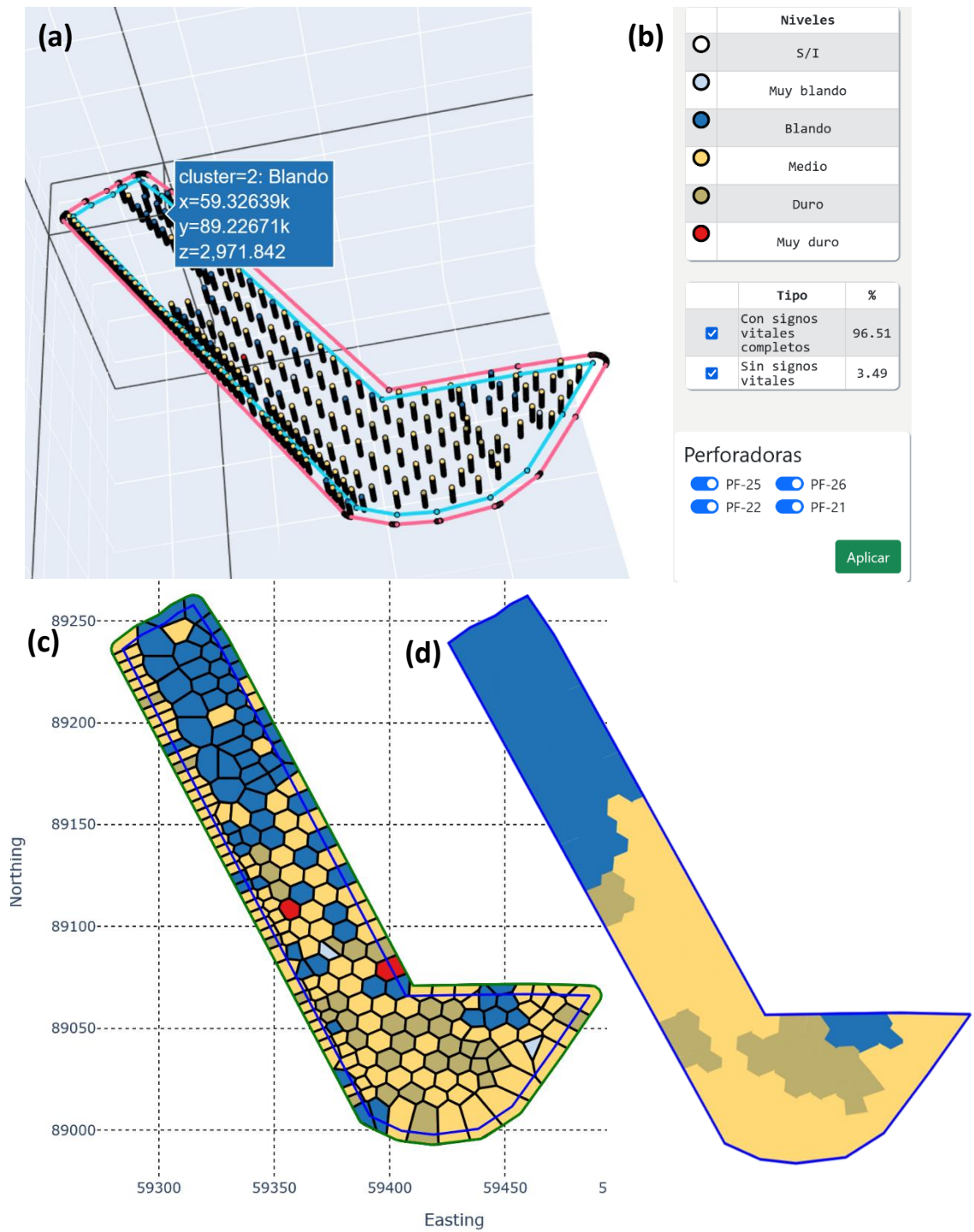


Figura 7: Ejemplo de aplicación de módulo *Bright Blast*. (a) Modelo 3D, (b) Tabla de contenido, (c) Modelo de pozos y (d) Modelo generalizado (Elaboración propia).

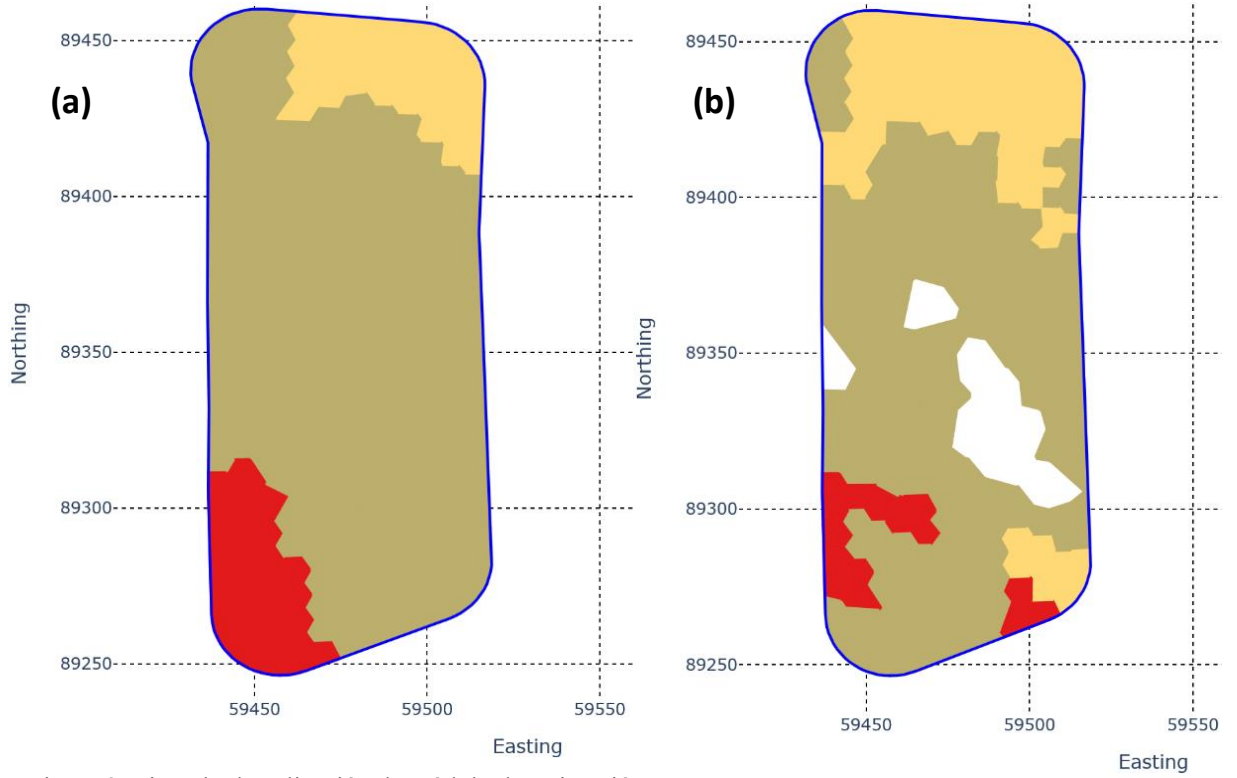


Figura 8: Ejemplo de aplicación de módulo de estimación de *Bright Blast*. (a) Resistencias estimadas en banco inferior y (b) Resistencias medidas en banco inferior (Elaboración propia).

## CAPÍTULO 3: MARCO GEOLÓGICO

### 3.1. Marco geológico regional

En modo general, la variada geología de la Cordillera de los Andes cercana a MLP consisten principalmente en rocas paleozoicas que se encuentran intruídas por rocas del orógeno Andino, con edades que varían desde el Jurásico Inferior al Holoceno (Figura 9). En la zona del rajo, afloran rocas sedimentarias Cretácicas e intrusivas del Mioceno (Mpodozis, 2012).

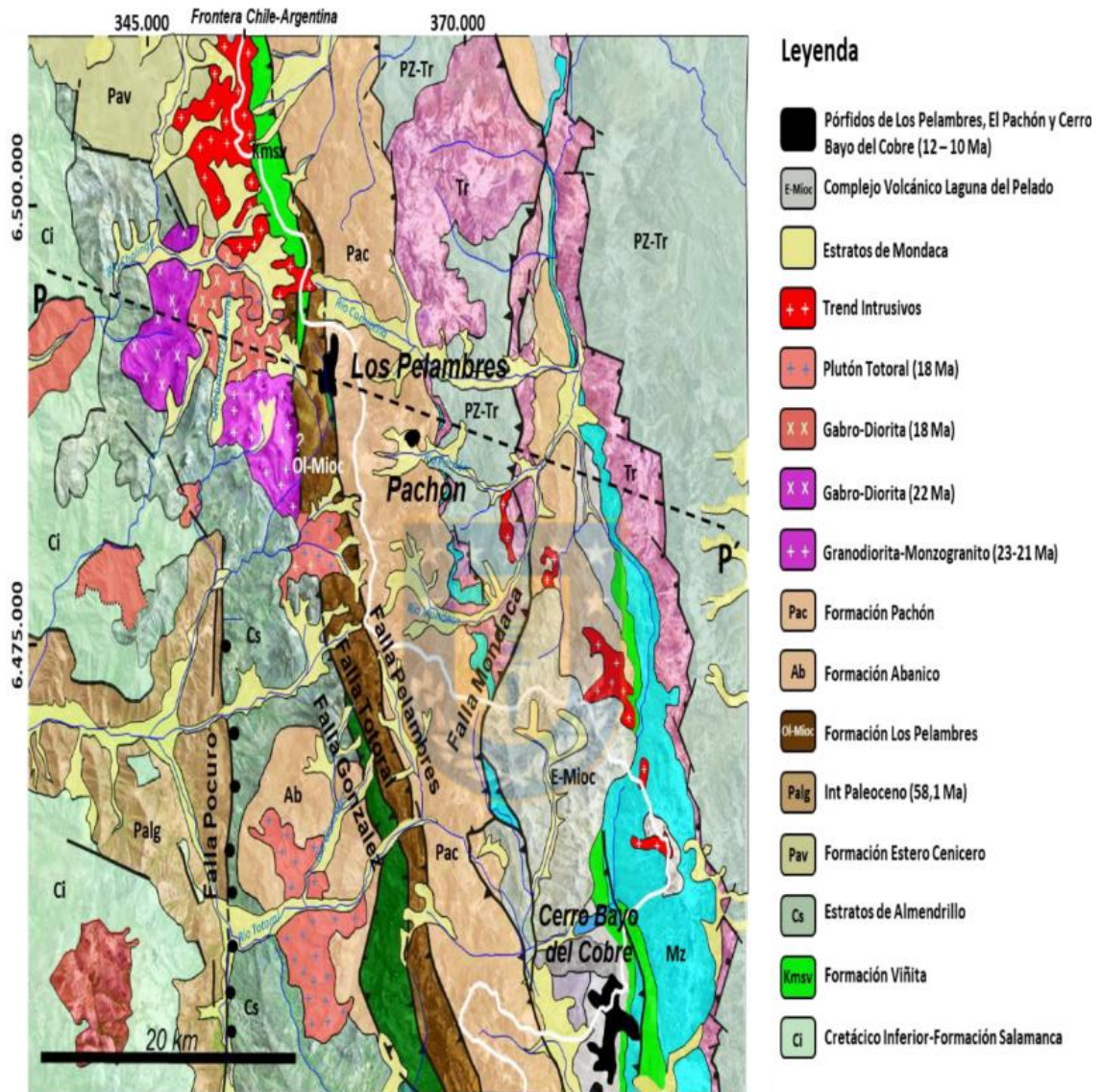


Figura 9: Mapa geológico regional del área de Los Pelambres (Extraído de Mpodozis, 2012).

### 3.1.1. Rocas estratificadas

Dentro de las rocas estratificadas existen distintas unidades, sin embargo, las más destacadas son la Formación Los Pelambres y la Formación El Pachón.

#### 3.1.1.1. Formación Los Pelambres

Esta unidad fue definida por Rivano y Sepúlveda (1991) como una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias intensamente deformadas, que afloran en el Estero Pelambres como en el valle del río Totoral, en donde se correlacionó con unidades volcano-sedimentarias del Neocomiano. Sin embargo, Mpodozis (2015) propone que esta formación corresponde en realidad a una unidad tectónica que forma parte de una estrecha banda de rumbo N-NW, de no más de 3 km de ancho, constituida por estratos muy deformados, limitados al oeste y este por las Fallas Tototal y Los Pelambres, las cuales las ponen en contacto con rocas mucho menos deformadas tanto al oriente (Formación Pachón) como al poniente (Estratos de Almendrillo). Entre ambas fallas, las rocas presentan manteos muy elevados y están plegadas de forma compleja (pliegues sub-isoclinales y láminas internas de corrimiento que definen una zona de cizalle).

Litológicamente la unidad es variada, incluyendo andesitas basálticas, lavas andesíticas y traquíticas, brechas volcanoclásticas, tobas daciandesíticas a riolíticas soldadas, *sills* andesíticos a riolíticos, volcarenitas y niveles de calizas lacustres. Generalmente, estas rocas están alteradas (clorita, epidota, calcita,  $\pm$  cuarzo,  $\pm$  albita) y en algunos sectores transformadas a *hornfels* de biotita y magnetita (Rivano y Sepúlveda, 1991; Mpodozis, 2015).

Dataciones U-Pb en circones indican, en general, edades comprendidas entre el Oligoceno inferior y el Mioceno inferior (Mpodozis, 2015).

#### 3.1.1.2. Formación El Pachón

La Formación El Pachón, definida por Lencinas y Tonel (1993), corresponde a una secuencia volcánica que se extiende en una faja de 5 a 10 km de ancho con orientación N-NW, ubicada al este de la Falla Pelambres. Está constituida por una alternancia de delgadas coladas de lavas básicas y, en menor medida, intercalaciones de niveles tobáceos junto a areniscas y

conglomerados rojos, los cuales forman un nivel continuo en la base expuesta de la secuencia entre los ríos Totoral y Teatinos

Las lavas corresponden principalmente a andesitas basálticas, afaníticas y porfídicas, generalmente alteradas a clorita, epidota, calcita y zeolitas. Las intercalaciones tobáceas incluyen tobas riódacíticas cristalo-pumíceas, soldadas con cuarzo, sanidina y biotita.

La datación más antigua disponible corresponde a una edad U-Pb de  $24,02 \pm 0,56$  Ma obtenida por Bertens *et al.* (2003, 2006), en Argentina, al norte del río Carnicería. En las cercanías del yacimiento Los Pelambres, numerosas edades U-Pb reportadas por Perelló *et al.* (2012) se disponen entre los  $22,7 \pm 0,2$  y  $21,36 \pm 0,8$ .

### 3.1.2. Rocas intrusivas

Entre las unidades intrusivas presentes en la zona, destacan:

#### 3.1.2.1. Pórfido Riolítico Los Pelambres

Corresponde a rocas intensamente recrystalizadas y deformadas que forman un pequeño afloramiento, inmediatamente al sur del *open pit* de la mina Los Pelambres. Presentan fenocristales de plagioclasa en cúmulos (4-5 mm) recrystalizados y argilizados con sobreposición de biotita y algunos pequeños ojos de cuarzo (0,5 mm). Las fases intersticiales cuarzo-feldespáticas presentan texturas mirmequíticas y micrográfica, y bandas oscuras de biotita-epidota. Una datación U-Pb en circones indicó un valor de  $70,1 \pm 1,5$  Ma. Otra datación obtenida, anteriormente por Bertens *et al.* (2006) indicó un valor de  $72,12 \pm 0,41$  Ma.

#### 3.1.2.2. *Stock* Pelambres

Intrusivo de 4,5 x 2,5 km de largo elongado en dirección NS, emplazado sobre la traza de la Falla Los Pelambres, que pone en contacto a la Formación El Pachón con la Formación Los Pelambres y pórfidos riolíticos cretácicos. Este intrusivo forma la mayor parte de la roca huésped de los pórfidos mineralizados del yacimiento Los Pelambres y está constituido por dioritas cuarcíferas de hornblenda y biotita.

Dos dataciones U-Pb en circones reportadas por Perelló *et al.* (2012), indican valores de  $13,60 \pm 0,30$  y  $13,0 \pm 0,70$  Ma, consistentes con las edades (U-Pb, en circón) de  $13,92 \pm 0,15$  a  $12,51 \pm 0,17$  Ma, publicadas con anterioridad por Bertens *et al.* (2003, 2006).

### 3.1.2.3. Pórfidos de Los Pelambres, El Pachón y El Altar-Piuquenes

Grupo formado por intrusivos hipabisales y diques afectados por alteración hidrotermal, portadores de la mineralización cuprífera en los yacimientos Los Pelambres, El Pachón, El Altar y Piuquenes. En Los Pelambres forman un clúster de pórfidos asociados a brechas magmáticas e hidrotermales emplazados dentro del *Stock* Pelambres y lavas andesíticas de la Formación El Pachón. Según Perelló *et al.* (2012), en Los Pelambres incluyen dos familias de intrusivos mineralizados: pórfidos dacíticos de hornblenda, biotita y cuarzo, y pórfidos andesíticos de biotita ( $\pm$  cuarzo) ambas acompañadas de diques microdioríticos tardíos. Quince edades U-Pb en circones, entre los  $12,30 \pm 0,30$  y  $10,53 \pm 0,14$  Ma, son concordantes con doce dataciones Re-Os en molibdenita comprendidas entre los  $11,81 \pm 0,06$  y  $10,14 \pm 0,04$  Ma (Perelló *et al.*, 2012).

### 3.1.3. Estructuras

A nivel regional, se observan tres grandes paneles estructurales limitados por sistemas de fallas inversas, de rumbo dominante norte-sur. Estos paneles son: panel occidental, panel central y el panel oriental. El yacimiento Los Pelambres se encuentra en el panel central, en contacto con la falla homónima (Saavedra, 2019).

El Panel Occidental, está limitado por las fallas Pocuro al oeste y Hualtatas al este. Está compuesto por rocas volcánicas y volcanosedimentarias agrupadas en dos formaciones principales, la Formación Salamanca y la Formación Abanico, ambas intruídas por el Plutón Hualtatas. El Panel Central, está definido por las fallas Hualtatas al oeste y Los Pelambres al este, y se compone por las rocas de la Formación Los Pelambres, las que son intruídas por el complejo intrusivo de Los Pelambres y cuerpos menores de cuarzo-feldespatos. Por último, el Panel Oriental se limita por las fallas Los Pelambres al oeste y El Fierro al este, ésta

última ubicada en el sector argentino. Esta unidad estructural está compuesta principalmente por rocas de la Formación Abanico (Castelli, 2006).

En cuanto a las fallas, todas son de tipo inverso de alto ángulo; la falla Pocuro posee un manteo de 50 a 60° hacia el este y alza rocas de las formaciones Abanico y Salamanca y del Plutón Fredes, la falla Hualtatas tiene un manteo entre 60 a 80° al oeste y alza rocas del Plutón Hualtatas sobre unidades de la Formación Los Pelambres y Abanico y, por otro lado, la falla Los Pelambres mantea 50 a 60° al oeste y alza rocas de la Formación Abanico sobre Los Pelambres. Esta falla fue utilizada por el Pórfido Cuarzo-Feldespático durante su ascenso antes de seguir como filón en unidades sedimentarias. La relación entre la falla Los Pelambres y el pórfido homónimo, indican una estrecha relación genética entre ambos, en la que el sistema porfídico se interpreta como relleno y canalizado de la falla, en un ambiente de emplazamiento sintectónico (Castelli, 2006; Brockway, 2008).

### 3.2.Marco geológico local



Figura 10: Mina Los Pelambres (Extraído de Taller de Explosivos AMSA – Madrid, 2019).

El yacimiento Los Pelambres (Figura 10) en general, muestra grandes similitudes con los esquemas típicos de pórfidos cupríferos en cuanto a alteración y mineralización. Pertenece a la franja metalogénica del Mioceno superior-Plioceno y se encuentra en el extremo norte de ésta, en los Andes Centrales, al interior de un extenso valle glacial inmediatamente al oeste del límite con la República Argentina, a altitudes que varían entre los 2.500 y 4.000 m s.n.m. (Camus, 2002).

El perfil de mineralización se asocia a un complejo intrusivo de 5 km de largo por 2 km de ancho. Se deposita en rocas andesíticas volcánicas y en forma de pórfido estéril feldespático (Informe Interno Geotecnia MLP, 2019). El depósito geológico se compone por una serie de brechas geológicas ígneas e hidrotermales. La mineralización primaria es calcopirita, molibdeno y bornita, y como mineralización secundaria, se tiene calcosina y vetillas de covelina. En detalle, una serie de procesos supérgenos han formado una zona de material lixiviado sobre el enriquecimiento secundario el cual cubre la zona de mineralización primaria (Modelo de Macizo Rocosó MLP, 2018).

### 3.2.1. Litología

Al inicio de este capítulo se detalla la litología existente en la región aledaña al yacimiento Los Pelambres, con las formaciones sedimentarias y rocas intrusivas presentes. Aun así, en la mina se utiliza un modelo litológico propio (Figura 11) proveniente de las principales unidades litológicas. Este modelo engloba parte de las formaciones y rocas intrusivas del marco geológico regional, sin embargo, son nombradas de acuerdo con su composición o textura, teniendo así una nomenclatura única que pueda ser ocupada por las diversas áreas de la mina y, además, ser reconocibles de manera más sencilla en terreno. Las litologías que se presentan en este estudio son descritas en el Modelo de Macizo Rocosó MLP (2018), y corresponden principalmente a:

- Diorita Cuarcífera (DIQ): Roca de textura fanerítica, inequigranular de grano medio, en ocasiones pobremente porfídica. En algunos sectores de la mina aparece una diorita de textura porfídica, a la que se le ha denominado Pórfido Diorita Cuarcífera (PDIQ).

- Pórfido B (PB): Corresponde a un intrusivo de composición dacítica, de textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, máficos y escasos ojos de cuarzo. La masa fundamental está constituida por un agregado microcristalino de cuarzo-feldespatos y biotita secundaria.
- Andesita Pachón y Andesita Pelambres (AND): Rocas de textura porfídica, compuestas por fenocristales de plagioclasa y fenocristales de biotita. La matriz tiene textura intergranular y está compuesta por microlitos de plagioclasa, escaso cuarzo intersticial y abundante biotita fina diseminada. Cronológicamente, han sido divididas en las unidades Andesita Pachón y Andesita Pelambres.

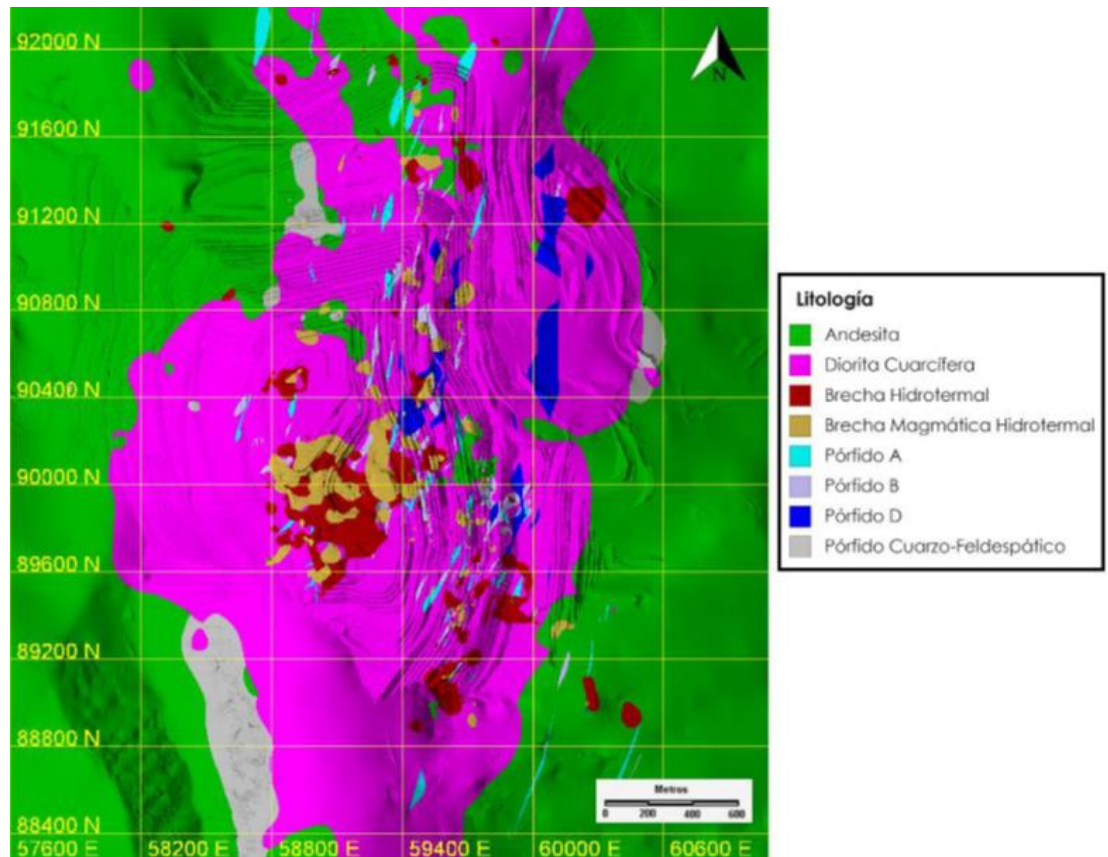


Figura 11: Modelo litológico de MLP (sin coluvio) (Extraído de Saavedra, 2019).

### 3.2.2. Alteración

Como se mencionó anteriormente, el yacimiento tiene las características típicas de los sistemas de alteración hidrotermal presente en depósitos tipo pórfidos cupríferos. Las alteraciones muestran un patrón concéntrico, centrado en el

*stock* diorítico. En el centro del yacimiento, se expone una zona de alteración potásico-silíceo rodeada por otra de tipo filica en un halo de aproximadamente 500 m. Hacia los bordes aparece una zona de alteración propilítica subordinada a la roca caja del *stock* diorítico (Saavedra, 2019).

De acuerdo con el modelo de alteración del yacimiento (Figura 12), la zona central, restringida al *stock* diorítico, corresponde a alteración potásica, siendo ésta la de mayor extensión. Esta alteración está definida por la presencia de feldespato potásico junto con biotita hidrotermal.

La zona de alteración filica, está compuesta por cuarzo y sericita, con clorita, turmalina, epidota y yeso subordinados. Se encuentra en el sector NW de la mina.

En cuanto a la alteración propilítica, ésta se encuentra en la zona externa del rajo, afectando a las rocas volcánicas. Los minerales presentes corresponden a clorita, epidota y pirita subordinada, con trazas de calcita en amígdalas y vetillas (Modelo de Macizo Rocos MLP, 2018).

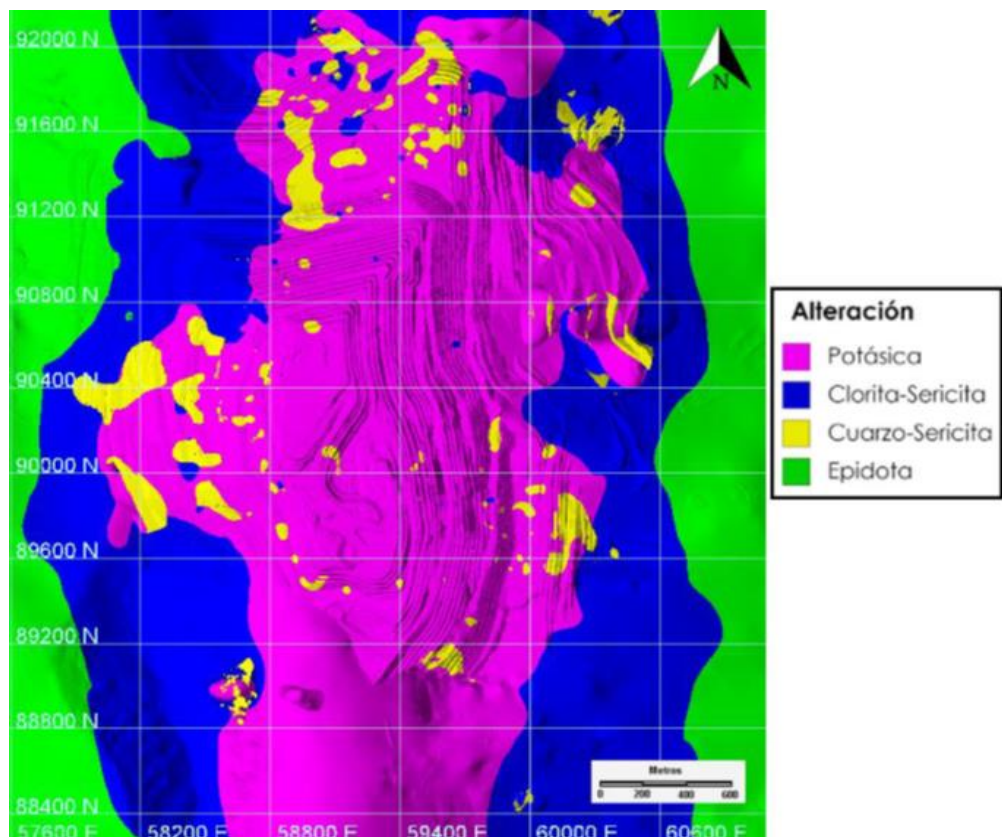


Figura 12: Modelo de alteración de MLP (Extraído de Saavedra, 2019).

### 3.2.3. Unidades geotécnicas (UGT) (Modelo de Macizo Rocoso MLP, 2018)

En Mina Los Pelambres existe una zonificación del yacimiento a través de Unidades Geotécnicas (también referenciadas como UGT, Figuras 13 y 14), agrupando características litológicas, mineralógicas y mecánicas similares (Modelo de Macizo Rocoso MLP, 2018). En específico, las UGT son una integración entre los ambientes mineralógicos de formación del yacimiento, las unidades litológicas del modelo geológico y su ubicación con respecto al techo de anhidrita, división geológica entre la mineralización supérgena e hipógena.

- UGT-1 Primario Con Anhidrita: Esta unidad está compuesta principalmente por Diorita, correspondiendo a la zona de mineralización hipógena, ubicada bajo el límite del techo de Anhidrita. Presenta un RQD promedio de 98 y un RMR promedio de 82, caracterizando esta unidad como una zona de muy buena calidad geotécnica.
- UGT-2 Primario Sin Anhidrita: al igual que la UGT-1, esta unidad está compuesta principalmente por Diorita, corresponde a la zona de mineralización hipógena, ubicada sobre el límite del techo de Anhidrita. Presenta un RQD promedio de 84 y un RMR promedio de 69, caracterizando esta unidad como una zona de buena calidad geotécnica.
- UGT-3 Secundario: Esta unidad está compuesta litológicamente por Diorita, Brechas y Pórfidos, corresponde a una zona de mineralización supérgena, ubicada sobre el techo de Anhidrita. Presenta un RQD promedio de 81 y un RMR promedio de 61, caracterizando esta unidad como una zona de buena a regular calidad geotécnica.
- UGT-5 Andesita Marginal Oeste Intermedia: Esta unidad está compuesta litológicamente por rocas volcano-sedimentarias, ubicada en el sector Oeste del rajo Los Pelambres; esta unidad se presenta bajo y sobre el límite del techo de Anhidrita. Presenta un RQD promedio de 27 y un RMR promedio de 43, caracterizando esta unidad como una zona de mala calidad geotécnica.

- UGT-9 Lixiviado: Esta unidad incluye todas las litologías (Andesitas, Dioritas, Brechas y Pórfidos), presente en la zona superior de todo el rajo, bajo la zona de coluvio. Presenta un RQD promedio de 77 y un RMR promedio de 57, caracterizando esta unidad como una zona de regular calidad geotécnica.

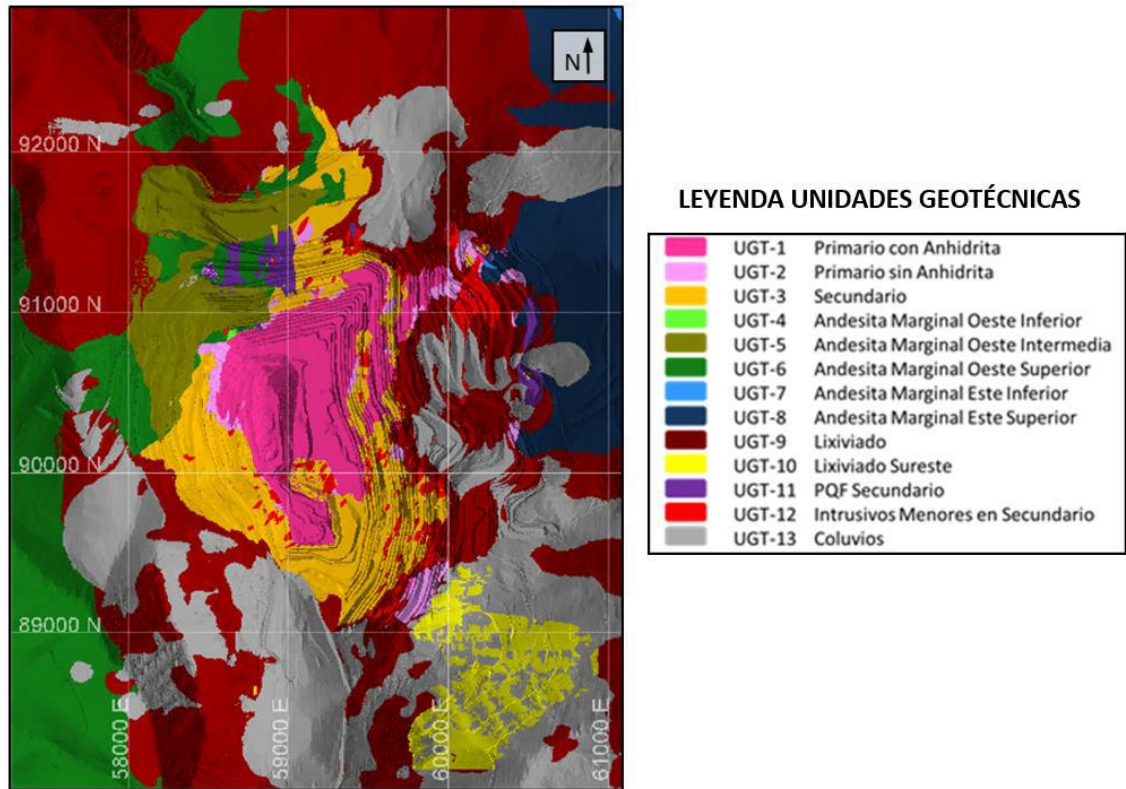


Figura 13: Unidades Geotécnicas de MLP (Extraído del Modelo de Macizo Rocoso MLP, 2018).

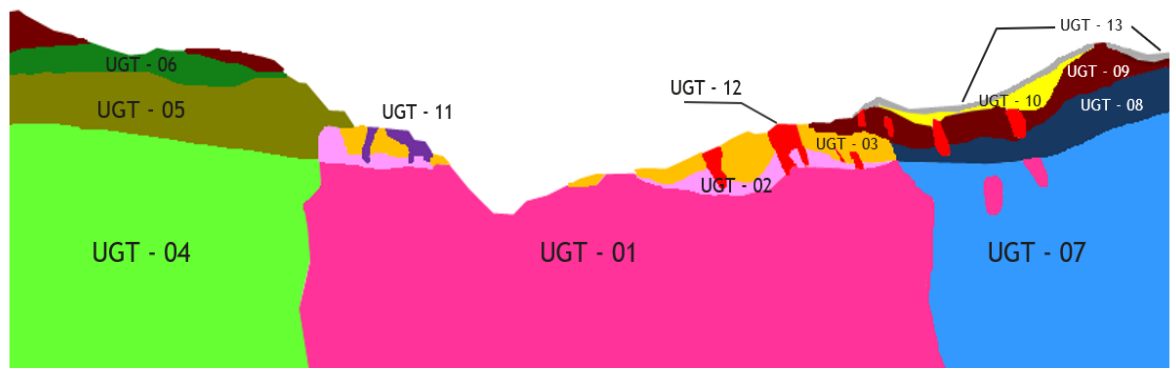


Figura 14: Perfil esquemático NE-SW de MLP con las UGT en profundidad (Extraído del Modelo de Macizo Rocoso MLP, 2018).

### 3.2.4. Propiedades resistentes de la roca intacta

Las unidades geotécnicas evaluadas son desde la UGT 01 hasta la UGT 12, excluyendo la UGT 13, correspondiente a un conjunto de sedimentos no consolidados. Las propiedades de la roca intacta por UGT resumidas en la siguiente tabla (Tabla 1) son la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), el módulo de elasticidad ( $E_i$ ) y el peso unitario (Enaex, 2024a).

| UGT<br>MLP | Peso unitario (t/m <sup>3</sup> ) |      |       |      | Módulo de elasticidad $E_i$<br>(GPa) |      |       |      | UCS (MPa) |      |       |      |
|------------|-----------------------------------|------|-------|------|--------------------------------------|------|-------|------|-----------|------|-------|------|
|            | N                                 | Máx. | Medio | Mín. | N                                    | Máx. | Medio | Mín. | N         | Máx. | Medio | Mín. |
| UGT 01     | 150                               | 2,70 | 2,66  | 2,63 | 123                                  | 83   | 61    | 30   | 94        | 167  | 110   | 98   |
| UGT 02     | 27                                | 2,66 | 2,63  | 2,60 | 23                                   | 86   | 62    | 35   | 16        | 136  | 114   | 77   |
| UGT 03     | 81                                | 2,53 | 2,52  | 2,47 | 48                                   | 62   | 36    | 20   | 27        | 140  | 74    | 53   |
| UGT 04     | 16                                | 2,82 | 2,79  | 2,72 | 13                                   | 107  | 67    | 35   | 15        | 225  | 100   | 79   |
| UGT 05     | 19                                | 2,79 | 2,74  | 2,69 | 9                                    | 71   | 53    | 33   | 8         | 115  | 74    | 74   |
| UGT 06     | 15                                | 2,84 | 2,77  | 2,72 | 2                                    | -    | 42    | -    | 8         | 115  | 78    | 89   |
| UGT 07     | 6                                 | 2,86 | 2,79  | 2,69 | 4                                    | 68   | 55    | 40   | 5         | 154  | 115   | 125  |
| UGT 08     | 3                                 | 2,84 | 2,82  | 2,80 | 3                                    | -    | 34    | -    | 2         | -    | 82    | -    |
| UGT 09     | 59                                | 2,56 | 2,49  | 2,40 | 26                                   | 52   | 32    | 12   | 8         | 70   | 84    | 42   |
| UGT 10     | 6                                 | 2,66 | 2,55  | 2,42 | 2                                    | -    | 28    | -    | 3         | -    | 52    | -    |
| UGT 11     | 13                                | 2,60 | 2,56  | 2,53 | 9                                    | 41   | 29    | 15   | 7         | 195  | 128   | 135  |
| UGT 12     | 25                                | 2,62 | 2,50  | 2,45 | 19                                   | 60   | 32    | 15   | 37        | 123  | 82    | 34   |

Tabla 1: Propiedades geomecánicas de la roca intacta (Extraído de Manual de Diseño Enaex, 2024).

## CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para lograr los objetivos de este estudio, se estableció una metodología cuantitativa y sistemática que permitió lograr una actualización del modelo de estimación de UCS del módulo *Bright Blast* de Enaex, la cual se esquematiza en la figura 15.

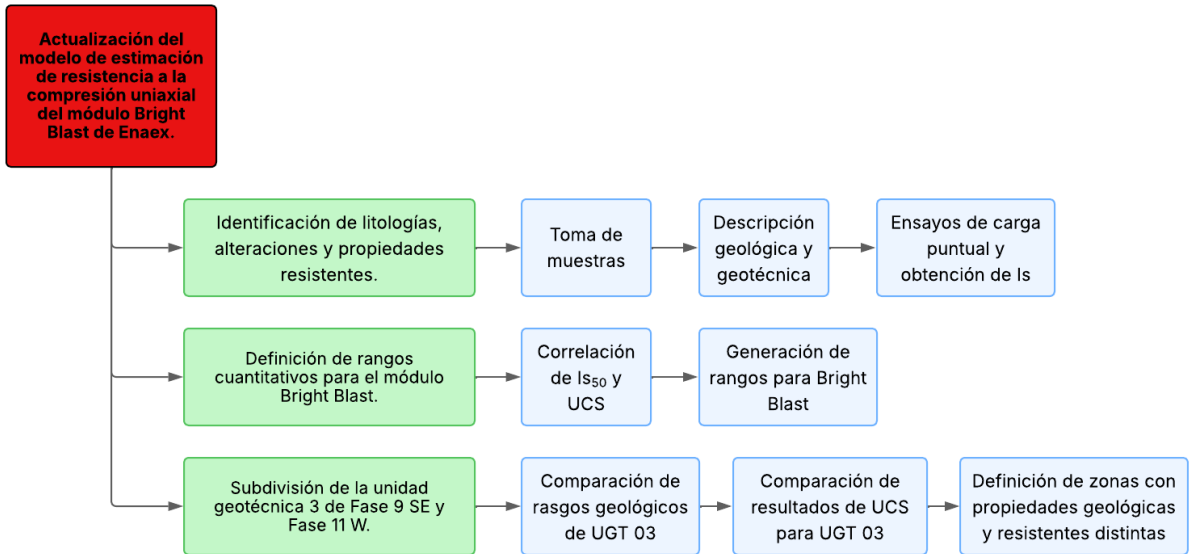


Figura 15: Flujo metodológico seguido para este estudio (Elaboración propia).

### 4.1. Identificar litologías, alteraciones y propiedades resistentes

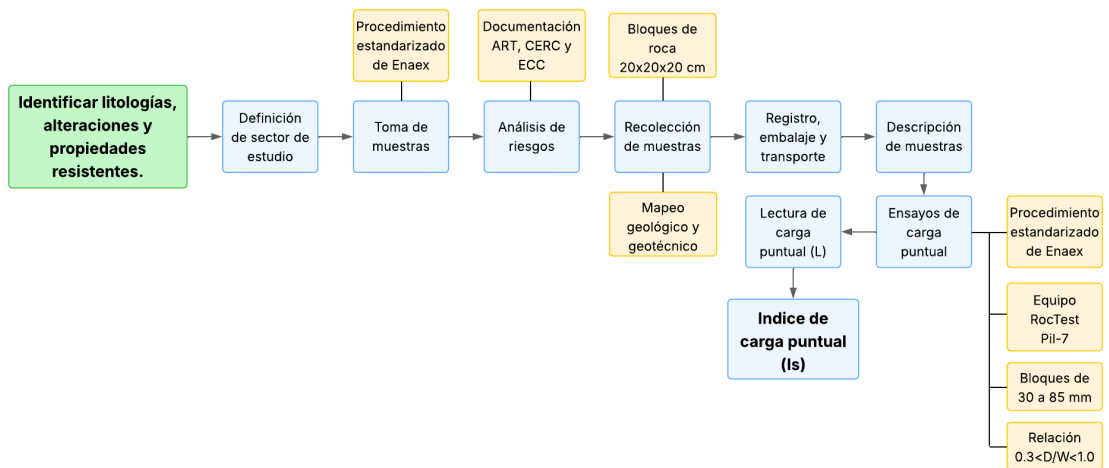


Figura 16: Flujo metodológico seguido para lograr el objetivo específico 1 (Elaboración propia).

Para la realización de este trabajo se seleccionaron como sectores objetivos la Fase 9 SE y la Fase 11 W del rajo Los Pelambres, los cuales se destacan en la figura 17. El criterio de selección de estos sectores se fundamentó en la presencia de las UGT que abarcan el mayor volumen de macizo rocoso; UGT 01, 02, 03 y 05, y que se presentan en las figuras 18 y 19. Además, se consideró la cantidad de información disponible en el módulo *Bright Blast* para las fases 9SE y 11W, así como la ausencia de restricciones de acceso a dichas fases.

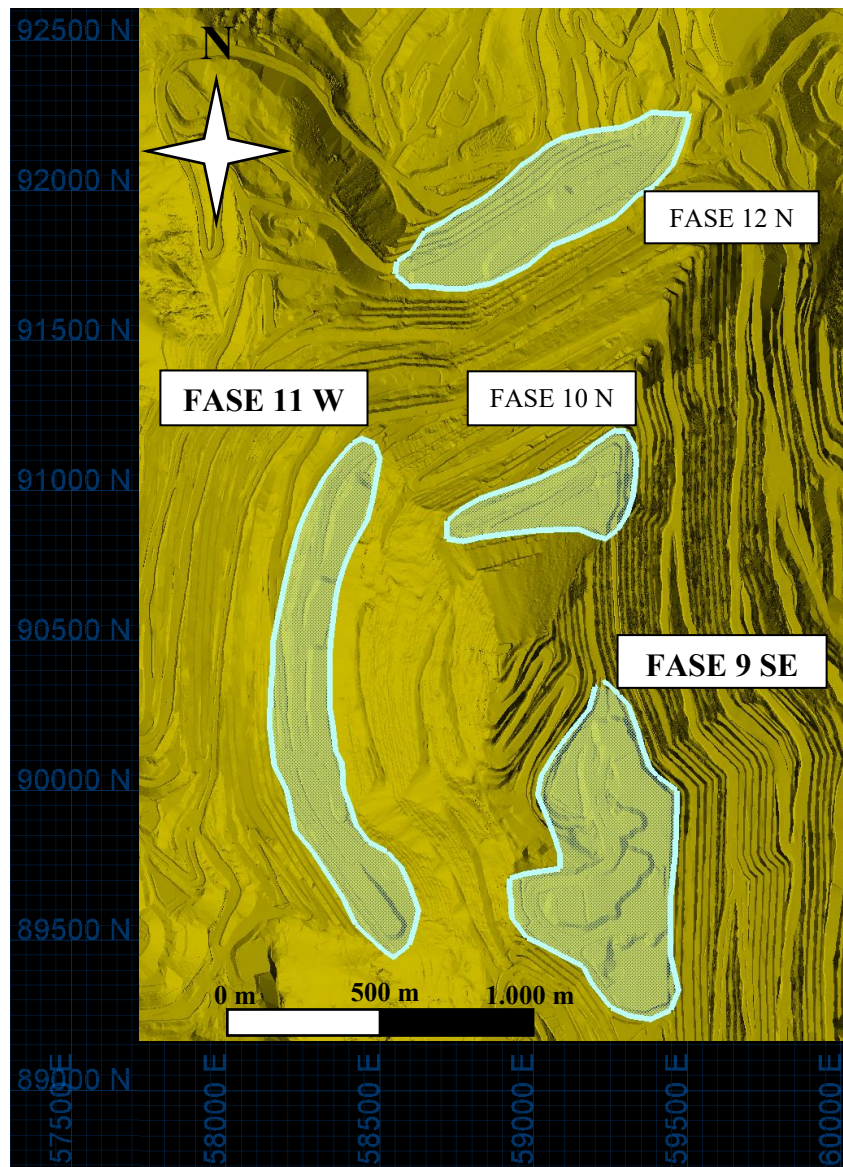


Figura 17: Fases operativas en MLP (Elaboración propia).

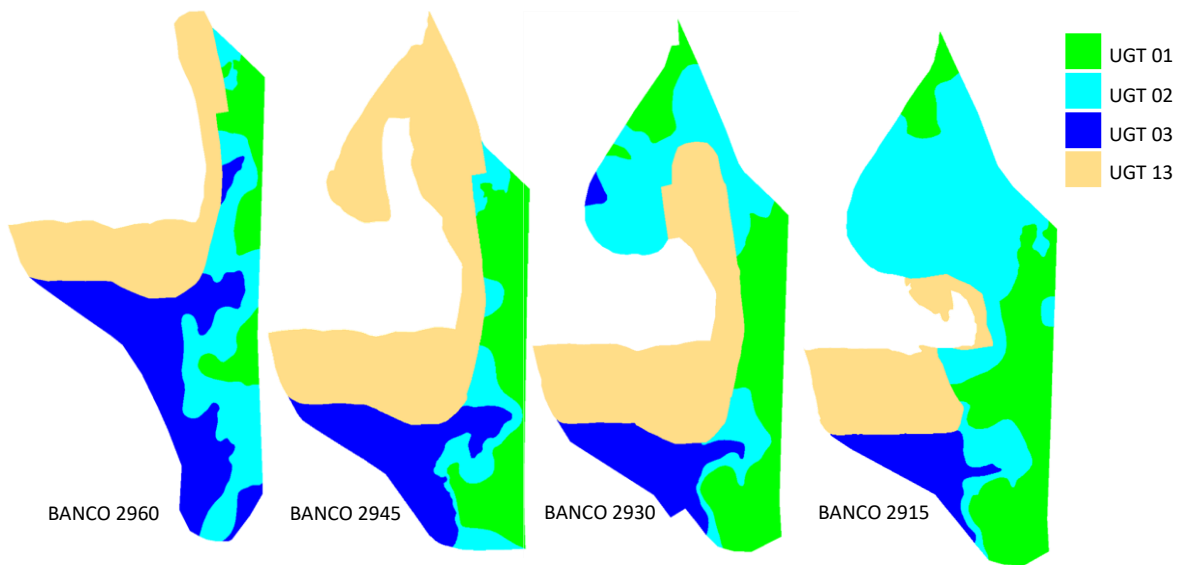


Figura 18: Modelo UGT de MLP para distintos bancos de Fase 9 SE (Elaboración propia).

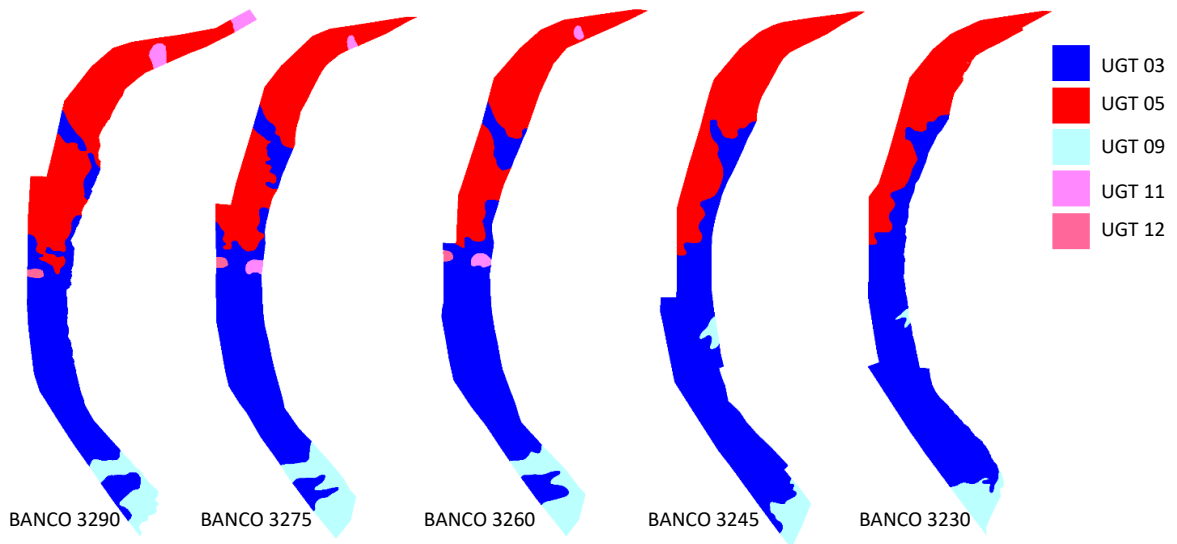


Figura 19: Modelo UGT de MLP para distintos bancos de Fase 11 W (Elaboración propia).

Para el cumplimiento de este objetivo se realizaron campañas de muestreo en las fases 9 SE y 11 W, siguiendo el procedimiento estandarizado por Enaex, el cual garantizó una recolección representativa, asegurando estándares de seguridad y calidad. Previo a la toma de muestras, se requirió contar con la documentación requerida por MLP; Análisis de Riesgos de Tareas (ART), Cartilla de Evaluación de Riesgos de Caída de Roca (CERC) y Estrategias de Controles Críticos (ECC), documentos detallados en “Anexo 1”, todo ello para generar una toma de muestras de forma segura y controlada.

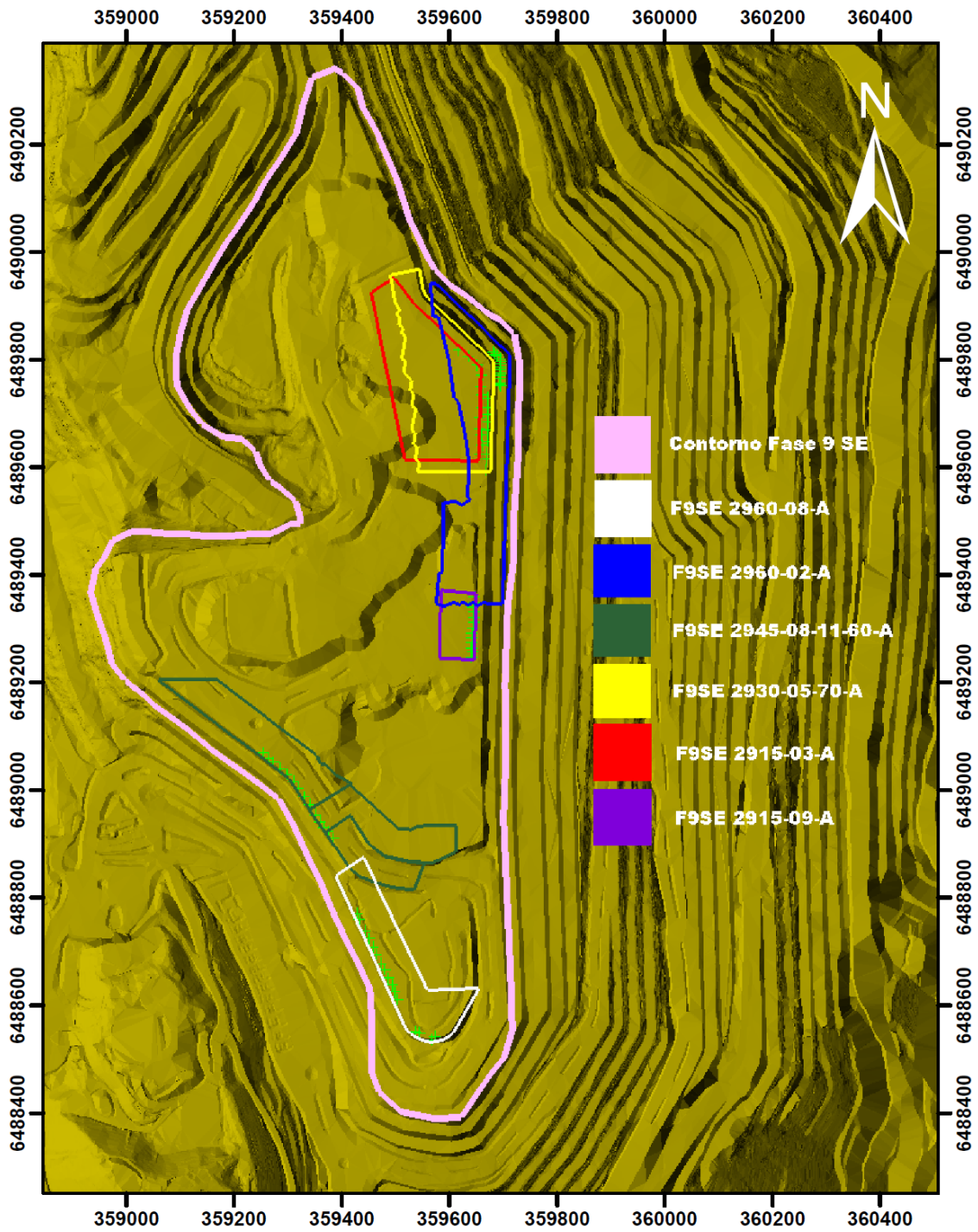


Figura 20: Mapa de polígonos muestreados en Fase 9 SE (Elaboración propia).

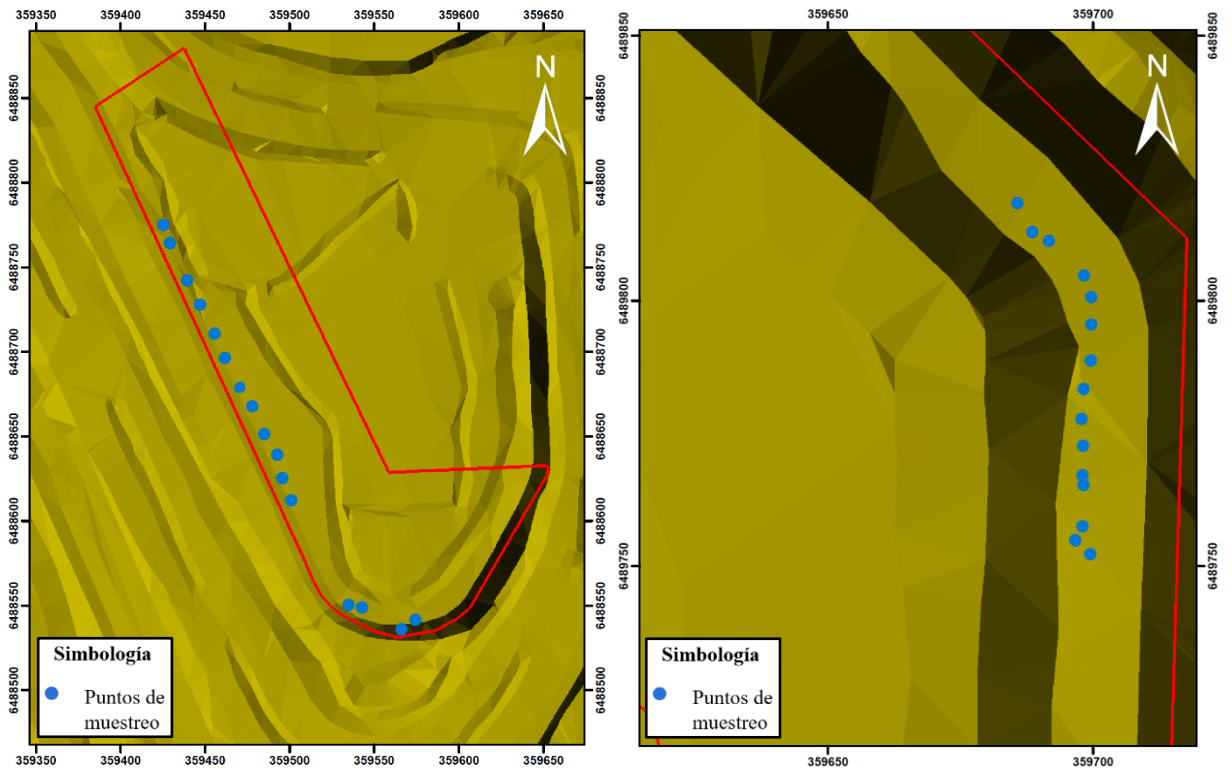


Figura 21: Puntos muestreados en Fase 9 SE; a la izquierda Polígono F9SE 2960-08-A, a la derecha Polígono F9SE 2960-02-A (Elaboración propia).

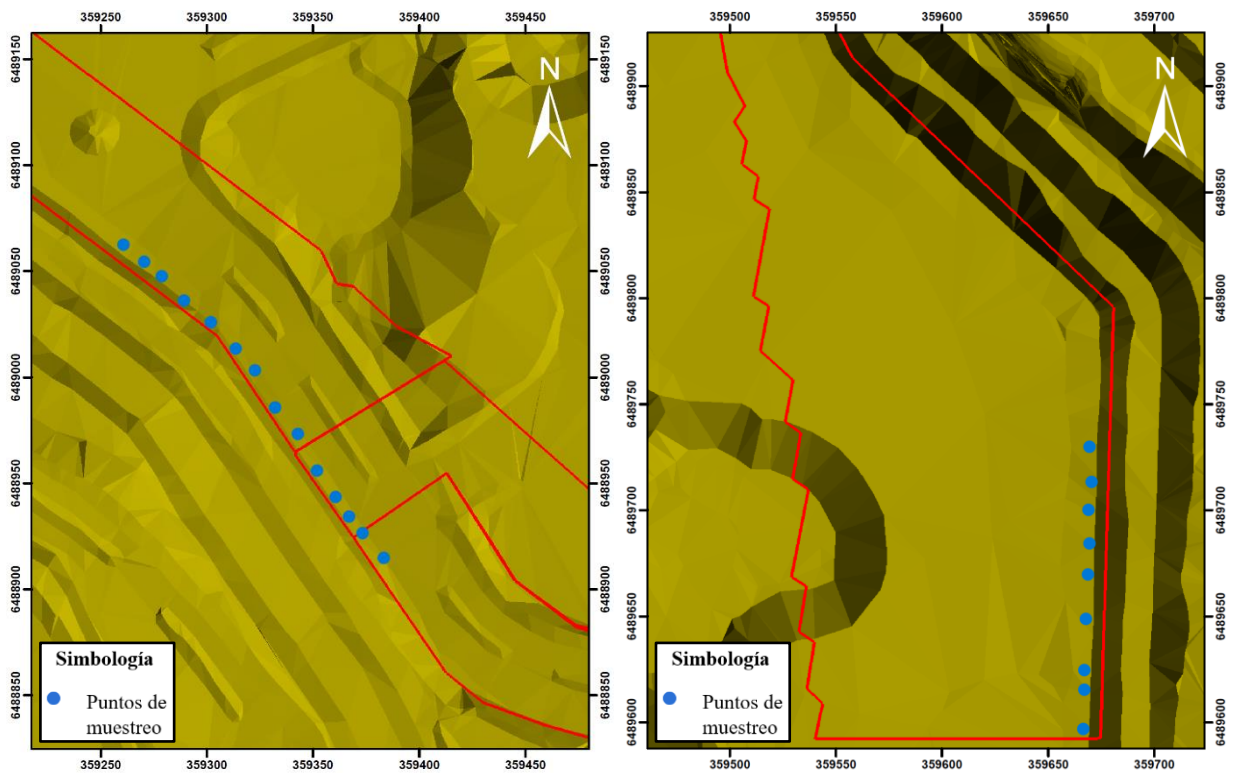


Figura 22: Puntos muestreados en Fase 9 SE; a la izquierda Polígono F9SE 2945-08-11-60-A, a la derecha Polígono F9SE 2930-05-70-A (Elaboración propia).

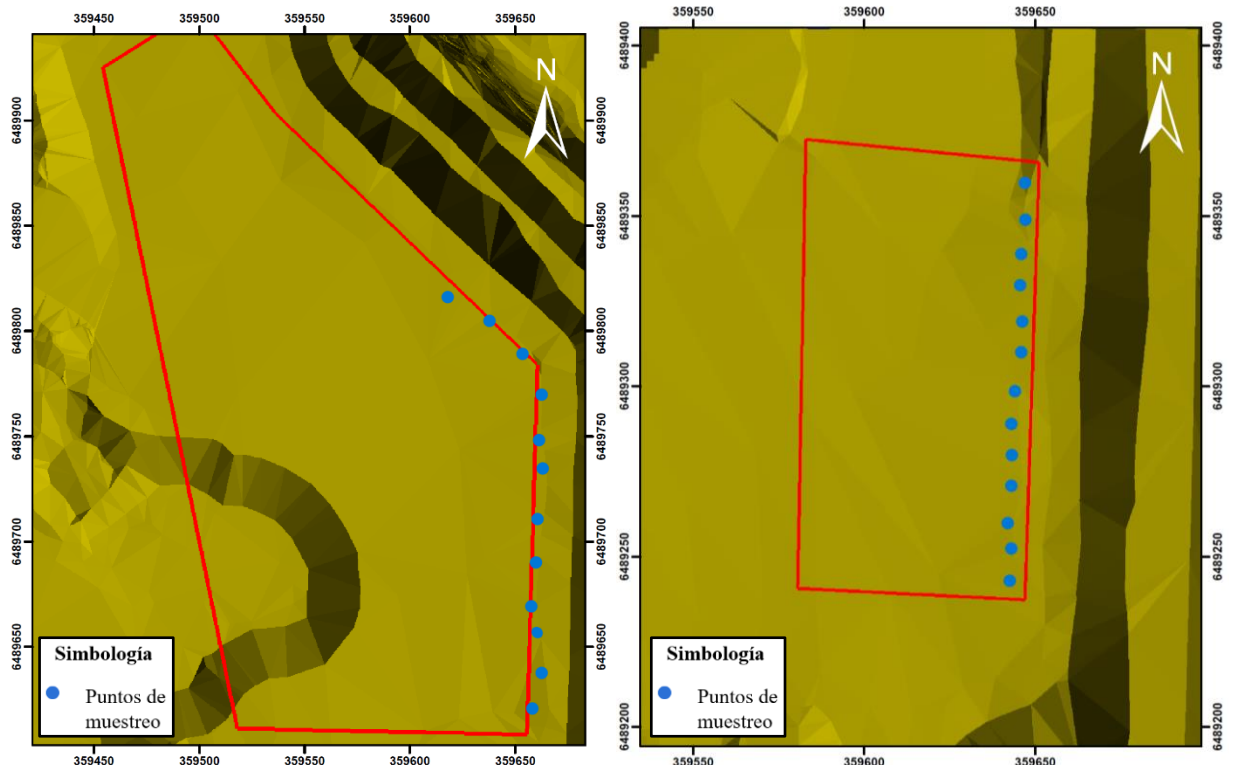


Figura 23: Puntos muestreados en Fase 9 SE; a la izquierda Polígono F9SE 2915-03-A, a la derecha Polígono F9SE 2915-09-A (Elaboración propia).

Las muestras se extrajeron directo desde el talud de los bancos, espaciadas cada 5 a 10 m dependiendo del tamaño de la malla de diseño, con medidas de aprox. 20x20x20 cm. Las muestras fueron recolectadas en cada UGT presente en los bancos, asegurando un mínimo de 5 muestras por unidad. Esto se realizó debido a que el “Procedimientos de ensayos de carga puntual (PLT)” de Enaex y la norma ASTM D5731 nos indica que para obtener un valor de Índice de carga puntual representativo, se debe contar con al menos 10 ensayos válidos, por lo cual se consideró un mínimo de 2 submuestras por cada bloque extraído. En la figura 20 se muestra un mapa general de los polígonos muestreados de Fase 9 SE, y en las figuras 21 a la 23 se detallan los puntos muestreados de cada uno de ellos. Así mismo, en la figura 24 se muestran aquellos polígonos muestreados en Fase 11 W, y en las figuras 25 a la 27 se detallan dichos polígonos con los puntos de toma de muestras. Además, se requirió la toma de puntos GPS (este, norte y cota) de cada muestra para luego relacionarla al modelo *Bright Blast*, como también un mapeo geológico y geotécnico utilizando las cartillas de

“Mapeo de Bancos” y “Mapeo GSI” (Anexo 2), entregadas por Enaex, para revisar desviaciones del modelo de UGT entregado por MLP.

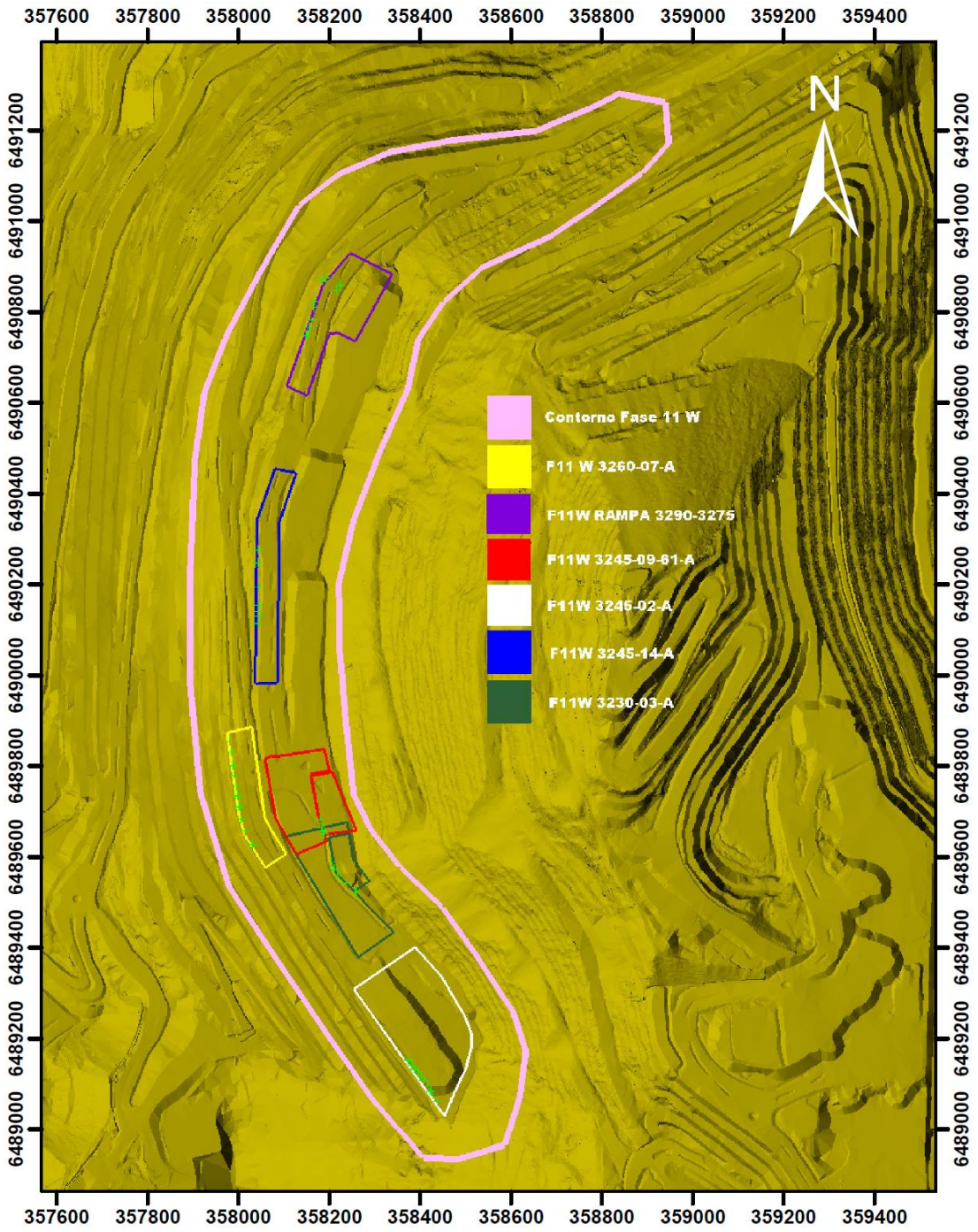


Figura 24: Mapa de polígonos muestreados en Fase 11 W (Elaboración propia).

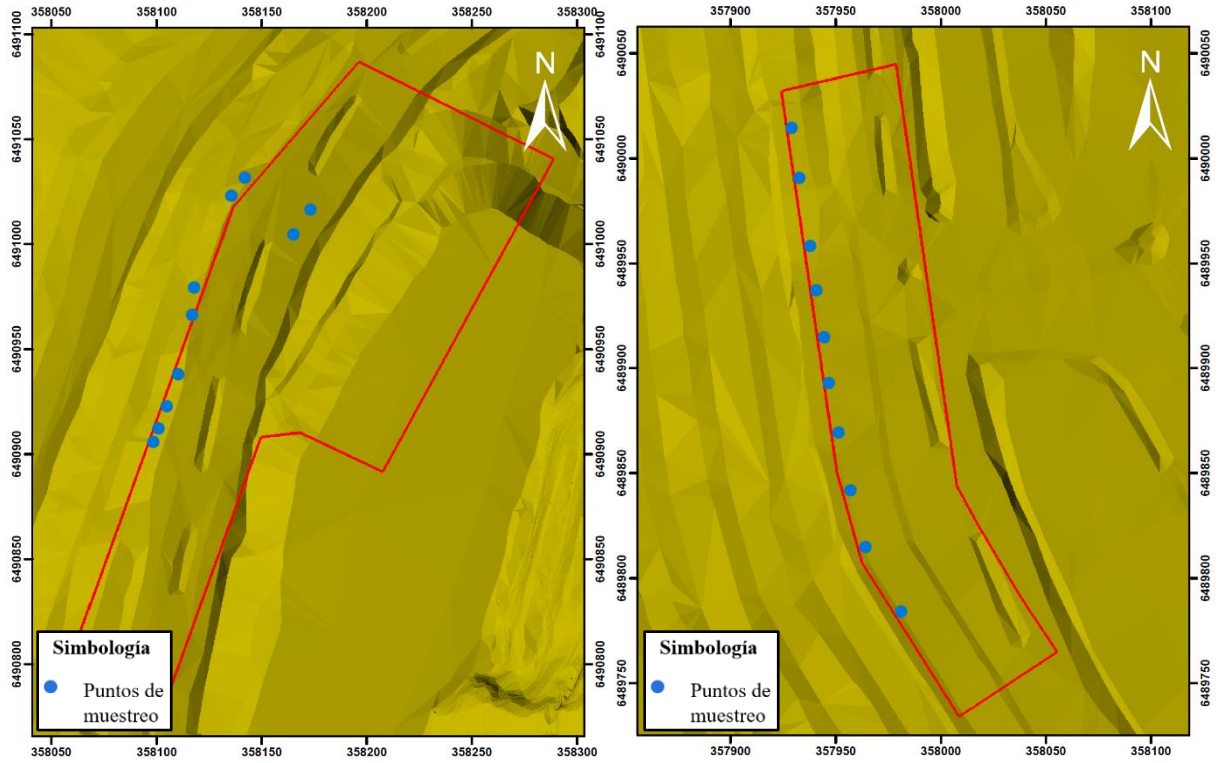


Figura 25: Puntos muestreados en Fase 11 W; a la izquierda Polígono Rampa 3290-3275, a la derecha Polígono F11W 3260-07-A (Elaboración propia).

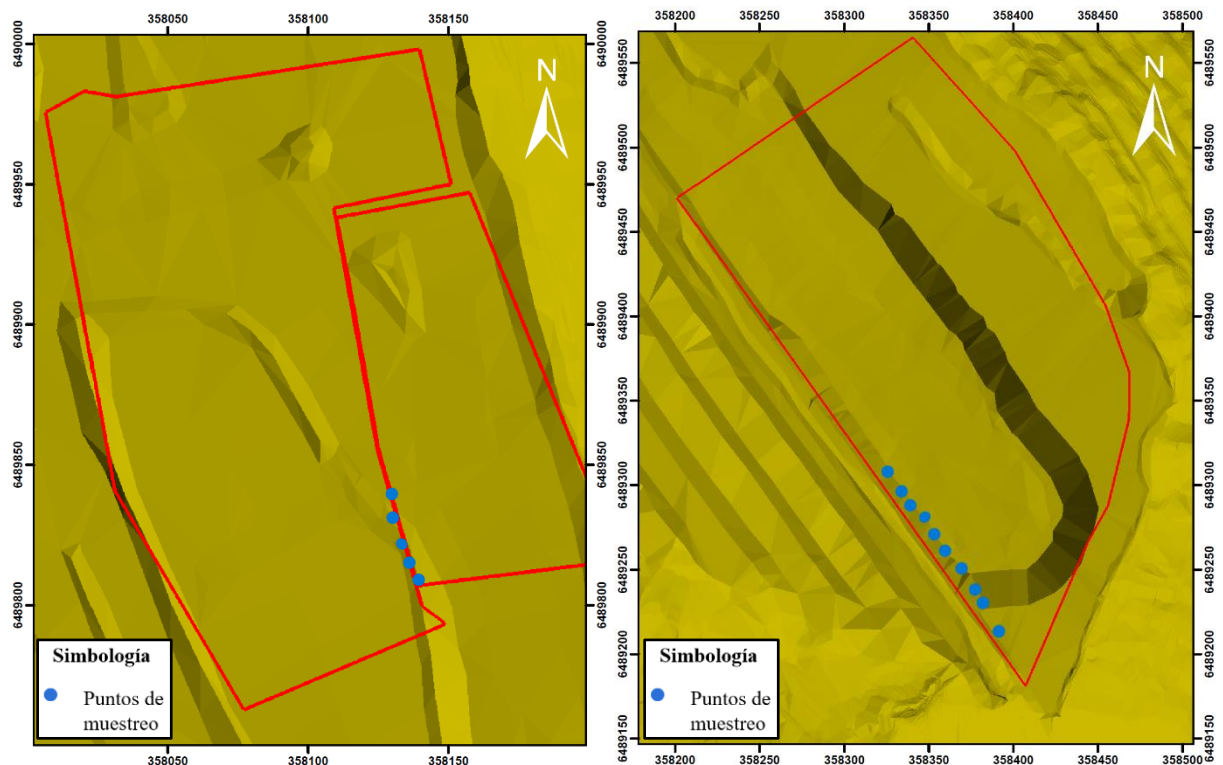


Figura 26: Puntos muestreados en Fase 11 W; a la izquierda Polígono F11W 3245-09-61-A, a la derecha Polígono F11W 3245-02-A (Elaboración propia).

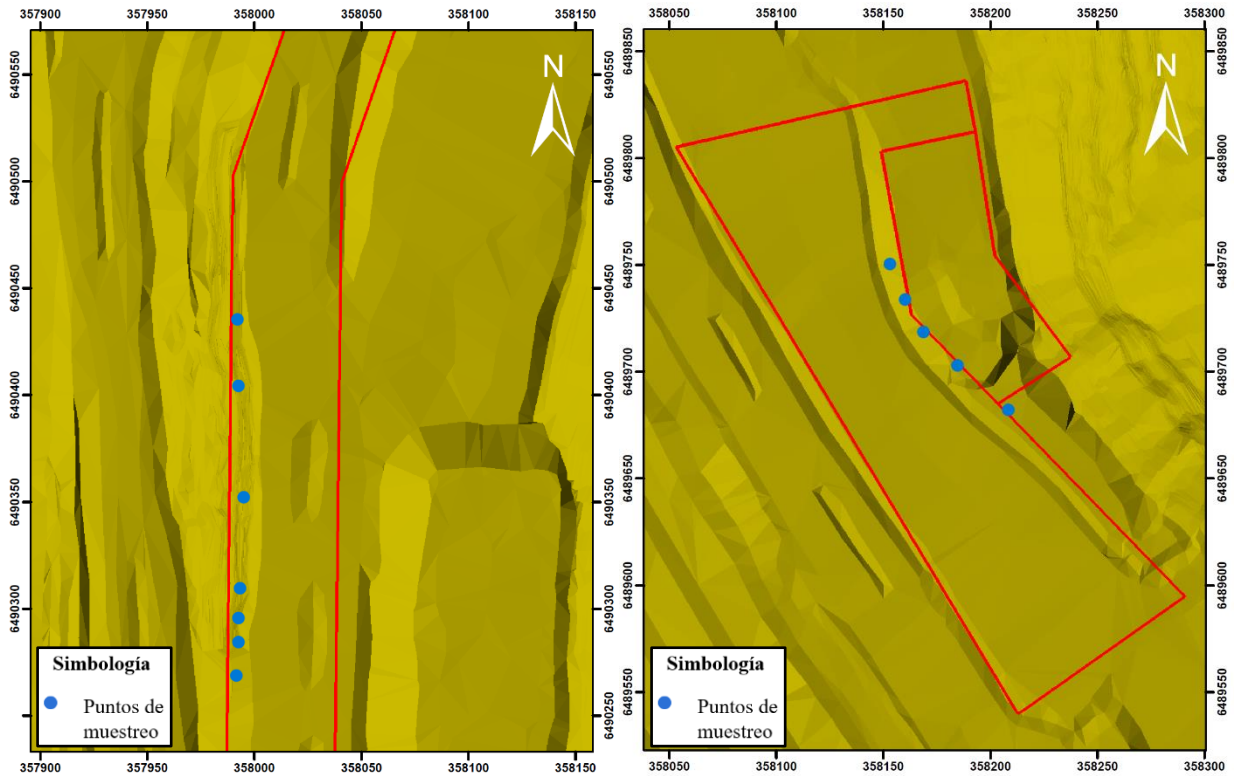


Figura 27: Puntos muestreados en Fase 11 W; a la izquierda Polígono F11W 3245-14-A, a la derecha Polígono F11W 3230-03-A (Elaboración propia).

Posteriormente, se realizó una descripción geológica detallada de las muestras obtenidas. Esta descripción incluyó color y tonalidad según Munsell (2009) (Figura 28), mineralogía primaria, alteraciones presentes y su intensidad (leve <25% roca, moderado 25-75% roca e intenso >75% roca) y presencia de mineralización y/o de estructuras secundarias.

| Color    | Aspecto     | Tonalidad |
|----------|-------------|-----------|
| Rosado   | Rosáceo     | Claro     |
| Rojo     | Rojizo      | Oscuro    |
| Amarillo | Amarillento |           |
| Marrón   | Oliváceo    |           |
| Oliva    | Verdoso     |           |
| Verde    | Azulado     |           |
| Azul     | Grisáceo    |           |
| Blanco   | Pardusco    |           |
| Gris     |             |           |
| Negro    |             |           |
| Púrpura  |             |           |

Figura 28: Descripción de color de roca según coloración, aspecto y tonalidad (Modificado de Munsell, 2009).

Para la realización de ensayos de carga puntual (PLT) se siguió el procedimiento estandarizado “Procedimiento de Ensayos de Carga Puntual (PLT)” entregado por Enaex. Este procedimiento está elaborado en base a la normativa ISRM (1985) y la norma ASTM D5731 que regulan y estandarizan la determinación del índice de resistencia de carga puntual ( $I_s$ ) y aplicación para las clasificaciones de resistencia en rocas. Además, se aseguró que los bloques que fueron ensayados cumplieran con la relación  $0.3 < \text{Diámetro}/\text{Ancho} < 1.0$  y  $\text{Diámetro} < 2 * \text{Largo}$ , ya que la norma indica que deben cumplir estas condiciones de tamaño para que el análisis sea considerado válido. Durante la etapa de terreno, se obtuvieron 126 muestras totales, las cuales fueron reducidas al tamaño requerido para los ensayos PLT. Hecho esto, se generaron 301 submuestras válidas para la realización de los ensayos. El principal criterio de selección de las submuestras ensayadas fue el cumplimiento del tamaño mínimo requerido por el equipo PLT. Además, se consideró exclusivamente roca intacta, descartando todas aquellas muestras que presentaban vetas y/o fracturas preexistentes. Asimismo, se priorizó que las muestras seleccionadas tuvieran una litología y un grado de alteración coherentes con los observados en la cara de banco del sector de origen. Los ensayos PLT fueron realizados en las instalaciones de Planta Enaex, ubicada en el rajo Los Pelambres, con un equipo marca RocTest modelo Pil-7.

#### 4.2. Definición de rangos cuantitativos para el módulo Bright Blast.

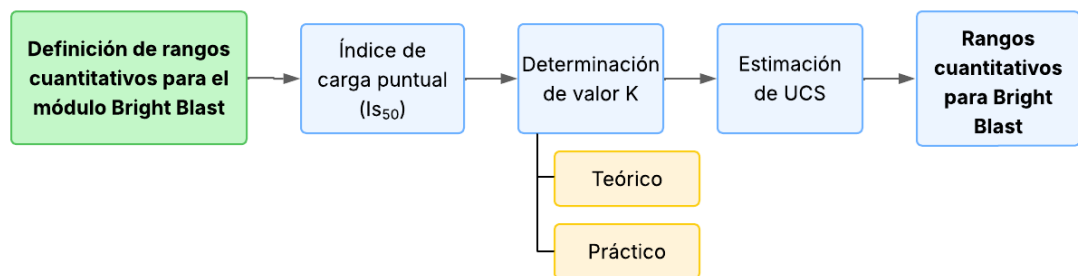


Figura 29: Flujo metodológico seguido lograr el objetivo específico 2 (Elaboración propia).

Para lograr este objetivo se generó una base de datos con la información obtenida en los ensayos de carga puntual. Sin embargo, estos valores no pueden ser utilizados directamente, puesto que las muestras no son homogéneas en tamaño y forma, lo que

hizo necesario una normalización según la norma ASTM D5731. Para ello se debió calcular un factor de corrección (F) para cada ensayo válido realizado, para luego calcular el índice de carga puntual normalizado ( $I_{S50}$ ).

| Referencia                | Ecuación de correlación          |
|---------------------------|----------------------------------|
| D'Andrea et al. (1964)    | $UCS = 15.3 * I_{S50} + 16.3$    |
| Deere y Miller (1966)     | $UCS = 20.7 * I_{S50} + 29.6$    |
| Singh (1981)              | $UCS = 18.7 * I_{S50} - 13.2$    |
| Gunsalus y Kulhawy (1984) | $UCS = 16.15 * I_{S50} + 51.0$   |
| Cargill y Shakoor (1990)  | $UCS = 23 * I_{S50} + 13$        |
| Grasso et al. (1992)      | $UCS = 25.67 * (I_{S50})^{0.57}$ |
| Ulusay et al. (1994)      | $UCS = 19 * I_{S50} + 12.7$      |
| Kahraman (2001)           | $UCS = 8.41 * I_{S50} + 9.51$    |
| Fener et al. (2005)       | $UCS = 9.08 * I_{S50} + 39.32$   |
| Broch y Franklin (1972)   | $UCS = 24 * I_{S50}$             |
| Bieniawski (1975)         | $UCS = 23 * I_{S50}$             |
| Hassani et al. (1980)     | $UCS = 29 * I_{S50}$             |

Tabla 2: Ecuaciones referenciales de regresión para determinar UCS utilizando  $I_{S50}$  (Elaboración propia).

Los valores de  $I_{S50}$  se pueden correlacionar a un valor de resistencia a la compresión uniaxial (UCS) debido a que diversos estudios y experimentos han demostrado que existe una relación estadística entre ambos valores. Aunque esta relación es empírica, ha sido validada para una amplia variedad de tipos de rocas y yacimientos como se muestra en la tabla 2, lo que permite utilizar el ensayo PLT como una alternativa indirecta cuando no se pueden realizar ensayos UCS. Sin embargo, esta relación varía ampliamente debido a factores como el tipo de roca, lugar geográfico, litología, tamaño de la muestra, etc., por lo que no existe un factor de conversión (K) único, pero puede obtenerse de 2 maneras:

- Si no se tienen datos de  $I_{S50}$  y UCS (correspondientes a la misma unidad geotécnica) para realizar una comparación y análisis, se debe optar por usar un valor teórico según indica la norma ASTM D5731, el cual es  $K=23$  para una normalización de muestras a testigos de 50 mm. Esto nos estima un valor menos preciso para el UCS, pero con una buena aproximación al resultado real.

- En caso de contar con dichos datos ( $I_{s50}$  y UCS), se puede generar una correlación entre ambos para obtener una ecuación que permita relacionar los datos de forma más exacta. El valor de K, idealmente, debe calcularse para cada unidad geotécnica o litología presente, de modo de reducir al mínimo la desviación en las estimaciones.

En este caso, debido a la ausencia de datos históricos de resistencia a la compresión uniaxial, se optó por llevar a cabo ensayos UCS de laboratorio con el fin de determinar un valor de K representativo del tipo de roca presente en la zona. Esto permitió obtener valores de resistencia mucho más precisos y adecuados a las condiciones reales del macizo rocoso.

Para este propósito, se recolectaron 22 muestras provenientes de la Fase 11 W, Banco 3245, adicionales a los muestreos regulares realizados para los ensayos PLT. Estas muestras fueron enviadas al Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad de Santiago de Chile, donde fueron sometidas a pruebas de densidad geométrica y compresión uniaxial. Estos valores fueron relacionados, mediante una ecuación, a valores de  $I_{s50}$  correspondientes a la contramuestra ensayada en el equipo PLT, generando un factor K mucho más preciso, con el cual se trabajó para la conversión de  $I_{s50}$  a UCS. Para los valores de UCS estimados a partir del  $I_{s50}$  se adoptó el criterio de Kuckartz (2013), el cual establece que valores de correlación entre los datos estudiados mayores al 70% corresponden a una buena relación entre los datos y es posible utilizar la ecuación asociada a la regresión para el cálculo del UCS a partir del  $I_{s50}$ .

Posteriormente, para generar los rangos de UCS para cada nivel del módulo *Bright Blast*, se procedió a contrastar la información entregada por el módulo; geoposición de cada pozo (este, norte y cota) y nivel cualitativo de resistencia estimado (de muy blando a muy duro), con la información obtenida mediante los ensayos PLT (posición GPS e  $I_{s50}$ ). Estos datos se trabajaron mediante el *software* Vulcan de Maptek, debido a que la información relacionada a las UGT, mallas de diseño, estructuras, y otros, son realizadas en este programa. Con esto, se logró asignar un nivel específico de

resistencia de *Bright Blast* a cada muestra ensayada, el cual corresponde al pozo más cercano a dicho punto muestreado.

La recopilación de esta información para cada punto de toma de muestras resultó en la creación de una base de datos completa, la cual contuvo tanto el valor estimado de UCS para cada muestra como el nivel entregado por el modelo de Pozos. Una vez que se tuvo la base de datos completa con todos los puntos GPS muestreados y los valores asociados, se procedió a realizar una serie de análisis estadísticos utilizando el *software* Minitab. La utilización de este software derivó de su practicidad a la hora de realizar análisis estadísticos complejos, como estadísticas descriptivas de datos, correlaciones entre valores o histogramas con ajustes de curvas, además de entregar la posibilidad de generar estos análisis de forma individual, por grupos o una mezcla de ambos, lo que permitió generar comparaciones mucho más sencillas entre los datos y grupos.

Estos análisis permitieron identificar y eliminar los valores *outliers* (valores atípicos que corresponden a ensayos válidos y no son producto de un error en el procedimiento, pero que fueron eliminados debido a su nula representatividad), mediante el método de rangos intercuartílicos (IQR) el cual mostró los datos que están demasiado lejos del centro de la distribución. Estos pasos fueron cruciales para asegurar que los rangos de resistencia fueran representativos y consistentes con las condiciones geológicas observadas en el terreno. Además, los resultados de estos análisis estadísticos ofrecieron una visión detallada de la variabilidad de los valores de UCS en las diferentes zonas, lo que contribuyó a una mejor comprensión de la calidad de la roca en el área de estudio.

#### 4.3. Subdivisión de la unidad geotécnica 3 de Fase 9 SE y Fase 11 W

Para llevar a cabo la subdivisión de la Unidad Geotécnica 03, es decir, su separación en función de las características geológicas y propiedades resistentes, se realizó un análisis detallado que integrará múltiples fuentes de información, tales como descripciones de las unidades geotécnicas entregadas en el Modelo de Macizo Rocosó MLP (2018), revisión de rasgos geológicos y estructurales identificados tanto en terreno como en las muestras recolectadas y la comparación de los valores de

resistencia a la compresión uniaxial (UCS) obtenidos a partir de los ensayos PLT. Al combinar estos datos, fue posible definir subunidades dentro de la UGT 03, permitiendo una caracterización más precisa del comportamiento mecánico de la roca y su relación con las condiciones geológicas del sector. Para visualizar esta posible división, se generará un plano esquemático de la ubicación de cada subunidad.

## CAPÍTULO 5: RESULTADOS

### 5.1. Toma de muestras

Durante este trabajo se llevaron a cabo un total de 12 campañas de recolección de muestras en las fases 9 SE y 11 W. Los polígonos muestreados en cada fase se indican en la tabla 3, y la ubicación de las muestras levantadas se puede consultar en “Capítulo 4: Metodología”.

| <b>Fase 9 SE</b> | <b>Fase 11 W</b> |
|------------------|------------------|
| 2960-08-A        | 3260-07-A        |
| 2960-02-A        | Rampa 3290-3275  |
| 2945-08-11-60-A  | 3245-09-61-A     |
| 2930-05-70-A     | 3245-02-A        |
| 2915-03-A        | 3245-14-A        |
| 2915-09-A        | 3230-03-A        |

Tabla 3: Polígonos muestreados de Fase 9 SE y Fase 11 W (Elaboración propia).

Las muestras presentaron dimensiones promedio de 20x15x15 cm, un tamaño adecuado que permitió la generación de submuestras para la realización de ensayos mediante las pruebas de carga puntual (PLT). En la Tabla 4 se detalla la cantidad de muestras recolectadas para cada UGT, proporcionando una visión más específica de la distribución del muestreo en ambas fases.

| <b>Fase</b> | <b>UGT</b> | <b>Nº muestras</b> |
|-------------|------------|--------------------|
| 9 SE        | UGT 01     | 47                 |
|             | UGT 02     | 5                  |
|             | UGT 03     | 26                 |
| 11 W        | UGT 03     | 29                 |
|             | UGT 05     | 14                 |
|             | UGT 09     | 5                  |
| TOTAL       |            | 126                |

Tabla 4: Cantidad de muestras por fase y por UGT (Elaboración propia).

Adicionalmente, la tabla 5 presenta la información principal obtenida durante el mapeo geológico y geotécnico de los polígonos muestreados, para los parámetros UGT, Nº de muestras, litología, alteración y GSI promedio.

| <b>Fase</b> | <b>Polígono</b> | <b>UGT</b> | <b>N° muestras</b> | <b>Litología</b>        | <b>Alteración</b>       | <b>GSI promedio</b> |
|-------------|-----------------|------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| 9 SE        | 2960-08-A       | UGT 02     | 3                  | Diorita                 | Potásica                | 65                  |
|             |                 | UGT 03     | 12                 |                         |                         | 65                  |
| 11 W        | 3260-07-A       | UGT 03     | 10                 | Diorita                 | Potásica/Oxidación      | 57                  |
| 9 SE        | 2960-02-A       | UGT 01     | 15                 | Diorita                 | Potásica/Silicificación | 75                  |
| 11 W        | Rampa 3290-3275 | UGT 05     | 10                 | Pórfido tipo B          | Propilítica             | 55                  |
| 11 W        | 3245-09-61-A    | UGT 03     | 5                  | Diorita                 | Potásica/Silicificación | 45                  |
| 9 SE        | 2945-08-11-60-A | UGT 03     | 13                 | Diorita                 | Potásica                | 60                  |
| 11 W        | 3245-02-A       | UGT 03     | 7                  | Diorita                 | Fílica                  | 50                  |
|             |                 | UGT 09     | 5                  | Diorita                 | Potásica/Fílica         | 37                  |
| 11 W        | 3245-14-A       | UGT 03     | 3                  | Diorita                 | Potásica/Silicificación | 60                  |
|             |                 | UGT 05     | 4                  | Pórfido tipo B/Andesita | Potásica                | 60                  |
| 9 SE        | 2930-05-70-A    | UGT 01     | 9                  | Diorita                 | Potásica/Silicificación | 70                  |
| 9SE         | 2915-03-A       | UGT 01     | 11                 | Diorita                 | Potásica/Silicificación | 70                  |
|             |                 | UGT 02     | 2                  | Diorita                 | Potásica/Silicificación | 70                  |
| 11 W        | 3230-03-A       | UGT 03     | 5                  | Diorita/Pórfido tipo B  | Potásica                | 55                  |
| 9 SE        | 2915-09-A       | UGT 01     | 12                 | Diorita                 | Potásica                | 70                  |

Tabla 5: Descripción geológica e índice GSI de los bancos muestreados (Elaboración propia).

### 5.1.1. Muestras de UGT 01/02 en Fase 9 SE

Las muestras recolectadas en Fase 9 SE pertenecientes a la UGT 01 y a la UGT 02 fueron extraídas desde los polígonos 2960-02-A, 2930-05-70-A, 2915-03-A y 2915-09-A, y correspondieron a una diorita leucocrática, con escasa presencia de minerales máficos (<20%) principalmente hornblendas. Se reconocieron dos tipos de alteración presentes, bien marcadas y con una distribución espacial homogénea en el sector:

- El primer grupo correspondió a una diorita con una alteración potásica en leve intensidad; posee un color rosado claro, presencia de feldespato potásico alterando a plagioclasas, hornblendas siendo reemplazadas por biotita y presencia de clorita diseminada y patinas de pirita. Una muestra de este sector corresponde a la presentada en la figura 30a.
- El segundo grupo, en cambio, correspondió a una diorita intensamente silicificada de color blanco grisáceo claro en donde es poco apreciable la textura original de la roca ya que la sílice oblitera la textura y mineralogía original y a cualquier alteración preexistente. Se observaron algunas biotitas y patinas de pirita en sectores puntuales. Un ejemplo de esta alteración se presenta en la figura 30b.

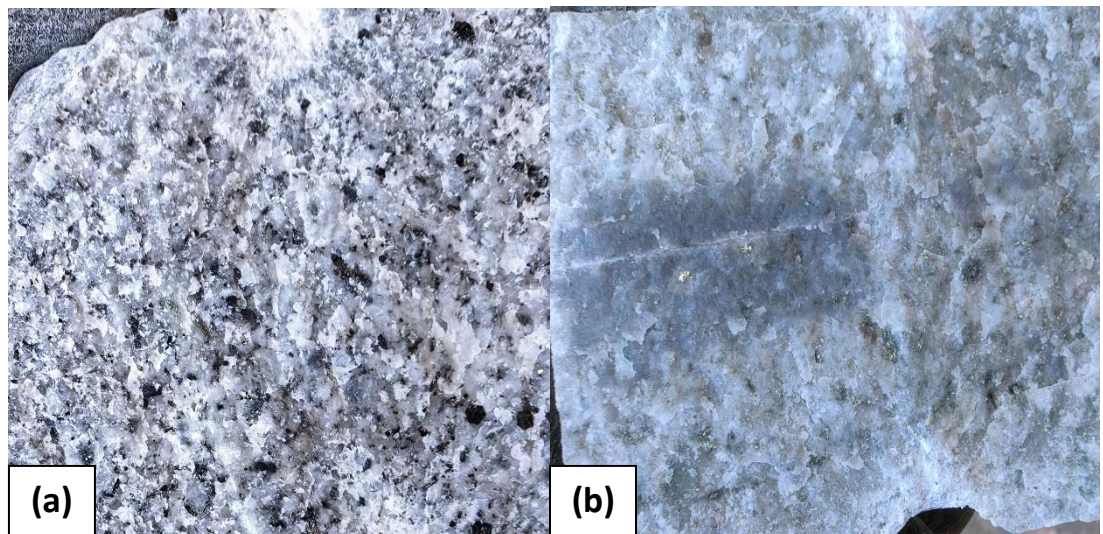


Figura 30: Muestras de UGT 01/02 de Fase 9 SE. (a) Muestra de diorita con bajo grado de silicificación y (b) Muestra de diorita intensamente silicificada (Elaboración propia).

### 5.1.2. Muestras de UGT 03 en Fase 9 SE

Las muestras pertenecientes a la UGT 03 de Fase 9 SE fueron extraídas desde los polígonos 2960-08-A y 2945-08-11-60-A, y corresponden a una diorita de color rosado grisáceo claro, con presencia de minerales máficos (hornblenda y biotita, ~30%) con alteración potásica de leve intensidad, en donde se observó reemplazo de plagioclasas a feldespato potásico y de hornblendas a biotita. Se reconoció, además, presencia de clorita y pirita en vetillas de espesores menores a 1 mm. Estas muestras se ejemplifican en la figura 31.



Figura 31: Muestra de diorita con alteración potásica de leve intensidad de UGT 03 de Fase 9 SE (Elaboración propia).

### 5.1.3. Muestras de UGT 03 en Fase 11 W

Las muestras recolectadas en la UGT 03 de Fase 11 W fueron tomadas en los polígonos 3260-07-A, 3245-09-61-A, 3245-14-A, 3245-02-A y 3230-03-A. Estas muestras correspondieron a una diorita, pero se definieron distintas alteraciones presentes dependiendo del polígono.

- Muestras de color amarillo pardusco claro, con presencia de argilización en distintos grados, variando de leve a intenso, en algunos casos obliterando la textura original, y en otros, sobrepuesta a las alteraciones anteriores pero aun permitiendo observarlas. Esta alteración se puede observar en la figura 32a.

- Muestras de color gris oscuro con silicificación secundaria de moderada intensidad sobreimpuesto a la alteración potásica, en donde se observó sílice amorfo sobre cristales de plagioclasa que están parcialmente reemplazados por feldespatos potásicos, como se aprecia en la figura 32b.
- Muestras de color gris amarillento claro, con una alteración potásica de leve intensidad, con presencia de feldespatos potásicos reemplazando la plagioclasa, biotita secundaria asociada a hornblendas, cuarzo y pirita en patinas (Figura 32c).

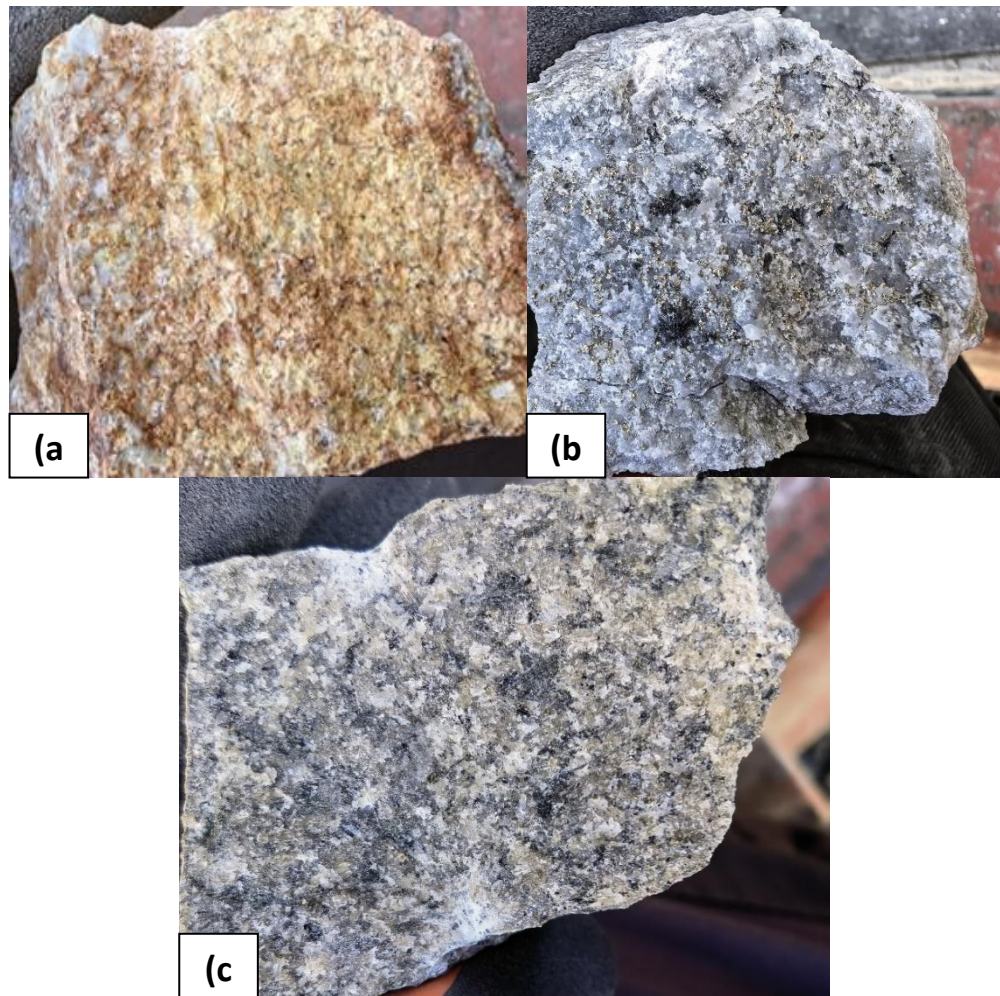


Figura 32: Muestras de UGT 03 de Fase 11 W. (a) Muestra de diorita intensamente argilizada, (b) Muestra de diorita con silicificación de moderada intensidad y (c) Muestra de diorita con alteración potásica y oxidación (Elaboración propia).

#### 5.1.4. Muestras de UGT 05 en Fase 11 W

En la UGT 05 de Fase 11 W, levantadas en los polígonos Rampa 3290-3275 y 3245-02-A, se identificó la presencia de dos distintas litologías:

- Pórfido tipo B, el cual podemos observar en la figura 33a, que corresponde a un intrusivo hipabisal de color gris oscuro, de composición tonalítica y con textura porfídica con fenocristales de plagioclasas y máficos. La matriz posee textura microcristalina, posiblemente un agregado de cuarzo y plagioclasa debido a la fractura concoidea existente en las muestras sumado al sonido tipo campana que se produjo al ser golpeadas con el martillo geológico, pero es indistinguible con el uso de lupa binocular. Las muestras exhibieron una alteración propilítica de leve intensidad con presencia de clorita, epidota y pirita en vetillas (<2 mm).
- Andesitas de color blanco grisáceo, que presentaron una textura porfídica con cristales de plagioclasa bien formados en una matriz microcristalina con cuarzo, además, se observaron minerales máficos como hornblendas con algunos grados leves a moderados de cloritización y epidotación. Un ejemplo de estas muestras se observa en la figura 33b.

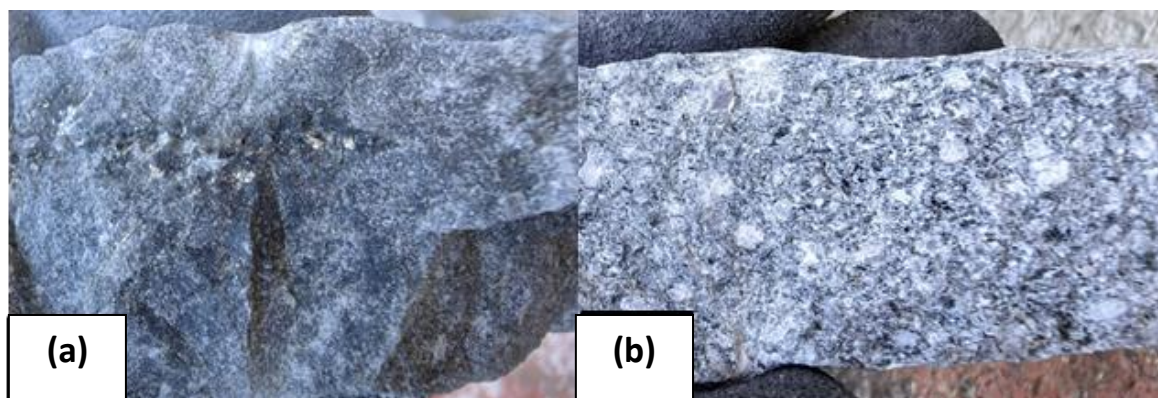


Figura 33: Muestras de UGT 05 de Fase 11 W. (a) Muestra de pórfido tipo B con alteración propilítica de leve intensidad y (b) Muestra de andesita cloritizada en baja intensidad (Elaboración propia).

#### 5.1.5. Muestras de UGT 09 en Fase 11 W

En la UGT 09 de Fase 11 W, extraídas desde el polígono 3245-02-A, las muestras correspondieron a una diorita que variaba su color de blanco claro a

amarillo pardusco, con una argilización intensa, además de oxidación secundaria moderada, lo que obliteró casi por completo la textura y roca original. Se apreció, además, sílice secundario en vetillas (0.2 a 0.8 mm), así como también hematización y sericitización de las plagioclasas, definiendo una alteración filica de moderada intensidad. En la figura 34a se observa una muestra de roca alterada a sericita de forma completa, junto a la presencia de cuarzo secundario, en la figura 34b se observa una muestra del mismo sector la cual cuenta con presencia de sericita de color amarillenta (producto del contacto con piritita oxidada) junto a hematita en la parte superior y una vetilla de cuarzo en la parte izquierda de la figura.

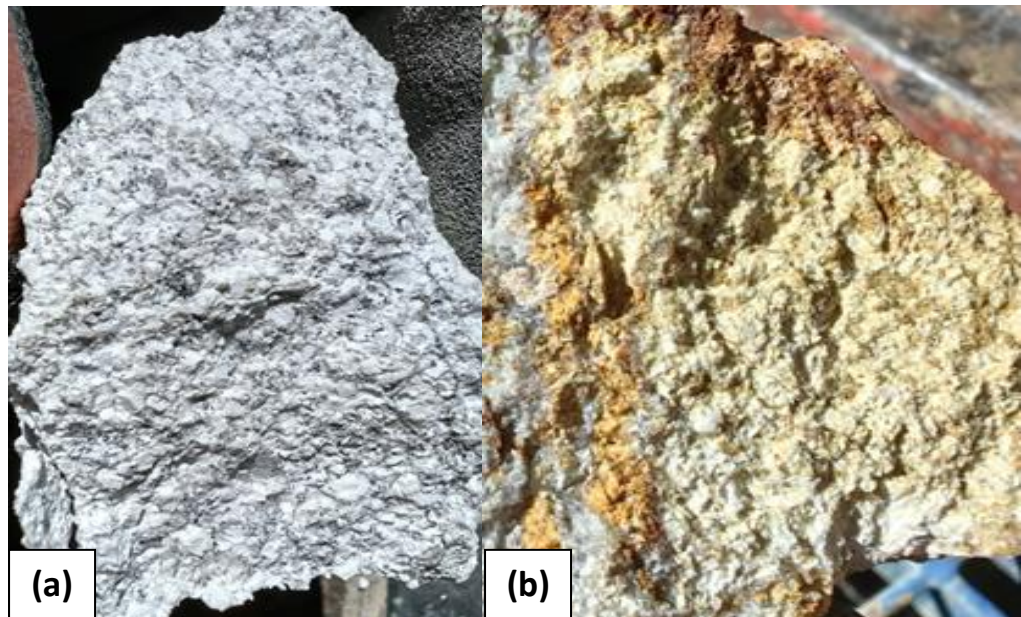


Figura 34: Muestras de UGT 09 de Fase 11 W. (a) Muestra de diorita con intensa sericitización y (b) Muestra de diorita con alto grado de argilización y vetas de sílice (Elaboración propia).

## 5.2. Resultados de ensayos de carga puntual

Del total de 126 muestras recolectadas en terreno, se obtuvieron 301 submuestras tras el proceso de reducción de colpas, las cuales fueron sometidas a ensayos en el equipo PLT.

De estos 301 ensayos realizados, 263 fueron considerados válidos, mientras que los 38 restantes fueron descartados, principalmente debido a la presencia de

microfracturas y rupturas provocadas por vetillas mineralizadas. El detalle de ensayos validos e inválidos por fase y por UGT se puede observar en la figura 35.

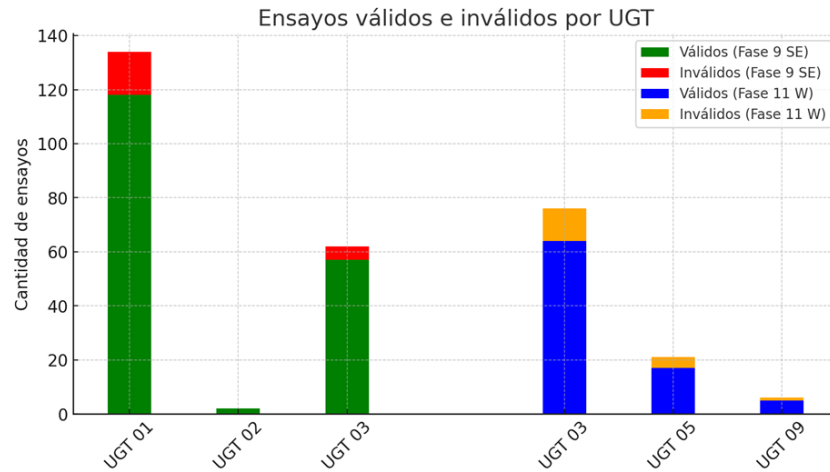


Figura 35: Cantidad de ensayos válidos e inválidos por fase y por UGT (Elaboración propia).

### 5.2.1. Cálculo de factor de conversión “K”

Para realizar el cálculo del factor K se enviaron 22 muestras a ensayos de compresión uniaxial. En la tabla 6 se presentan los resultados de las pruebas realizadas para los parámetros de densidad, UCS y carga aplicada a las muestras, en donde solo 20 de las 22 enviadas lograron ser ensayadas.

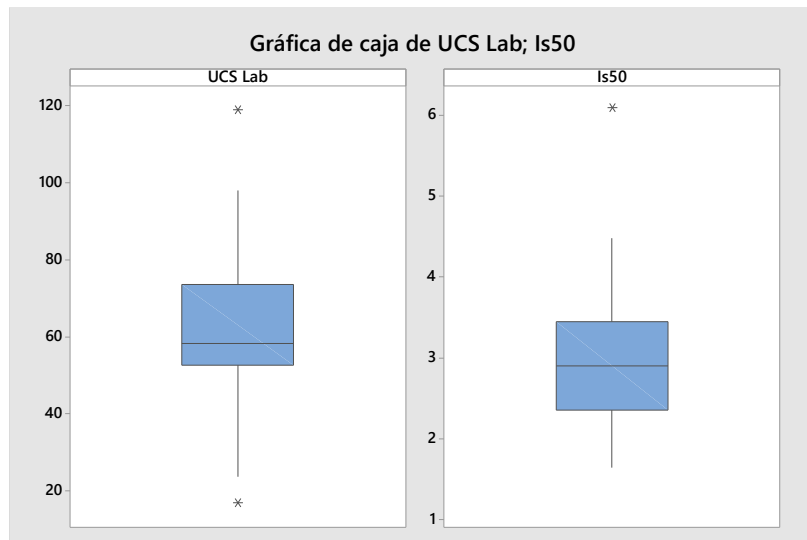


Figura 36: *Boxplot* de UCS de laboratorio y valores de  $Is_{50}$  obtenidos vía PLT (Elaboración propia).

En el *boxplot* de la figura 36 se presentan los valores de UCS obtenidos en los ensayos de laboratorio y los valores de  $Is_{50}$  obtenidos con los ensayos PLT. Se

observa que la mediana de UCS es de 58 MPa, con un rango intercuartílico (IQR) que abarca entre 52 y 74 MPa indicando cierta uniformidad en los valores, además se observa una dispersión considerable hacia los extremos con un bigote inferior de 24 MPa y superior de 98 MPa. Adicionalmente, se identificaron 2 valores *outliers* (16,8 y 119,0 MPa). Por otro lado, los valores de  $I_{s50}$  presentan una distribución más compacta y simétrica. La mediana se sitúa alrededor de 3 MPa, con un IQR que va desde 2,4 hasta 3,4 MPa. Los bigotes se extienden aproximadamente desde 1,6 hasta 4,5 MPa, y se detecta un único valor *outlier* por encima de 6 MPa.

Posteriormente, de los 20 resultados entregados por el laboratorio solo se hizo uso de 18 datos de UCS, puesto que 2 de ellos correspondían a valores *outliers* que se aprecian en la figura 36, y que disminuirían la confiabilidad de los resultados posteriores. Los 18 valores finales fueron comparados con los valores de  $I_{s50}$  obtenidos vía ensayos PLT en la tabla 7, con el fin de generar distintas líneas de tendencia entre ambos valores para verificar la correlación entre los datos ( $R^2$ ), según indica el procedimiento detallado en el “Capítulo 4: Metodología”. Las figuras 37 a la 39 muestran las 3 tendencias con el valor de correlación más alto entre los datos; regresión polinómica ( $R^2=70.58\%$ ), regresión potencial ( $R^2=70.57\%$ ) y regresión lineal ( $R^2=70.63\%$ ).

Al ser la regresión lineal la tendencia con la correlación más elevada, se hizo uso de la siguiente ecuación para la estimación de valores de UCS en MLP:

$$UCS [MPa] = 17,762 * (I_{s50}) + 8,8145$$

Dado que no se contaba con ensayos UCS diferenciados por litología, UGT o fase, y considerando la limitada disponibilidad de datos en otros sectores de la mina, se optó por utilizar una ecuación de conversión única para toda la faena. Si bien esta generalización introduce un grado de incertidumbre al no capturar variaciones locales, el valor obtenido se considera suficientemente representativo del comportamiento general del macizo rocoso en Minera Los Pelambres.

| ID Muestra           | Promedio      |            | Razón L/D | Masa (gr) | Volumen (cm <sup>3</sup> ) | Densidad (gr/cm <sup>3</sup> ) | Compresión |            |
|----------------------|---------------|------------|-----------|-----------|----------------------------|--------------------------------|------------|------------|
|                      | Diámetro (mm) | Largo (mm) |           |           |                            |                                | UCS (MPa)  | Carga (kN) |
| M1_F11W_3245-09-61-A | 49,33         | 110,33     | 2,24      | 531,50    | 172,06                     | 2,56                           | 53,10      | 101,9      |
| M2_F11W_3245-09-61-A | 49,34         | 89,20      | 1,81      | 437,50    | 169,15                     | 2,59                           | 119,00     | 228,1      |
| M3_F11W_3245-09-61-A | 49,35         | 109,33     | 2,22      | 533,50    | 209,09                     | 2,55                           | 16,79      | 32,2       |
| M4_F11W_3245-09-61-A | 49,46         | 95,40      | 1,93      | 433,95    | 182,79                     | 2,37                           | 52,05      | 100,2      |
| M5_F11W_3245-09-61-A | 49,37         | 90,09      | 1,82      | 441,11    | 172,08                     | 2,56                           | 52,52      | 100,8      |
| M1_F11W_3245-02-A    | 49,37         | 95,45      | 1,93      | 377,53    | 178,42                     | 2,12                           | 53,15      | 102,0      |
| M2_F11W_3245-02-A    | 49,37         | 99,24      | 2,01      | 368,47    | 189,97                     | 1,94                           | 23,71      | 45,5       |
| M3_F11W_3245-02-A    | 49,35         | 97,44      | 1,97      | 442,01    | 182,84                     | 2,42                           | 66,37      | 127,3      |
| M4_F11W_3245-02-A    | 39,35         | 89,56      | 1,81      | 426,60    | 171,31                     | 2,49                           | 88,80      | 170,3      |
| M5_F11W_3245-02-A    | 49,34         | 91,15      | 1,85      | 357,40    | 169,07                     | 2,11                           | 55,40      | 106,2      |
| M6_F11W_3245-02-A    | 49,36         | 95,53      | 1,94      | 411,65    | 177,46                     | 2,32                           | 60,52      | 116,1      |
| M7_F11W_3245-02-A    | 49,36         | 94,06      | 1,91      | 407,55    | 175,67                     | 2,32                           | 52,81      | 101,3      |
| M8_F11W_3245-02-A    | 49,34         | 93,02      | 1,89      | 426,49    | 177,80                     | 2,40                           | 57,96      | 111,1      |
| M9_F11W_3245-02-A    | 49,36         | 94,34      | 1,91      | 468,57    | 180,49                     | 2,60                           | 79,71      | 152,9      |
| M10_F11W_3245-02-A   | 49,35         | 91,40      | 1,85      | 437,80    | 171,45                     | 2,55                           | 74,24      | 142,4      |
| M1_F11W_3245-14-A    | 49,32         | 95,60      | 1,94      | 460,74    | 177,28                     | 2,60                           | 58,77      | 112,6      |
| M2_F11W_3245-14-A    | 49,34         | 93,99      | 1,91      | 427,10    | 174,38                     | 2,45                           | 71,58      | 137,2      |
| M3_F11W_3245-14-A    | -             | -          | -         | -         | -                          | -                              | -          | -          |
| M4_F11W_3245-14-A    | 49,35         | 91,53      | 1,85      | 454,60    | 170,37                     | 2,67                           | 97,89      | 187,7      |
| M5_F11W_3245-14-A    | 49,39         | 105,11     | 2,13      | 580,84    | 198,27                     | 2,93                           | 58,37      | 112,1      |
| M6_F11W_3245-14-A    | -             | -          | -         | -         | -                          | -                              | -          | -          |
| M7_F11W_3245-14-A    | 49,36         | 88,76      | 1,80      | 455,30    | 161,44                     | 2,82                           | 34,26      | 65,5       |

Tabla 6: Resultados de ensayos de pruebas de densidad geométrica y UCS (Elaboración propia).

| <b>ID Muestra</b>    | <b>UGT modelo</b> | <b>UCS (MPa)</b> | <b>Is<sub>50</sub> (MPa)</b> |
|----------------------|-------------------|------------------|------------------------------|
| M1_F11W_3245-09-61-A | UGT 03            | 53,10            | 4,48                         |
| M2_F11W_3245-09-61-A | UGT 03            | 119,00*          | 6,09*                        |
| M3_F11W_3245-09-61-A | UGT 03            | 16,79*           | 2,80                         |
| M4_F11W_3245-09-61-A | UGT 03            | 52,05            | 2,99                         |
| M5_F11W_3245-09-61-A | UGT 03            | 52,52            | 3,38                         |
| M1_F11W_3245-02-A    | UGT 09            | 53,15            | 2,59                         |
| M2_F11W_3245-02-A    | UGT 09            | 23,71            | 1,64                         |
| M3_F11W_3245-02-A    | UGT 03            | 66,37            | 3,40                         |
| M4_F11W_3245-02-A    | UGT 03            | 88,80            | 3,16                         |
| M5_F11W_3245-02-A    | UGT 03            | 55,40            | 2,36                         |
| M6_F11W_3245-02-A    | UGT 03            | 60,52            | 2,56                         |
| M7_F11W_3245-02-A    | UGT 03            | 52,81            | 2,30                         |
| M8_F11W_3245-02-A    | UGT 03            | 57,96            | 2,35                         |
| M9_F11W_3245-02-A    | UGT 03            | 79,71            | 4,04                         |
| M10_F11W_3245-02-A   | UGT 03            | 74,24            | 3,44                         |
| M1_F11W_3245-14-A    | UGT 05            | 58,77            | 2,66                         |
| M2_F11W_3245-14-A    | UGT 05            | 71,77            | 3,48                         |
| M3_F11W_3245-14-A    | UGT 05            | -                | 4,44                         |
| M4_F11W_3245-14-A    | UGT 05            | 98,14            | 3,22                         |
| M5_F11W_3245-14-A    | UGT 03            | 58,52            | 1,97                         |
| M6_F11W_3245-14-A    | UGT 03            | -                | 2,35                         |
| M7_F11W_3245-14-A    | UGT 03            | 34,36            | 2,81                         |

Tabla 7: Resumen de valores de UCS de laboratorio e Is50 obtenidos en ensayos PLT.

(\*) Valores outliers descartados, (-) Muestras no ensayadas (Elaboración propia).

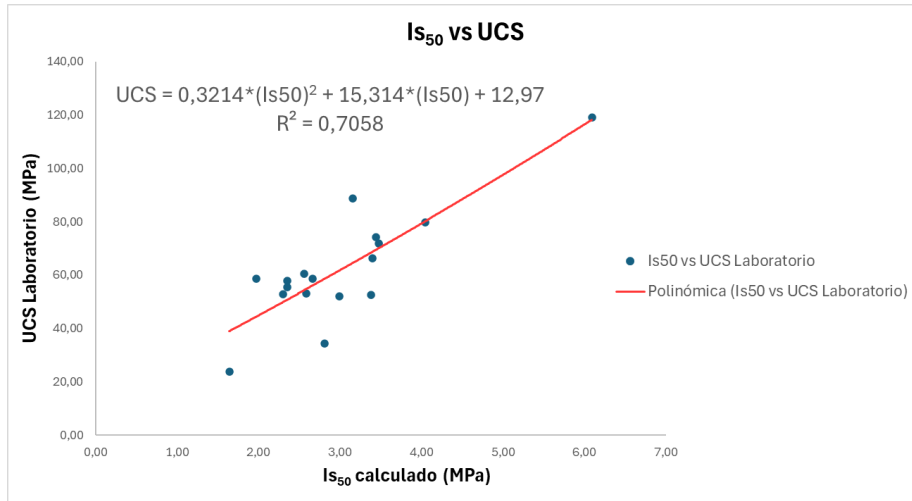


Figura 37: Línea de regresión polinómica entre Is<sub>50</sub> y UCS (Elaboración propia).

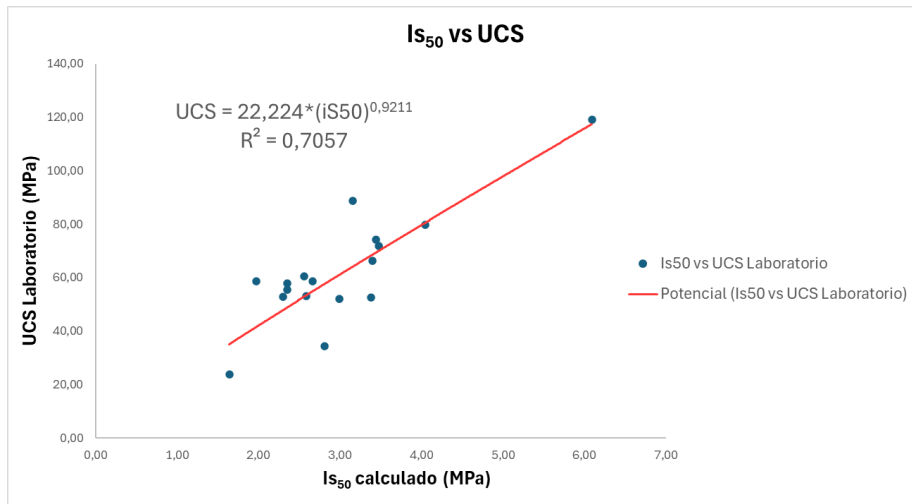


Figura 38: Línea de regresión potencial entre Is<sub>50</sub> y UCS (Elaboración propia).

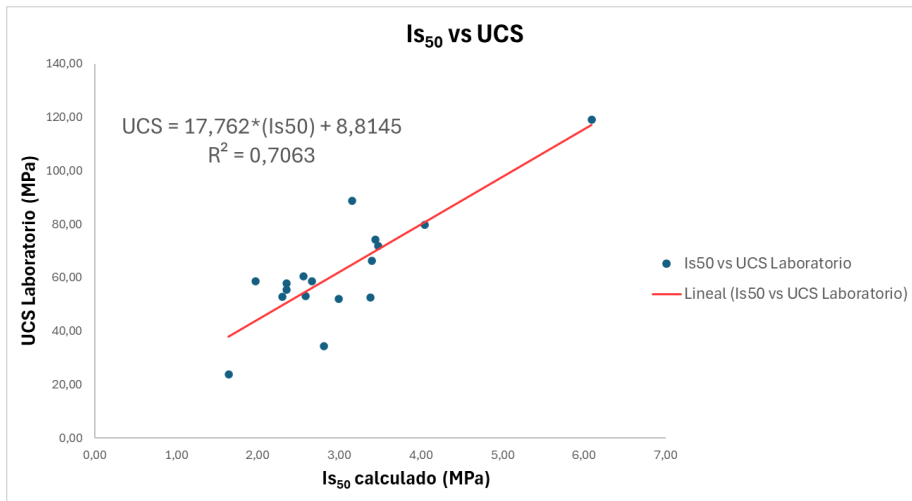


Figura 39: Línea de regresión lineal entre Is<sub>50</sub> y UCS (Elaboración propia).

### 5.2.2. Resultados de ensayos PLT en Fase 9 SE

En la tabla 8 se muestran los valores de UCS promedio con los que trabaja el modelo de UGT en MLP, junto a los valores de UCS obtenidos en los ensayos PLT para cada polígono muestreado de la Fase 9 SE. Además, en la figura 40 se muestra la distribución de estos datos en un diagrama *boxplot*; la UGT 1.1 presenta una mediana de 110 MPa con un IQR entre ~90 y 135 MPa y bigotes desde ~55 a 150 MPa, la UGT 1.2 tiene una mediana cercana a 150 MPa con un IQR entre ~140 y 170 MPa y bigotes desde ~120 a 200 MPa, la UGT 02 cuenta con una mediana de ~112 MPa junto con un IQR entre ~90 y 135 MPa y bigotes desde ~85 a 145 MPa, y finalmente la UGT 03 posee una mediana de ~74 MPa con un IQR entre ~55 y 90 MPa y bigotes desde ~35 a 120 MPa.

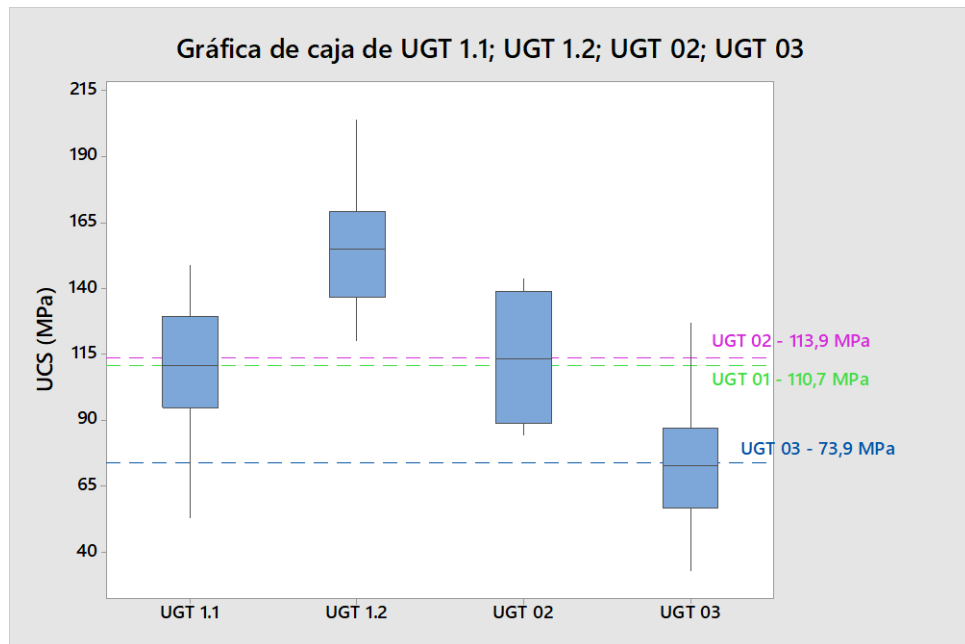


Figura 40: *Boxplot* de valores de ensayos PLT en Fase 9 SE (Elaboración propia).

| Fase 9<br>SE    | UGT 01       |                |               |               |              |                |               |               | UGT 02       |                |               |               | UGT 03       |                |               |               |
|-----------------|--------------|----------------|---------------|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|
|                 | UGT 1.1      |                |               |               | UGT 1.2      |                |               |               | UCS<br>(MPa) | D. E.<br>(MPa) | Mín.<br>(MPa) | Máx.<br>(MPa) | UCS<br>(MPa) | D. E.<br>(MPa) | Mín.<br>(MPa) | Máx.<br>(MPa) |
|                 | UCS<br>(MPa) | D. E.<br>(MPa) | Mín.<br>(MPa) | Máx.<br>(MPa) | UCS<br>(MPa) | D. E.<br>(MPa) | Mín.<br>(MPa) | Máx.<br>(MPa) |              |                |               |               |              |                |               |               |
| Modelo MLP      | 110,7        | 38,9           | 88,4          | 147,6         | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | 113,9        | 42,9           | 77,3          | 136,8         | 73,9         | 34,6           | 53,2          | 110,7         |
| 2960-08-A       | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | 95,9         | 16,1           | 84,5          | 107,4         | 77,5         | 7,3            | 63,8          | 89,1          |
| 2960-02-A       | 115,9        | 17,9           | 102,6         | 140,9         | 151,3        | 17,5           | 119,6         | 183,2         | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           |
| 2945-08-11-60-A | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | 71,7         | 17,9           | 52,9          | 97,3          |
| 2930-05-70-A    | 110,5        | 17,1           | 85,6          | 132,9         | 139,6        | 17,6           | 117,8         | 200,6         | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           |
| 2915-03-A       | 111,6        | 24,6           | 91,7          | 149,1         | 153,6        | 19,6           | 132,4         | 227,2         | 126,4        | 12,1           | 94,9          | 143,2         | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           |
| 2915-09-A       | 112,9        | 17,8           | 76,3          | 141,4         | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           |

Tabla 8: Resumen de UCS estimados en distintos bancos de F9SE (S/I: sin información, D.E.: Desviación estándar, Elaboración propia).

Las muestras correspondientes a la UGT 01 se extrajeron en la zona este y noreste de la Fase 9. En este sector, los valores de UCS encontrados se dividieron en 2 grupos principales:

- Subunidad Geotécnica 1.1 (UGT 1.1): este grupo contiene muestras de diorita con alteración potásica de intensidad leve (descritas en apartado 5.1.1 Muestras de UGT 01/02 en Fase 9 SE), y valores promedios de UCS de  $110 \pm 19,3$  MPa (según tabla 8). Geográficamente, este grupo se localiza predominantemente en la pared este de la Fase 9, tal como se observa en la figura 41, en donde se destaca la zona en color verde.
- Subunidad Geotécnica 1.2 (UGT 1.2): En este caso, las muestras corresponden a diorita con una alteración de sílice (descrita en apartado 5.1.1 Muestras de UGT 01/02 en Fase 9 SE), y con valores de UCS promedio de  $150 \pm 18,6$  MPa (Tabla 8). Estas muestras con alto contenido de sílice se encuentran principalmente en la zona del quiebre o codo ubicado en el noreste de la Fase 9, como se observa en el polígono de color rosa en la figura 41.

La diferenciación de estos grupos se constató en varios niveles, incluyendo las cotas 2960, 2930 y 2915, así como en el nivel 2945, donde, aunque no se tomaron muestras, se realizaron observaciones y descripciones en terreno.

Por otro lado, las muestras de UGT 02, ubicadas en una franja con orientación norte-sur dentro de la Fase 9 (polígono color cian en la Figura 41), presentan valores promedio de resistencia de  $110 \pm 14,6$  MPa (Tabla 8). Aunque el número de muestras en esta unidad es menor en comparación con las demás UGT, estas muestras exhiben una notable homogeneidad, sin variaciones significativas en litología o alteración respecto al modelo original.

Finalmente, las muestras de UGT 03, recolectadas en la zona sur-suroeste de la Fase 9, zona correspondiente al polígono azul destacado en la figura 41, presentan un valor promedio de UCS de  $75 \pm 12,7$  MPa.

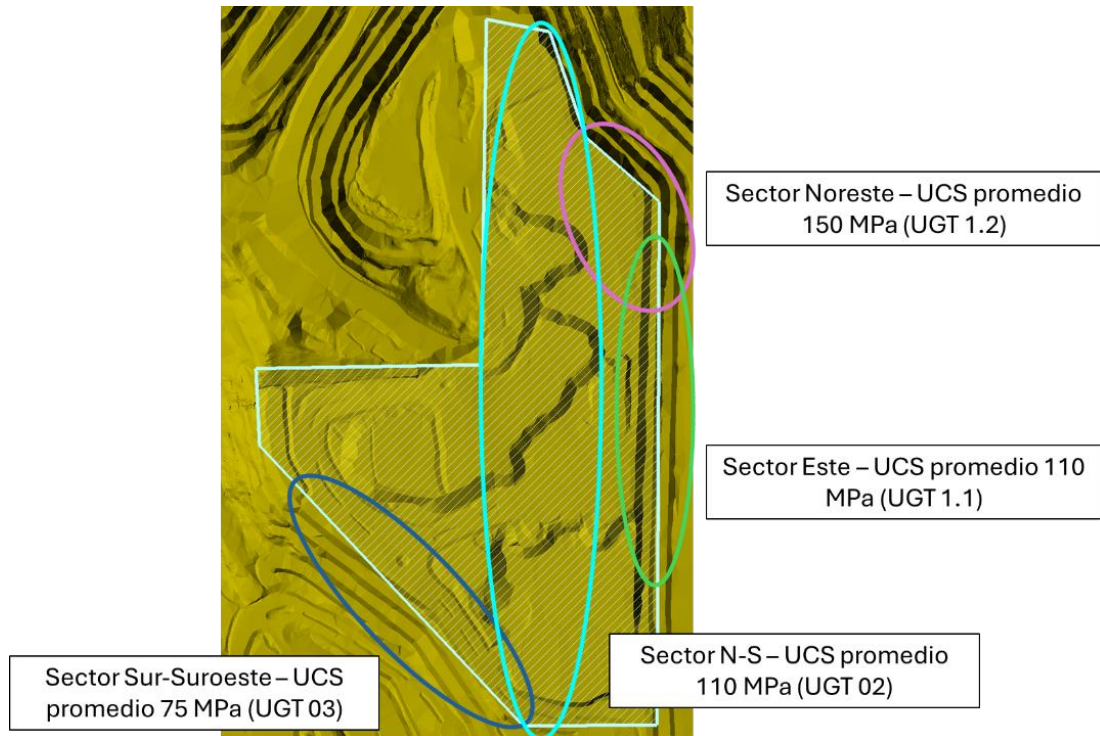


Figura 41: Mapa con resumen de UCS promedios por zonas en F9SE (Elaboración propia).

### 5.2.3. Resultados de ensayos PLT en Fase 11 W

En la tabla 9 se muestran los valores de UCS promedio con los que trabaja el modelo de UGT en MLP, junto a los valores de UCS obtenidos en los ensayos PLT para cada polígono muestreado de la Fase 11 W. Adicionalmente, en la figura 42 se muestra la distribución de estos datos en un diagrama *boxplot*; la UGT 3.1 presenta una mediana de 60 MPa con un IQR entre ~50 y 70 MPa y bigotes desde ~30 a 90 MPa, la UGT 3.2 tiene una mediana cercana a 100 MPa con un IQR entre ~90 y 110 MPa y bigotes desde ~85 a 115 MPa, la UGT 05 cuenta con una mediana de ~80 MPa junto con un IQR entre ~70 y 90 MPa y bigotes desde ~60 a 115 MPa, y finalmente la UGT 09 posee una mediana de ~45 MPa con un IQR entre ~40 y 60 MPa y bigotes desde ~38 a 70 MPa.

| Fase 11<br>W    | UGT 03       |                |               |               |              |                |               |               | UGT 05       |                |               |               | UGT 09       |                |               |               |
|-----------------|--------------|----------------|---------------|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|
|                 | UGT 3.1      |                |               |               | UGT 3.2      |                |               |               | UCS<br>(MPa) | D. E.<br>(MPa) | Mín.<br>(MPa) | Máx.<br>(MPa) | UCS<br>(MPa) | D. E.<br>(MPa) | Mín.<br>(MPa) | Máx.<br>(MPa) |
|                 | UCS<br>(MPa) | D. E.<br>(MPa) | Mín.<br>(MPa) | Máx.<br>(MPa) | UCS<br>(MPa) | D. E.<br>(MPa) | Mín.<br>(MPa) | Máx.<br>(MPa) |              |                |               |               |              |                |               |               |
| Modelo MLP      | 73,9         | 34,6           | 53,2          | 110,7         | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | 74,0         | 34,0           | 64,1          | 115,8         | 84,3         | 46,3           | 42,3          | 98,5          |
| Rampa 3290-3275 | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | 83,1         | 9,7            | 61,8          | 116,1         | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           |
| 3260-07-A       | 61,2         | 9,9            | 43,1          | 92,9          | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           |
| 3245-09-61-A    | 63,8         | 6,5            | 54,6          | 76,7          | 112,5        | 15,1           | 88,4          | 140,7         | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           |
| 3245-14-A       | 51,3         | 8,1            | 27,2          | 73,8          | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | 75,8         | 10,0           | 56,1          | 91,8          | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           |
| 3245-02-A       | 65,7         | 17,0           | 44,3          | 94,6          | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | 46,5         | 7,1            | 37,9          | 71,0          |
| 3230-03-A       | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | 98,4         | 14,2           | 63,2          | 120,7         | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           | S/I          | S/I            | S/I           | S/I           |

Tabla 9: Resumen de UCS estimados en distintos bancos de F11W (S/I: sin información, D.E.: Desviación estándar, Elaboración propia).

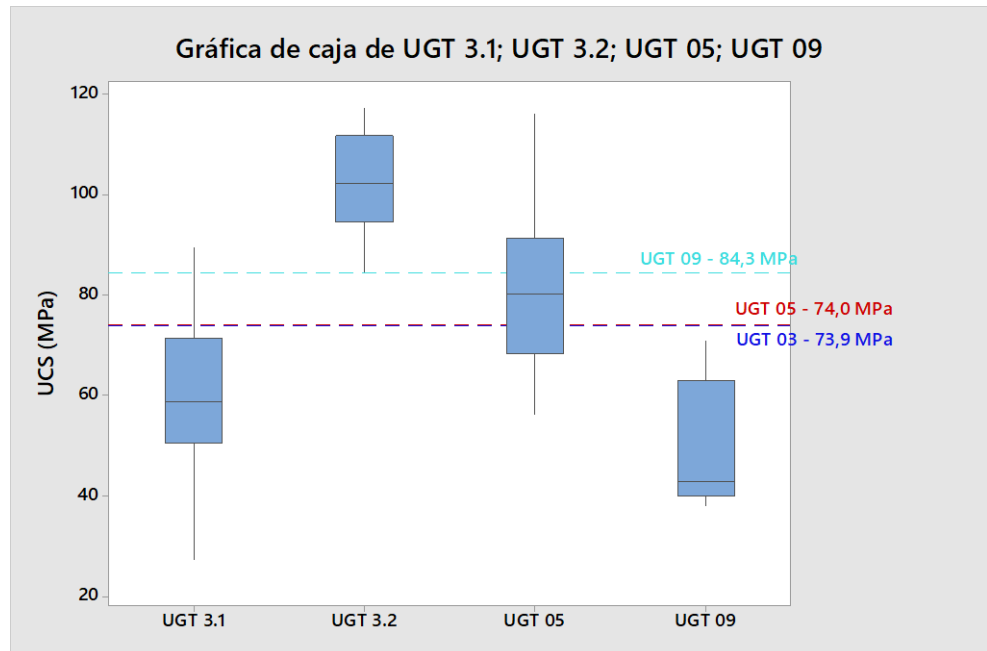


Figura 42: *Boxplot* de valores de ensayos PLT en Fase 11 W (Elaboración propia).

Las muestras correspondientes a la UGT 03 provienen de la zona centro y sur de la Fase 11 W. En este sector se definieron dos grupos dentro de la UGT 03:

- El primer grupo corresponde a muestras de diorita con alteración potásica de leve intensidad (descritas en apartado 5.1.3. Muestras de UGT 03 en Fase 11 W), presentando valores promedio de UCS de  $60 \pm 10,2$  MPa (Tabla 9), y fue denominado Subunidad Geotécnica 3.1 (UGT 3.1). Abarca toda la zona centro y sur, además de algunas áreas del centro-norte. En la figura 43 se observa su distribución de mejor forma, destacado de color azul claro.
- El segundo grupo también corresponde a muestras de diorita, pero con un grado de silicificación no pervasiva (también descritas en apartado 5.1.3. Muestras de UGT 03 en Fase 11 W). Estas muestras arrojaron valores de UCS promedio de  $100 \pm 14,7$  MPa (Tabla 9), y se encuentran dentro de la zona descrita como UGT 3.1, específicamente en la zona sur de la Fase 11 W, como se indica en la figura 43 de color azul oscuro. Este grupo fue denominado Subunidad Geotécnica 3.2 (UGT 3.2).

Las muestras correspondientes a la UGT 05, ubicadas en la zona centro-norte de la Fase 11, zona de color rojo en la figura 43, presentan valores promedio de UCS de  $79 \pm 9,9$  MPa (Tabla 9).

Por otro lado, las muestras de UGT 09, localizadas en la zona sur-sureste de la Fase 11, destacado en color cian en la figura 43, muestran valores de UCS con un promedio de  $46 \pm 7,1$  MPa (Tabla 9).

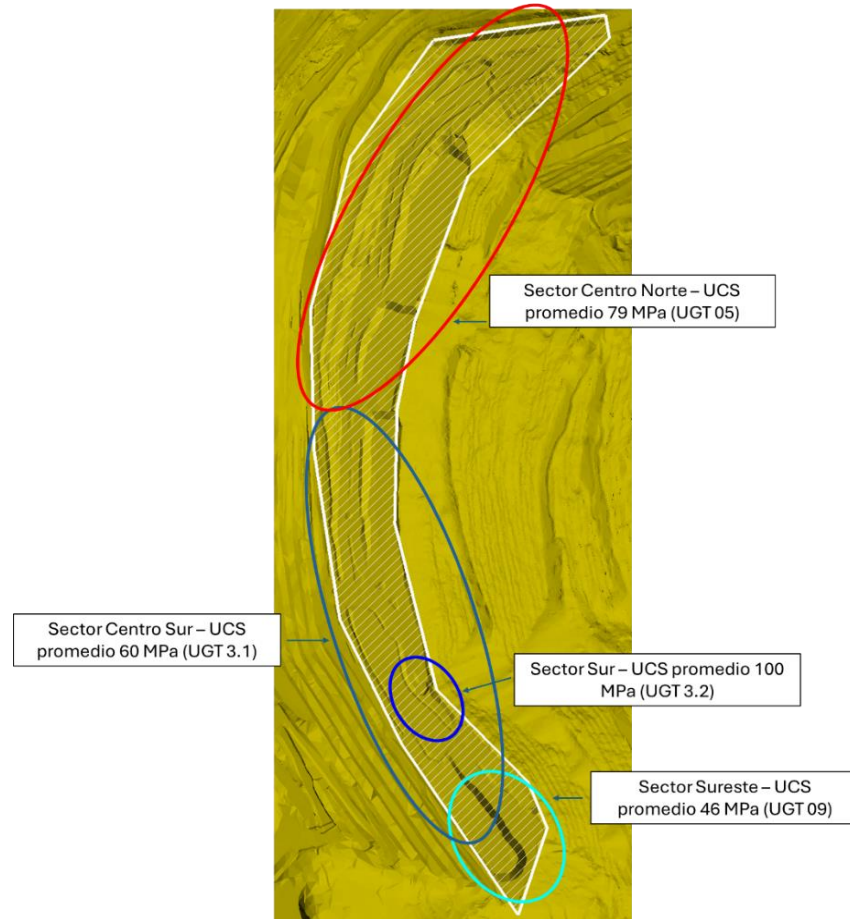
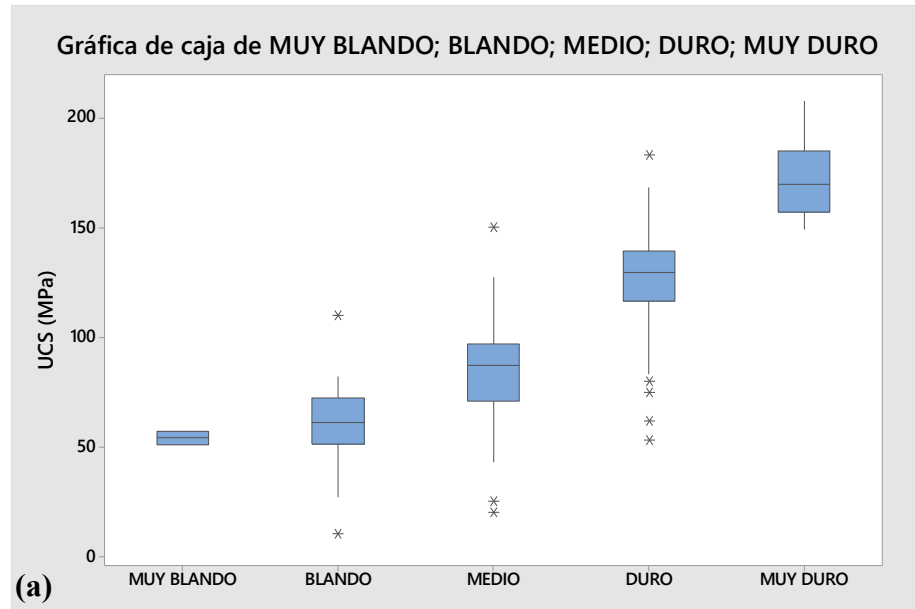


Figura 43: Mapa con resumen de UCS promedios por zonas en F11W (Elaboración propia).

### 5.3. Generación de rangos de UCS para *Bright Blast*

Con la información obtenida en los ensayos PLT, se generó la base de datos que se presenta en el “Anexo 3”, la cual incluyó la identificación de cada muestra, los valores UCS de las muestras ensayadas y el nivel de resistencia entregado por el módulo *Bright Blast*.

Estos valores se agruparon en 5 conjuntos según su nivel en *Bright Blast* (Muy blando, Blando, Medio, Duro y Muy duro). En la figura 44 se observa un *boxplot* que muestra la distribución de los valores de UCS respecto al nivel cualitativo del módulo *Bright Blast*.



(a)

**Estadísticas**

| Variable   | Media  | Desv.Est. | Q1     | Mediana | Q3     | IQR   |
|------------|--------|-----------|--------|---------|--------|-------|
| MUY BLANDO | 54,09  | 4,50      | *      | 54,09   | *      | *     |
| BLANDO     | 60,36  | 12,99     | 51,33  | 61,17   | 72,11  | 20,77 |
| MEDIO      | 84,02  | 19,15     | 71,25  | 87,34   | 96,99  | 25,73 |
| DURO       | 125,05 | 24,55     | 116,61 | 129,67  | 139,58 | 22,97 |
| MUY DURO   | 172,77 | 17,66     | 157,23 | 169,91  | 184,91 | 27,68 |

(b)

Figura 44: (a) Diagrama de *Boxplot* para cada grupo de datos, (b) Estadísticas de los grupos (Elaboración propia).

En la figura 45 se presenta un histograma de frecuencia con ajuste de distribución normal, que muestra la distribución de los valores de UCS, clasificados según la dureza cualitativa de la roca (Muy Blando, Blando, Medio, Duro y Muy Duro).

El histograma permite observar claramente la separación de distribuciones para cada categoría de resistencia. Las rocas clasificadas como “Muy Blandas” se concentran en un rango estrecho alrededor de los 55 MPa, mientras que las categorías “Blando” y “Medio” presentan una distribución más ancha, indicando mayor variabilidad. A su vez, las categorías “Duro” y “Muy Duro” presentan distribuciones centradas en

valores superiores a 130 MPa, con la categoría “Muy Duro” alcanzando valores promedio de aproximadamente 173 MPa.

La tabla que se presenta en el histograma resume los estadísticos clave para cada categoría, destacando el incremento progresivo en la media de UCS desde “Muy Blando” (54,09 MPa) hasta “Muy Duro” (172,76 MPa), así como el aumento en la desviación estándar asociado a categorías con mayor heterogeneidad.

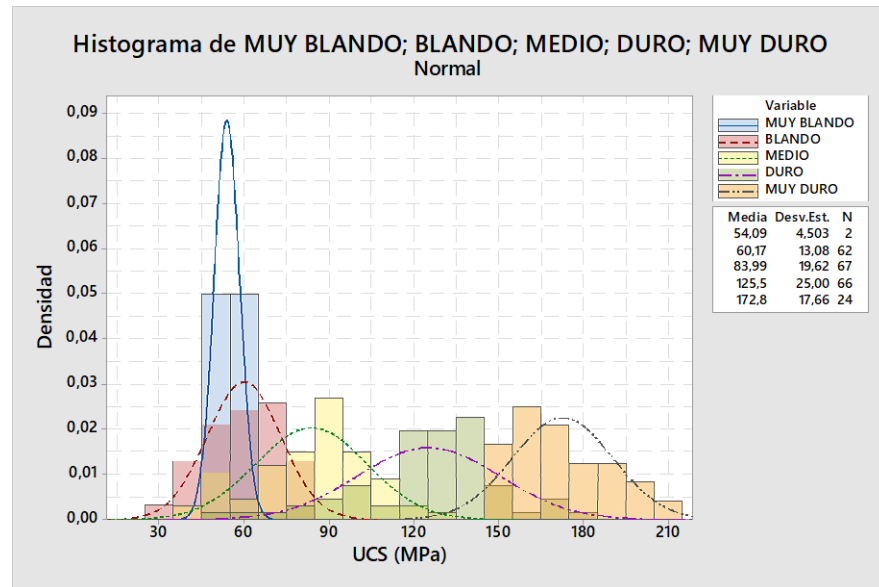


Figura 45: Histogramas con ajuste de distribución para cada grupo de datos (Elaboración propia).

En la figura 46 se presenta una gráfica de puntos que ilustra la distribución de los valores estimados de UCS. Esta visualización permite observar la dispersión y densidad de los datos individuales por categoría, aportando una perspectiva complementaria a la proporcionada por el histograma y diagramas de caja.

La categoría “Muy Blando” presenta una agrupación estrecha de valores en torno a los 50 MPa, con baja dispersión, debido principalmente a la escasez de datos asociado a dicho nivel de resistencia. En las categorías “Blando” y “Medio” se observa una mayor densidad de puntos y dispersión de valores, evidenciando una alta variación en las muestras ensayadas. Por otro lado, las categorías “Duro” y “Muy Duro” muestran una clara separación hacia valores más altos de UCS, con una distribución concentrada en torno a los 140 MPa y 170 MPa respectivamente.

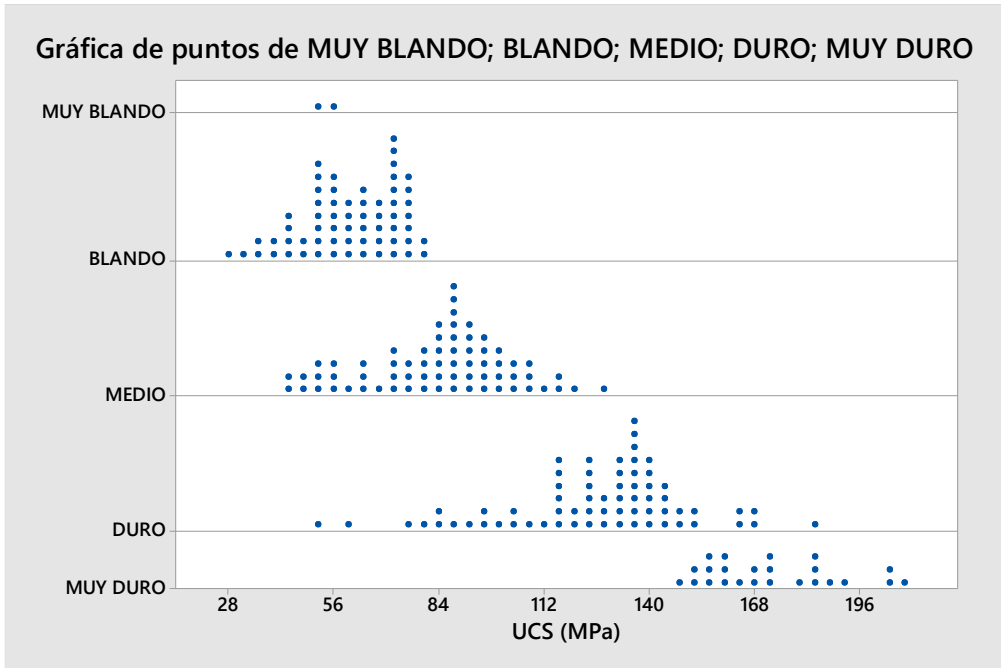


Figura 46: Diagrama de puntos para cada grupo de datos (Elaboración propia).

## CAPÍTULO 6: DISCUSIONES

### 6.1. Subdivisión de la UGT 03

La Unidad Geotécnica 03 (UGT 03) está caracterizada como una zona de mineralización supérgena que abarca distintas litologías y presenta una calidad geotécnica variable, oscilando entre buena y regular. Esta unidad se encuentra presente en las dos fases analizadas en este estudio, donde se ha observado, según reportes de MLP, un comportamiento diferencial de la unidad en cada fase, principalmente en resultados de granulometría y cumplimiento de línea de diseño, aun habiendo aplicado una malla de perforación y un factor de carga similar. Dado este escenario, se realizó un análisis comparativo de los sectores en los que la UGT 03 está presente, con el propósito de verificar estas diferencias y determinar la viabilidad de subdividir la unidad en función de sus características geológicas y propiedades resistentes.

#### 6.1.1. Comparación de rasgos geológicos y geotécnicos

Se contrastaron los rasgos geológicos identificados en las muestras obtenidas desde los polígonos con las observaciones directas en terreno. Aunque la UGT 03 comprende diversas litologías, incluyendo dioritas, brechas y pórfidos tipo B, en este estudio solo se evidenció la presencia de diorita dentro de los sectores estudiados.

- Fase 9 SE: las muestras de diorita presentan una alteración predominantemente potásica de baja intensidad, en donde se observa feldespato potásico alterando a plagioclasas y biotita alterando a hornblendas. Esto permite conservar y observar con claridad la textura de la roca original.

Las características geológicas clave incluyen:

- Baja intensidad de oxidación supérgena, con escasa o nula presencia de material argilizado.
  - Ausencia de estructuras secundarias.
  - Buena conservación de características geológicas originales.
- Fase 11 W: las muestras de diorita presentan una interacción más compleja entre alteraciones potásicas (feldespato potásico reemplazando a plagioclasas y biotita reemplazando hornblendas) y

distintos grados de argilización (presencia de sericita y hematita reemplazando plagioclasas y pirita, respectivamente), lo que en algunos casos llega a obliterar la textura original de la roca.

Los aspectos más relevantes de esta fase son:

- Presencia de estructuras secundarias, especialmente en la zona centro-sur.
- Mayor heterogeneidad mineralógica, con combinaciones de alteraciones.
- Presencia de ensambles mineralógicos con baja calidad geomecánica.

La figura 47 presenta ejemplos de muestras de roca extraídas de UGT 03 en Fase 9 SE, en donde se logra observar la baja intensidad en las alteraciones presentes. En cambio, la figura 48 presenta muestras de roca extraídas de UGT 03 en Fase 11 W, mostrando la amplia variedad de alteraciones presentes en este sector, además de la presencia de las estructuras secundarias mencionadas (Figuras 48c y 48d).

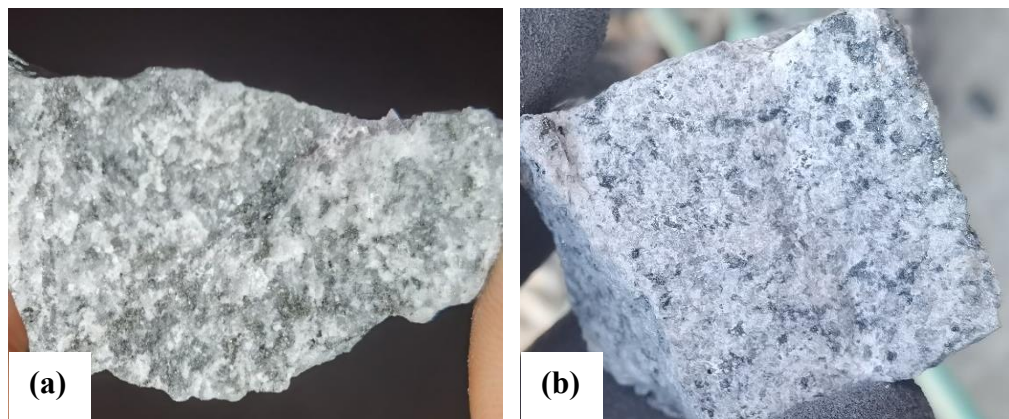


Figura 47: Ejemplos de muestras de UGT 03 de Fase 9 SE en donde se aprecian muestras casi sin alteraciones. (a) 2960-08-A y (b) 2945-08-11-60-A (Elaboración propia).

Las características descritas fueron identificadas tanto en las muestras recolectadas en terreno como en las superficies expuestas de los taludes dentro de los polígonos donde se emplaza la UGT 03. La variabilidad en el comportamiento geotécnico entre ambas zonas se ve reflejada, además, en los valores estimados del GSI, los cuales se ubicaron en el rango de 50–57 para la

Fase 11 W y entre 60–65 para la Fase 9 SE, evidenciando una diferencia significativa en la calidad geomecánica del macizo rocoso entre ambas áreas.

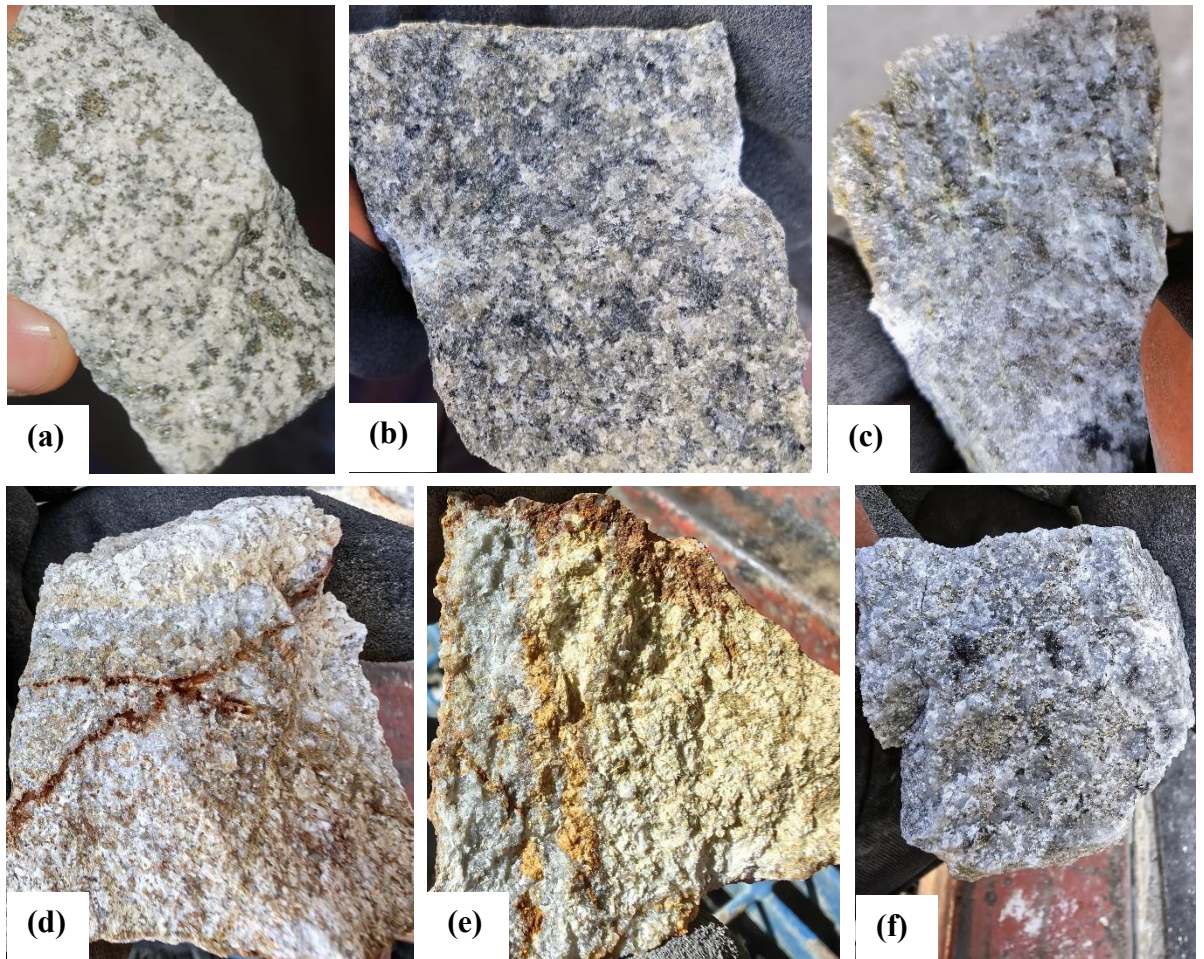


Figura 48: Ejemplos de muestras de UGT 03 de Fase 11 W en donde se evidencian las distintas alteraciones y sus grandes variaciones. (a) 3260-07-A, (b) y (c) 3245-09-61-A, (d) y (e) 3245-02-A y (f) 3245-14-A (Elaboración propia).

#### 6.1.2. Comparación de valores de UCS estimados

Para complementar el análisis geológico, se realizó una comparación de los valores de UCS estimados para la UGT 03 en ambas fases, presentada en la tabla 10, la cual contiene el UCS y desviación estándar promedio de los datos en cada polígono, el número de datos y además los valores promedios de cada fase. Este análisis buscó determinar si las diferencias en los rasgos geológicos tenían un impacto significativo en la resistencia mecánica de la roca, lo que podría justificar la subdivisión de la unidad.

Los valores promedio de UCS obtenidos fueron los siguientes:

- Fase 9 SE:  $\sim 74 \pm 4$  MPa. Este valor es coherente con el Modelo Geotécnico de MLP, que reporta valores de  $73.9 \pm 34.6$  MPa.
- Fase 11 W:  $\sim 61 \pm 8$  MPa. Representa una disminución considerable respecto al modelo de MLP y a los valores de la misma unidad en Fase 9 SE.

| Sector                     | UGT 03<br>F9 SE<br>2960-08-<br>A | UGT 03<br>F9 SE<br>2945-08-<br>11-0-A | UGT 03<br>F11W<br>3260-07-<br>A | UGT 03<br>F11 W<br>3245-09-<br>61-A | UGT 03<br>F11 W<br>3245-02-<br>A | UGT 03<br>F11 W<br>3245-14-<br>A | UGT 03<br>F11 W<br>3230-09-<br>A |
|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| <b>UCS Promedio (MPa)</b>  | 77,5                             | 71,7                                  | 61,2                            | 63,8                                | 65,7                             | 51,3                             | 68,4                             |
| <b>Desv. Std. (MPa)</b>    | 7,3                              | 17,9                                  | 9,9                             | 6,5                                 | 17,0                             | 8,1                              | 14,2                             |
| <b>N° datos</b>            | 10                               | 47                                    | 9                               | 6                                   | 18                               | 7                                | 15                               |
| <b>UCS promedio</b>        | UGT 03 Fase 9 SE = 74,6 MPa      |                                       | UGT 03 Fase 11 W = 61,1 MPa     |                                     |                                  |                                  |                                  |
| <b>Desv. Std. Promedio</b> | UGT 03 Fase 9 SE = 4,1 MPa       |                                       | UGT 03 Fase 11 W = 8,7 MPa      |                                     |                                  |                                  |                                  |

Tabla 10: Valores de UCS estimados de los bancos de Fase 9 SE y Fase 11 W con UGT 03 presente. (Elaboración propia).

Estas diferencias geológicas y de propiedades resistentes, permiten generar una división de la UGT 03 en dos subunidades; UGT 03SE correspondiente a dioritas con bajas intensidades de alteración potásica, valores de UCS en torno a los 75 MPa y GSI sobre 60. Esta subunidad se relacionó a la actual UGT 03, puesto que comparten todas sus características.

La UGT 03W, en cambio, corresponde a dioritas con presencia de alteraciones potásicas leves y argilización, hematización y/o seritización en distintos grados, con valores de UCS en torno a los 60 MPa y con GSI menores a 60. Esta subunidad se define como una UGT de buena a regular calidad geotécnica.

Esta división preliminar se presenta en la figura 49, en donde se aprecia una sección de la cota 3000 para la UGT 03. Los límites de la división se realizaron en base a la fase a la que pertenecen; UGT 03SE perteneciente a la Fase 9 SE y UGT 03W perteneciente a la Fase 11 W, sin embargo, se requiere la continuación de estudios para validar los límites entre cada unidad.

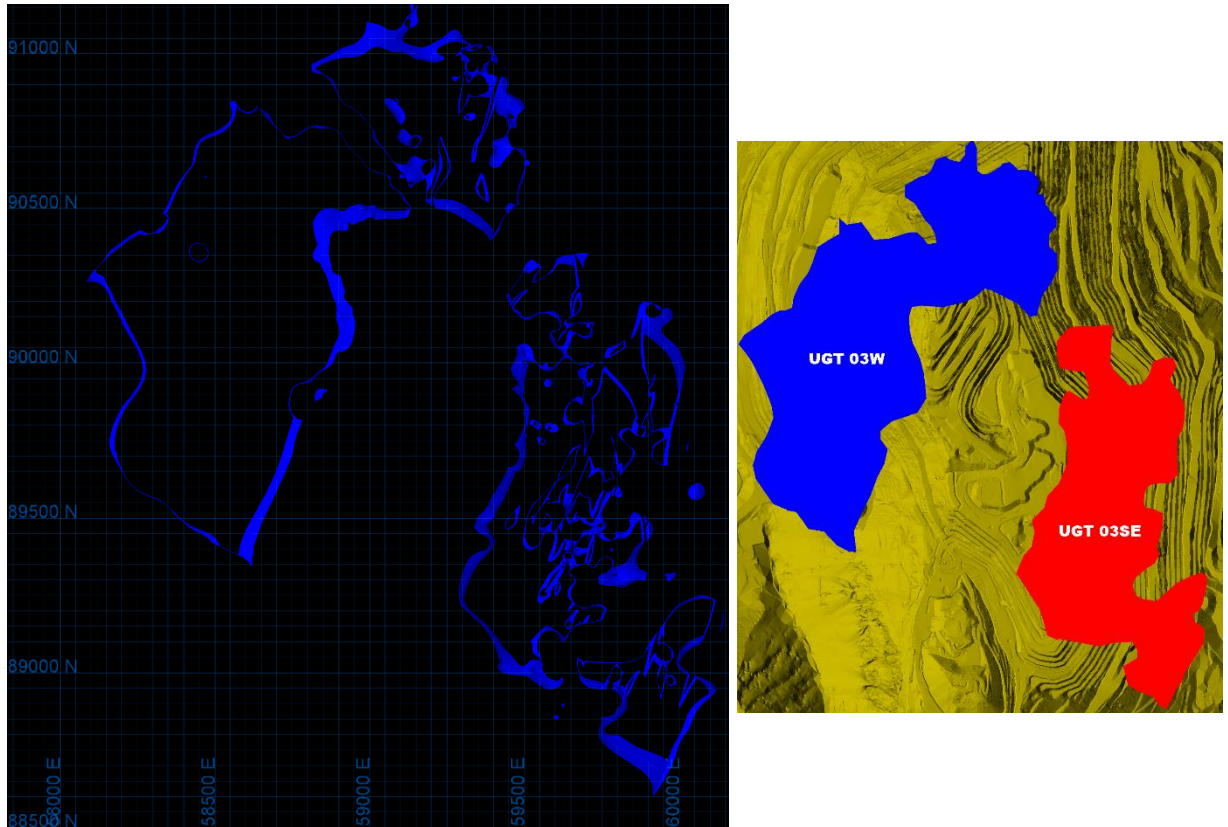


Figura 49: División preliminar de UGT 03; a la izquierda sección de cota 3000, a la derecha esquema de subdivisión respecto al rajo Los Pelambres (Elaboración propia).

La subdivisión de la Unidad Geotécnica 03 (UGT 03) permitió identificar zonas con contrastes importantes en los valores de resistencia a la compresión uniaxial, previamente ocultos bajo una clasificación unitaria, lo cual tiene efectos operacionales directos. Desde el punto de vista del diseño de voladura, contar con un modelo más detallado permite ajustar los parámetros de diseño como el burden, espaciamiento, longitud de columna de explosivo, tiempos de retardo y tipo de explosivo, en función de la resistencia real del macizo rocoso. Esto se traduce en una fragmentación más controlada, reducción de la sobrerotura, y un mejor rendimiento del proceso de excavación y chancado.

En términos de planificación geotécnica, la subdivisión permitiría una caracterización más precisa del macizo rocoso, lo que mejoraría el diseño de taludes y el análisis de estabilidad local y global. Esto es particularmente relevante en ambientes geológicos complejos como el de MLP, donde variaciones litológicas, estructurales y de alteración afectan significativamente las propiedades mecánicas. Esta estrategia se alinea con las recomendaciones de autores como Hoek y Brown (1997), quienes enfatizan que la caracterización geotécnica debe considerar dominios estructurales y litológicos homogéneos, ya que incluso variaciones menores dentro de una unidad pueden modificar su comportamiento mecánico. Asimismo, Hudson y Harrison (1997) destacan la importancia de identificar dominios con propiedades geotécnicas diferenciadas para mejorar los modelos predictivos de comportamiento del macizo.

En este sentido, la subdivisión de la UGT 03 no solo tiene un valor descriptivo, sino que incorporaría un criterio operativo con impacto tangible en el diseño y en la toma de decisiones en campo. Esto refuerza la necesidad de mantener una actualización constante de los modelos geotécnicos a medida que se avanza en el desarrollo del yacimiento y se adquiere nueva información de terreno.

## 6.2.Relevancia de la caracterización geológica

El presente estudio ha demostrado la importancia de la caracterización geológica como complemento indispensable a los ensayos de carga puntual, permitiendo diferenciar zonas con comportamientos geotécnicos contrastantes incluso dentro de una misma Unidad Geotécnica. Las diferencias observadas entre la Fase 9 SE y la Fase 11 W en la UGT 03 se correlacionan directamente con el entorno geológico: mientras la Fase 9 SE se ubica en un ambiente hipógeno con características primarias bien preservadas, la Fase 11 W está marcada por un entorno supérgeno intensamente lixiviado, lo que afecta negativamente la calidad mecánica de la roca. La cuantificación de estas diferencias se realizó mediante la estimación de UCS a partir de ensayos PLT y su contraste con valores reportados en el modelo geotécnico de MLP. Además, se complementó con indicadores como el GSI, cuyos rangos oscilaron entre 50–57 en Fase 11 W y 60–65 en Fase 9 SE, reforzando la validez de la segmentación propuesta.

Así mismo, la caracterización geológica permitió establecer diferencias en la UGT 01, pasando de una alteración potásica a una silicificación en el sector NE de la UGT, lo cual se logró asociar a un aumento significativo de los valores promedios de UCS en la zona, variando de 110 MPa en los sectores con alteración potásica y hasta 150 MPa en la zona silicificada.

Estudios como los de Hoek y Brown (1997) y Hudson y Harrison (1997) han enfatizado que incluso variaciones menores en textura, grado de alteración o disposición estructural pueden modificar significativamente el comportamiento del macizo rocoso, validando la metodología aplicada.

### 6.3. Validez y utilidad del modelo $I_{s50}$ –UCS

La correlación entre el índice de carga puntual ( $I_{s50}$ ) y la resistencia a la compresión uniaxial ha demostrado ser una metodología efectiva para estimar propiedades mecánicas de rocas en condiciones de terreno. La adopción de esta técnica se fundamenta en trabajos de Broch y Franklin (1972) y ha sido validada en contextos mineros similares por autores como Singh *et al.* (2012) y Feijoo y Román (2019). En este estudio, el factor de conversión “K” utilizado permitió obtener resultados coherentes con los promedios de UCS reportados en el modelo geotécnico de MLP.

Además, la aplicación del modelo  $I_{s50}$ –UCS posibilitó la identificación de subzonas geotécnicas previamente no reconocidas, mejorando la resolución espacial del modelo y permitiendo una integración operativa en el módulo *Bright Blast*. En resultados preliminares informados en reuniones por MLP, la incorporación de valores cuantitativos de UCS al módulo permitió redefinir el diseño de tronadura en 2 bancos de Fase 11 W, logrando ampliaciones de malla de 10.5x12.5 a 11.5x12.5 en sectores de UGT 03, con un ahorro operacional de USD \$30.000 sin comprometer los resultados de fragmentación ni la línea de diseño.

### 6.4. Fortalezas y limitaciones del uso de PLT en terreno

El ensayo PLT demostró ser una herramienta eficaz, debido a su portabilidad, bajo costo y rapidez en la obtención de resultados. Permitió una cobertura geográfica extensa en condiciones variables, siendo crucial para detectar heterogeneidades dentro

de las unidades geotécnicas. Esto se reflejó, por ejemplo, en la diferenciación de dominios con distintas propiedades resistentes dentro de la UGT 03. Asimismo, la densidad de datos obtenida facilitó el establecimiento de rangos cuantitativos para cada categoría cualitativa del *Bright Blast*, fortaleciendo su aplicación en el diseño de tronadura. Estos resultados están respaldados por Broch y Franklin (1972), Singh *et al.* (2012) y Sharma y Singh (2008), quienes destacan la confiabilidad del PLT en contextos mineros a cielo abierto.

Sin embargo, el ensayo PLT también presenta limitaciones relevantes que deben ser consideradas al interpretar sus resultados. Dado que se trata de una estimación indirecta de UCS, su precisión depende de factores empíricos de corrección, que pueden variar según la litología, el grado de anisotropía y el estado de meteorización del macizo (Rusnak y Mark, 2000). En este estudio, esta incertidumbre se mitigó parcialmente mediante la correlación de los valores PLT con observaciones geológicas en terreno y parámetros de clasificación geomecánica como el GSI. Además, el PLT no considera explícitamente el comportamiento estructural de la masa rocosa a gran escala, por lo que su interpretación aislada puede ser limitada. En ambientes altamente alterados, como el observado en Fase 11 W, su sensibilidad al estado de alteración también puede afectar la consistencia de los valores obtenidos. En este sentido, su uso debe complementarse con otras técnicas de caracterización geotécnica para aumentar la robustez del modelo (ISRM, 1985).

#### 6.5. Comparación con el modelo geotécnico oficial de MLP

Al contrastar los resultados obtenidos mediante PLT con los valores de UCS entregados en el informe “Modelo Macizo Rocosos MLP (2018)”, se identificaron diferencias relevantes en varias unidades, en especial en la UGT 01 y la UGT 03.

Investigaciones previas realizadas por Perelló *et al.* (2012) y Sillitoe (1973) señalan que la diorita cuarcífera del *Stock Pelambres*, correspondiente a la UGT 01 de MLP, puede presentar fases localizadas de alta silicificación, las cuales incrementan considerablemente la resistencia mecánica de la roca. Sin embargo, estas variaciones no están reflejadas explícitamente en la clasificación litológica de la unidad DIQ ni en la descripción geotécnica de la UGT 01, lo que genera desviaciones sistemáticas entre

el modelo y los valores reales medidos. Estas fases silicificadas fueron descritas en este trabajo dentro de la Fase 9 SE, específicamente en el sector NE, en donde los valores de UCS aumentaban considerablemente respecto a las zonas no silicificadas (~150 MPa vs ~110 MPa, respectivamente). Estos resultados refuerzan la necesidad de generar segmentaciones más detalladas dentro de las unidades, controlando la dispersión de los valores de resistencia y el comportamiento mecánico del macizo rocoso.

Por otra parte, el modelo geotécnico de MLP considera rangos demasiado amplios para los valores de UCS dentro de una misma unidad. Si bien estos rangos son correctos y consistentes, no permiten generar una segmentación más detallada del macizo rocoso, ocasionando problemas de fragmentación y cumplimiento de la línea de diseño. Esto es el caso de la UGT 03 ( $73.9 \pm 34.6$  MPa), unidad que posee comportamientos distintos en Fase 9 SE y en Fase 11 W, e inclusive, comportamientos distintos dentro de un mismo sector, pasando de UCS promedios de 60 MPa a zonas con UCS de 100 MPa (banco 3245 de Fase 11 W), lo que ha ocasionado pérdidas de ancho de berma por sobrefragmentación y bajo cumplimiento en la línea de diseño. En este contexto, estudios geotécnicos modernos recomiendan segmentaciones más detalladas dentro de unidades litológicas heterogéneas, particularmente en yacimientos tipo pórfido, donde la zonificación estructural y los efectos de lixiviación pueden ser significativos (Hoek y Brown, 1997; Hudson y Harrison, 1997).

Las alteraciones hidrotermales también juegan un rol determinante. En la Fase 11 W, por ejemplo, se observaron sectores de diorita intensamente lixiviada con valores de UCS cercanos a 46 MPa, lo cual coincide con zonas superficiales de muy mala calidad de roca, altamente afectadas por procesos supérgenos. Estas observaciones son congruentes con la zonación de alteración descrita por Saavedra (2019), quien identifica una zona de alteración potásico-silíceo dominante en el centro del yacimiento, rodeada por halos de alteración filica y propilitica en los bordes. Dado que el modelo geotécnico actual no incorpora explícitamente esta zonificación ni su influencia sobre la resistencia de la roca, se recomienda avanzar hacia un modelo

geomecánico integrado, que combine litología, alteración y estado estructural del macizo.

Finalmente, la subdivisión de unidades como la UGT 01 y UGT 03, en base a observaciones de campo y resultados de PLT, permite mejorar la caracterización geotécnica del yacimiento. Esta propuesta se alinea con los criterios establecidos por el Modelo de Macizo Rocoso de MLP (2018), que sugiere adaptar las unidades geotécnicas a las condiciones reales observadas en terreno.

#### 6.6. Justificación técnica de los rangos propuestos para *Bright Blast*

Inicialmente, el modelo contaba con un rango preliminar de UCS para cada nivel del modelo *Bright Blast*, presentado en la tabla 11, y que era derivado del análisis de datos proporcionados por las perforadoras y de mediciones previas no estandarizadas realizadas por los geotécnicos de MLP. Estas mediciones incluían principalmente mapeos de *cutting* y estimaciones de UCS mediante martillo geológico.

| <b>Rango de UCS preliminares Bright Blast</b> |                        |
|---|------------------------|
| <b>Nivel módulo</b>                           | <b>Rango UCS (MPa)</b> |
| Muy blando                                    | <50                    |
| Blando  | 50-70                  |
| Medio   | 70-100                 |
| Duro  | 100-140                |
| Muy duro                                      | >140                   |

Tabla 11: Rangos preliminares para Módulo *Bright Blast* (Elaboración propia).

En base a la información recolectada, condición geológica y geomecánica de los bancos y muestras, y los valores de UCS analizados, se logró observar una clara distribución ascendente en los datos conforme aumentaba la categoría de resistencia. Sin embargo, también se evidenció en los análisis gráficos solapamientos entre categorías adyacentes, especialmente entre "Blando–Medio" y "Medio–Duro", lo cual motivó un ajuste de los umbrales para reducir la ambigüedad en la clasificación.

Al comparar las dispersiones dentro de cada categoría, se detectó una alta variabilidad en las categorías intermedias, lo que sugiere que los límites anteriores eran demasiado amplios. Por ello, se establecieron límites más ajustados, basándose en acumulación

de datos, lo cual mejoró la consistencia interna de los datos UCS dentro de cada grupo. Al reposicionar los límites hacia las concentraciones de datos más representativas, los rangos propuestos que se presentan en la tabla 12 reflejan de mejor forma la distribución actual de los niveles.

| <b>Rango de UCS para módulo Bright Blast</b> |                        |
|--|------------------------|
| <b>Nivel módulo</b>                          | <b>Rango UCS (MPa)</b> |
| Muy blando                                   | <40                    |
| Blando                                       | 40-70                  |
| Medio  | 70-105                 |
| Duro   | 105-145                |
| Muy duro                                     | >145                   |

Tabla 12: Rangos finales para cada nivel de resistencia del Módulo *Bright Blast* (Elaboración propia).

La calibración del módulo *Bright Blast* mediante los valores obtenidos por PLT permitió establecer rangos de UCS más precisos para cada categoría cualitativa. Los nuevos rangos (Tabla 12) reflejan de forma más realista la resistencia efectiva del macizo y reducen la superposición entre categorías. La propuesta se fundamenta en la necesidad de asociar datos medidos con observaciones operacionales. A diferencia del modelo UGT de MLP, que presenta rangos amplios y solapados, esta calibración permite una asignación diferenciada por banco, litología y condición estructural. Esto tiene un impacto directo en la calidad del diseño de tronadura, permitiendo la reducción de costos, una mejor fragmentación y mayor seguridad operacional.

En contraste con los rangos preliminares usados por el módulo *Bright Blast*, se observan diferencias poco significativas en los límites de los rangos. Esto indica que, aunque los cambios en los umbrales son pequeños, la funcionalidad de los ensayos PLT para estimación de UCS es óptima y otorga el respaldo estandarizado a la metodología utilizada que se requería para integrar estos valores dentro de la interfaz del módulo. Sin embargo, se destaca la necesidad de una retroalimentación de información continua hacia el módulo *Bright Blast*, debido a las altas variaciones de características y condiciones estructurales detectadas en el macizo rocoso.

## 6.7.Limitaciones y recomendaciones futuras

A pesar de los resultados positivos obtenidos, el estudio presenta ciertas limitaciones. Entre los principales desafíos enfrentados se encuentran la disponibilidad limitada de taludes, el tiempo de acceso a los polígonos de tronadura, las condiciones de seguridad en el área de trabajo y la presencia de pretiles geotécnicos. Estas condiciones dificultaron la homogeneidad en la cantidad de muestras recolectadas, generando una distribución variable entre los distintos sectores evaluados. Sin embargo, a pesar de estas dificultades, el proceso de recolección se llevó a cabo de manera eficiente dentro de las posibilidades operativas, asegurando la obtención de datos representativos para el análisis posterior. Para mitigar esta desviación en estudios futuros se recomienda realizar una modificación al “Procedimiento de obtención de muestras para laboratorio” de Enaex, añadiendo un apartado de planificación detallada de tareas y tiempo empleado para ello entre los involucrados, ya sea el equipo multidisciplinario de área técnica de Enaex, operadores de equipos en el área y/o supervisión mina. Esto no solo permitiría el acceso oportuno a los bancos en desarrollo, sino que también permitiría el acceso a sectores cerrados previa autorización, integrando sectores no estudiados y robusteciendo la base de datos.

Además, si bien la correlación entre  $I_{s50}$  y UCS es ampliamente reconocida, su precisión depende del tipo de litología, las condiciones de carga y el tamaño de muestra, como lo advierten la norma ASTM D5731 y autores como Singh *et al.* (2012). Por ello, se hace necesario realizar nuevas compañías de pruebas con el equipo PLT, dividiéndose los resultados por fase, por UGT, por tipo de litología y por tipo de alteración presente. Esto permitiría generar factores de conversión “K” de forma más detallada, aumentando la confiabilidad de los resultados, además de definir rangos de UCS más precisos que los del modelo actual, gracias al aumento de información en la base de datos.

Asimismo, el modelo *Bright Blast* se encuentra actualmente limitado a la estimación de UCS y no contempla otros parámetros geotécnicos relevantes como la cohesión, el ángulo de fricción interno ni la anisotropía del macizo rocoso, que también influyen en el diseño de voladuras.

## 6.8. Propuesta de integración multidisciplinaria

Una de las fortalezas de este trabajo radica en la integración de disciplinas geológicas, geotécnicas y tecnológicas en la calibración del módulo *Bright Blast*. Este enfoque multidisciplinario es coherente con las tendencias actuales en minería avanzada, que requieren de una colaboración activa entre geólogos, ingenieros de minas, especialistas en datos y desarrolladores de *software*. La colaboración entre áreas permitió desarrollar una solución adaptada a las condiciones reales del yacimiento, mejorando la calidad del diseño de tronadura y optimizando recursos.

Un ejemplo concreto del impacto de esta integración fue la reducción de la variabilidad en la estimación de la UCS, lo cual permitirá ajustar de forma más precisa los parámetros de diseño de perforación y voladura (como el burden y espaciamiento), disminuyendo así los casos de sobrerotura y retrabajo.

Los resultados obtenidos permiten vislumbrar el potencial de escalabilidad del modelo calibrado. La metodología de correlación  $I_{s50}$ –UCS, junto con el análisis estadístico y espacial, puede ser replicada en otros sectores del mismo yacimiento o incluso en otras operaciones mineras que presenten condiciones geológicas y operacionales comparables.

Para lograr una transferencia tecnológica exitosa, será necesario adaptar los factores de conversión y validar el modelo en terreno. Esta posibilidad de expansión es coherente con las metas de Enaex de ofrecer soluciones basadas en datos para operaciones mineras diversas, contribuyendo a una minería más inteligente y sustentable (Enaex, 2025).

Estudios previos como los de McGaughey y Stead (2016) destacan la necesidad de integrar sensores, modelos predictivos y análisis geotécnico en plataformas digitales para optimizar operaciones mineras. Este trabajo se enmarca dentro de esa línea, demostrando que los modelos tradicionales pueden complementarse con herramientas inteligentes para obtener resultados más precisos y aplicables.

## CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

El presente trabajo tuvo como objetivo actualizar el modelo de estimación de resistencia a la compresión uniaxial (UCS) del módulo *Bright Blast* de Enaex, a través de una metodología integrada que incorpora observaciones geológicas de terreno, ensayos de carga puntual (PLT) y análisis de unidades geotécnicas en sectores específicos del rajo Los Pelambres, particularmente en Fase 9 SE y Fase 11 W.

En primer lugar, se logró identificar y caracterizar detalladamente las litologías y tipos de alteración presentes en ambos sectores. En Fase 9 SE se identificó principalmente diorita con variabilidad en el tipo y grado de alteración, destacando una fase de silicificación masiva no descrita anteriormente, que motivó la definición de una nueva subunidad geotécnica (UGT 1.2). Asimismo, se corroboró la presencia de UGTs ya conocidas como UGT 01, UGT 02 y UGT 03, validando sus rangos de resistencia y continuidad espacial. En Fase 11 W, se reconoció una mayor diversidad litológica, incluyendo pórfidos tipo B, andesitas y dioritas, con distintas alteraciones como propilitica, potásica, argílica y filica, permitiendo identificar subunidades nuevas como UGT 3.2 y ajustar la interpretación de zonas con comportamiento atípico, como una fase meteorizada de la UGT 09.

En segundo lugar, se establecieron rangos cuantitativos de UCS para las categorías del módulo *Bright Blast*, permitiendo una traducción objetiva y funcional de los niveles de resistencia: muy blando (<40 MPa), blando (40–70 MPa), medio (70–105 MPa), duro (105–145 MPa) y muy duro (>145 MPa). Esta parametrización, basada en datos empíricos de PLT, representa un avance metodológico significativo respecto al enfoque cualitativo anterior, aportando mayor robustez a la planificación y control operacional de tronaduras.

Adicionalmente, los análisis geomecánicos permitieron subdividir la unidad geotécnica UGT 03 en dos subunidades con diferencias significativas en su respuesta mecánica y características geológicas: UGT 03SE, con litología homogénea y alteración potásica leve, y UGT 03W, con mayor heterogeneidad litológica y presencia de alteraciones argílicas y filicas, asociadas a menores valores de UCS y GSI. Esta diferenciación mejora la resolución espacial del modelo y contribuye a una gestión más precisa del macizo rocoso.

En conjunto, estos resultados no solo validan la factibilidad de aplicar un enfoque cuantitativo replicable para la estimación de UCS en el contexto operativo de MLP, sino que también sientan las bases para expandir el modelo hacia otras zonas del yacimiento y hacia parámetros geotécnicos adicionales, tales como cohesión, ángulo de fricción y módulos elásticos. Esto permite avanzar hacia una caracterización más completa del macizo rocoso, optimizando la planificación de excavaciones, perforación y tronadura.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Alfaro, M. (2009). Efecto de la aplicación de leyes de corte en el cálculo de un programa de producción [Memoria de título, Universidad de Chile]. Santiago, Chile.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2016). Standard method for determination of the point load strength index of rock (ASTM D5731-16). ASTM International.

Atkinson, T. (1992). Design and layout of haul roads. En H. L. Hartman (Ed.), *SME Mining Engineering Handbook* (pp. 1334–1342). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

Bertens, A., Clark, A., Barra, F., y Deckart, K. (2006). Evolution of the Los Pelambres–El Pachón porphyry copper-molybdenum district, Chile/Argentina. En XI Congreso Geológico Chileno, Antofagasta (pp. 179–181).

Bertens, A., Deckart, K., y González, A. (2003). Geocronología U–Pb, Re–Os y  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  del pórfido Cu–Mo Los Pelambres, Chile central. En 10º Congreso Geológico Chileno, Concepción (CD-ROM).

Bieniawski, Z. T. (1975). The point load test in geotechnical practice. *Engineering Geology*, 9(1), 1–11.

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classification: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering*. Wiley.

Broch, E., y Franklin, J. A. D. (1972). The point-load strength test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 9(6), 669–697.

Brockway, H., Perrelló, J., Posso, H. y East, P. (2008). Programa exploración Los Pelambres. Informe Final, Mayo 2008. Informe Inédito. 55 p.

Brown, E. T. (1981). *Rock characterization, testing and monitoring: ISRM suggested methods*. Pergamon Press.

Camus, F. (2002). The Andean porphyry systems. En D. R. Cooke & J. Pongrantz (Eds.), *Giant Ore Deposits: Characteristics, Genesis and Exploration* (pp. 5–21). CODES Special Publication 4.

Cannell, J., Cooke, D., Walshe, J., y Stein, H. (2005). Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu–Mo deposit. *Economic Geology*, 100, 979–1003.

Cargill, S. M., y Shakoor, A. (1990). Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 27(6), 495–503.

Casanegra, M. (2008). Estudio de vibraciones en excavaciones subterráneas inducidas por tronaduras superficiales en Hemlo Mine [Tesis de magíster, Universidad de Chile]. Santiago, Chile.

Castelli, J. (2006). Geología de Los Pelambres y El Pachón: Geovectra. Informe para AMSA, Santiago, p. 35.

Cooke, D., Hollings, P., Wilkinson, J., y Tosdal, R. (2014). Geochemistry of porphyry deposits. En *Treatise on Geochemistry* (Vol. 13, pp. 357–376). Elsevier.

D’Andrea, D. V., Fischer, R. L., y Dacar, M. A. (1964). Prediction of compressive strength from other rock properties. *ASTM Special Technical Publication*, 335, 71–89.

Deere, D. U., y Miller, R. P. (1966). Engineering classification and index properties for intact rock (AFWL-TR-65-116). Air Force Weapons Laboratory.

Deere, D. U., y Deere, D. W. (1988). The rock quality designation (RQD) index in practice. En L. Kirkaldie (Ed.), *Rock classification systems for engineering purposes*. ASTM Special Publication.

Diaz, C. (2017). Planificación minera a cielo abierto considerando diseño óptimo de rampas [Memoria de título, Universidad de Chile].

Enaex. (2024a). Manual de diseño Enaex. Departamento de Área Técnica.

Enaex. (2024b). Guía interna Bright Blast V2. Departamento de Innovación, Enaex.

Enaex. (2025). Tecnologías aplicadas a minería inteligente: Informe técnico Bright Blast. Departamento de Innovación, Enaex.

Feijoo, P., y Román, M. (2019). Correlación entre la deformación y la resistencia a la compresión en rocas: Un diagnóstico de campo. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 23(91), 12–17.

Fener, M., Kahraman, S., y Gunaydin, O. (2005). The effect of weathering on the strength and deformability of basalts. *Engineering Geology*, 75(3–4), 339–347.

Ferrer, M. y Gonzalez de Vallejo. (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. IGME, Madrid, 107 p.

Floyd, D. (1998). Drill and blast performance evaluation: A practical approach. En *Proceedings of the ISEE Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*.

Flores, J., y Tinoco, A. (2019). Construcción de la “Máquina de Franklin”, pruebas y correlación con ensayos de laboratorio. Universidad del Azuay.

Geotecnia Consultores. (2022). Apuntes Geotecnia VIII: Roca intacta vs. Macizo rocoso. Extraído de “<https://www.geotecniaconsultores.com/apuntes-geotecnia-viii-roca-intacta-vs-macizo-rocoso/>”.

González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). Ingeniería geológica. Pearson Educación.

Grasso, P., Mahtab, A., y Xu, J. (1992). A modified point load test for weak rocks. *Geotechnical Testing Journal*, 15(4), 385–394.

Gunsalus, C. L., y Kulhawy, F. H. (1984). A comparative evaluation of laboratory rock testing techniques. *Geotechnical Testing Journal*, 7(3), 129–137.

Hassani, F., Scoble, M. J., y Whittles, D. N. (1980). A review of methods for estimating in situ rock strength. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 89, A100–A104.

Herrera, J., Castilla, J., y Bernaola, J. (2013). Perforación y voladura de rocas en minería. Universidad Politécnica de Madrid.

- Hoek, E. (2006). Practical rock engineering. *Environmental & Engineering Geoscience*, 14(1), 53–57.
- Hoek, E., y Brown, E. T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of Geotechnical Engineering*, 106(GT9), 1013–1035.
- Hoek, E., y Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165–1186.
- Hoek, E., Kaiser, P. K., y Bawden, W. F. (1994). Support of underground excavations in hard rock. Balkema.
- Hudson, J. A., y Harrison, J. P. (1997). *Engineering rock mechanics: An introduction to the principles*. Pergamon Press.
- Hustrulid, W., Kuchta, M., y Martin, R. (2013). *Open pit mine planning and design* (Vol. 1, 3rd ed.). CRC Press.
- ISRM. (1985). Suggested method for determining point load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 22(2), 51–60.
- Jimeno, C., Jimeno, E., y Carcedo, F. (1995). *Drilling and blasting of rocks*. CRC Press.
- John, D. (2010). Introduction. En D. John (Ed.), *Porphyry copper deposit model* (pp. 11–20). USGS Scientific Investigations Report 2010-5070-B.
- Kahraman, S. (2001). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7), 981–994.
- Konya, C. J. (1998). Blast design. En C. J. Konya & E. J. Konya (Eds.), *Blasting Handbook* (pp. 113–145). ISEE.
- Kuckartz, U., Rädiker, S., Ebert, T., y Schehl, J. (2013). *Statistik: Eine verständliche Einführung* (p. 213).
- Lencinas, A., y Tonel, M. (1993). La Brecha Sur del Yacimiento Pachón. En XI Congreso Geológico Argentino, V, 241–247.

- Lowell, J., y Guilbert, J. (1970). Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65, 373–408.
- Marinos, P., y Hoek, E. (2000). GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. En *ISRM International Symposium*. Melbourne, Australia.
- Mathiesen, J. (2000). *Modern trends in tunneling and blast design*. Netherlands.
- Meyer, C., y Hemley, J. (1967). Wall rock alteration. En H. Barnes (Ed.), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (pp. 166–235). Wiley.
- Minera Los Pelambres. (2018). *Modelo de macizo rocoso MLP*. Departamento de Geotecnia, Minera Los Pelambres.
- Moraga, M. (2018). *Actualización del modelo geotécnico en sectores del rajo de Minera Los Pelambres [Informe interno, Departamento de Geotecnia, MLP]*.
- Mpodozis, C. (2015). *Mapa geológico regional del área de Los Pelambres (esc. 1:75.000)*. Informe interno, Antofagasta Minerals.
- Mpodozis, C., y Cornejo, P. (2012). Cenozoic tectonics and porphyry copper systems of the Chilean Andes. En *Society of Economic Geologists, Special Publication 16* (pp. 329–360).
- Munsell Color. (2009). *Munsell Soil Color Charts*. Grand Rapids, MI: Munsell Color.
- Palmstrom, A. (1975). *Characterization of degree of jointing and rock mass quality*. Ing. A.B. Berdel A.S., Oslo.
- Parra, A. (2015). *Planificación minera a cielo abierto utilizando fundamentos geomecánicos [Tesis de magíster, Universidad de Chile]*.
- Perelló, J., Sillitoe, R., Mpodozis, C., Brockway, H., y Posso, H. (2012). Geologic setting and evolution of porphyry copper–molybdenum deposits at Los Pelambres. En *Society of Economic Geologists, Special Publication 16* (pp. 79–104).
- Priest, S. D., y Hudson, J. A. (1976). Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 13(5), 135–148.

Rivano, S., y Sepúlveda, P. (1991). Carta geológica de Chile N°69: Hoja Illapel. SERNAGEOMIN.

Rusnak, J., y Mark, C. (2000). Using the point load test to determine UCS of coal measure rock. En 19th International Conference on Ground Control in Mining (pp. 362–371).

Saavedra, F. (2019). Zonificación de alteración hidrotermal en el yacimiento Los Pelambres y su relación con la calidad de roca [Memoria de título, Universidad de Concepción].

Saavedra, J. (2019). Zonificación de alteración hidrotermal en el yacimiento Los Pelambres. Informe interno, MLP.

Sharma, V. M., y Singh, T. N. (2008). Correlation of point load index with UCS for Indian rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(3), 259–269.

Sillitoe, R. H. (1973). Geology of the Los Pelambres porphyry copper deposit, Chile. *Economic Geology*, 68(1), 1–10.

Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105, 3–41.

Singh, B. (1981). Estimation of UCS by point load index. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 18(3), 221–227.

Singh, B., Singh, T. N., y Kainthola, A. (2011). Correlation between point load index and UCS for different rock types. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44(3), 271–279.

Singh, B., Singh, T. N., y Kainthola, A. (2012). Correlation between point load index and UCS for different rock types. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(2), 259–264.

SONAMI. (2014). Guía N°4 de operación para la pequeña minería: Perforación y tronadura.

Thompson, R. (2011). Design, construction, and maintenance of haul roads. En P. Darling (Ed.), *SME Mining Engineering Handbook* (Vol. 1, pp. 957–975). SME.

Ulusay, R., Gokceoglu, C., Sönmez, H., y Tuncay, E. (1994). Estimation of UCS of weak rocks using point load index. En 7th ISRM Congress, Aachen, Germany (pp. 1431–1434).

Wetherelt, A., y Van der Wielen, K. (2011). Introduction to open-pit mining. En P. Darling (Ed.), SME Mining Engineering Handbook (Vol. 1, pp. 857–875). SME.

# ANEXO 1



# ART (ANÁLISIS DE RIESGOS DE LA TAREA)

VERS. 4

| I) ETAPA 1   |  |   |  |  |
|--|--|---|--|--|
| <b>1.1) ANTECEDENTES DEL TRABAJO</b>   |  |   |  |  |
| NOMBRE DE LA EMPRESA:  | FECHA: / /   |   |  |  |
| DESCRIPCIÓN DE LA TAREA:   | HORA DE INICIO:  |   |  |  |
|  | HORA DE TÉRMINO:   |   |  |  |
|  | ÁREA DE TRABAJO:   |   |  |  |
|  | LUGAR ESPECÍFICO:  |   |  |  |
| NOMBRE DEL SUPERVISOR RESPONSABLE DEL TRABAJO:   | FIRMA:   |   |  |  |
| <b>1.2) DE LOS TRABAJADORES: CONTESTE CADA PREGUNTA</b>  |  |   |  |  |
|  | SI NO  |   |  |  |
| 1 ¿Me encuentro en condiciones físicas y psicológicas para realizar la tarea?  | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>              |   |  |  |
| 2 ¿Las condiciones del entorno permiten realizar mi trabajo de manera segura? (condiciones climáticas, iluminación, otras).  | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>              |   |  |  |
| 3 ¿Verifiqué que las áreas de desplazamiento y trabajo (plataformas de trabajo, pasillos, grating, barandas, entre otros) se encuentran en condiciones para realizar mi tarea? | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>              |   |  |  |
| 4 ¿Poseo todos los elementos de protección personal específicos para la tarea?   | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>              |   |  |  |
| 5 ¿Dispongo de equipos y herramientas apropiadas para la tarea, en buen estado y con su inspección al día?   | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>              |   |  |  |
| 6 ¿Sé cómo activar y actuar ante una emergencia?   | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>              |   |  |  |
| <b>⚠ UN NO A CUALQUIERA DE LAS PREGUNTAS SIGNIFICA NO INICIAR LA TAREA Y DAR AVISO A SU SUPERVISIÓN.</b>   |  |   |  |  |
| <b>1.3) DE LA TAREA</b>  |  |   |  |  |
|  | SI NO  |   |  |  |
| 1 ¿Estoy capacitado(a) y conozco las medidas de prevención que mi empleador ha definido para ejecutar mi trabajo o tarea de manera correcta y segura?                          | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>              |   |  |  |
| <b>⚠ UN NO A ESTA PREGUNTA SIGNIFICA NO INICIAR LA TAREA Y DAR AVISO A SU SUPERVISIÓN.</b>   |  |   |  |  |
| 2 ¿Existe algún documento que regule mi trabajo o tarea? Manual, reglamento, procedimiento, instructivo de trabajo u otro. Indique cuál:                                       | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>              |   |  |  |
| 3 ¿El manual, reglamento, procedimiento, instructivo u otro incluye todas las actividades (alcance) a desarrollar en terreno?  | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>              |   |  |  |
| <b>4 Verificar si aplica una o más Estrategias de Control, seleccionando la casilla:</b>   |  |   |  |  |
| <input type="checkbox"/> Operación de Vehículos Livianos   | <input type="checkbox"/> Prevención de Silicosis               | <input type="checkbox"/> Operación de Equipos Pesados       | <input type="checkbox"/> Prevención de Hipoacusia                                  | <input type="checkbox"/> Operaciones de Izaje  |
| <input type="checkbox"/> Fatiga y Somnolencia  | <input type="checkbox"/> Trabajos en Altura                    | <input type="checkbox"/> Interacción con Partes Móviles     | <input type="checkbox"/> Op. y Mantenimiento de Correas Transp.                    | <input type="checkbox"/> Trabajos en Espacios Confinados                             |
| <input type="checkbox"/> Interacción con Energía Eléctrica   | <input type="checkbox"/> Manejo de Explosivos y Frag. de Roca  | <input type="checkbox"/> Interacción con Energía Hidráulica | <input type="checkbox"/> Manejo de Sol. Ácidas, Aciduladas y Sustancias Peligrosas | <input type="checkbox"/> Geotecnia   |
| <input type="checkbox"/> Interacción con Energía Neumática   | <input type="checkbox"/> Operaciones de Perforación            | <input type="checkbox"/> Operación de Neumáticos Mineros    | <input type="checkbox"/> Operaciones de Sondajes                                   | <input type="checkbox"/> Op. de Almacenaje, Traslado de Materiales y Vuelo de Drones |
| <input type="checkbox"/> Operación de Estructuras  | <input type="checkbox"/> Manejo de Elementos Combustibles      | <input type="checkbox"/> Buceo Profesional                  | <input type="checkbox"/> Construcción de Zanjas y Excavaciones                     | <input type="checkbox"/> Humos Metálicos   |
| <input type="checkbox"/> Manejo Manual de Carga  | <input type="checkbox"/> Almacenamiento en Depósitos de Relave |   |  |  |
| <b>⚠ RESPONDER LA HOJA DE VERIFICACIÓN DE CONTROLES CRÍTICOS CORRESPONDIENTE A LAS ESTRATEGIAS QUE APLICAN.</b>  |  |   |  |  |
| 5 ¿Existe interacción con otros trabajos?  |  | SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>     |  |  |
| <b>⚠ UN SI A ESTA PREGUNTA SIGNIFICA REALIZAR ADICIONALMENTE LA ETAPA II, PUNTO 2.1 "VERIFICACIÓN DE TRABAJOS CRUZADOS".</b>   |  |   |  |  |
| 6 ¿Requiero de un permiso especial de trabajo? Indique cuál.   |  | SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>     |  |  |
| Permiso de Ingreso al Área   | <input type="checkbox"/>                                       | Permiso de Retiro de Piso (grating o piso) y barandas       | <input type="checkbox"/>   |  |
| Permiso de Trabajo en Caliente   | <input type="checkbox"/>                                       | Permiso de Trabajo en Altura y Verificación de SPDC         | <input type="checkbox"/>   |  |
| Permiso de Trabajo en Espacios Confinados  | <input type="checkbox"/>                                       | Permiso de Trabajo Líneas Eléctricas Aéreas                 | <input type="checkbox"/>   |  |
| Permiso de Aislación y Bloqueo   | <input type="checkbox"/>                                       | Permiso de Trabajo con Equipos Radioactivos                 | <input type="checkbox"/>   |  |
| Permiso de Trabajo para Intervenir Equipo Energizado   | <input type="checkbox"/>                                       | Otros Permisos  | <input type="checkbox"/>   |  |
| Permiso de Izaje (para izajes críticos)  | <input type="checkbox"/>                                       | Indique Cuál  | <input type="checkbox"/>   |  |
| ¿Dispongo de los permisos de trabajo requeridos?   |  | SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>     |  |  |
| <b>⚠ SI REQUIERE PERMISOS Y NO LOS DISPONE, SIGNIFICA NO INICIAR LA TAREA Y DAR AVISO A SU SUPERVISIÓN.</b>  |  |   |  |  |

Cartilla de Análisis de Riesgos de la Tarea (ART) en MLP.

NOMBRE: \_\_\_\_\_ FECHA: \_\_\_\_\_  
 EMPRESA: \_\_\_\_\_ TAREA: \_\_\_\_\_  
 UBICACIÓN: \_\_\_\_\_

**ACCIONES REQUERIDAS**

**A.- REGLAS GENERALES**

- Antes de comenzar cualquier trabajo en las proximidades de las paredes del rajo, revise el plano de peligro de caída de rocas, contáctese con el jefe de turno y comuníquese sus intenciones.
- Antes de llegar a la cercanía de un talud o berma en el cual requiere desarrollar una actividad, observe el área desde la distancia. Obtenga una apreciación global (banco superior - banco inferior), para identificar cualquier riesgo o condición de riesgo obvia.
- En el área en la cual se requiere desarrollar una actividad, revise las condiciones de la pared y NO OLVIDE revisar las condiciones del piso.
- Estacione el vehículo lejos de las paredes del rajo, o en una posición segura y que pueda ser visto por otros equipos en el área.
- Nunca se ubique bajo un equipo que se encuentre operando en línea vertical.
- Siempre informe por comunicación radial al ingreso a distintas áreas de trabajo.
- Para todos los accesos de la Mina, la condición de peligro de caída de roca debe ser verificada por todos aquellos que transiten por dichos accesos, y cualquier alerta detectada debe ser informada.

**B. INSPECCIÓN ÁREA DE TRABAJO**  
 Existe peligro de caída de roca por:

|   | Si                       | No                       |
|---|--------------------------|--------------------------|
| • Sobrecoigaduras.                            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Rocas inestables en cara/cresta.            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Grietas mayores abiertas.                   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Grietas en la berma o piso.                 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • La cara del talud esta húmeda.              | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Por lluvia fuerte o deshielos.              | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Agua fluyendo desde la cara.                | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Existe sobre-excavación en la pata.         | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Existe actividad minera en parte superior.  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • En el área, tiene factor climático adverso. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • En el área, existen labores subterráneas.   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

**D. NIVEL DE EXPOSICIÓN**

|  | Arriba                   | bajo                     |
|--|--------------------------|--------------------------|
| <b>Arriba:</b>   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Exposiciones directas de personal potencialmente prolongadas cerca de las caras del talud.                             | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Exposiciones de personal en sectores con labores subterráneas.   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <b>Bajo:</b>   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Personal expuesto en un equipo, que realicen actividades que someten el área inmediata a periodo de intensa vibración. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Personal en un equipo, que realicen actividades en un sector, durante un periodo prolongado.                           | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <b>bajo:</b>   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • La actividad puede desarrollarse cerca de la cara del talud.   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

**C. NIVEL DE EXPOSICIÓN**

|  | Si                       | No                       |
|--|--------------------------|--------------------------|
| • La pared requiere saneamiento.   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Requiere esperar mejores condiciones climáticas.                         | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • El peligro detectado, podría afectar accesos.                            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • La ejecución de su actividad requiere coordinaciones con otros procesos. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Requiere discutir detalles adicionales para entender mejor la tarea.     | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • La CECR está incompleta.   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

**ANTES DEL TRABAJO**


SI UNA O MÁS DE SUS RESPUESTAS ES "SI", O TIENE ALGUNA DUDA:

**NO PROCEDA Y CONTACTE A SU SUPERVISOR DIRECTO ANTES DE INICIAR LA TAREA.**

**E. CONSIDERACIONES GENERALES**

- Nunca se exponga, ni exponga a otras personas a riesgos.
- Si fuera necesario, el Supervisor directo puede solicitar la opinión adicional del Jefe de Operaciones del rajo, Superintendente de Operaciones o un miembro del Equipo Geotécnico.

Cartilla de Evaluación de Riesgos de Caída de Roca (CERC)



## 01 PSGCC Prevención de la Silicosis

### Operador/a PRACTICAS SEGURAS DE GESTIÓN DE CONTROLES

EVENTO TOP-EXPOSICIÓN DE TRABAJADOR A POLVO CON CONTENIDO DE SÍLICE SOBRE EL LPP Alcance Este estándar aplica a las instalaciones y actividades del Grupo Minero que involucren labores en ambientes con exposición a polvo con contenido de sílice sobre el LPP.

**\* Obligatorio**

Compañía

1

Selección de Compañía \*

Seleccione la compañía en donde se encuentra realizando esta actividad

Selecciona la respuesta ▼

Evaluación de Controles Críticos (ECC) – Prevención de Silicosis



## 10 PSGCC Interacción con energía hidráulica (Operador/a)

EVENTO NO DESEADO – PÉRDIDA DE CONTENCIÓN DE LÍQUIDO A ELEVADA PRESIÓN Y/O TEMPERATURA Alcance Este Estándar aplica a las instalaciones y actividades del Grupo Minero en las que puede haber exposición, contacto o liberación descontrolada de energía hidráulica desde equipos, maquinarias o instalaciones.

\* Obligatorio

Compañía

1

Selección de Compañía \*

*Seleccione la compañía en donde se encuentra realizando esta actividad*

Selecciona la respuesta



Evaluación de Controles Críticos (ECC) – Interacción con energía hidráulica



| EMTS  |          | MAPEO GSI - ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA DE MACIZO ROCOSO |    |              |     |              |         |                   |      |       |         |
|-------|----------|--|----|--------------|-----|--------------|---------|-------------------|------|-------|---------|
| Enaex |          | MAPEO GSI - ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA DE MACIZO ROCOSO |    |              |     |              |         |                   |      |       |         |
| MINA  | Poligono | Fase   |    | Banco        |     | Roca Intacta |         | Hoek&Marinos 2000 |      | Fotos |         |
|       |          | Pi   | Pf | Az Talud [°] | UGT | LITO         | UCS min | UCS max           | Agua |       | GSI min |
| 1     |          |  |    |              |     |              |         |                   |      |       |         |
| 2     |          |  |    |              |     |              |         |                   |      |       |         |
| 3     |          |  |    |              |     |              |         |                   |      |       |         |
| 4     |          |  |    |              |     |              |         |                   |      |       |         |
| 5     |          |  |    |              |     |              |         |                   |      |       |         |
| 6     |          |  |    |              |     |              |         |                   |      |       |         |
| 7     |          |  |    |              |     |              |         |                   |      |       |         |
| 8     |          |  |    |              |     |              |         |                   |      |       |         |
| 9     |          |  |    |              |     |              |         |                   |      |       |         |
| 10    |          |  |    |              |     |              |         |                   |      |       |         |
| 11    |          |  |    |              |     |              |         |                   |      |       |         |
| 12    |          |  |    |              |     |              |         |                   |      |       |         |
| 13    |          |  |    |              |     |              |         |                   |      |       |         |
| 14    |          |  |    |              |     |              |         |                   |      |       |         |
| 15    |          |  |    |              |     |              |         |                   |      |       |         |

| UGT | Valor   | Descripción                                     | Condición de Agua |                 | Código |
|-----|---------|---|-------------------|-----------------|--------|
|     |         |   | Tipo              | Sin información |        |
| R6  | UNV ARG | Sólo astillas con golpe de martillo             | Seco              |                 | S      |
| R5  | POP ARG | Fracturada con muchos golpes de martillo        | Húmedo            |                 | H      |
| R4  | POP ARG | Más de un golpe para ser fracturada             | Mojado            |                 | M      |
| R3  | UC      | Un golpe firme para ser fracturada              | Goteo             |                 | G      |
| R2  | SIL     | Hendiduras poco profundas con golpe de martillo | Flujo             |                 | F      |
| R1  | ESCA    | Desgranable con firme golpe de martillo         |                   |                 |        |
| R0  | ESCA    | Hendiduras con uña del pulgar                   |                   |                 | SI     |

OBSERVACIONES / IMÁGENES / ESQUEMAS

Cartilla de Mapeo GSI Enaex

**ANEXO 3**

| POLÍGONO             | ID MUESTRA     | UCS (MPa) | BRIGHT BLAST | POLÍGONO             | ID MUESTRA | UCS (MPa) | BRIGHT BLAST |
|----------------------|----------------|-----------|--------------|----------------------|------------|-----------|--------------|
| F9SE 2960-08-A       | M1             | 107,36    | MEDIO        | F9SE 2945-08-11-60-A | M1.1       | 33,00     | BLANDO       |
|                      | M2             | 84,55     | MEDIO        |                      | M1.2       | 56,23     | BLANDO       |
|                      | M3             | 87,39     | MEDIO        |                      | M1.3       | 50,16     | BLANDO       |
|                      | M4             | 89,16     | MEDIO        |                      | M1.4       | 47,26     | BLANDO       |
|                      | M5             | 86,83     | MEDIO        |                      | M2.1       | 111,97    | MEDIO        |
|                      | M8             | 77,11     | BLANDO       |                      | M2.2       | 58,08     | BLANDO       |
|                      | M9             | 80,43     | MEDIO        |                      | M2.3       | 87,34     | MEDIO        |
|                      | M11            | 75,84     | BLANDO       |                      | M2.4       | 89,56     | MEDIO        |
|                      | M12            | 63,84     | BLANDO       |                      | M3.1       | 84,02     | MEDIO        |
|                      | M13            | 74,38     | BLANDO       |                      | M3.2       | 59,98     | BLANDO       |
|                      | M14            | 72,81     | BLANDO       |                      | M3.3       | 77,76     | BLANDO       |
|                      | M16            | 65,29     | MEDIO        |                      | M4.1       | 71,42     | BLANDO       |
|                      | F9SE 2960-02-A | M1        | 203,71       |                      | MUY DURO   | M4.2      | 75,99        |
| M2                   |                | 102,60    | DURO         |                      | M4.3       | 66,72     | BLANDO       |
| M4                   |                | 103,28    | MEDIO        |                      | M4.4       | 64,75     | BLANDO       |
| M5                   |                | 140,99    | DURO         |                      | M5.1       | 87,98     | MEDIO        |
| M7                   |                | 116,72    | DURO         |                      | M5.2       | 71,71     | BLANDO       |
| M8                   |                | 125,77    | DURO         |                      | M5.3       | 85,15     | MEDIO        |
| M9                   |                | 136,76    | DURO         |                      | M6.1       | 99,59     | MEDIO        |
| M10                  |                | 164,62    | DURO         |                      | M6.2       | 97,66     | MEDIO        |
| M11                  |                | 89,59     | MEDIO        |                      | M6.3       | 90,07     | MEDIO        |
| M12                  |                | 147,47    | DURO         |                      | M6.4       | 96,27     | MEDIO        |
| M13                  |                | 168,07    | DURO         |                      | M7.1       | 54,27     | BLANDO       |
| M14                  |                | 183,20    | DURO         |                      | M7.2       | 51,33     | BLANDO       |
| M15                  |                | 165,04    | DURO         |                      | M7.3       | 56,41     | BLANDO       |
| F11W RAMPA 3290-3275 | M1             | 71,60     | BLANDO       |                      | M8.1       | 79,93     | MEDIO        |
|                      | M3             | 75,35     | BLANDO       |                      | M8.2       | 76,07     | BLANDO       |
|                      | M4             | 116,16    | MEDIO        |                      | M8.3       | 62,99     | BLANDO       |
|                      | M5             | 80,95     | MEDIO        |                      | M9.1       | 127,33    | MEDIO        |
|                      | M6             | 92,68     | MEDIO        |                      | M9.2       | 84,85     | MEDIO        |
|                      | M7             | 61,78     | BLANDO       |                      | M9.3       | 85,92     | MEDIO        |
|                      | M9             | 81,99     | BLANDO       |                      | M9.4       | 71,11     | BLANDO       |
|                      | M10            | 96,42     | MEDIO        |                      | M10.1      | 64,67     | BLANDO       |
| F11W 3245-09-61-A    | M1.1           | 91,23     | MEDIO        |                      | M10.2      | 57,28     | MUY BLANDO   |
|                      | M1.2           | 100,11    | MEDIO        |                      | M10.4      | 50,91     | MUY BLANDO   |
|                      | M1.3           | 116,75    | DURO         |                      | M11.1      | 72,29     | BLANDO       |
|                      | M1.4           | 88,39     | MEDIO        |                      | M11.2      | 119,66    | MEDIO        |
|                      | M1.5           | 102,22    | MEDIO        |                      | M11.3      | 97,27     | MEDIO        |
|                      | M2.1           | 150,70    | DURO         |                      | M12.1      | 40,17     | BLANDO       |
|                      | M2.2           | 128,52    | DURO         |                      | M12.2      | 51,34     | BLANDO       |
|                      | M2.3           | 117,03    | DURO         |                      | M12.3      | 72,92     | BLANDO       |
|                      | M2.4           | 131,62    | DURO         |                      | M13.1      | 37,14     | BLANDO       |
|                      | M3.1           | 62,45     | BLANDO       |                      | M13.2      | 43,17     | BLANDO       |
|                      | M3.3           | 54,61     | BLANDO       | M13.3                | 53,02      | BLANDO    |              |
|                      | M4.1           | 68,66     | BLANDO       | M14.1                | 100,56     | MEDIO     |              |
|                      | M4.2           | 55,05     | BLANDO       | M14.2                | 73,95      | BLANDO    |              |
|                      | M5.1           | 76,72     | MEDIO        | M14.3                | 53,88      | BLANDO    |              |
|                      | M5.2           | 68,87     | BLANDO       | M1                   | 56,11      | BLANDO    |              |
|                      | F11W 3245-02-A | M1.1      | 54,78        | MEDIO                | M2.1       | 76,57     | MEDIO        |
| M1.2                 |                | 71,03     | MEDIO        | M2.2                 | 83,63      | MEDIO     |              |
| F11W 3245-14-A       |                |           |              |                      |            |           |              |
|                      |                |           |              |                      |            |           |              |



|       |        |          |                |      |        |        |
|-------|--------|----------|----------------|------|--------|--------|
| M9.3  | 181,14 | MUY DURO | F11W 3260-07-A | M5.2 | 104,45 | MEDIO  |
| M9.4  | 121,03 | DURO     |                | M5.3 | 58,52  | BLANDO |
| M9.5  | 136,90 | DURO     |                | M5.4 | 74,14  | BLANDO |
| M9.6  | 203,97 | MUY DURO |                | M1   | 50,72  | MEDIO  |
| M9.7  | 156,78 | MUY DURO |                | M2   | 56,23  | MEDIO  |
| M10.1 | 168,96 | MUY DURO |                | M3   | 43,14  | MEDIO  |
| M10.2 | 134,29 | DURO     |                | M4   | 54,65  | BLANDO |
| M10.3 | 185,06 | MUY DURO |                | M5   | 71,47  | MEDIO  |
| M11.1 | 131,76 | DURO     |                | M6   | 52,38  | BLANDO |
| M11.2 | 141,21 | DURO     |                | M7   | 68,99  | BLANDO |
| M11.3 | 132,08 | DURO     |                | M8   | 92,94  | MEDIO  |
| M11.4 | 122,83 | DURO     |                | M9   | 74,00  | BLANDO |
| M12.1 | 134,91 | DURO     |                |      |        |        |
| M12.2 | 207,84 | MUY DURO |                |      |        |        |

Valores de UCS obtenidos y su nivel en Bright Blast (Elaboración propia).