

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**  
**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**T E S I S**

**Caracterización geomecánica para el diseño de sostenimiento de labores subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A.-2023**

**Para optar el título profesional de:**

**Ingeniero de Minas**

**Autor:**

**Bach. Fredy Luis PALMA FERNANDEZ**

**Asesor:**

**Mg. Raúl FERNANDEZ MALLQUI**

**Cerro de Pasco – Perú - 2026**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**  
**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**T E S I S**

**Caracterización geomecánica para el diseño de sostenimiento de labores subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A.-2023**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

---

**Mg. Teodoro Rodrigo SANTIAGO ALMERCÓ**  
**PRESIDENTE**

---

**Mg. Joel Enrique OSCUVILCA TAPIA**  
**MIEMBRO**

---

**Dr. Luis Alfonso UGARTE GUILLERMO**  
**MIEMBRO**



UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

Facultad de Ingeniería de Minas

Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas

"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"



## INFORME DE ORIGINALIDAD N° 015-2026

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión ha realizado el análisis con exclusiones en el Software Turnitin Originality, que a continuación se detalla:

Presentado por:

**Bach. PALMA FERNANDEZ, Fredy Luis**

Escuela de Formación Profesional

**Ingeniería de Minas**

Tipo de trabajo:

**Tesis**

Título del trabajo:

**"Caracterización Geomecánica para el Diseño de Sostenimiento de Labores Subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A.-2023"**

Asesor:

**Dr. Raúl FERNANDEZ MALLQUI**

Índice de Similitud: **18 %**

Calificativo

**APROBADO**

Se adjunta al presente el informe y el reporte de evaluación del software similitud.

Cerro de Pasco, 26 de mayo de 2026



Firmado digitalmente por  
FERNANDEZ MALLQUI Raul FAU  
20154605046 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 26.05.2026 15:34:42 -05:00

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo de investigación a mi familia, por ser fuente permanente de motivación, valores y fortaleza durante mi formación académica y personal. Su respaldo incondicional ha constituido el pilar fundamental para alcanzar este objetivo profesional.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Dios, por darme la fortaleza y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa.

A la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, por brindarme la oportunidad de formación académica y profesional.

A mis docentes y asesores de tesis, quienes con su orientación, paciencia y dedicación hicieron posible la culminación de este trabajo de investigación.

A mis compañeros y amigos, por su apoyo, colaboración y motivación constante.

Finalmente, a todas las personas que de manera directa o indirecta contribuyeron a la realización de esta tesis, mi más profundo reconocimiento y gratitud.

## RESUMEN

A través de la clasificación geomecánica de macizos rocosos en labores subterráneas, es posible establecer los lineamientos necesarios para garantizar una adecuada instalación del sostenimiento. El uso correcto de la geomecánica constituye una herramienta clave en la gestión estratégica minera, ya que su aplicación facilita la toma de decisiones orientadas a alcanzar operaciones estables, seguras y sostenibles.

En la Compañía Minera Raura S.A. se viene desarrollando un proceso de evaluación geomecánica enfocado en el diseño del sostenimiento de labores subterráneas, con el objetivo principal de prevenir accidentes que puedan afectar al personal, a los equipos o generar pérdidas materiales. El objetivo central de la presente investigación es evaluar el diseño del sostenimiento de labores subterráneas en función de las características geomecánicas de la roca en la Compañía Minera Raura S.A. durante el año 2023.

La investigación se basó en ensayos de laboratorio y estudios de gabinete realizados en diferentes niveles de la mina. Los resultados determinaron que la calidad del macizo rocoso predominante varía entre mala y regular. El análisis geomecánico se efectuó en 14 niveles (Nivel 100, Nivel 100 intermedio, Nivel 150 intermedio, Nivel 150 segundo intermedio, Nivel 200 primer intermedio, Nivel 200 segundo intermedio, Nivel 300 primer intermedio, Nivel 300 segundo intermedio, Nivel 300 tercer intermedio, Nivel 300 cuarto intermedio, Nivel 380 base y Nivel 380 intermedio), evaluando labores subterráneas ubicadas en la zona sur, correspondientes a las estructuras mineralizadas Farallón, Katy, Hadas, Santa Rosa, Karol, Margot y Vanessa. Se evidenció que las estructuras ubicadas en el sector sur (Sector 1), como Farallón, Santa Rosa, Karol y Katy, presentan valores de RMR entre 30 y 50, mientras que las estructuras del sector norte (Sector 2), como Hadas, Margot y Vanessa, muestran valores de RMR entre 50 y 60.

De acuerdo con las características geomecánicas determinadas, se establecieron los tipos de sostenimiento más adecuados. En rocas de calidad mala, las vetas Santa Rosa y Karol 01 requieren sostenimiento con shotcrete + malla + Split set, mientras que en Breka y parte de Margot se utiliza shotcrete + malla + hydrabolt. En rocas de calidad regular, las

vetas Santa Rosa aplican shotcrete + malla + Split set, y en vetas como Hadas, Santa Rosa Norte, Santa Rosa, Karol 0, Hades 01 y Margot se emplea malla + Split set. Por otro lado, en sectores de las vetas Karol 01, Santa Rosa, Ramal Santa Rosa, Breka, Hades 01 y Vanessa, se recomienda el sostenimiento con malla + pernos helicoidales.

**Palabras claves:** clasificación geomecánica de roca, Compañía Minera Raura, shotcrete, malla, Split set, pernos helicoidales, hydrabolt

## ABSTRACT

Through the geomechanical classification of rock masses in underground workings, it is possible to establish the necessary guidelines to ensure proper installation of ground support systems. The correct use of geomechanics is a key tool in strategic mining management, as its application facilitates decision-making aimed at achieving stable, safe, and sustainable operations.

At Compañía Minera Raura S.A., a geomechanical evaluation process has been carried out focused on the design of ground support in underground workings, with the main objective of preventing accidents that could affect personnel, equipment, or cause material losses. The primary aim of this research is to evaluate the design of ground support in underground workings based on the geomechanical characteristics of the rock mass at Compañía Minera Raura S.A. during 2023.

The research was based on laboratory tests and desk studies conducted at different mine levels. The results showed that the predominant rock mass quality ranges from poor to fair. Geomechanical analyses were carried out at 14 levels (Level 100, Level 100 intermediate, Level 150 intermediate, Level 150 second intermediate, Level 200 first intermediate, Level 200 second intermediate, Level 300 first intermediate, Level 300 second intermediate, Level 300 third intermediate, Level 300 fourth intermediate, Level 380 base, and Level 380 intermediate), evaluating underground workings located in the southern zone, corresponding to mineralized structures such as Farallón, Katy, Hadas, Santa Rosa, Karol, Margot, and Vanessa. It was found that structures located in the southern sector (Sector 1), such as Farallón, Santa Rosa, Karol, and Katy, present RMR values between 30 and 50, while structures in the northern sector (Sector 2), such as Hadas, Margot, and Vanessa, show RMR values between 50 and 60.

Based on the geomechanical characteristics, the most appropriate types of ground support were determined. In poor-quality rocks, the Santa Rosa and Karol 01 veins require shotcrete + mesh + Split set, while in Breka and part of Margot, shotcrete + mesh + hydrabolt is applied. In fair-quality rocks, the Santa Rosa vein uses shotcrete + mesh + Split

set, while veins such as Hadas, Santa Rosa Norte, Santa Rosa, Karol 0, Hades 01, and Margot employ mesh + Split set. Additionally, in parts of the Karol 01, Santa Rosa, Ramal Santa Rosa, Breka, Hades 01, and Vanessa veins, mesh + helical bolts are recommended as support.

**Keywords:** Rock mass classification, Compañía Minera Raura, shotcrete, mesh, Split set, helical bolts, hydrabolt.

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación geomecánica se justifica en la necesidad de prevenir riesgos que puedan derivar en accidentes a personas, daños a equipos o pérdidas materiales, así como en la importancia de analizar cómo la evaluación geomecánica influye en la selección del tipo de sostenimiento del macizo rocoso y en el dimensionamiento o diseño geomecánico de las excavaciones.

La ejecución de la investigación se desarrolló en la Compañía Minera Raura, situada en la cordillera Occidental, dentro del distrito de San Miguel de Cauri, provincia de Lauricocha, en el departamento de Huánuco, y también en el distrito y provincia de Oyón, pertenecientes al departamento de Lima, a una altitud comprendida entre los 4400 y 4800 metros sobre el nivel del mar.

La investigación se llevó a cabo mediante el mapeo geomecánico por celdas, el cual se ejecutó a través de la implementación de estaciones geomecánicas que cubren un área aproximada de 3 m x 3 m. Este método permitió identificar y cuantificar las propiedades del macizo rocoso, así como las características principales de las familias de discontinuidades presentes. Para cada familia se registraron aspectos como el tipo de discontinuidad, su orientación (buzamiento y dirección del buzamiento), resistencia de las paredes, espaciamiento, persistencia, apertura, tipo de relleno, rugosidad y el grado de alteración o meteorización.

**El autor.**

## ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPITULO I

#### PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1. Identificación y determinación del problema.....	1
1.2. Delimitación de la investigación .....	2
1.3. Formulación del problema.....	2
1.3.1. Problema general .....	2
1.3.2. Problemas específicos.....	3
1.4. Formulación de objetivos .....	3
1.4.1. Objetivo General.....	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5. Justificación de la investigación .....	3
1.6. Limitaciones de la investigación.....	4

### CAPITULO II

#### MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de estudio.....	5
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	5
2.1.2. Antecedente a nivel nacional.....	6
2.1.3. Antecedentes a nivel local .....	7
2.2. Bases teóricas - científicas .....	8

2.2.1. Características geomecánicas.....	8
2.2.2. Sistemas de clasificación.....	8
2.2.3. RQD (Rock Quality Designation) – Designación de la calidad de roca .....	8
2.2.4. RMR – (Rock Mass Rating) – Clasificación del macizo rocoso, Bieniawski (1973, 1989) y Q (Tunnel Quality Index) – Índice de la calidad del túnel .....	10
2.2.5. Fuerzas in situ de la roca masiva .....	11
2.2.6. El concepto del “arco natural”.....	14
2.2.7. Importancia de la Mecánica de Rocas en la Minería.....	15
2.2.8. Perfiles o secciones geomecánicas .....	16
2.2.9. Tipos de sostenimiento de mina subterránea .....	17
2.2.10. Compañía Minera Raura .....	18
2.3. Definición de términos básicos.....	18
2.3.1. Socavón: .....	18
2.3.2. Rampa:.....	18
2.3.3. Nivel: .....	19
2.3.4. Subnivel: .....	19
2.3.5. Entibación:.....	19
2.3.6. Buzamiento: .....	19
2.3.7. Geotecnia:.....	19
2.3.8. Fracturación: .....	19
2.3.9. Cuadros:.....	19
2.3.10. Proceso de Voladura .....	19
2.3.11. Roca:.....	20
2.3.12. Zona: .....	20
2.3.13. Astillamiento de la roca:.....	20
2.3.14. Banco: .....	20
2.3.15. Calcificación: .....	20
2.3.16. Cuña:.....	20

2.3.17. Roca Intacta: .....	20
2.4. Formulación de hipótesis .....	21
2.4.1. Hipótesis general.....	21
2.4.2. Hipótesis específicas.....	21
2.5. Identificación de las variables .....	21
2.5.1. Variable independiente.....	21
2.5.2. Variable dependiente.....	21
2.6. Definición operacional de variables e indicadores.....	22

### CAPITULO III

#### METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACION

3.1. Tipo de investigación .....	23
3.2. Nivel de la investigación.....	23
3.3. Métodos de investigación.....	23
3.4. Diseño de la investigación .....	24
3.5. Población y muestra .....	24
3.5.1. Población .....	24
3.5.2. Muestra .....	24
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	25
3.6.1. Técnicas.....	25
3.6.2. Instrumentos.....	25
3.7. Técnicas de procesamientos y análisis de datos .....	25
3.8. Tratamiento estadístico.....	25
3.9. Orientación ética filosófica y epistémica.....	26

### CAPITULO IV

#### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo .....	27
4.1.1. Ubicación de la zona a investigar .....	27
4.1.2. Accesibilidad .....	27

4.1.3. Trabajos Geomecánicas.....	29
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	29
4.2.1. Descripción cuantitativa del macizo rocoso .....	29
4.3. Prueba de hipótesis .....	74
4.4. Discusión de resultados.....	77

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Página</b>
Tabla 1 Definición operacional de variables e indicadores .....	22
Tabla 2: Criterio de diseño para investigaciones de campo y laboratorio .....	30
Tabla 3: Relación de ensayos de mecánica de rocas.....	30
Tabla 4: Resultados de los ensayos de determinación de las propiedades físicas.....	31
Tabla 5: Resultados de los ensayos de compresión triaxial .....	31
Tabla 6: Resultados de los ensayos de tracción indirecta .....	32
Tabla 7: Resultados de los ensayos de determinación de propiedades elásticas.....	33
Tabla 8: Resultados de los ensayos de corte directo .....	33
Tabla 9: Resultados de los ensayos de compresión uniaxial.....	34
Tabla 10: Cantidad de ensayos de carga puntual .....	35
Tabla 11: Parámetros utilizados por Bieniawski .....	36
Tabla 12: Tabla geomecánica RMR.....	37
Tabla 13: Sistema Q de Barton .....	38
Tabla 14: Características del macizo rocoso según GSI .....	43
Tabla 15: Incidencia de la calidad de roca en la zona sur (sector 1 y sector 2) de la unidad minera Raura a partir de las labores de avance .....	49
Tabla 16: Orientación de las familias de estructuras en la zona de Hadas 1, Vanessa y Margot .....	50
Tabla 17: Información estructural recolectada en los mapeos geomecánicos del sector sur	52
Tabla 18: Orientación de las familias de estructuras en la veta Breka.....	53
Tabla 19: Parámetros de dimensionamiento y resultados por Zona .....	58
Tabla 20: Parámetros de dimensionamiento y resultados por Zona .....	59
Tabla 21: Longitud de tajeos para diferentes ELOS para vetas angostas con ancho de minado > 3m, considerando un minado longitudinal y sin sostenimiento en la bóveda o en la caja techo.....	60

Tabla 22: Longitud de tajeos para diferentes ELOS para vetas con ancho de minado de 3 a 6 m, considerando un minado longitudinal y sin sostenimiento en la bóveda o en la caja techo .....	61
Tabla 23: Longitud de tajeos para diferentes ELOS para vetas con ancho de minado de 6 a 10 m, considerando un minado longitudinal y sin sostenimiento en la bóveda o en la caja techo .....	62
Tabla 24: Longitud de tajeos para diferentes ELOS para vetas con ancho de minado de 10 a 16 m, considerando un minado longitudinal y sin sostenimiento en la bóveda o en la caja techo .....	63
Tabla 25: Dimensiones de pilar costilla .....	64
Tabla 26: Parámetros de evaluación del pilar costilla.....	64
Tabla 27: Parámetros de evaluación del pilar costilla.....	64
Tabla 28: Propiedades por tipo de relleno.....	65
Tabla 29: Estimación de resistencia de relleno requerida .....	66
Tabla 30: Tipo de sostenimiento para las labores de Cía. Minera Raura.....	69
Tabla 31: Caracterización geomecánica de labores y tipo de sostenimiento.....	70
Tabla 32: Distribución de los sensores en la Mina .....	72
Tabla 33: Distribución de los sensores en la Mina. ....	72
Tabla 34: Prueba de normalidad .....	75
Tabla 35: Tabla cruzada de calidad de roca/tipo de sostenimiento .....	75
Tabla 36: Prueba chi cuadrada .....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 1: Procedimiento de medición y cálculo de RQD (Afler Decre. 1989).....	9
Figura 2: Clasificación geomecánica de roca y tipos de terrenos .....	10
Figura 3: Clasificaciones y tipos de sostenimiento .....	11
Figura 4: Fuerzas en situ de las rocas masivas.....	12
Figura 5: Fuerzas en situ de las rocas masivas.....	12
Figura 6: Fuerzas en situ de las rocas después de las excavaciones .....	13
Figura 7: La reorientación y la concentración de la presión in situ alrededor de las excavaciones .....	14
Figura 8: Tipos de zonas.....	14
Figura 9: Sección geomecánica típica.....	17
Figura 10: Parámetros utilizados por Bieniawski .....	36
Figura 11: Rumbo del esfuerzo principal mayor en la zona del estudio.....	45
Figura 12: Esfuerzo vertical, $v$ (izquierda y razón de esfuerzos in situ $K$ (derecha) obtenidos de los ensayos de esfuerzos in situ (overcoring) con mayor proximidad a la mina Raura.....	46
Figura 13: Carga litostática en el sector Sur de mina Raura. A la izquierda, profundidad de 600 metros hasta el nivel 4300. A la derecha, estimación de los esfuerzos verticales	47
Figura 14: Vista en planta. (Izquierda): Sección geológica en el NV 300, (Derecha): Zonificación geomecánica por niveles en la zona Sur realizada por unidad minera Raura.....	49
Figura 15: Información estructural registrada en mapeos de ventanas Mina Raura Sector Norte.....	50
Figura 16: Información estructural recolectada en los mapeos geomecánicos del sector sur. .....	51
Figura 17: Información estructural recolectada en los mapeos geomecánicos en la veta Breka .....	52

Figura 18: Longitud de tajeos para diferentes ELOS para vetas angostas con ancho de minado > 3m, considerando un minado longitudinal y sin sostenimiento en la bóveda o en la caja techo.....	54
Figura 19: Método de explotación Sub Level Stopping Transversal (SLST) .....	55
Figura 20: MGEM Sector Superior (Cota > 4100) .....	56
Figura 21: MGEM Sector Inferior (Cota < 4100).....	57
Figura 22: Formula empírica – Criterio de Mitchel.....	65
Figura 23: Modelo numérico 3D en las Etapas de minado. ....	66
Figura 24: Modelo numérico 3D y ubicación de las secciones de análisis.....	67
Figura 25: Estimación de soporte en frentes y tajeos .....	68
Figura 26: Estimación de soporte en intersecciones. ....	69
Figura 27: Distribución de los sensores en la Mina. ....	72
Figura 28: Detalle de eventos microsísmicos en general durante la operación. ....	73
Figura 29: Detalle de eventos microsísmicos de magnitud leve durante la operación. ....	74

## **CAPITULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACION**

#### **1.1. Identificación y determinación del problema**

Uno de los impactos más significativos que provoca la minería subterránea en la superficie terrestre es el fenómeno de los hundimientos. Este tipo de daño incluye manifestaciones como asentamientos, irregularidades en el nivel del terreno, curvaturas, deslizamientos, así como deformaciones por estiramiento y compresión del suelo. Tales efectos pueden materializarse con mayor facilidad debido a la escasa información geomecánica disponible, lo que dificulta una adecuada evaluación del comportamiento del macizo rocoso (Estrucplan, 2018).

A través de una clasificación geomecánica precisa de las formaciones rocosas en zonas subterráneas, es posible definir estrategias claras para asegurar la correcta implementación de sistemas de sostenimiento. Las rocas presentan una amplia variedad de características y propiedades físicas, por lo que requieren análisis individualizados. Asimismo, ciertas condiciones geotécnicas particulares demandan el empleo de fortificaciones adicionales con el fin de estabilizar los estratos, asegurar los bloques sueltos e impedir desprendimientos que puedan afectar la seguridad operativa (Seguridad Minera, 2013).

En términos generales, los macizos rocosos se presentan como estructuras compuestas por bloques irregulares unidos, que se hallan separados por diversas

discontinuidades geológicas tales como fracturas, diaclasas o fallas. Esta complejidad estructural convierte la evaluación geomecánica en un proceso exigente, ya que debe contemplar tanto las propiedades físicas de la roca matriz como las características mecánicas de sus discontinuidades. En este contexto, mitigar los riesgos de accidentes que puedan afectar al personal, equipos o materiales —provocados por inestabilidades en las labores durante su ejecución— representa una prioridad fundamental dentro de la planificación minera (Seguridad Minera, 2013).

La correcta aplicación de principios y técnicas geomecánicas se constituye como una herramienta estratégica de gestión en las operaciones mineras. Su valor radica en facilitar decisiones técnicas informadas, con el propósito de alcanzar labores subterráneas que sean no solo estables, sino también seguras para todos los procesos que allí se desarrollan (Tapia Aguirre, 2019).

Asimismo, en la Compañía Minera Raura se está llevando a cabo la evaluación geomecánica orientada al diseño del sostenimiento en labores subterráneas, con el propósito de asegurar que no se materialicen riesgos que puedan ocasionar accidentes al personal, daños a los equipos o pérdidas de materiales.

## **1.2. Delimitación de la investigación**

Es estudio planteado se realizará dentro de las labores subterráneas de la Compañía Minera Raura S.A.

## **1.3. Formulación del problema**

### **1.3.1. Problema general**

¿Cómo influye la caracterización geomecánica del macizo rocoso en el diseño adecuado del sostenimiento de las labores subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A. durante el año 2023?

### **1.3.2. Problemas específicos**

- a. ¿Cuál es la calidad geomecánica del macizo rocoso en las diferentes zonas de trabajo subterráneo de la Compañía Minera Raura S.A.?
- b. ¿Qué tipo de sostenimiento es el más apropiado según la caracterización geomecánica obtenida?
- c. ¿Cuáles son los parámetros geomecánicos para el diseño de sostenimiento de labores subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A.?

## **1.4. Formulación de objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Determinar la influencia de la caracterización geomecánica del macizo rocoso en el diseño adecuado del sostenimiento de las labores subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A. durante el año 2023.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a. Determinar la calidad geomecánica del macizo rocoso en las diferentes zonas de trabajo subterráneo de la Compañía Minera Raura S.A.
- b. Establecer el tipo de sostenimiento más apropiado según la caracterización geomecánica del macizo rocoso.
- c. Identificar los parámetros geomecánicos clave para el diseño del sostenimiento en labores subterráneas.

## **1.5. Justificación de la investigación**

La presente investigación geomecánica se justifica por los siguientes motivos:

- Prevenir la ocurrencia de accidentes que puedan afectar al personal, los equipos y provocar pérdidas materiales.
- Analizar cómo influye la evaluación geomecánica en la selección del tipo de sostenimiento del macizo rocoso, así como en el dimensionamiento o diseño geomecánico de las excavaciones.

## **1.6. Limitaciones de la investigación**

La principal limitación fue el acceso restringido a las labores de desarrollo de la Compañía Minera Raura S.A., lo cual dificultó la obtención de información.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEORICO**

#### **2.1. Antecedentes de estudio**

##### **2.1.1. Antecedentes Internacionales**

Lascano (2022) desarrolló una investigación enfocada en la caracterización geomecánica de un tramo específico del decline ubicado en el área minera Cascabel, entre las abscisas 0+2100 y 0+2400, con el objetivo de diseñar un sistema de sostenimiento adecuado. El trabajo se sustentó en información bibliográfica y datos técnicos de la empresa, complementado con el logueo geotécnico de más de 210 metros de testigos de perforación. La caracterización utilizó los sistemas RMR (Bieniawski, 1989) y Q de Barton (1974), además de ensayos de laboratorio para determinar propiedades físico-mecánicas. Los resultados se visualizaron mediante interpolación de isosuperficies en Leapfrog Geo 5.1, revelando que la calidad del macizo rocoso era media según el RMR y entre mala y media según el índice Q. Con base en esto, se propusieron dos soluciones de sostenimiento y se recomendaron medidas de auscultación geotécnica para monitorear el comportamiento del terreno antes, durante y después de su implementación.

Cisterna (2018) investigó la estabilidad del macizo rocoso en una faena subterránea de pequeña minería, específicamente en la Mina Los Pequeños, ubicada en la Región de Coquimbo, Chile. La autora destacó que, debido a las limitaciones técnicas del sector, es necesario contar con metodologías simples y efectivas para evaluar la estabilidad del terreno. Para ello, aplicó el método Q de Barton, utilizando parámetros como el RQD, el número y estado de las discontinuidades ( $J_n$ ,  $J_r$ ,  $J_a$ ), condiciones de humedad ( $J_w$ ), y el SRF. Además, consideró la orientación de las labores respecto a las discontinuidades estructurales para ajustar los valores. Para facilitar su uso en pequeñas minas, simplificó las categorías del sistema Q de seis a tres clases. El estudio identificó tres zonas con roca de mala calidad que requerían refuerzo estructural, recomendando el uso de marcos de madera con separaciones menores a 0,5 metros.

### **2.1.2. Antecedente a nivel nacional**

Alfaro (2021) desarrolló una investigación aplicada enfocada en evaluar geomecánicamente el macizo rocoso de un tramo del nivel 2 de la mina Nueva Esperanza, perteneciente al consorcio minero HNS–Algamarca, con el propósito de diseñar un sistema de sostenimiento eficiente para túneles. Para ello, se analizaron ocho estaciones geomecánicas distribuidas cada 20 metros a lo largo de 156.5 metros. Se emplearon métodos empíricos como RMR, Q de Barton y GSI, y se complementaron con herramientas numéricas y análisis estructural mediante software como RockData, Dips, Phase2 y Unwedge. Los resultados evidenciaron una calidad de roca regular, con valores de RMR entre 35 y 70, Q entre 1 y 10, y GSI de 40 a 70. En base a ello, se propuso un sistema de sostenimiento que incluyó pernos sistemáticos de 2 a 4.5 metros de longitud, malla metálica, y ocasionalmente shotcrete de 150 a 200 mm. La implementación del sistema proyectado representó un costo total de S/. 473,566.62.

Cotrado (2022) llevó a cabo un estudio explicativo con enfoque cuantitativo en la mina Chaparra, ubicada en Caravelí, Arequipa, con el fin de definir el diseño de sostenimiento más adecuado usando el método Q de Barton. Se trabajó con once tramos de excavación a partir de afloramientos rocosos. El estudio aplicó técnicas como observación directa y análisis geomecánico mediante el uso de picota. Los resultados revelaron que el 50 % del macizo rocoso presentaba calidad buena, 20 % muy buena, otro 20 % muy baja y 10 % calidad regular, con un valor promedio de Q igual a 29. Además, se evaluaron riesgos geomecánicos que impactaban la seguridad del personal, identificando que el 29 % de los tramos presentaba riesgo muy alto. En función de los dominios geomecánicos, se plantearon diferentes tipos de sostenimiento, que incluyeron empernado puntual o sistemático, uso de shotcrete con fibras, y distancias variables entre pernos, de acuerdo a la calidad de la roca. Finalmente, se propuso un sostenimiento activo con pernos helicoidales adheridos, con un costo de S/. 3,125.97 por metro lineal.

### **2.1.3. Antecedentes a nivel local**

Lucas (2019) realizó un estudio en la mina Huantajalla, ubicada en la unidad de producción Uchucchacua de la Compañía Minera Buenaventura S.A.A., con el propósito de evaluar el sostenimiento subterráneo a partir de una caracterización geomecánica detallada. El trabajo comprendió la recolección de datos en campo, toma de muestras y realización de ensayos tanto en laboratorios internos de la unidad minera como en laboratorios universitarios externos. A partir de esta información, se llevó a cabo un análisis geotécnico para obtener parámetros relevantes en todas las fases del proceso minero: exploración, desarrollo, preparación y explotación. La caracterización incluyó la agrupación y clasificación de datos litológicos, con la finalidad de obtener valores representativos por tipo de roca. Para la evaluación de la calidad del macizo rocoso se utilizó el sistema de

clasificación RMR propuesto por Bieniawski, lo cual permitió establecer una base técnica para definir las condiciones de sostenimiento en las labores subterráneas.

## **2.2. Bases teóricas - científicas**

### **2.2.1. Características geomecánicas**

La caracterización geomecánica de un macizo rocoso constituye una herramienta fundamental para prever su comportamiento frente a los esfuerzos generados por una variedad de obras de ingeniería, tales como presas, excavaciones tanto superficiales como subterráneas, y otras estructuras que requieren un análisis detallado de la estabilidad del terreno. Este proceso es crucial para evaluar cómo reaccionará el macizo bajo las cargas y condiciones impuestas por las actividades de ingeniería, permitiendo tomar decisiones más informadas y eficientes (Celli, A. E., & Falcioni, F. E., 2022).

### **2.2.2. Sistemas de clasificación**

Los tres sistemas más conocidos para La Clasificación Geomecánica de la Roca son los siguientes (Seguridad minera, 2013):

- RQD (Rock Quality Designation) Designación de la calidad de roca, Deere et al, 1967).
- RMR (Rock Mass Rating) Clasificación de la masa rocosa, Bieniawski (1973, 1989).
- Q (Tunnel Quality Index) Índice de la calidad del túnel, Barton et al (1974). (De la Cruz. A., Rodríguez V., Huamaní, Lidia , 2012).

### **2.2.3. RQD (Rock Quality Designation) – Designación de la calidad de roca**

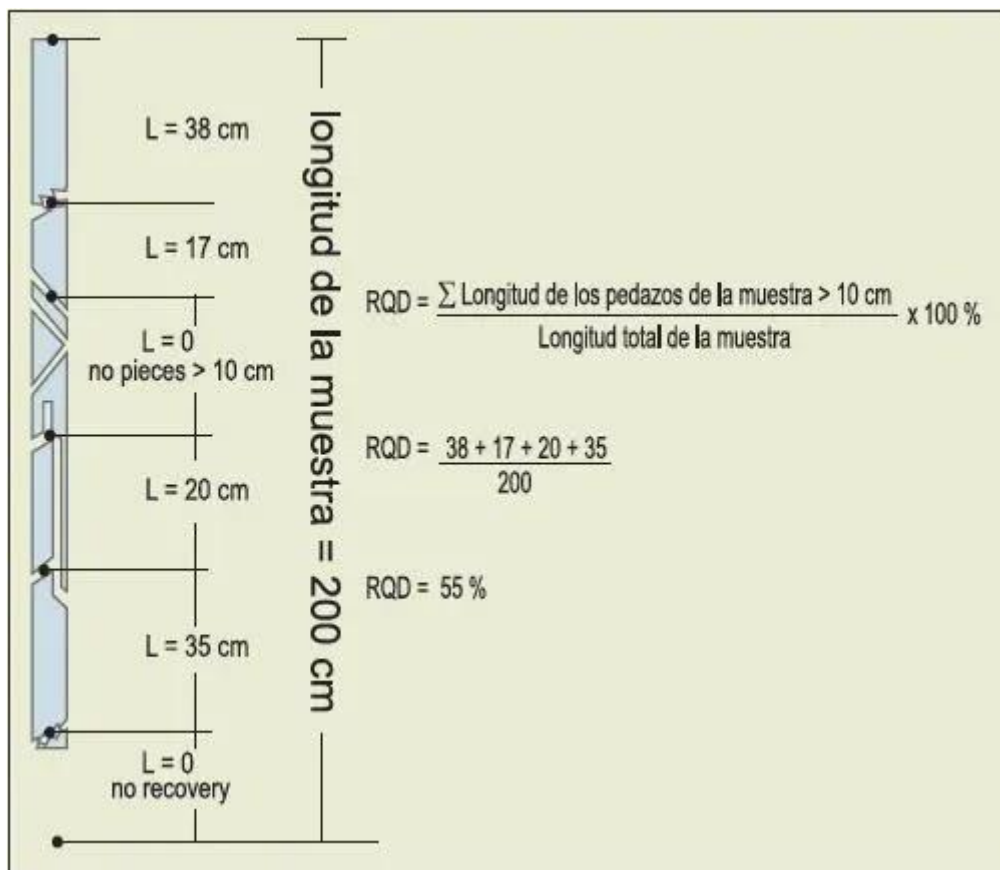
El proceso que emplea la calidad de las muestras de perforación, específicamente las obtenidas mediante sondajes diamantina (Deere et al., 1967), permite determinar la calidad del macizo rocoso in situ. Generalmente, las muestras son de dimensiones estándar de 54,7 mm de diámetro y 1,5 m de longitud

(Seguridad minera, 2013), lo que da lugar a un porcentaje representativo que refleja la heterogeneidad y características del material rocoso en el lugar de estudio.

- 0 – 25 % Muy Malo
- 25 – 50 % Malo
- 50 – 75 % Regular
- 75 – 90 % Bueno
- 90 – 100 % Muy Bueno

El valor de 10 cm = diámetro de la muestra x 2

**Figura 1:** Procedimiento de medición y cálculo de RQD (Afler Decre. 1989)



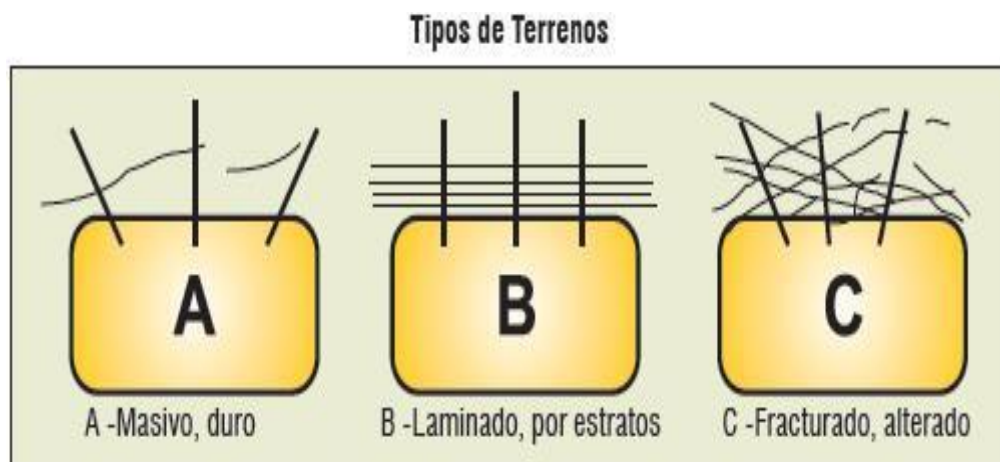
El sistema RQD (Rock Quality Designation) proporciona una indicación detallada sobre la calidad de la roca en la zona de la muestra, permitiendo identificar la presencia de fallas, fracturas y otras discontinuidades, así como las fuerzas que afectan al macizo rocoso en ese sector específico. Este indicador es fundamental

para evaluar la integridad estructural del material rocoso y prever su comportamiento ante las condiciones de esfuerzo (Seguridad minera, 2013).

#### Clasificación geomecánica de roca y tipos de terrenos

1. Masivo, duro
2. Laminado, por estratos
3. Fracturado, alterado

**Figura 2:** Clasificación geomecánica de roca y tipos de terrenos



#### 2.2.4. RMR – (Rock Mass Rating) – Clasificación del macizo rocoso, Bieniawski (1973, 1989) y Q (Tunnel Quality Index) – Índice de la calidad del túnel

##### Parámetros Utilizados Para RMR y Q

Dureza del macizo rocoso; RQD (Designación de la Calidad de la Roca); frecuencia y grado de alteración de las fracturas; esfuerzos presentes en la masa rocosa in situ; y presencia de filtraciones de agua (Seguridad minera, 2013).

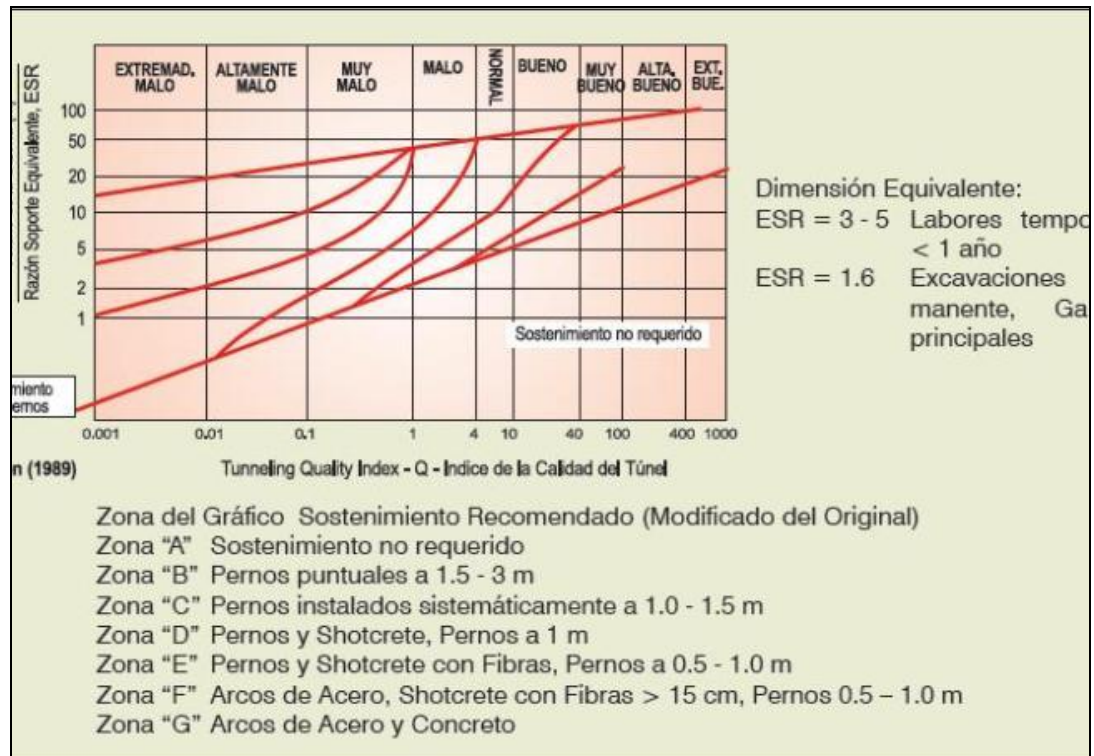
##### RMR – Clasificaciones y tipos de sostenimiento

##### Descripción RMR

1. Muy buena 81-100. Sin sostenimiento, Pernos puntuales  $L = 1.4 + (0.18 \times W)$
2. Buena 61-80. Pernos puntuales  $L = 1.4 + (0.18 \times W)$
3. Normal 41-60. Pernos – Esp. 1.5,  $L = 1.8 + (0.18 \times W)$ , Shotcrete 50mm

4. Malo 21-40. Shotcrete 100mm, Pernos – Esp. 1m,  $L = 2 + (0.18 \times W)$
5. Muy malo < 20 Arcos. Shotcrete 150mm, Pernos– Esp. 1m,  $L = 3 + (0.18 \times W)$

**Figura 3: Clasificaciones y tipos de sostenimiento**



### Índice de la Calidad del Túnel – Q Index

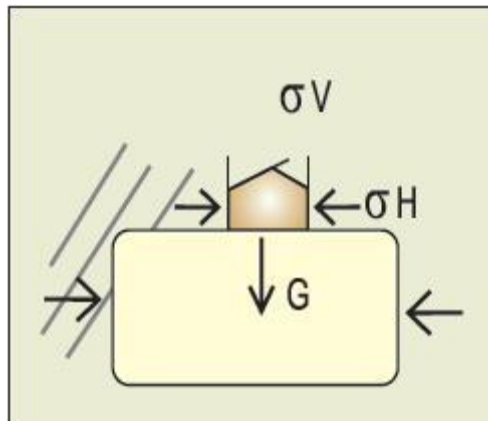
Para calcular el Índice Q, se consideran diversos factores clave, como la dureza de la roca, el RQD, la frecuencia y el grado de alteración de las fracturas, la presencia de agua y las fuerzas que actúan sobre el macizo rocoso in situ. Además, el valor del ESR, o "Excavation Support Ratio" (Razón de Soporte de la Excavación), está vinculado de manera directa con el uso previsto de la excavación y su vida útil estimada, lo que facilita el ajuste del diseño del sostenimiento en función de las condiciones geomecánicas del terreno (Seguridad minera, 2013).

#### 2.2.5. Fuerzas in situ de la roca masiva

Las fuerzas principales que influyen en el comportamiento del macizo rocoso son: (sV), que representa la fuerza vertical ejercida por la masa rocosa sobrepuesta; (sH), la fuerza horizontal, que también está vinculada a la masa de roca superior; y

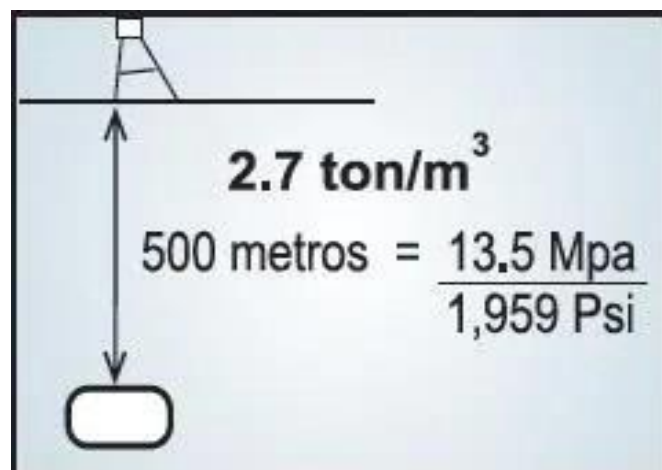
(G), que corresponde a la fuerza de la gravedad que actúa sobre las estructuras o bloques rocosos, C Cuando la magnitud de la fuerza vertical, horizontal o gravitacional supera la resistencia de la fuerza horizontal, existe la posibilidad de que se produzca una falla en el techo de la excavación, lo que pone en riesgo la estabilidad del terreno (Seguridad minera, 2013).

**Figura 4:** Fuerzas en situ de las rocas masivas



La presión vertical  $sV$  puede ser calculado tomando el volumen de la roca encima (en MPa o Psi) para llegar a un factor de  $+ - 20\%$  de la fuerza in situ, en el caso de  $sH$  en roca dura, masiva se puede utilizar un factor de  $1,5 - 2,0 \times sV$ , y con una profundidad de  $+ 1,000$  m, un factor de 1 (Seguridad minera, 2013).

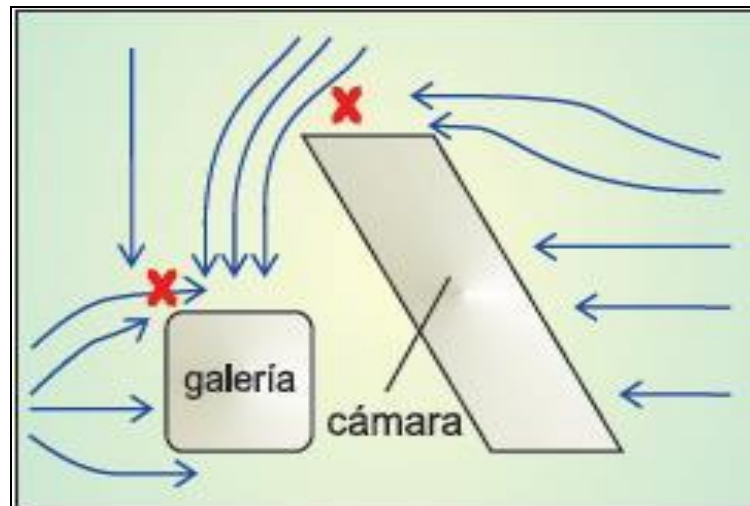
**Figura 5:** Fuerzas en situ de las rocas masivas



Antes de iniciar la explotación, el terreno se encuentra en un estado de estabilidad y equilibrio. Sin embargo, con la excavación de las aberturas

subterráneas y durante las actividades de explotación, las presiones in situ que actúan sobre la masa rocosa experimentan una reorientación y concentración, el impacto de estas presiones varía dependiendo de factores como el tipo de roca, la proximidad a fallas geológicas, las dimensiones y geometría de la excavación, así como la cercanía de otras aperturas en la misma área (Seguridad minera, 2013).

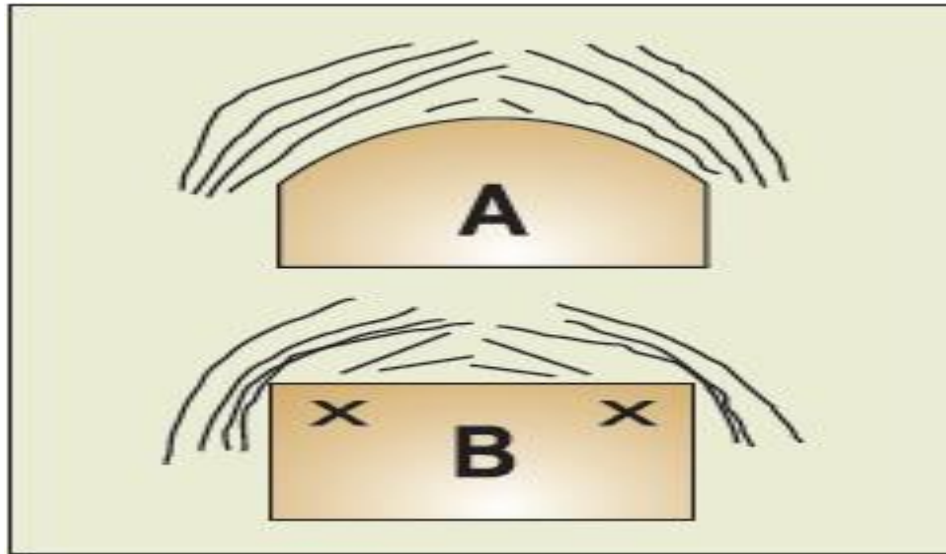
**Figura 6:** *Fuerzas in situ de las rocas después de las excavaciones*



La reorientación y concentración de las presiones in situ alrededor de las excavaciones son consecuencia directa de la geometría de las aberturas, en estos casos, las fuerzas tienden a concentrarse en las esquinas de la cámara y la galería, señaladas como "X", donde su impacto es más significativo, lo que aumenta la vulnerabilidad de estas áreas a posibles fallas o deformaciones (Seguridad minera, 2013).

El impacto de la geometría y la distribución de las fuerzas de compresión es crucial en la estabilidad de la excavación, en el caso del ejemplo (A), donde la abertura tiene una forma de arco, se observa una mayor resistencia frente a la concentración de las fuerzas verticales, lo que contribuye a una distribución más equilibrada de las tensiones, en contraste, en el ejemplo (B), las esquinas (X) favorecen una mayor concentración de estas fuerzas, lo que incrementa el riesgo de inestabilidad en esas zonas específicas (Seguridad minera, 2013).

**Figura 7:** La reorientación y la concentración de la presión in situ alrededor de las excavaciones

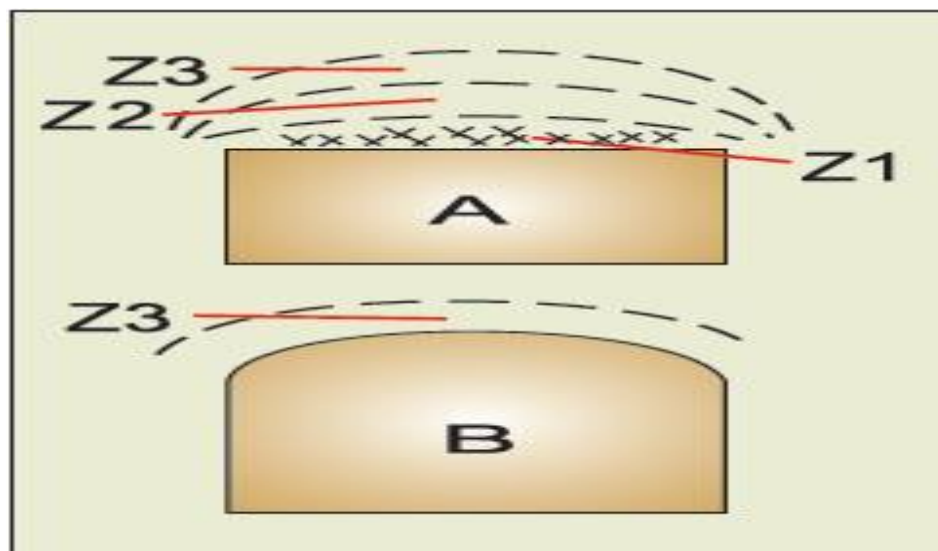


#### 2.2.6. El concepto del “arco natural”

- Z1: zona de material suelto anticipado
- Z2: zona del arco natural
- Z3: límite de relajación del terreno

La zona (Z1) de material suelto en su ancho natural debe ser reforzada.

**Figura 8:** Tipos de zonas



### **2.2.7. Importancia de la Mecánica de Rocas en la Minería**

La Mecánica de Rocas se puede definir como la disciplina científica que estudia la respuesta de los materiales rocosos frente a los campos de fuerza que actúan en su entorno físico natural. Esta área, al igual que muchas otras que conforman las denominadas Ciencias de la Tierra, surge tanto del interés por comprender y explicar de manera cualitativa y cuantitativa los fenómenos naturales, como de la necesidad práctica de los ingenieros por desarrollar soluciones técnicas eficientes para controlar el comportamiento del terreno en proyectos de minería, así como en construcciones civiles y militares (Herrera & Gómez, 2007).

La estabilidad de las excavaciones ha sido, desde tiempos antiguos, una preocupación constante para los mineros, quienes de manera permanente han buscado formular teorías racionales y fundamentadas que les permitan optimizar su diseño y garantizar condiciones seguras durante la ejecución de las labores subterráneas.

La presencia de discontinuidades representa el factor determinante en el comportamiento mecánico de un medio rocoso, independientemente de la escala de análisis que se utilice. La fractura de una probeta sometida a carga entre las placas de una prensa es, en realidad, el resultado de la propagación de fisuras ya existentes en su estructura. De manera similar, la rotura de macizos rocosos ocurre, en la mayoría de los casos, a lo largo de superficies de discontinuidad previamente presentes. Asimismo, el flujo de agua tiende a concentrarse y desplazarse principalmente a través de estas discontinuidades, y las fuerzas hidrodinámicas que se generan en consecuencia se orientan predominantemente según la dirección de dichas fracturas (Herrera & Gómez, 2007).

La existencia de discontinuidades constituye un elemento clave en el comportamiento mecánico del macizo rocoso, sin importar la escala de análisis que se adopte. Por ejemplo, la fractura de una probeta comprimida entre las placas de

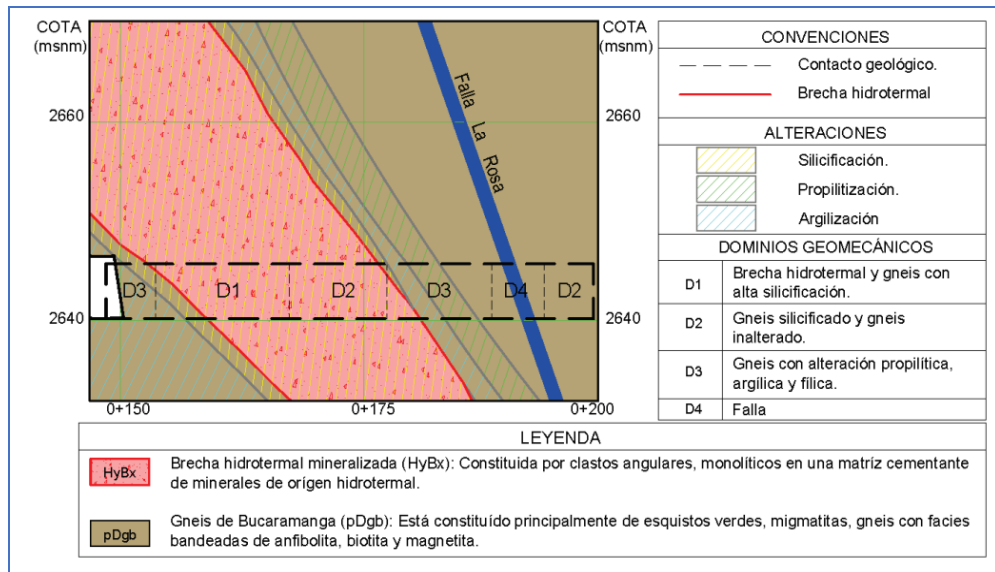
una prensa suele obedecer a la propagación de fisuras internas ya presentes en el material. Del mismo modo, la falla de macizos rocosos ocurre con mayor frecuencia a lo largo de superficies de discontinuidad previamente formadas. Además, el agua subterránea tiende a circular principalmente por estas zonas de debilidad, y las fuerzas hidrodinámicas generadas siguen en gran medida la orientación de dichas discontinuidades (Herrera & Gómez, 2007).

#### **2.2.8. Perfiles o secciones geomecánicas**

Los perfiles geomecánicos se elaboran a partir de cortes o secciones realizados sobre una zona específica, en los cuales se representa de forma detallada la información geológica relevante, como la litología, los contactos entre unidades, y las estructuras geológicas tanto mayores como menores. Asimismo, se incluye la evaluación de la calidad del macizo rocoso utilizando una clasificación geomecánica previamente definida. Estas secciones tienen como finalidad presentar, de manera clara, simplificada y esquemática, las variaciones en el comportamiento del macizo rocoso dentro del área analizada. Además, constituyen una herramienta útil en el proceso de zonificación geomecánica, mediante el cual se delimitan áreas con propiedades geomecánicas relativamente homogéneas (Osinerming, 2017).

Asimismo, las secciones geomecánicas suelen emplearse como datos de entrada o "input" en simulaciones computacionales realizadas mediante programas especializados, como Phase2, los cuales permiten evaluar la estabilidad de las excavaciones y los efectos generados por las actividades de minado. Para la elaboración adecuada de estas secciones, se recomienda contar con el respaldo del área de geología, ya que esta unidad generalmente tiene a su cargo la elaboración de cortes y representaciones esquemáticas de las distintas zonas de la mina (Osinerming, 2017).

**Figura 9: Sección geomecánica típica**



### 2.2.9. Tipos de sostenimiento de mina subterránea

Existen diversos tipos de sostenimiento para excavaciones, que pueden utilizarse individualmente o en combinación con otros para estabilizar las excavaciones mineras (Osinerming, 2017). Estos son:

- Pernos de anclaje.
- Cables de acero.
- Revestimiento de concreto.
- Concreto lanzado (simple o reforzado con fibra).
- Puntales de madera.
- Paquetes de madera (Wood pack).
- Cuadros de madera con encribado de madera.
- Cimbras metálicas.
- Cimbras cedentes.
- Gatas hidráulicas.
- Malla metálica eslabonada y electrosoldada.
- Relleno (simple o cementado).
- Pernos autoperforantes con relleno cementado (para rocas blandas)

- Elementos de pre soporte (micropilotes y spilling bars)

#### **2.2.10. Compañía Minera Raura**

En la actualidad, la Compañía Minera Raura posee más de 23 millones de toneladas en recursos minerales, lo que le otorga una vida operativa estimada superior a los 20 años. Esta empresa peruana, perteneciente al Grupo Brecia, se ubica entre los distritos de San Miguel de Cauri, en la región Huánuco, y Oyón, en la región Lima, desarrollando actividades de mediana minería polimetálica. Su labor principal se centra en la extracción y procesamiento de concentrados de cobre, plata, plomo y zinc. En el año 2012, la compañía inició un proceso de transformación profunda con la meta de evolucionar hacia una operación minera de clase mundial. Este cambio se sustentó en pilares estratégicos como la innovación tecnológica, la consolidación de sus recursos minerales, la mejora de la eficiencia en todos sus procesos operativos y la adopción de un enfoque integral de sostenibilidad (IIMP, 2018).

El método de minado seleccionado, junto con su implementación actual, consiste en la habilitación de accesos hacia el cuerpo mineralizado, la construcción de subniveles dispuestos en paralelo a dichos cuerpos, así como la apertura de ventanas transversales, chimeneas de extracción y bolsillos de acumulación. La secuencia de estas actividades responde directamente al plan de trabajo previamente diseñado, el cual guía de manera estructurada cada etapa del proceso minero (De la Cruz, A., Rodríguez, V., & Huamaní, L., 2012).

### **2.3. Definición de términos básicos**

#### **2.3.1. Socavón:**

Galería de acceso desde el exterior horizontal con pendiente de drenaje (Herrera & Gómez , 2007 ).

#### **2.3.2. Rampa:**

Acceso inclinado (Herrera & Gómez , 2007 ).

### **2.3.3. Nivel:**

Galería o grupo de galerías con acceso directo desde el pozo ó rampa de entrada a mina (Herrera & Gómez , 2007 ).

### **2.3.4. Subnivel:**

Galería desde la que se ejecutan labores de arranque y / o carga a una cota determinada (Herrera & Gómez , 2007 ).

### **2.3.5. Entibación:**

Sistema o técnica de sostenimiento de huecos mineros (Herrera & Gómez , 2007 ).

### **2.3.6. Buzamiento:**

Angulo que el depósito forma con la horizontal (Herrera & Gómez , 2007).

### **2.3.7. Geotecnia:**

Estado de la geometría de las discontinuidades y / o capacidad que los huecos tienen para autosoportarse (Herrera & Gómez , 2007).

### **2.3.8. Fracturación:**

Intensidad, frecuencia y forma de presentarse las separaciones entre planos de mineral (Herrera & Gómez , 2007 ).

### **2.3.9. Cuadros:**

Estructuras metálicas realizadas a base de patucos, trabancas y tresillones que sostienen las galerías de servicio y las generales (Herrera & Gómez , 2007 ).

### **2.3.10. Proceso de Voladura**

Es un conjunto de actividades que incluye: el transporte del explosivo y sus accesorios desde los polvorines hasta el lugar de disparo, las medidas preventivas previas al carguío, el carguío de los explosivos, la conexión de los taladros cargados, la comprobación de las medidas de seguridad, la autorización y el encendido del disparo (Reglamento de Seguridad e Higiene Minera - Decreto Supremo N° 024-2016-EM, 2016).

#### **2.3.11. Roca:**

Cualquier combinación natural de minerales, las rocas forman parte de la corteza terrestre (Estudios Mineros del Perú S.A.C., 2016).

#### **2.3.12. Zona:**

Área de una mineralización bien definida (Estudios Mineros del Perú S.A.C., 2016).

#### **2.3.13. Astillamiento de la roca:**

Es una forma de fractura frágil de la roca debido a la acción de esfuerzos elevados. Los fragmentos resultantes de esta fractura presentan formas puntiagudas (Gonzales de Vallejo ,2006).

#### **2.3.14. Banco:**

Unidad básica de explotación en forma de gran escalón constituido por un plano vertical, o frente, y un plano horizontal, o plataforma de trabajo. (Gonzales de Vallejo, 2006).

#### **2.3.15. Calcificación:**

Unidad fundamental de explotación que tiene la forma de un gran escalón, compuesto por un plano vertical o frente y un plano horizontal o plataforma de trabajo (Gonzales de Vallejo, 2006).

#### **2.3.16. Cuña:**

Queso, cecinas o carne que se coloca sobre el pan del manche, o trozo de metal utilizado para partir los palos cuando eran muy duros (Gonzales de Vallejo, 2006).

#### **2.3.17. Roca Intacta:**

La roca intacta es el bloque situado entre las discontinuidades, y puede ser representada por una muestra a mano o un trozo de testigo utilizado para realizar ensayos de laboratorio (Jiménez, 2014, citado por Conde, 2019)

## **2.4. Formulación de hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis general**

La caracterización geomecánica del macizo rocoso influye significativamente en el diseño adecuado del sostenimiento de las labores subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A., permitiendo una selección más precisa y eficiente de los sistemas de soporte.

### **2.4.2. Hipótesis específicas**

- a. La calidad geomecánica del macizo rocoso varía en función de la zona de trabajo subterráneo, lo que incide en la necesidad de diferentes tipos de sostenimiento.
- b. Un sostenimiento diseñado a partir de una caracterización geomecánica detallada mejora la estabilidad de las labores subterráneas y reduce los riesgos operativos.
- c. Los parámetros geomecánicos como el RMR, Q de Barton y GSI son determinantes en el diseño del sistema de sostenimiento adecuado para cada tipo de macizo rocoso.

## **2.5. Identificación de las variables**

### **2.5.1. Variable independiente**

Caracterización geomecánica del macizo rocoso.

### **2.5.2. Variable dependiente**

Diseño adecuado del sostenimiento de las labores subterráneas.

## 2.6. Definición operacional de variables e indicadores

**Tabla 1** Definición operacional de variables e indicadores

VARIABLE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES E INDICADORES	INDICADORES
Variable Dependiente  <b>Diseño adecuado del sostenimiento de las labores subterráneas.</b>	Es la selección y aplicación de sistemas de soporte y refuerzo (como pernos, mallas, concreto lanzado, arcos metálicos, etc.) en las labores subterráneas, basada en la caracterización geomecánica del macizo rocoso, con el fin de garantizar la estabilidad y seguridad estructural de las excavaciones.	<b>Dimensiones Independiente:</b>  ▪ Se evaluará los diseños de labores que ayudaran a reducir los riesgos de caída de rocas.	▪ Tipo de soporte seleccionado
Variable Independiente  <b>Caracterización geomecánica del macizo rocoso</b>	Es el proceso mediante el cual se evalúan las propiedades físicas, mecánicas y estructurales del macizo rocoso en las labores subterráneas, utilizando sistemas de clasificación como RMR, Q de Barton o GSI, con el fin de determinar su calidad, comportamiento y condiciones para el diseño de sostenimiento.	<b>Dimensiones Dependiente:</b>  ▪ Se evaluará el comportamiento de los esfuerzos a fin de determinar de que tipo de roca estamos teniendo.	▪ Clasificación RMR, Índice GSI

**Fuente:** Elaboración propia

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACION**

#### **3.1. Tipo de investigación**

Según Sampieri (2011), la investigación descriptiva tiene como objetivo detallar las propiedades, características y perfiles de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno objeto de estudio. En este caso, nuestra investigación será de tipo aplicada, ya que se enfoca en los resultados obtenidos de la Caracterización Geomecánica para el Diseño de Sostenimiento de Labores Subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A.

#### **3.2. Nivel de la investigación**

El nivel de investigación es descriptivo analítico, ya que describió y analizó las características geomecánica para el Diseño de Sostenimiento de Labores Subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A

#### **3.3. Métodos de investigación**

Para el desarrollo de esta investigación, se consideraron los siguientes métodos de investigación:

- Método de Observación
- Método Inductivo
- Método Deductivo

- Método de Análisis
- Método de Síntesis

Estos métodos facilitarán la obtención de información más detallada y la resolución de problemas a través de su aplicación.

Por lo tanto, el tipo de investigación de este trabajo es también descriptivo, ya que permite analizar, registrar y describir las actividades realizadas durante este proceso de:

- **Evaluación en campo**
  - a. Evaluación de las características geomecánicas.
  - b. Conocer los tipos de perforación y voladura.
- **Trabajo de gabinete**
  - a. Evaluar el tipo de sostenimiento

### **3.4. Diseño de la investigación**

El diseño de investigación es no experimental - transversal ya que se recolectará y analizará información de las Caracterización Geomecánica para el Diseño de Sostenimiento de Labores Subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A.

### **3.5. Población y muestra**

#### **3.5.1. Población**

La población está conformada por la totalidad del macizo rocoso presente en las labores subterráneas de la Compañía Minera Raura S.A., en sus distintos frentes de trabajo durante el año 2023, que constituye el objeto de estudio para la caracterización geomecánica.

#### **3.5.2. Muestra**

La muestra está constituida por los sectores seleccionados de las labores subterráneas (galerías y rampas o niveles) donde se realizaron estudios geomecánicos, como puntos de muestreo o estaciones geomecánicas, elegidas de

manera no probabilística e intencionada, según accesibilidad, representatividad litológica y condiciones geotécnicas observadas.

### **3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

#### **3.6.1. Técnicas**

##### **Recopilación de información**

- La recolección estará basada en copilar información utilizando fichas de recolección de datos
- Recopilación de información mediante mapeo geomecanico.
- Análisis documental
- Observación del campo

#### **3.6.2. Instrumentos**

- Fichas de caracterización geomecanica
- Tabla de parámetros de método Q de Barton
- Ficha matricial de evaluación del riesgo geomecanico
- Aparato Fotográfico

### **3.7. Técnicas de procesamientos y análisis de datos**

- Clasificación de información
- Tabulación.
- Análisis e interpretación.
- Tablas y matrices de evaluación del método Q de Barton.
- Correlaciones con el RMR y Q de Barton.
- Cuadro comparativo generados a partir del software Excel.

### **3.8. Tratamiento estadístico**

El procesamiento de los datos en el presente proyecto de investigación se llevará a cabo mediante el uso de los siguientes programas informáticos, los cuales permitirán organizar, analizar y presentar la información de manera eficiente, asegurando la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos.

- software SPSS.

- software Excel.

### **3.9. Orientación ética filosófica y epistémica**

La investigación se llevará a cabo conforme a los siguientes lineamientos y normativas:

- Reglamento de Grados y Títulos de la UNDAC y normas APA.
- Reglamento de Publicación (UNDAC, 2019).
- Reglamento General de Investigación (UNDAC, 2019).
- Líneas de Investigación (UNDAC, 2019).
- Código de Ética para la Investigación (UNDAC, 2019).
- Reglamento de Propiedad Intelectual (UNDAC, 2019).
- Reglamento de Grados Académicos y Títulos Profesionales (UNDAC, 2022).
- Reglamento de Verificación de Similitud y Contenido Académico y Científico (UNDAC, 2022).
- Resolución de Consejo Universitario (UNDAC, 2022).

Esta estructura asegura el cumplimiento de los procedimientos y estándares establecidos por la universidad para la investigación y publicación académica.

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. Descripción del trabajo de campo**

##### **4.1.1. Ubicación de la zona a investigar**

Se encuentra ubicada en la cordillera Occidental, distrito de San Miguel de Cauri, provincia de Lauricocha, departamento de Huánuco, y el distrito y provincia de Oyón, departamento de Lima, a una altitud que varía entre los 4400 a 4800 msnm.

##### **4.1.2. Accesibilidad**

El acceso principal por vía terrestre desde Lima se realiza a través de la carretera Panamericana Norte hasta el desvío de Sayán en Río Seco (102 km). Luego, se toma una carretera asfaltada que pasa por Sayán (49 km) y continúa en dirección este, siguiendo el curso del río Huaura hasta llegar a Churín (59 km). Desde allí, se gira hacia el norte, pasando por Oyón (29 km) hasta alcanzar la unidad minera Raura (34 km). En total, la distancia desde Lima es de aproximadamente 273 km.

**Mapa 1 Ubicación - Compañía Minera Raura S.A.**



### **4.1.3. Trabajos Geomecánicas**

#### ***Recolección de Datos:***

Durante la etapa de operación, se llevó a cabo la recolección sistemática de datos con el apoyo del departamento correspondiente, utilizando como técnica habitual el mapeo geomecánico por celdas.

#### ***Mapeo Geomecánico Subterráneo por Celdas***

El mapeo geomecánica por celdas se desarrolló a través de la ejecución de estaciones geomecánicas, las cuales deben abarcar un área aproximada de 3m x 3m.

A través del mapeo geomecánico por celdas, se identificaron y cuantificaron las propiedades del macizo rocoso, así como las características de las principales familias de discontinuidades. Para cada una de estas familias, se determinó el tipo de discontinuidad, su orientación (buzamiento y dirección del buzamiento), la resistencia de las paredes de la discontinuidad, el espaciamiento, la persistencia, la apertura, el relleno, la rugosidad presente y el grado de alteración o meteorización.

Todo esto tiene como objetivo establecer los parámetros necesarios para clasificar el macizo rocoso utilizando el sistema RMR (Rock Mass Rating) y el GSI (Índice de Resistencia Geológica). Además, facilitará la clasificación del macizo rocoso en el sistema Q, mediante la determinación de parámetros como RQD, Jn, Jr, Ja, Jw y SRF.

## **4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados**

### **4.2.1. Descripción cuantitativa del macizo rocoso**

#### ***Ensayos de laboratorio de mecánica de rocas***

La distribución de los ensayos y las litologías se muestra en la Tabla 2, los ensayos de mecánica de rocas fueron realizados en el Laboratorio de mecánica de rocas de Golder Associates Perú, en el de la Pontificia Universidad Católica del Perú y en el Laboratorio de mecánica de rocas de SRK. Allí se ejecutaron los siguientes ensayos:

- Propiedades físicas: gravedad específica, porosidad y absorción.
- Propiedades de resistencia mecánica: carga puntual, corte directo, tracción indirecta, compresión uniaxial y triaxial.
- Propiedades elásticas: módulo de Young, relación de Poisson.

**Tabla 2:** *Criterio de diseño para investigaciones de campo y laboratorio*

Descripción	Valor	Autor o fuente
Geotechnical Data Management System (GTDMS) - Logging Manual	Consideraciones para el logueo geotécnico de taladros diamantinos	SRK Consulting (UK), 2016
Clasificación geomecánica del macizo rocoso	RMR <sub>76</sub> , RMR <sub>89</sub> , Q	Bieniawski, 1976, 1989 Barton, 1974
Metodología para la caracterización del macizo rocoso y ensayos de laboratorio	Metodología sugerida para la descripción cuantitativa de las discontinuidades en macizos rocosos. Determinación de la resistencia de carga puntual. Determinación del contenido de agua, porosidad, densidad y propiedades relacionadas. Determinación de la resistencia de carga puntual.	ISRM, 2007
Normas para el ensayo de mecánica de rocas	C97 – Propiedades físicas. D2664 – Ensayo de compresión triaxial. D3967 – Ensayo de tracción indirecta. D5607 – Ensayo de corte directo D5731 – Ensayo de carga puntual. D7012 – Módulos elásticos.	ASTM (American Society for Testing and Materials)

**Fuente:** Compañía Minera Raura

**Tabla 3:** *Relación de ensayos de mecánica de rocas*

Descripción	Valor	Autor o fuente
Geotechnical Data Management System (GTDMS) - Logging Manual	Consideraciones para el logueo geotécnico de taladros diamantinos	SRK Consulting (UK), 2016
Clasificación geomecánica del macizo rocoso	RMR <sub>76</sub> , RMR <sub>89</sub> , Q	Bieniawski, 1976, 1989 Barton, 1974
Metodología para la caracterización del macizo rocoso y ensayos de laboratorio	Metodología sugerida para la descripción cuantitativa de las discontinuidades en macizos rocosos. Determinación de la resistencia de carga puntual. Determinación del contenido de agua, porosidad, densidad y propiedades relacionadas. Determinación de la resistencia de carga puntual.	ISRM, 2007
Normas para el ensayo de mecánica de rocas	C97 – Propiedades físicas. D2664 – Ensayo de compresión triaxial. D3967 – Ensayo de tracción indirecta. D5607 – Ensayo de corte directo D5731 – Ensayo de carga puntual. D7012 – Módulos elásticos.	ASTM (American Society for Testing and Materials)

**Fuente:** Compañía Minera Raura

### ***Propiedades físicas***

A partir de las muestras de roca intacta, se determinaron las siguientes propiedades físicas: porosidad ( $\eta$ ), densidad seca ( $\rho_d$ ) y absorción. Los ensayos

siguieron los métodos sugeridos por el ISRM (1979) y la norma ASTM C97. Los resultados promedio se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4:** Resultados de los ensayos de determinación de las propiedades físicas

Litología	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad (%)	Absorción (%)
Endoskarn	3.20	1.81	0.65
Exoskarn	3.01	1.43	0.46
Intrusivo	2.73	1.13	0.41
Mármol	2.82	0.59	0.19
Subvolcánico	2.79	2.40	0.90
Volcánico	2.71	1.70	0.60
Mineral	3.09	1.40	0.40

Fuente: Compañía Minera Raura

#### **Resistencia a la compresión triaxial**

Este ensayo permitió determinar la resistencia a la compresión de un testigo de roca intacta al someterlo a presión de confinamiento y carga axial. A partir del ensayo de compresión triaxial, se obtiene el ángulo de fricción interna y la cohesión de la roca intacta, según el criterio de falla de Mohr-Coulomb, así como los parámetros “mi” y la resistencia a la compresión simple de la roca intacta, utilizados en el criterio de falla de Hoek-Brown. Además, para ajustar la envolvente de esfuerzos, se consideran los resultados de compresión y tracción de cada tipo de litología. Los resultados obtenidos para las diferentes litologías ensayadas se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5:** Resultados de los ensayos de compresión triaxial

Litología	Cohesión (MPa)	Angulo de fricción interna (°)	mi
Endoskarn	15.82	49.65	9
Exoskarn	12.9	49.74	7
Intrusivo	28*	38.7*	10*
Mármol	13.45	52.52	11
Subvolcánico	12.61	56.78	27
Volcánico	12.61*	56.78*	27*
Mineral	18.41	56.16	12

\*Valor estimado, Fuente: Golder y PUCP, 2018

Fuente: Compañía Minera Raura

### **Resistencia a la tracción indirecta**

La resistencia a la tracción de la roca fue determinada a través del método de tracción indirecta, el cual consiste en la aplicación de una carga lineal de compresión en el eje del diámetro de un disco de roca. El valor de la resistencia a la tracción se utiliza como parámetro de entrada en la gráfica de la envolvente de esfuerzos. Los ensayos de tracción indirecta fueron realizados siguiendo la norma ASTM 3967 y los resultados de muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6:** Resultados de los ensayos de tracción indirecta

<b>Litología</b>	<b>Resistencia a la tracción indirecta (MPa)</b>
Endoskarn	8.53
Exoskarn	9.84
Intrusivo	7.00*
Mármol	8.40
Subvolcánico	8.33
Volcánico	11.83
Mineral	11.57

\*Valor estimado, Fuente: Golder y PUCP, 2018

**Fuente:** Compañía Minera Raura

### **Propiedades Elásticas**

Este tipo de ensayos permite determinar la resistencia a la compresión simple de la muestra y, en paralelo, calcular los módulos elásticos y Poisson (E y  $\nu$ ) de la misma. Los valores registrados como  $\sigma_1$  se consideran en el cálculo de resistencia a la compresión simple promedio. Los resultados obtenidos en el laboratorio se resumen en la Tabla 7.

**Tabla 7:** Resultados de los ensayos de determinación de propiedades elásticas

Litología	Módulo de Young E (GPa)	Relación de Poisson (n)
Endoskarn	16.5	0.29
Exoskarn	18.4	0.25
Intrusivo	11.2	0.25
Mármol	14.3	0.27
Subvolcánico	11.7	0.24
Volcánico	35.35	0.29*
Mineral	23.33	0.29*

\*Valor estimado, Fuente: UNI, Golder, 2018

**Fuente:** Compañía Minera Raura

### **Ensayo de corte directo**

El ensayo de corte directo permite calcular la resistencia de los materiales al corte tanto en discontinuidades naturales como en superficies inducidas. De este modo se puede estimar la resistencia que tendría un sistema de discontinuidades en caso se produjese un movimiento a lo largo de las mismas.

Los ensayos son realizados siguiendo la norma ASTM D5607 y sus resultados se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8:** Resultados de los ensayos de corte directo

Muestra /Sondaje	Litología	Tipo de discontinuidad	Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción residual (°)
Bloque M4	Endoskarn	Inducida	0	29
Bloque M3	Exoskarn	Inducida	0	27.4
Bloque M5	Subvolcánico	Inducida	0	35.1

**Fuente:** Compañía Minera Raura

### ***Ensayo de compresión uniaxial***

Se recolectaron muestras representativas, tanto de los mapeos como de los testigos de perforación, para evaluar la resistencia a la compresión simple de la roca intacta ( $\sigma_{ci}$ ). Las muestras estaban en condiciones óptimas, sin discontinuidades. La preparación de las muestras para el ensayo se realizó conforme a las pautas establecidas en la norma ASTM D4543, y los ensayos de compresión simple se llevaron a cabo según los procedimientos descritos en la norma ASTM D2938. Los valores obtenidos para la resistencia a la compresión simple se resumen en la Tabla 9.

**Tabla 9:** Resultados de los ensayos de compresión uniaxial

<b>Litología</b>	<b>Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)</b>
Endoskarn	112
Exoskarn	77
Intrusivo	85*
Mármol	77
Subvolcánico	88
Volcánico	90
Mineral	131

\*Valor estimado, Fuente: Golder y PUCP, 2018

**Fuente:** Compañía Minera Raura

### ***Ensayo de carga puntual***

El ensayo de carga puntual determina el índice  $I_s$  (50) en testigos de roca que requieren poca preparación y que pueden presentar formas regulares o irregulares. Este índice facilita la estimación de la resistencia a la compresión simple de la roca intacta. Los ensayos se realizaron de acuerdo con los procedimientos establecidos por las normas ISRM (1985) y ASTM D5731-02.

Se realizaron ensayos de carga puntual durante la campaña de logueo geomecánica, además se realizaron ensayos de carga en el Laboratorio de mecánica de rocas de Golder Associates Perú, en el de la Pontificia Universidad

Católica del Perú y en el Laboratorio de mecánica de rocas de SRK, totalizando 391 ensayos de carga puntual.

Los índices  $I_s$  (50) promedios de los resultados de los ensayos se muestran en la Tabla 10.

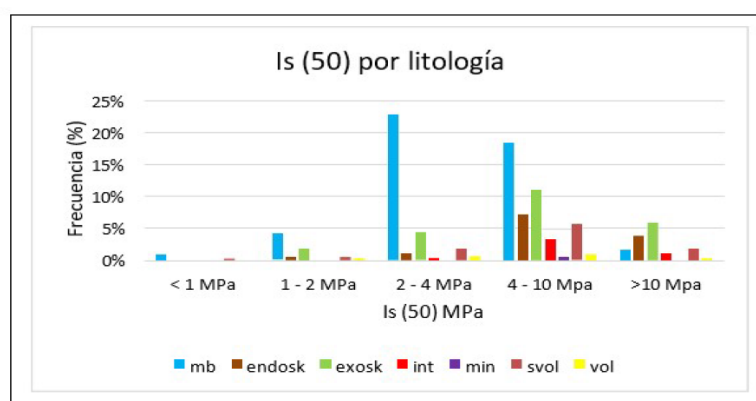
**Tabla 10:** Cantidad de ensayos de carga puntual

Litología	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)
Endoskarn	112
Exoskarn	77
Intrusivo	85*
Mármol	77
Subvolcánico	88
Volcánico	90
Mineral	131

\*Valor estimado, Fuente: Golder y PUCP, 2018

**Fuente:** Compañía Minera Raura

**Gráfico 1:** Histograma de ensayos de carga puntual  $I_s$  (50)



**Fuente:** Compañía Minera Raura

### **Clasificación geomecánica del macizo rocoso**

En primer lugar, se presentan tres de los sistemas de clasificación geomecánica de la masa rocosa más utilizados en la ingeniería de rocas: el Sistema RMR (Valoración de la Masa Rocosa) de Bieniawski (1989), el Sistema Q de Barton (1974) y el Índice Geológico de Resistencia GSI. A continuación, se aplican estos sistemas para diversas tareas, tales como: la estimación de los desplazamientos máximos de las excavaciones, la estimación de los tiempos de auto-sostenimiento y

la estimación del sostenimiento tanto permanente como temporal. Además, se incluye una guía para la selección y dimensionamiento del sistema de pernos.

**a. Sistema RMR de Bieniawski (1989)**

En esencia consiste en asignar a cada tipo de macizo rocoso un índice de calidad denominado RMR, que depende de:

- Resistencia a compresión simple de la roca matriz
- Condiciones de diaclasamiento
- Efecto del agua
- Posición relativa de la excavación con respecto a las diaclasas

El sistema Bieniawski RMR es representado por las siguientes tablas:

**Figura 10: Parámetros utilizados por Bieniawski**



**Tabla 11: Parámetros utilizados por Bieniawski**

Parámetros		Escala de valores						
Resistencia de la roca intacta	Bajo carga puntual	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Para estos valores es preferible la resistencia a		
	A compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Valor	15	12	7	4	2	1	0
R.Q.D.		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	25%		
Valor		20	17	13	8	3		
Espaciado de las juntas		> 2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
Valor		20	15	10	8	5		
Condición de las juntas		Muy rugosas, sin continuidad, cerradas, roca labios sana	Ligeramente rugosa separación < 1 mm, roca labios ligeramente meteorizada	Ligeramente rugosa separación < 1 mm, roca labios muy meteorizada	Espejo o falla o relleno de espesor < 5 mm, o juntas abiertas 1 - 5 mm, juntas continuas	Relleno blando de espesor > 5 mm, o juntas abiertas > 5 mm, juntas continuas		
Valor		30	25	20	10	0		
Agua	Flujo en cada 10 m de túnel, o bien:	Ninguno	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min		
	Relación presión del agua en la junta / tensión principal máxima	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
	Condiciones generales	Completamente seco	Manchas de humedad	Muy húmedo	Goteo	Flujo de agua		
	Valor	15	10	7	4	0		

Orientación del rumbo y buzamiento de las discontinuidades		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable
VALORES	Túneles y minas	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Rumbo perpendicular al eje del túnel				Rumbo paralelo al eje del túnel		Buzamiento 0° - 20° (Independiente del rumbo)
DIRECCION SEGUN BUZAMIENTO		DIRECCION CONTRA BUZAMIENTO		Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°	
Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°	Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°			
Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable	Regular	Desfavorable

En base a dicha clasificación se obtiene el siguiente resultado RMR:

**Tabla 12: Tabla geomecánica RMR**

RAURA		TABLA GEOMECANICA RMR						CIA. MINERA RAURA S.A. DEPARTAMENTO DE GEOMECANICA	
RMR: ROCK MASS RATING (VALUACION DE LA MASA ROCOSA), BIENIAWSKY (1989)									
CLASIFICACION GEOMECANICA Y TIPOS DE SOSTENIMIENTO									
TIPO	CALIDAD	TIPOS DE SOSTENIMIENTO	ALGUNAS CARACTERISTICAS Y SOSTENIMIENTO ASOCIADO	TIPOS GSI	GSI		RMR		Tiempo de Auto soporte
I	MUY BUENA		Macizo rocoso con alta resistencia, con muy pocas fracturas, sana o ligeramente alterada, seca o con poca humedad en algunos casos. SIN SOPORTE o PERNOS PUNTUALES	LF/B	75	85	80	90	10 AÑOS
II	BUENA		Macizo rocoso con pocas fracturas, ligera alteración y en algunos caso humeda, se rompe con varios golpes de picota PERNOS SISTEMATICOS	LF/R, F/B	65	75	70	80	5 AÑOS
				LF/P, F/R, MF/B	55	65	60	70	1 AÑO
III A	REGULAR		Macizo rocoso con regular cantidad de fracturas, presencia de algunas fallas menores de moderada o fuerte alteración, con goteo de agua permanente por fracturas, se rompe con uno o dos golpes de picota PERNO SISTEMATICOS Y PERNOS + MALLA	LF/MP, F/P, MF/R, IF/B	45	55	50	60	1 MES
III B				F/MP, MF/P, IF/R	35	45	40	50	4 DIAS
IV A	MALA		Macizo rocoso muy fracturado con algunas fallas panizadas, fuertemente alterado con mucho goteo continuo y flujo de agua, se indenta superficialmente con la picota SHOT CRETE MAS PERNOS Y SHOT. MAS PERNOS CON MALLA	MF/MP, IF/P	25	35	30	40	5 HORAS
IV B				IF/MP	15	25	20	30	INMEDIATO
V	MUY MALA		Macizo rocoso totalmente triturado o brechado, con muchas fallas panizadas, altamente alterado con flujo constante de agua, se indenta con la picota mas de 5.0mm. CIMBRAS METALICAS O SHOT. MAS MALLA CON PERNOS	T/MP	5	15	10	20	INMEDIATO

Fuente: Compañía Minera Raura

#### b. Sistema q de Barton (1974)

Sistema Q está basado en una evaluación numérica de la calidad del macizo rocoso utilizando 6 parámetros distintos los cuales son:

1. RQD
2. Número de familias de fracturas.
3. Rugosidad de la fractura o discontinuidad más desfavorable.

4. Grado de alteración o relleno a lo largo de las fracturas más débiles
5. Flujo de agua
6. Condición de esfuerzos

Estos 6 parámetros son agrupados en 3 cocientes para dar la calidad global de la masa rocosa Q como sigue:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$$

**Donde:**

RQD = Designación de la calidad de la roca

J<sub>n</sub> = Número de familias de fracturas

J<sub>r</sub> = Número de rugosidad de las fracturas

J<sub>a</sub> = Número de alteración de las fracturas

J<sub>w</sub> = Numero de reducción por agua en las fracturas.

SRF = Factor de reducción de esfuerzos

La calidad de la roca puede variar de Q = 0.001 a Q = 1000 sobre una escala logarítmica de calidad del macizo rocoso.

El sistema Q de Barton es representado por las siguientes Tablas:

**Tabla 13: Sistema Q de Barton**

Descripción	J <sub>n</sub>
Roca masiva	0,5 - 1
Una familia de diaclasas	2
Una familia y algunas juntas ocasionales	3
Dos familias	4
Dos familias y algunas juntas	6
Tres familias	9
Tres familias y algunas juntas	12
Cuatro o más familias, roca muy fracturada, "terrones de azucar", etc	15
Roca triturada terrosa	20
En boquillas, se utiliza 2J <sub>n</sub> y en intersecciones de túneles 3J <sub>n</sub>	

<b>Contacto entre las dos caras de la junta mediante un desplazamiento cortante de menos de 10 cm</b>	<b>Jr</b>
Juntas discontinuas	4
Junta rugosa o irregular ondulada	3
Suave ondulada	2
Espejo de falla, ondulada	1,5
Rugosa o irregular, plana	1,5
Suave, plana	1
Espejo de falla, plana	0,5
<b>No existe contacto entre las dos caras de la junta cuando ambas se desplazan lateralmente</b>	
Zona conteniendo minerales arcillosos, suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las dos caras de la junta	1
Arenas, gravas o zona fallada suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las dos caras de la junta	1
<p>Nota: Si el espaciado de la familia de juntas es mayor de 3 m hay que aumentar el Jr en una unidad</p> <p>Para juntas planas con espejo de falla provisto de lineaciones, si éstas están orientadas en la dirección de mínima resistencia se puede usar Jr = 0,5</p>	

DESCRIPCION		
<b>Contacto entre las dos caras de la junta</b>	<b>Ja</b>	<b>Ø° r</b>
Junta sellada dura, sin reblandecimiento, impermeable. P. e. cuarzo, paredes sanas	0,75	
Caras de la junta únicamente manchadas	1	25 - 30
Las caras de la junta están alteradas ligeramente y contienen minerales no reblandecibles, partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla, etc	2	25 - 30
Recubrimiento de limo o arena arcillosa, pequeña fracción arcillosa no reblandecible	3	20 - 25
Recubrimiento de minerales arcillosos blandos o de baja fricción, p. e. caolinita, mica, clorita, talco, yeso, grafito, etc. y pequeñas cantidades de arcillas expansivas. Los recubrimientos son discontinuos con espesores máximos de 1 ó 2 mm	4	8 - 16
<b>Contacto entre las dos caras de la junta con menos de 10 cm de desplazamiento</b>	<b>Ja</b>	<b>Ø° r</b>
Partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla	4	25 - 30
Rellenos de minerales arcillosos no reblandecidos, fuertemente sobreconsolidados. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor	6	16 - 24
Sobreconsolidación media o baja, reblandecimiento; rellenos de minerales arcillosos. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor	8	12 - 16
Rellenos de arcillas expansivas, p. e. montmorillonita, de espesor continuo de 5 mm. El valor Ja depende del porcentaje de partículas del tamaño de la arcilla expansiva	8 - 12	6 - 12
<b>No existe contacto entre las dos caras de la junta cuando ésta ha sufrido un desplazamiento cortante</b>	<b>Ja</b>	<b>Ø° r</b>
Zonas o bandas de roca desintegrada o roca machacada y arcilla	6 - 12	6 - 24
Zonas blandas de arcilla limosa o arenosa con pequeña fracción de arcilla, sin reblandecimiento	5	6 - 24
Milonitos arcillosos gruesos	10 - 20	6 - 24

Descripción	Jw	Presión agua kg/cm <sup>2</sup>
Excavaciones secas o de fluencia poco importante, p.e. menos de 5 l/min localmente	1	< 1
Fluencia o presión medias, ocasional lavado de los rellenos de las juntas	0,66	1 - 2,5
Fluencia grande o presión alta; considerable lavado de los rellenos de las juntas	0,33*	2,5 - 10
Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas al dar las pegas, decayendo con el tiempo	0,1 - 0,2*	> 10
Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas y continuas, sin disminución	0,05 - 0,1*	> 10
Los valores presentados con el signo * son sólo valores estimativos. Si se instalan elementos de drenaje, hay que aumentar Jw		
Los problemas causados por la formación de hielo no se consideran		

DESCRIPCION				
Zonas débiles que intersectan la excavación y pueden causar caídas de bloques, según avanza la misma			SRF	
A	Varias zonas débiles conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca muy suelta alrededor. Cualquier profundidad		10	
B	Sólo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente. Profundidad de excavación menor de 50 m		5	
C	Sólo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente. Profundidad de excavación mayor de 50 m		2,5	
D	Varias zonas de fractura en roca competente (libre de arcilla), roca suelta alrededor. Cualquier profundidad		7,5	
E	Sólo una zona fracturada en roca competente (libre de arcilla). Profundidad de excavación menor de 50 m		5	
F	Sólo una zona fracturada en roca competente (libre de arcilla). Profundidad de excavación mayor de 50 m		2,5	
G	Juntas abiertas sueltas, muy fracturadas. Cualquier profundidad		5	
<b>Rocas competentes, problemas de tensiones en las rocas</b>				
H	Tensiones pequeñas cerca de la superficie	$\sigma_c / \sigma_1 > 200$	$\sigma_t / \sigma_1 > 13$	2,5
J	Tensiones medias	200 - 10	13 - 0,66	1,0
K	Tensiones altas, estructura muy compacta (normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales)	10 - 5	0,66 - 0,33	0,5 - 2,0
L	Explosión de roca suave (roca masiva)	5 - 2,5	0,33 - 0,16	5 - 10
M	Explosión de roca fuerte (roca masiva)	< 2,5	< 0,16	10 - 20
$\sigma_c$ y $\sigma_t$ son las resistencias a compresión y tracción, respectivamente, de la roca; $\sigma_1$ es la tensión principal máxima que actúa sobre la roca				

DESCRIPCION		
Roca fluyente, flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de altas presiones litostáticas	SRF	
N	Presión de flujo suave	5 - 10
O	Presión de flujo intensa	10 - 20
Rocas expansivas, actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua	SRF	
P	Presión de expansión suave	5 - 10
R	Presión de expansión intensa	10 - 20
<b>Observaciones al S.R.F.</b>		
- Reducir los valores del SRF en un 25 - 50% si las zonas de rotura sólo influyen pero no intersectan a la excavación		
- En los casos en que la profundidad de la clave del túnel sea inferior a la anchura del mismo, se sugiere aumentar el SRF de 2,5 a 5 (ver H)		
- Para campos de tensiones muy anisotropos (si se miden) cuando $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$ reducir $\sigma_c$ y $\sigma_t$ a $0,8\sigma_c$ y $0,8\sigma_t$ . Cuando $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$ reducir $\sigma_c$ y $\sigma_t$ a $0,2\sigma_c$ y $0,6\sigma_t$		
$\sigma_1$ y $\sigma_3$ son las tensiones principales máxima y mínima		
$\sigma_c$ y $\sigma_t$ son las resistencias a compresión y tracción de la roca		

### c. Índice geológico de resistencia – GSI

El Índice Geológico de Resistencia (G.S.I.), propuesto por Hoek (1997) y Hoek, Kaiser y Bawden (1998), ofrece un sistema práctico para estimar cómo varía la resistencia de un macizo rocoso según diferentes condiciones geológicas.

La resistencia de un macizo rocoso fracturado depende de las propiedades de los bloques de roca intacta y de la libertad que estos tienen para rotar o deslizarse bajo diversas condiciones de esfuerzo. Esta libertad está influenciada por el perfil geométrico de los bloques de roca intacta, así como por el estado de las superficies que los separan.

La historia geológica de una región (procesos geomorfológicos, sedimentarios, estructurales, ígneos y metamórficos, hidrogeológicos, metalogenéticos, entre otros) tiene un impacto fundamental en las propiedades y características de los parámetros empleados en el índice geológico de resistencia (G.S.I.). Por lo tanto, es crucial considerar la evaluación geológica de un área al aplicar este índice.

Utilizando las tablas originales del Índice G.S.I. y con el objetivo de hacerlas más prácticas y fáciles de utilizar, se asoció el parámetro de estructura del macizo rocoso con el grado de fracturamiento, medido a través del R.Q.D. o la cantidad de fracturas por metro, adaptando su terminología según estos conceptos: Masiva (M).

- Menos de 2 fracturas / mt, RQD (90 - 100).
- Levemente fracturada (LF) de 2 a 6 fracturas / mt, RQD (70 - 90)
- Moderadamente fracturada (F) de 6 a 12 fracturas / mt, RQD (50 a 70).
- Muy fracturada (MF) de 12 a 20 fracturas / mt, RQD (25 a 50).
- Intensamente fracturada (IF) con más de 20 fracturas / mt, RQD (0 a 25).



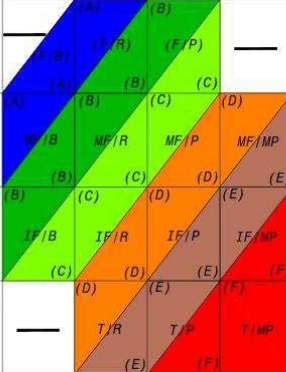
Triturada y brechada en zonas de falla, sin RQD, incluyéndose además las condiciones de trabazón de los bloques que se mencionan en las tablas originales. Con respecto al parámetro de condición de las Discontinuidades, se ha asociado este a la resistencia de la roca intacta, determinada en forma muy sencilla y practica con golpes de picota o su indentación o disgregación de la misma, usando la siguiente terminología:

- Muy buena (MB) Extremadamente resistente, solo se astilla con golpes de picota.
- Buena (B) Muy resistente, se rompe con varios golpes de picota.
- Regular (R) Resistente, se rompe con 1 o 2 golpes de picota.
- Pobre (P) Pobre, moderadamente resistente, se indenta superficialmente con la picota.
- Muy pobre (MP) Blanda a muy blanda, se indenta profundamente con golpes de picota o se disgrega fácilmente, incluyéndose al igual que en el parámetro anterior las condiciones de las discontinuidades mencionadas en la tabla original.

De esta forma, utilizando el flexómetro y la picota, se logrará una clasificación rápida del macizo rocoso.

A partir de esta clasificación, se puede determinar la tabla de sostenimiento correspondiente, considerando el tipo de labor, ya sea de explotación o avances, y en función de las aberturas.

Tabla 14: Características del macizo rocoso según GSI

TABLA GSI		CONDICION			
 <p><b>CIA. MINERA RAURA S.A.</b>                      DEPARTAMENTO DE GEOMECANICA                      (GEOLOGICAL STRENGTH INDEX)                      (INDICE GEOLOGICO DE RESISTENCIA)                      (HOEK (1997), KAISER &amp; BARDEN (1998))</p> <p><b>CARACTERISTICAS DEL MACIZO ROCOSO SEGUN GSI</b>                      Se basa en la cantidad de fracturas por metro, medidos insitu con un flexómetro.                      La mala voladura afecta esta condición.                      La resistencia se determina golpeando o indentando la roca con una picota, se toma en cuenta la rugosidad, alteración de paredes y relleno de las discontinuidades.                      LABOR TEMPORAL: SPLIT SET-HYDRABOLT                      LABOR PERMANENTE: PERNO HELICOIDAL PERNO HYDRABOLT</p>					
		BUENA	REGULAR	POBRE	MUY POBRE
		<b>B</b>	<b>R</b>	<b>P</b>	<b>MP</b>
		BUENA (MUY RESISTENTE, FRESCA) SUPERFICIE DE LAS DISCONTINUIDADES MUY RUGOSAS E INALTERADAS, CERRADAS. (Rc 100 a 200 MPa) (SE ROMPE CON VARIOS GOLPES DE PICOTA)	REGULAR (RESISTENTE, LEVEMENTE ALTERADO) DISCONTINUIDADES RUGOSAS, LEVEMENTE ALTERADAS, CERRADAS, LIGERAMENTE ABIERTAS. (Rc 50 a 100 MPa) (SE ROMPE CON 1 O 2 GOLPES DE PICOTA)	POBRE (MODER. RESIST., LEVE A MODER. ALTER.) DISCONTINUIDADES LISAS, MODERADAMENTE ALTERADAS, LIGERAMENTE ABIERTAS. (Rc 25 a 50 MPa) (SE INDENTA SUPERFICIALMENTE CON GOLPES DE PICOTA)	MUY POBRE (BLANDA, MUY ALTERADA) SUPERFICIE PULIDA O CON EXTRACCIONES, MUY MODERADAMENTE ABIERTA O CON FRAGMENTOS DE ROCA (Rc 5 a 25 MPa) (SE INDENTA PROFUNDAMENTE)
<b>ESTRUCTURA</b>					
<b>F</b>	FRACTURADO MUY BIEN TRABADA, NO DISTURBADA, BLOQUES CUBICOS FORMADOS POR TRES SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES ORTOGONALES (ROD 50 - 75) (6 A 10 FRACTURAS POR METRO)	(B)	(R)	(P)	(MP)
<b>MF</b>	MUY FRACTURADO MODERADAMENTE TRABADA, PARCIALMENTE DISTURBADA, BLOQUES ANGULOSOS FORMADOS POR CUATRO O MAS SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES (ROD 25-50) (11 A 20 FRACTURAS POR METRO)	(B)	(R)	(P)	(MP)
<b>IF</b>	INTENSAMENTE FRACTURADO PLEGAMIENTO Y FALLAMIENTO CON MUCHAS DISCONTINUIDADES INTERCEPTADAS FORMANDO BLOQUES ANGULOSOS O IRREGULARES (ROD 0 - 25) (MAS DE 20 FRACTURAS POR METRO)	(B)	(R)	(P)	(MP)
<b>T</b>	TRITURADA O BRECHADA LIGERAMENTE TRABADA, MASA ROCOSA EXTREMADAMENTE ROTA CON UNA MEZCLA DE FRAGMENTOS FACILMENTE DISGREGABLES, ANGULOS Y REDONDEADOS. (SIN ROD)	(B)	(R)	(P)	(MP)

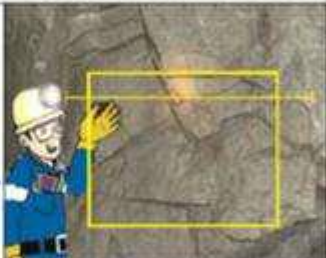

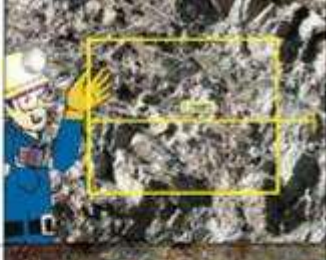


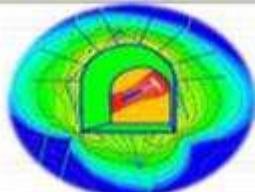
  

TIPO DE SOSTENIMIENTO	
LABORES DE AVANCE >= 3.5m	
<b>A</b>	Sin sostenimiento o perno puntual de 7'.
<b>B</b>	Perno sistemático de 7'.
<b>C</b>	Malla Electrosoldada + Perno sistemático de 7'.
<b>D</b>	Shotcrete de 2" + Malla Electrosoldada + Perno sistemático de 7'.
<b>E</b>	Shotcrete de 3" + Malla Electrosoldada + Perno Sistemático de 7'.
<b>F</b>	Shotcrete de 4" + Malla Electrosoldada + Perno Sistemático de 7' o Cimbras Metalicas esp. desde 0.8m a 1.2m.
LABORES DE EXPLOTACIÓN >= 5m	
<b>A</b>	Perno sistemático de 7'.
<b>B</b>	Perno sistemático de 7'.
<b>C</b>	Malla Electrosoldada + Perno sistemático de 7'.
<b>D</b>	Shotcrete de 2"-3" + Malla Electrosoldada + Perno sistemático de 7'.
<b>E</b>	Shotcrete de 2" + Malla Electrosoldada + Perno Sistemático de 7' + Shotcrete de 1" a 2".
<b>F</b>	Shotcrete de 2" + Malla Electrosoldada + Perno Sistemático de 7' + Shotcrete de 2" a 3".

Fuente: Compañía Minera Raura

# METODOLOGIA DE APLICACION

## CONSIDERACIONES DEL USO DE LA TABLA GSI

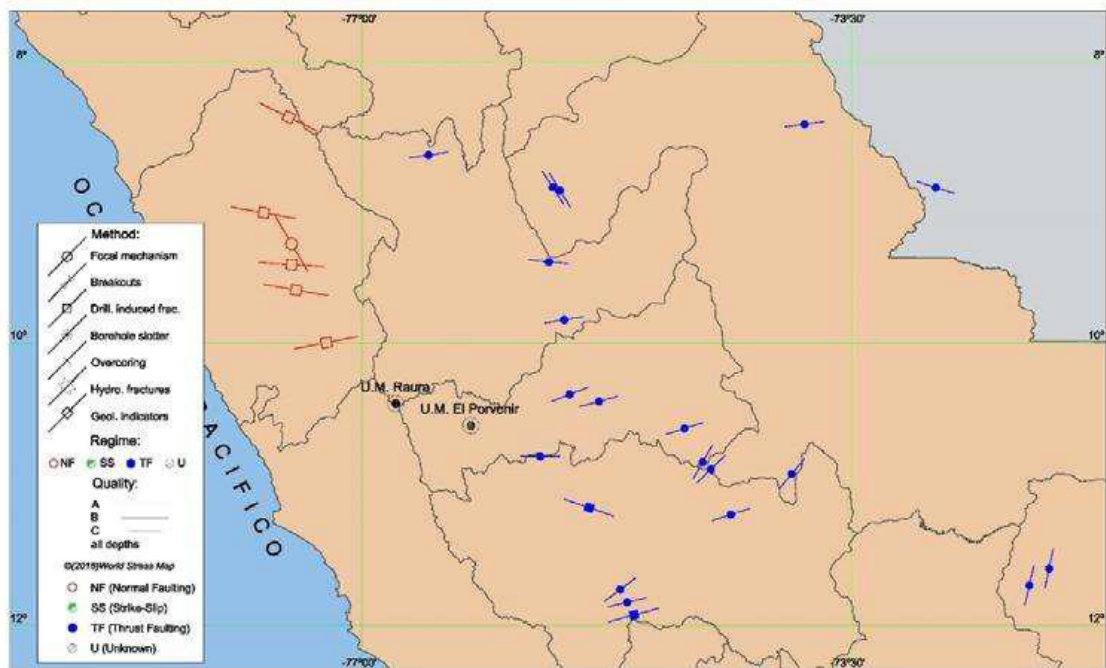
INDICE G.S.I.	INDICE RMR	TIPO DE FRACTURAMIENTOS
MODERADAMENTE FRACTURADA/BUENA (F/B)	70-80	<b>FRACTURADO (F)</b> 6-10 fracturas/m. 
MODERADAMENTE FRACTURADA/REGULAR (F/R)	60-70	
MODERADAMENTE FRACTURADA/POBRE (F/P)	50-60	
MUY FRACTURADA/BUENA (MF/B)	60-70	
MUY FRACTURADA/REGULAR (MF/R)	50-60	
MUY FRACTURADA/POBRE (MF/P)	40-50	
MUY FRACTURADA/MUY POBRE (MF/MP)	30-40	<b>MUY FRACTURADO (MF)</b> 11-20 fract./m. 
INTENSAMENTE FRACTURADA/REGULAR (IF/R)	40-50	
INTENSAMENTE FRACTURADA/POBRE (IF/P)	30-40	
INTENSAMENTE FRACTURADA/MUY POBRE (IF/MP)	20-30	
TRITURADO O BRECHADO/REGULAR (T/R)	30-40	<b>INTENSAMENTE FRACTURADO (IF)</b> >20 fract./m. 
TRITURADO O BRECHADO/POBRE (T/P)	20-30	
TRITURADO O BRECHADO/ MUY POBRE (T/MP)	10-20	
<b>FACTORES INFLUYENTES</b> 		<b>TRITURADA O BRECHADA (T)</b> 
<b>CONSIDERACIONES PARA EL SOSTENIMIENTO</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>En Zonas de Taladros Largos: Se sostendra con Malla + perno sistematico las siguientes labores: -Ventanas de Acceso para limpieza de mineral -Bypass de la Zona de Taladros Largos</li> <li>Longitud del perno a usar: Sección de excavación &gt; 3.5m usar 7pies</li> <li>Para Cámaras DDH, RBs, Subestaciones: Usar pernos de 7 pies + malla</li> <li>Cam. Bombeo, Polvorin, Refugio minero, Comedor: Shotcrete + Malla + Perno sistematico</li> <li>Zonas de Relajamiento de Roca: Malla + Perno sistematico</li> <li>Zona de Intersecciones: Shotcrete + Malla + Perno sistematico</li> <li>Subniveles y tajeos con Tipo de Roca IV Mala: Shotcrete + Malla + Hydrabolt</li> </ol> <p>TODO SOSTENIMIENTO ES HASTA EL TOPE DE LA LABOR</p>		
		<b>CIA. MINERA RAURA S.A</b> DEPARTAMENTO DE GEOMECANICA 

Fuente: Compañía Minera Raura

### **Estimación de esfuerzos in situ**

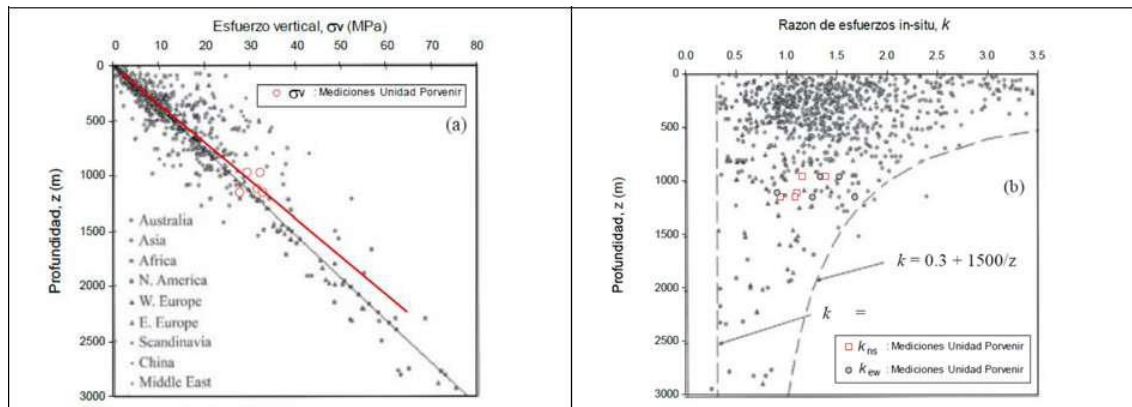
De acuerdo con el mapa mundial de esfuerzos (World Stress Map, 2016) para la zona de estudio, se observa que la mayor parte de la base de datos presenta una dirección E-W para el esfuerzo principal mayor 1 (ver Figura 11).

**Figura 11:** Rumbo del esfuerzo principal mayor en la zona del estudio



A manera de benchmarking se identificó que la unidad minera con mayor proximidad a la mina Raura que cuenta con ensayos de esfuerzos in situ es la U.M. El Porvenir, la cual cuenta con un esfuerzo principal mayor que varía en un rango de  $40^\circ$  y  $298^\circ$  con un rumbo promedio de  $90^\circ$ . Asimismo, se observa que las razones de esfuerzos (K) varía entre 0.9 y 1.4 para una profundidad que varía entre los 970m y 1160m, en la cual se realizó el ensayo.

**Figura 12:** Esfuerzo vertical,  $\sigma_v$  (izquierda) y razón de esfuerzos in situ  $K$  (derecha) obtenidos de los ensayos de esfuerzos in situ (overcoring) con mayor proximidad a la mina Raura.

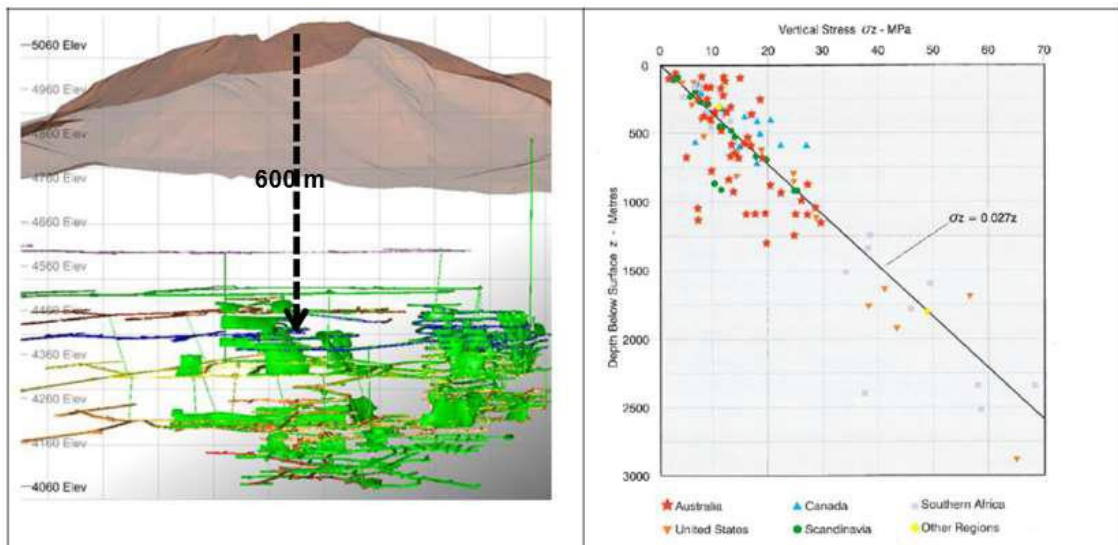


Con la finalidad de realizar un modelo numérico preliminar para la estabilidad global de la mina Raura - Zona Sur se ha realizado una estimación de la magnitud y orientación de los esfuerzos en función a la carga litostática y a los estados compresionales existentes en la zona. Así mismo, se ha revisado la información del mapa de esfuerzos tectónicos del mundo (Heidbach et al, 2005).

Tras este análisis se estimó que la orientación del esfuerzo principal máximo es horizontal con un azimut de  $70^\circ$  y la orientación del esfuerzo principal intermedio también horizontal tiene un azimut de  $160^\circ$ . El esfuerzo principal menor será el vertical.

Considerando un cambio de esfuerzo vertical igual a  $0.027 \text{ MPa/m}$  de profundidad y la razón de esfuerzo horizontal máximo al vertical "Kmax" se asume como 1.5 y para el esfuerzo horizontal mínimo "Kmin" el valor es de 1.2 y teniendo en cuenta que la topografía se encuentra en la cota 4900.

**Figura 13:** Carga litostática en el sector Sur de mina Raura. A la izquierda, profundidad de 600 metros hasta el nivel 4300. A la derecha, estimación de los esfuerzos verticales



Considerando las estimaciones anteriores se ha podido estimar la magnitud de los esfuerzos in situ para el nivel 4300 y son mostrados en el siguiente cuadro. Así mismo, en la Figura se muestra la orientación de los esfuerzos principales.

### ***Dominios geomecánicas***

Una vez que se ha construido el modelo geomecánico, el siguiente paso en el diseño es dividirlo en zonas llamadas "dominios geomecánicos", en las cuales las características del modelo sean similares o consideradas homogéneas. Estos dominios suelen estar vinculados a las características geológicas del área y a los mecanismos de falla esperados en cada sector.

Generalmente, la estructura mineralizada y los contactos litológicos con la roca circundante facilitan la delimitación de los dominios geomecánicos. No obstante, en áreas geológicas más complejas, la alteración y/o los sistemas de fallas pueden influir en las condiciones del macizo rocoso, definiendo de esta manera dichos dominios.

Con la información de mapeo geomecánico proporcionado por la mina Raura, se realizó la revisión de la clasificación geomecánica en el sistema RMR89, de todos

los planos geomecánicos de la zona Sur, donde también se proyectan las trazas y orientación de las estructuras como fallas y discontinuidades.

En la figura 14 del lado izquierdo, se muestra un plano litológico típico en el nivel 300 donde se aprecia que las litologías predominantes de la roca encajonante de los cuerpos y vetas en la zona Sur son el mármol, exoeskarn, intrusivo y volcánico.

En la figura 14 del lado derecho, se muestra una vista en planta de la zonificación geomecánica de 14 niveles (Nivel 100, Nivel 100 intermedio, Nivel 150 intermedio, Nivel 150 2do intermedio, Nivel 200 1er intermedio, Nivel 200 2do intermedio, Nivel 300 3cer intermedio, Nivel 300 1er intermedio, Nivel 300 2do intermedio, Nivel 300 3cer intermedio, Nivel 300 4to intermedio, Nivel 380 base, Nivel 380 intermedio) realizados por la mina Raura en las labores de la zona Sur que involucran las estructuras mineralizadas: Farallón, Katy, Hadas, Santa rosa, Karol, Margot y Vanessa. Se observa claramente que las estructuras hacia el sur (Sector 1) como Farallón, Santa rosa, Karol y Katy presentan un RMR predominante entre 30 a 50 y las estructuras hacia el norte (Sector 2) como Hadas, Margot y Vanessa presentan un RMR entre 50 a 60.

Raura ha medido las longitudes por tipo de roca en todas las labores con zonificación geomecánica y se ha determinado la incidencia del tipo de roca por sector; es así como en el sector 1 el 28% de las labores actualmente presentan RMR entre 30 a 40 (predominantemente estructura mineralizada y cajas cercanas), 57% de las labores presentan RMR entre 40 a 50 (predominantemente rampas, cruceros, galerías, ventanas y cajas cercanas) y sólo un 15% de las labores con un RMR entre 50 a 60.

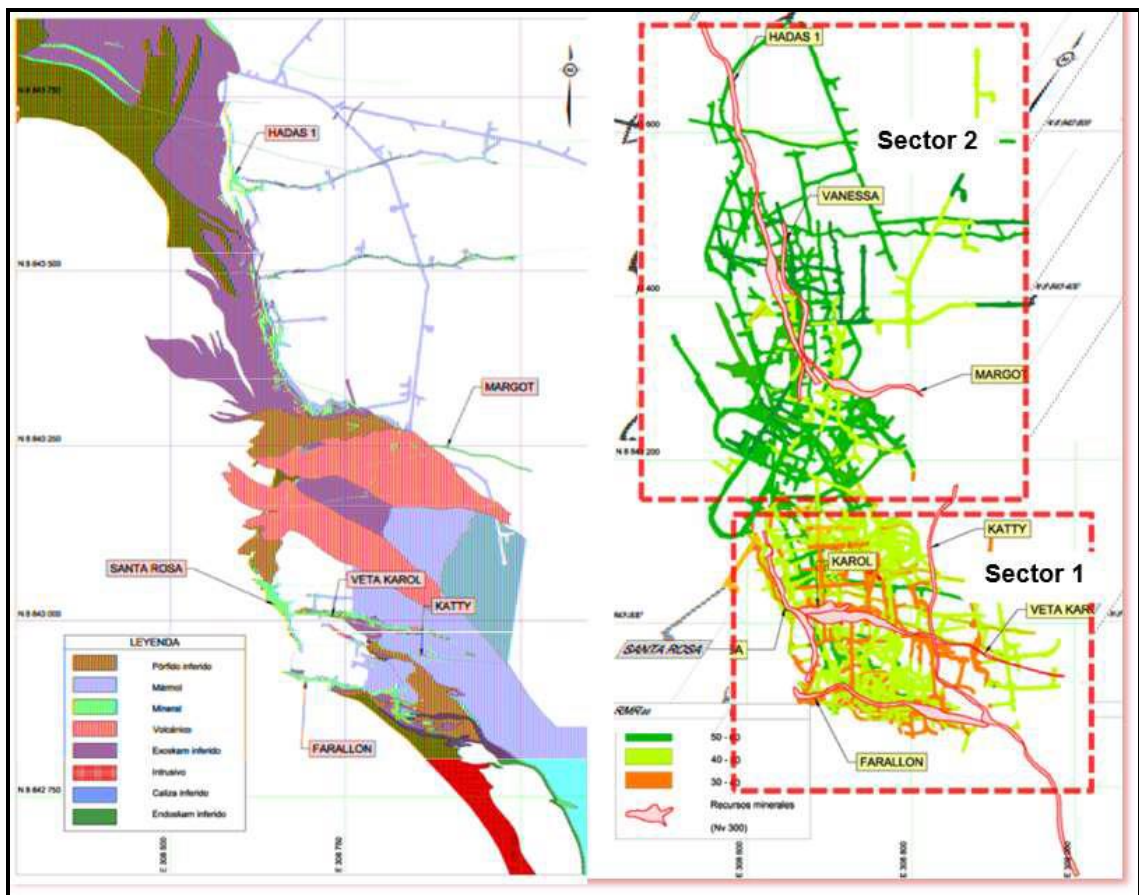
En el sector 2 se tiene que sólo un 10% de las labores actualmente presentan un RMR entre 30 a 40, el 30% de las labores presentan un RMR entre 40 a 50 y el 60% de las labores presentan un RMR entre 50 a 60.

**Tabla 15:** Incidencia de la calidad de roca en la zona sur (sector 1 y sector 2) de la unidad minera Raura a partir de las labores de avance

RMR <sup>89</sup>	Sector 1 (Farallón, Santa rosa, Karol y Katy)	Sector 2 (Hadas, Margot y Vanessa)
< 30	0%	0%
30-40	28%	10%
40-50	57%	30%
50-60	15%	60%

**Fuente:** Compañía Minera Raura

**Figura 14:** Vista en planta. (Izquierda): Sección geológica en el NV 300, (Derecha): Zonificación geomecánica por niveles en la zona Sur realizada por unidad minera Raura



#### a. Sistemas de discontinuidades menores

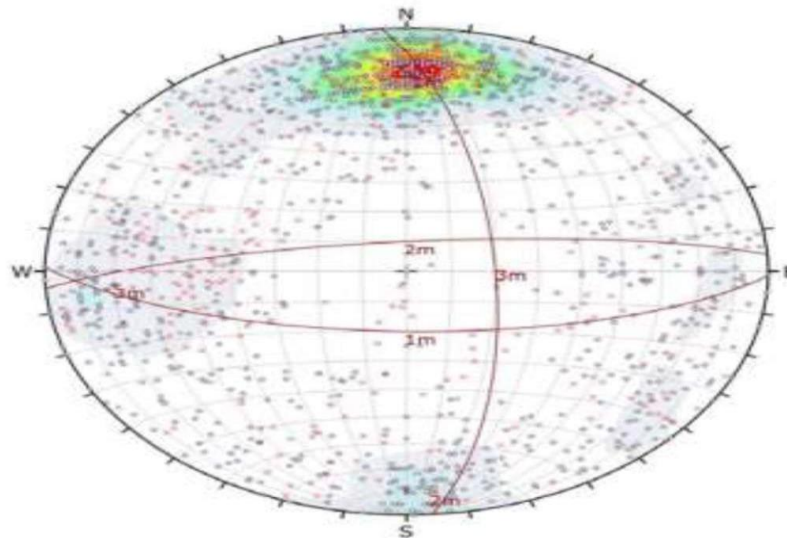
Para la definición de los sistemas de discontinuidades Para la definición de los sistemas de discontinuidades menores predominantes en las principales litologías de cada zona mineralizada evaluada se empleó la información del registro de la orientación (buzamiento y dirección de buzamiento) de las

discontinuidades registradas en los mapeos geomecánicos sobre labores de desarrollo y preparación, esta información fue recolectada durante los años 2017, 2018 y 2019. La nomenclatura de las familias se mostrará en formato Buzamiento/Dirección de buzamiento.

### Orientación de Discontinuidades Sector Norte

Se analiza la base de datos estructural de todo el sector Norte, compuesto por Hadas 1, Vanesa y Margot que consideran 37 estaciones geomecánicas y 355 mediciones de información estructural. En base a la proyección estereográfica mostrada en la siguiente Figura, se observan tres familias de estructuras con algunas estructuras aleatorias, siendo la familia más dominante la familia 1m (70/181) que es perpendicular al rumbo de la mineralización.

**Figura 15:** Información estructural registrada en mapeos de ventanas Mina Raura Sector Norte.



**Tabla 16:** Orientación de las familias de estructuras en la zona de Hadas 1, Vanessa y Margot

Familia	Buzamiento (°)	Dirección de Buzamiento (°)
1m	73	217
2m	73	155
3m	48	107

**Fuente:** Compañía Minera Raura

La familia 1 (1m) tiene como características el tener persistencia entre 3 a 10 metros, abertura promedio de 0.1 mm, con relleno promedio duro, superficies ligeramente rugosas y con una meteorización de paredes de ligera a medianamente meteorizadas.

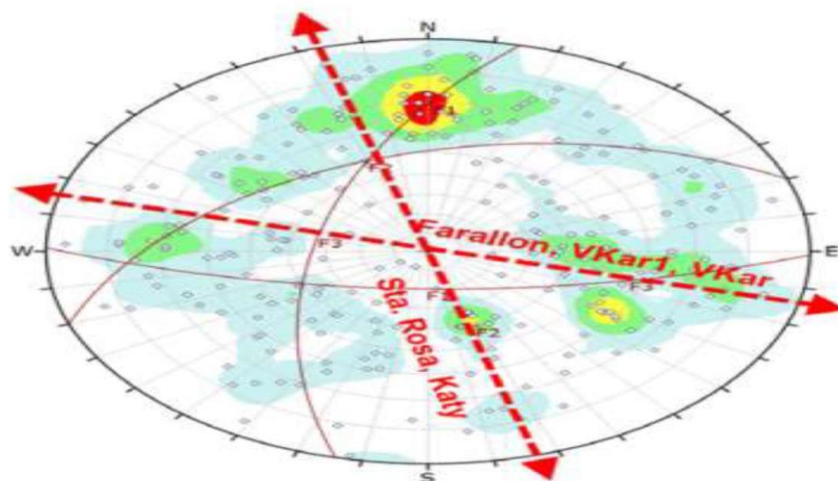
La familia 2 (2m) es una familia conjugada de la familia 1 con propiedades muy similares. La familia 2 tiene persistencia entre 3 a 10 metros, en su mayoría son estructuras cerradas y sin relleno, ligeramente rugosas y con la meteorización de paredes de medianamente a ligeramente meteorizadas.

La familia 3 (3m) tiene una orientación Norte-Sur con persistencia de entre 3 a 10 metros, presenta estructuras cerradas y con relleno duro en los casos que se presente abertura, superficies ligeramente rugosas y con una meteorización entre ligera y roca fresca.

#### **Orientación de Discontinuidades Sector Sur**

Para el sector sur, se registraron 134 estaciones geomecánicas donde las familias de discontinuidades que gobiernan abarcan a las estructuras Katty (Az. 162°), Sta. Rosa (Az. 162°), Karol (Az. 105°) y Karol 1 (Az.105) tal como se muestra en la siguiente Figura.

**Figura 16:** Información estructural recolectada en los mapeos geomecánicos del sector sur.



**Tabla 17:** Información estructural recolectada en los mapeos geomecánicos del sector sur

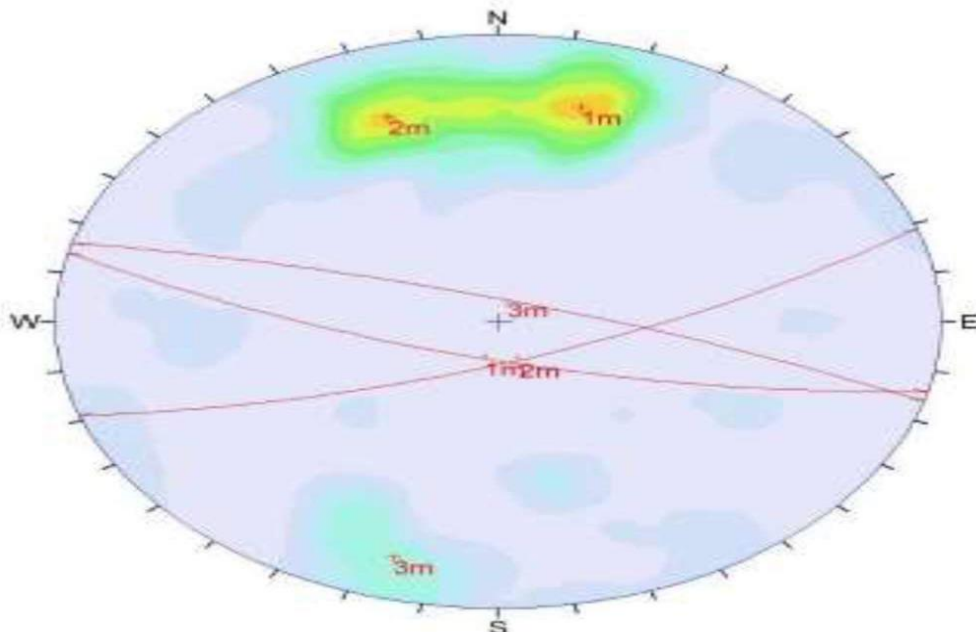
Familia	Buzamiento (°)	Dirección de Buzamiento (°)
F1	70	181
F2	41	340
F3	57	284

**Fuente:** Compañía Minera Raura

### Orientación de Discontinuidades Breka

Para el cuerpo Breka, se registraron 11 estaciones geomecánicas cercanas a dicho cuerpo. Con esta información se identificaron tres familias de discontinuidades (1m, 2m y 3m). Las orientaciones para 1m es de 75/194, para 2m es de 74/161 y para 3m es de 81/16. Así mismo las fallas principales que se encuentran cercana a la zona de Breka poseen una dirección preferencial este oeste y algunas con dirección norte sur.

**Figura 17:** Información estructural recolectada en los mapeos geomecánicos en la veta Breka



**Tabla 18:** Orientación de las familias de estructuras en la veta Breka.

Familia	Buzamiento (°)	Dirección de Buzamiento (°)
F1	75	194
F2	74	161
F3	81	016

**Fuente:** Compañía Minera Raura

### ***Diseño geomecánicos de excavaciones***

Las buenas prácticas de diseño, para ambos tipos de excavaciones serán aquellas que minimicen el riesgo de caídas de rocas, en la Raura se tiene dos diseños de explotación de los cuales se detalla y se recomienda su dimensión a fin de reducir el riesgo de caída de rocas.

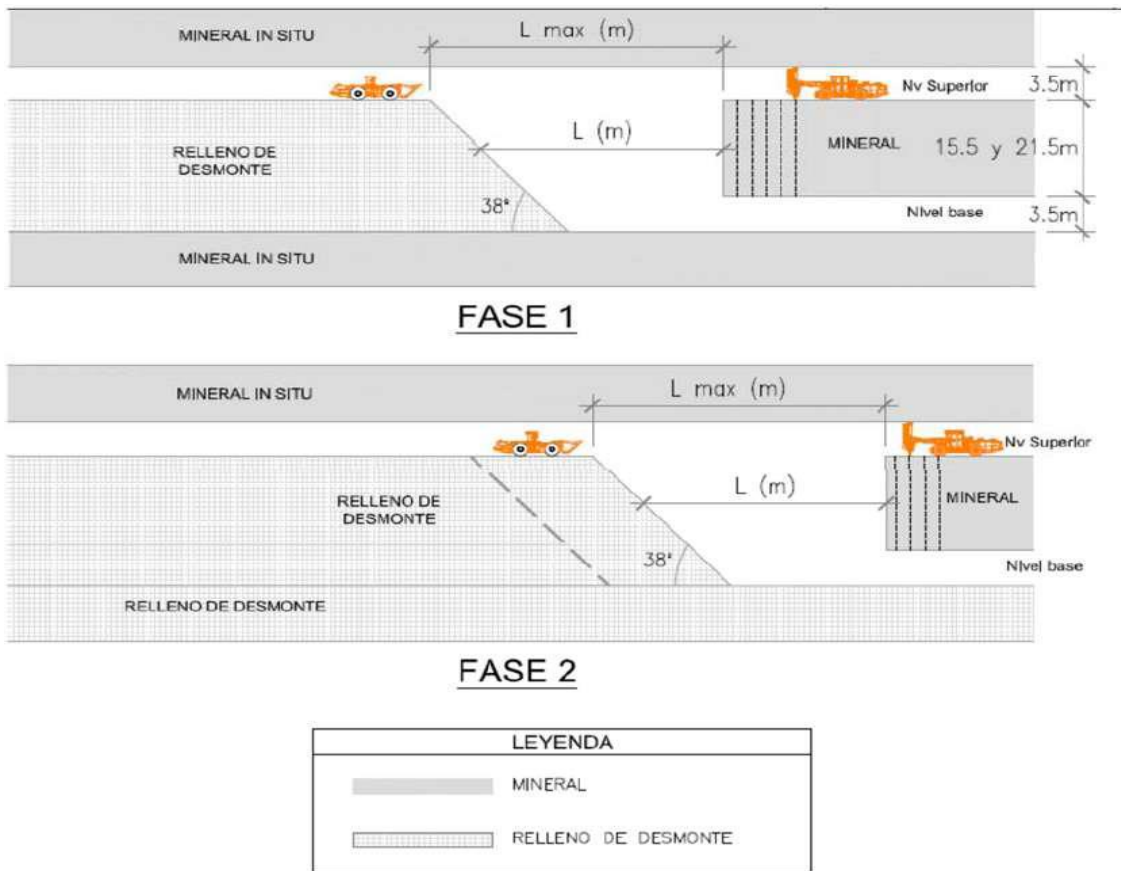
#### **a. Sublevel stoping con minado longitudinal**

Este método es normalmente utilizado en vetas tanto angostas como potentes, donde el sector que usualmente presenta mayor riesgo de colapso es la caja techo y en zonas potentes, la bóveda del tajeo.

En la caja techo, la estabilidad es controlada por el ancho y altura inclinada de la pared del tajeo, sin sostenimiento, que representa el máximo radio hidráulico.

Sin embargo, en la bóveda al instalar permanentemente sostenimiento estándar (pernos, malla y/o Shotcrete), este tiene un efecto localizado en la bóveda de los tajeos con anchos de minado menores a 4.5 m. Entonces se considera que para tajeos con anchos de minado mayores a 4.5 m el sostenimiento estándar ya no tiene efecto, y deberá ser calculado su estabilidad usando el radio hidráulico de la bóveda sin sostenimiento.

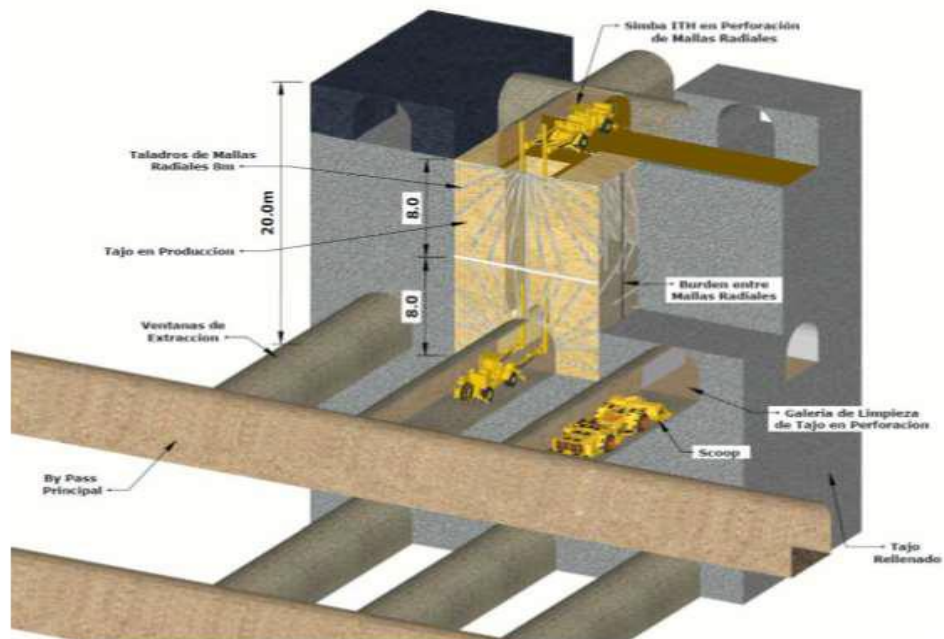
**Figura 18:** Longitud de tajeos para diferentes ELOS para vetas angostas con ancho de minado > 3m, considerando un minado longitudinal y sin sostenimiento en la bóveda o en la caja techo



**b. Sublevel stoping transversal (SLST)**

Se recomienda la aplicación del método para potencias por sobre los 12m y buzamientos mayores a 50° de inclinación. Se debe emplear relleno en pasta considerando un minado secuencial de tajeos primarios y secundarios.

**Figura 19:** Método de explotación Sub Level Stopping Transversal (SLST)

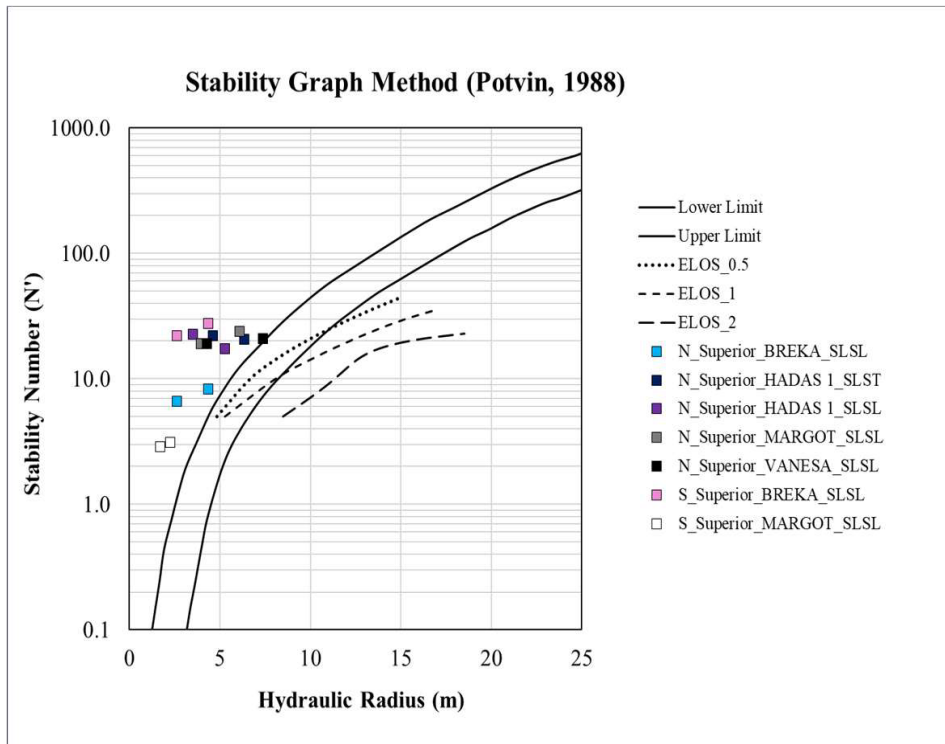


### c. Sectorización de la mina

#### Sector Superior (Cota >4100)

El dimensionamiento de los tajeos para las zonas superiores realizado por REDCO identifica un incremento principalmente en los anchos de minado debido a que se tuvo una revisión exhaustiva del radio hidráulico máximo permitido para el techo de los tajeos, además las alturas de explotación entre subniveles propuestas son coherentes con las alturas de explotación ejecutadas con anterioridad por la operación minera de Raura en los sectores superiores.

**Figura 20: MGEM Sector Superior (Cota > 4100)**

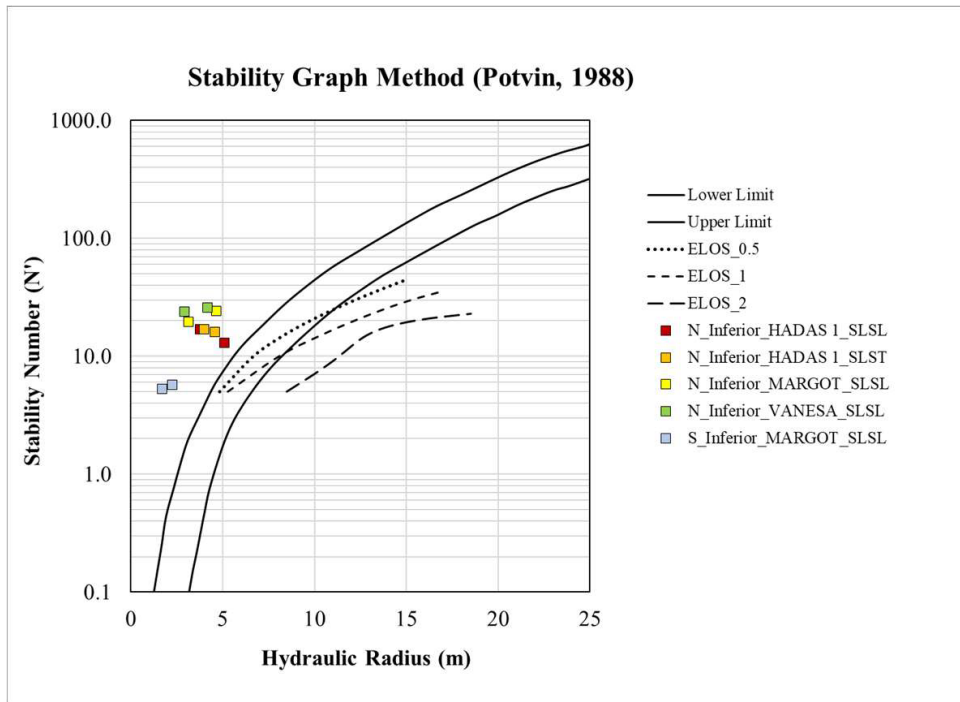


#### **Sector Inferior (Cota < 4100)**

Para la zona inferior el dimensionamiento tuvo la tendencia a reducir las longitudes máximas expuestas para los tajeos del sublevel stoping, debido principalmente a la revisión y actualización del cálculo del factor de esfuerzos “A” que define el número de estabilidad modificado, este parámetro actualmente considera un ambiente de esfuerzos inducidos altos producto de las altas profundidades (mayor a 1000m) y

esto es corroborado por la presencia de eventos microsísmicos de intensidad regular registrados así como los esfuerzos estimados en los modelos numéricos realizados por SRK, por consiguiente se debe considerar un dimensionamiento acorde a la realidad geomecánica y empleo de relleno en pasta.

**Figura 21: MGEM Sector Inferior (Cota < 4100)**



En la siguiente Tabla, se considera los parámetros de dimensionamiento y resultados por Zona para los sectores por encima de la cota 4100 y por debajo de esta.

**Tabla 19: Parámetros de dimensionamiento y resultados por Zona**

Cuadrante	Cota	Zona	Método de minado	Q Corona	Q Pared	A Corona	A Pared	B Corona	B Pared	C Corona	C Pared	N Corona	N Pared	Altura**	Longitud	Ancho***
N	Superior	BREKA	SLS-L	8	7	0.74	0.74	0.6	0.23	2	6.5	7	8	20	15	8
N	Superior	HADAS 1	SLS-T	18	18	0.74	0.74	0.85	0.2	2	8	22	21	27	24*	15
N	Superior	HADAS 1	SLS-L	18	18	0.74	0.74	0.85	0.2	2	6.5	23	17	27	17	12
N	Superior	MARGOT	SLS-L	20	22	0.8	0.8	0.6	0.23	2	6.5	19	26	25	23	12
N	Superior	VANESA	SLS-L	20	19	0.8	0.8	0.6	0.2	2	6.5	19	20	28	30	12
S	Superior	BREKA	SLS-T	25	22	0.74	0.74	0.6	0.23	2	6.5	22	24	20	15*	8
S	Superior	MARGOT	SLS-L	3	2	0.8	0.8	0.6	0.2	2	6.5	3	2	10	8	6
N	Inferior	HADAS 1	SLS-L	20	25	0.5	0.5	0.85	0.2	2	6.5	17	16	20	20	12
N	Inferior	HADAS 1	SLS-T	20	25	0.5	0.5	0.85	0.2	2	8	17	20	20	17*	15
N	Inferior	MARGOT	SLS-L	28	27	0.59	0.59	0.6	0.23	2	6.5	19	24	20	17	10
N	Inferior	VANESA	SLS-L	38	40	0.53	0.53	0.6	0.2	2	6.5	24	28	20	14	10
S	Inferior	MARGOT	SLS-L	8	10	0.59	0.59	0.6	0.2	2	6.5	5	7	10	8	6

\*La longitud para método de SLST es en dirección transversal a la veta

\*\* La altura se mide de piso a techo

\*\*\* Para el método SLSL indica el ancho de minado |

**Fuente:** Compañía Minera Raura

De acuerdo con los parámetros tomado en campo, se tiene el resumen de los valores de RMR  $\hat{76}$  para cada estructura y dominio como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 20:** *Parámetros de dimensionamiento y resultados por Zona*

Sector	Veta	Dominio	RMR' Promedio	RMR' Mínimo	RMR' Máximo	Desv. Estándar	Cant. De datos	RMR' Diseño	Q'
Norte	Hadas 1	CPC	70	44	83	7	107	68	14
		CTC	67	37	90	12	121	63	8
		MIN	68	36	80	11	171	65	10
	Hadas 2	CPC	70	60	80	5	24	68	14
		CTC	72	59	81	7	17	70	18
		MIN	69	57	80	6	26	67	13
	Vanesa	CPC	71	41	85	9	36	68	14
		CTC	71	55	78	5	36	70	18
		MIN	71	47	85	8	70	69	16
	Margot	CPC	62	38	79	11	44	59	5
		CTC	61	30	84	17	45	56	4
		MIN	64	32	80	14	103	60	6
Sur	Farallón	CPC	53	30	74	10	123	51	2
		CTC	46	25	72	10	138	43	1
		MIN	50	28	74	10	242	47	1
	Katty	CPC	46	26	70	10	73	43	1
		CTC	50	28	70	8	75	48	2
		MIN	47	23	71	10	101	44	1
	Santa Rosa	CPC	60	40	78	11	31	57	4
		CTC	59	17	77	15	30	54	3
		MIN	54	16	78	14	68	50	2
	Veta Karol	CPC	55	39	72	11	11	51	2
		CTC	65	40	83	12	16	61	7
		MIN	55	36	83	13	19	51	2
	Veta Karol 1	CPC	54	41	78	8	20	51	2
		CTC	50	35	73	9	20	48	2
		MIN	50	33	75	11	34	47	1
	C. Karol	CC	47	33	62	6	58	45	1
		MIN	48	17	65	10	98	45	1
	Norte	Hadas1, Hadas2, Vanesa, Margot	CAJALN	67	19	85	10	1787	64
Sur	Farallón, Katty, Santa Rosa, Karol, Karol 1, Cuerpo Karol	CAJALS	53	15	87	12	3166	49	2

**Fuente:** Compañía Minera Raura

A continuación, se muestran las dimensiones de los tajeos para ELOS de 0.5, 0.7, 0.8 y 1.0 m.

**Tabla 21:** Longitud de tajeos para diferentes ELOS para vetas angostas con ancho de minado > 3m, considerando un minado longitudinal y sin sostenimiento en la bóveda o en la caja techo

Veta	Buzamiento de la veta (°)	Ancho de Minado (m)	Altura de subnivel vertical de piso a piso (m)	Altura de galería (m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (0.5 m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (0.7 m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (0.8 m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (1 m)
Margot	50 a 65	1 a 3	27.5	3.5	9	11	13	16
Margot	65 a 80	1 a 3	27.5	3.5	12	15	17	22
Margot	80 a 90	1 a 3	27.5	3.5	18	20	23	28
Margot	50 a 65	1 a 3	21.5	3.5	10	12	14	18
Margot	65 a 80	1 a 3	21.5	3.5	13	17	19	36
Margot	80 a 90	1 a 3	21.5	3.5	18	23	27	25
Vanesa	50 a 65	1 a 3	27.5	3.5	32	39	40	40
Vanesa	65 a 80	1 a 3	27.5	3.5	40	40	40	40
Vanesa	80 a 90	1 a 3	27.5	3.5	40	40	40	40
Vanesa	50 a 65	1 a 3	21.5	3.5	39	40	40	40
Vanesa	65 a 80	1 a 3	21.5	3.5	40	40	40	40
Vanesa	80 a 90	1 a 3	21.5	3.5	40	40	40	40
Farallón	65 a 80	1 a 3	15.5	3.5	8	9	10	11

Veta	Buzamiento de la veta (°)	Ancho de Minado (m)	Altura de subnivel vertical de piso a piso (m)	Altura de galería (m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (0.5 m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (0.7 m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (0.8 m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (1 m)
Farallón	80 a 90	1 a 3	15.5	3.5	9	10	11	12
Veta Karol	80 a 90	1 a 3	15.5	3.5	40	40	40	40
Veta Karol 1	65 a 80	1 a 3	15.5	3.5	9	11	11	13
Veta Karol 1	80 a 90	1 a 3	15.5	3.5	10	12	14	16
Santa Rosa	80 a 90	1 a 3	15.5	3.5	17	25	30	40

Fuente: Compañía Minera Raura

**Tabla 22:** Longitud de tajeos para diferentes ELOS para vetas con ancho de minado de 3 a 6 m, considerando un minado longitudinal y sin sostenimiento en la bóveda o en la caja techo

Veta	Buzamiento de la veta	Ancho de Minado (m)	Altura de subnivel vertical de piso a piso (m)	Altura de galería (m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (0.5 m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (0.7 m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (0.8 m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (1 m)
Hadas 1	50 a 65	3 a 6	27.5	3.5	18	22	24	28
Hadas 1	65 a 80	3 a 6	27.5	3.5	24	29	32	39
Hadas 1	80 a 90	3 a 6	27.5	3.5	33	39	40	40
Hadas 1	50 a 65	3 a 6	21.5	3.5	21	26	28	34
Hadas 1	65 a 80	3 a 6	21.5	3.5	29	37	40	40
Hadas 1	80 a 90	3 a 6	21.5	3.5	40	40	40	40
Margot	50 a 65	3 a 6	27.5	3.5	9	11	13	16
Margot	65 a 80	3 a 6	27.5	3.5	12	15	17	22
Margot	80 a 90	3 a 6	27.5	3.5	16	20	23	28
Margot	50 a 65	3 a 6	21.5	3.5	10	12	14	18
Margot	65 a 80	3 a 6	21.5	3.5	13	17	19	36
Margot	80 a 90	3 a 6	21.5	3.5	18	23	27	25
Vanesa	50 a 65	3 a 6	27.5	3.5	32	39	40	40
Vanesa	65 a 80	3 a 6	27.5	3.5	40	40	40	40
Vanesa	80 a 90	3 a 6	27.5	3.5	40	40	40	40
Vanesa	50 a 65	3 a 6	21.5	3.5	39	40	40	40
Vanesa	65 a 80	3 a 6	21.5	3.5	40	40	40	40
Vanesa	80 a 90	3 a 6	21.5	3.5	40	40	40	40
Farallón	65 a 80	3 a 6	15.5	3.5	8	9	10	11
Farallón	80 a 90	3 a 6	15.5	3.5	9	10	11	12
Veta Karol	80 a 90	3 a 6	15.5	3.5	40	40	40	40
Veta Karol 1	65 a 80	3 a 6	15.5	3.5	9	11	11	13
Veta Karol 1	80 a 90	3 a 6	15.5	3.5	10	12	14	16
Cuerpo Karol	80 a 90	3 a 6	15.5	3.5	10	11	11	13
Santa Rosa	80 a 90	3 a 6	15.5	3.5	17	25	30	40

**Fuente:** Compañía Minera Raura

**Tabla 23:** Longitud de tajeos para diferentes ELOS para vetas con ancho de minado de 6 a 10 m, considerando un minado longitudinal y sin sostenimiento en la bóveda o en la caja techo

Veta	Buzamiento de la veta	Ancho de Minado (m)	Altura de subnivel vertical de piso a piso (m)	Altura de galería (m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (0.5 m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (0.7 m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (0.8 m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (1 m)
Hadas 1	50 a 65	6 a 10	27.5	3.5	18	19	19	19
Hadas 1	65 a 80	6 a 10	27.5	3.5	21	21	21	21
Hadas 1	80 a 90	6 a 10	27.5	3.5	23	23	23	23
Hadas 1	50 a 65	6 a 10	21.5	3.5	19	19	19	19
Hadas 1	65 a 80	6 a 10	21.5	3.5	21	21	21	21
Hadas 1	80 a 90	6 a 10	21.5	3.5	23	23	23	23
Margot	50 a 65	6 a 10	27.5	3.5	9	11	13	14
Margot	65 a 80	6 a 10	27.5	3.5	12	15	16	16
Margot	80 a 90	6 a 10	27.5	3.5	16	18	18	18
Margot	50 a 65	6 a 10	21.5	3.5	10	12	14	14
Margot	65 a 80	6 a 10	21.5	3.5	13	16	16	16
Margot	80 a 90	6 a 10	21.5	3.5	18	18	18	18
Vanesa	50 a 65	6 a 10	27.5	3.5	23	23	23	23
Vanesa	65 a 80	6 a 10	27.5	3.5	35	35	35	35
Vanesa	80 a 90	6 a 10	27.5	3.5	40	40	40	40
Vanesa	50 a 65	6 a 10	21.5	3.5	23	23	23	23
Vanesa	65 a 80	6 a 10	21.5	3.5	35	35	35	35
Vanesa	80 a 90	6 a 10	21.5	3.5	40	40	40	40
Farallón	65 a 80	6 a 8	15.5	3.5	8	9	10	11
Farallón	65 a 80	8 a 10	15.5	3.5	8	9	10	10
Farallón	80 a 90	6 a 8	15.5	3.5	9	10	11	12
Farallón	80 a 90	8 a 10	15.5	3.5	9	10	10	10
Veta Karol	80 a 90	6 a 8	15.5	3.5	17	17	17	17
Veta Karol 1	65 a 80	6 a 8	15.5	3.5	9	11	11	13
Veta Karol 1	65 a 80	8 a 10	15.5	3.5	9	10	10	10
Veta Karol 1	80 a 90	6 a 8	15.5	3.5	10	12	13	13
Veta Karol 1	80 a 90	8 a 10	15.5	3.5	10	10	10	10
Cuerpo Karol	80 a 90	6 a 8	15.5	3.5	10	11	11	13
Cuerpo Karol	80 a 90	8 a 10	15.5	3.5	10	10	10	10
Santa Rosa	80 a 90	6 a 8	15.5	3.5	17	17	17	17
Santa Rosa	80 a 90	8 a 10	15.5	3.5	12	12	12	12

**Fuente:** Compañía Minera Raura

**Tabla 24:** Longitud de tajeos para diferentes ELOS para vetas con ancho de minado de 10 a 16 m, considerando un minado longitudinal y sin sostenimiento en la bóveda o en la caja techo

Veta	Buzamiento de la veta	Ancho de Minado (m)	Altura de subnivel vertical de piso a piso (m)	Altura de galería (m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (0.5 m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (0.7 m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (0.8 m)	Longitud del tajo (m) para un ELOS (1 m)
Hadas 1	50 a 65	10 a 13	27.5	3.5	13	13	13	13
Hadas 1	50 a 65	13 a 16	27.5	3.5	11	11	11	11
Hadas 1	65 a 80	10 a 13	27.5	3.5	14	14	14	14
Hadas 1	65 a 80	13 a 16	27.5	3.5	12	12	12	12
Hadas 1	80 a 90	10 a 13	27.5	3.5	15	15	15	15
Hadas 1	80 a 90	13 a 16	27.5	3.5	12	12	12	12
Hadas 1	50 a 65	10 a 13	21.5	3.5	13	13	13	13
Hadas 1	50 a 65	13 a 16	21.5	3.5	11	11	11	11
Hadas 1	65 a 80	10 a 13	21.5	3.5	14	14	14	14
Hadas 1	65 a 80	13 a 16	21.5	3.5	12	12	12	12
Hadas 1	80 a 90	10 a 13	21.5	3.5	15	15	15	15
Hadas 1	80 a 90	13 a 16	21.5	3.5	12	12	12	12
Margot	50 a 65	10 a 13	27.5	3.5	9	10	10	10
Margot	65 a 80	10 a 13	27.5	3.5	12	12	12	12
Margot	80 a 90	10 a 13	27.5	3.5	13	13	13	13
Margot	50 a 65	10 a 13	21.5	3.5	10	10	10	10
Margot	65 a 80	10 a 13	21.5	3.5	12	12	12	12
Margot	80 a 90	10 a 13	21.5	3.5	13	13	13	13
Vanesa	50 a 65	10 a 13	27.5	3.5	15	15	15	15
Vanesa	50 a 65	13 a 16	27.5	3.5	12	12	12	12
Vanesa	65 a 80	10 a 13	27.5	3.5	20	20	20	20
Vanesa	65 a 80	13 a 16	27.5	3.5	15	15	15	15
Vanesa	80 a 90	10 a 13	27.5	3.5	25	25	25	25
Vanesa	80 a 90	13 a 16	27.5	3.5	19	19	19	19
Vanesa	50 a 65	10 a 13	21.5	3.5	15	15	15	15
Vanesa	50 a 65	13 a 16	21.5	3.5	12	12	12	12
Vanesa	65 a 80	10 a 13	21.5	3.5	20	20	20	20
Vanesa	65 a 80	13 a 16	21.5	3.5	15	15	15	15
Vanesa	80 a 90	10 a 13	21.5	3.5	25	25	25	25
Vanesa	80 a 90	13 a 16	21.5	3.5	19	19	19	19
Farallón	65 a 80	10 a 13	15.5	3.5	8	8	8	8
Farallón	80 a 90	10 a 13	15.5	3.5	8	8	8	8

**Fuente:** Compañía Minera Raura

#### d. Dimensionamiento de pilares

Los pilares costillas tienen como finalidad independizar los tajeos del minado mediante el método bench and fill en la etapa previa a la construcción de la planta de relleno en pasta, estos deben ser espaciados en base la longitud máxima expuesta para cada sector.

Primero se definen las dimensiones a evaluar como el alto del pilar que representa la altura del tajeo, el ancho de minado calculado en el dimensionamiento de tajeos y que se ajusta a la mineralización, el largo del tajeo que sería la máxima dimensión abierta en longitud de las aberturas adyacentes y el ancho del pilar que es el parámetro a diseñar para tener un Factor de seguridad mayor o igual a 1.2. Se detallan en la siguiente tabla.

**Tabla 25:** Dimensiones de pilar costilla

Dimensión	Unidad	Valor
Alto Pilar (H)	m	16
Ancho Pilar (W)	m	11
Ancho Minado (Wt)	m	20
Largo Tajeo (L)	m	12

**Fuente:** Compañía Minera Raura

Luego se caracterizó el macizo rocoso y se determina una profundidad media, para poder determinar en función a la geometría el esfuerzo inducido en el pilar y la resistencia del pilar.

**Tabla 26:** Parámetros de evaluación del pilar costilla

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	t/m <sup>3</sup>	3.5
Profundidad Media	m	700
Esfuerzo Vertical	MPa	19
RMR (76) - Mineral	-	65
UCS - Mineral	MPa	159

**Fuente:** Compañía Minera Raura

Los resultados aplicando las fórmulas de Lunder y Pakalnis de esfuerzo inducido, resistencia del pilar y factor de seguridad se detallan en la siguiente tabla.

**Tabla 27:** Parámetros de evaluación del pilar costilla

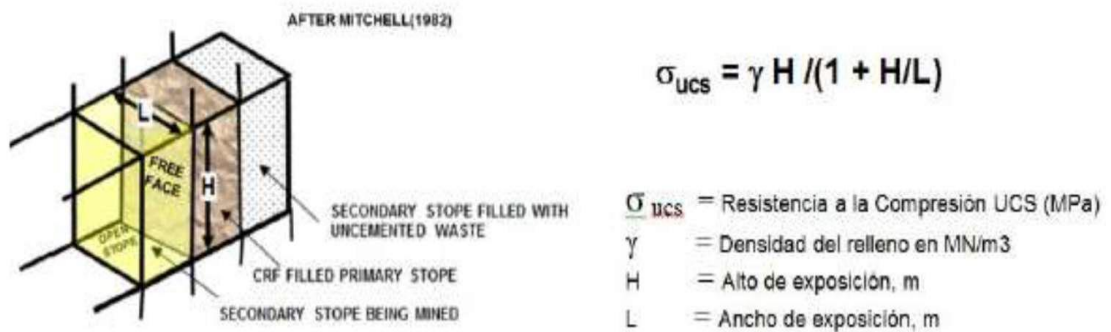
Parámetro	Unidad	Valor
Ancho equivalente (Wp)	m	14
Resistencia Pilar (Sp)	MPa	63
Esfuerzo promedio Pilar ( $\sigma_p$ )	MPa	50
Factor de Seguridad	-	1.2

**Fuente:** Compañía Minera Raura

**e. Resistencia de relleno**

Con el objetivo de validar la resistencia de relleno en pasta en el modelo elástico, se utilizan las estimaciones empíricas con el criterio de Mitchel como input para la resistencia de relleno en pasta. En el caso de las propiedades de relleno detrítico se consideró parámetros estándar de este material. Ambos materiales son modelados con el criterio de falla de Mohr - Coulomb.

**Figura 22:** *Formula empírica – Criterio de Mitchel*



Para dimensiones promedio de tajeos en el sector de profundización, con un ancho de exposición promedio de 18 m, un alto de exposición de 20 m, un peso unitario del relleno de 0.019 MN/m<sup>3</sup> y un factor de seguridad de 1.5 se tiene una resistencia de relleno requerida de 214 Kpa. Se muestran las propiedades por tipo de relleno en la siguiente Tabla.

**Tabla 28:** *Propiedades por tipo de relleno*

Parámetros		Relleno detrítico	Relleno en Pasta
Peso unitario	MN/m <sup>3</sup>	0.019	0.024
Ratio Poisson		0.30	0.35
Mod. Elasticidad	Mpa	200	1095
Cohesión	Mpa	0	0.35
Angulo Fricción	°	35	30
Resistencia a la Tracción	Mpa	0	0.1

**Fuente:** Compañía Minera Raura

En términos de esfuerzos, ambas secuencias resultaban estables; sin embargo, se determinó utilizar la secuencia de tajeos primario - secundario a que esta secuencia genera una mayor productividad. Así mismo, se validaron en

el modelo local la estabilidad de los pilares puente y la resistencia de relleno en pasta promedio requerida de 220Kpa para el caso de Hadas 1, por lo tanto, la estimación empírica queda calibrada y se recomienda las resistencias de relleno requerida por veta en la siguiente Tabla.

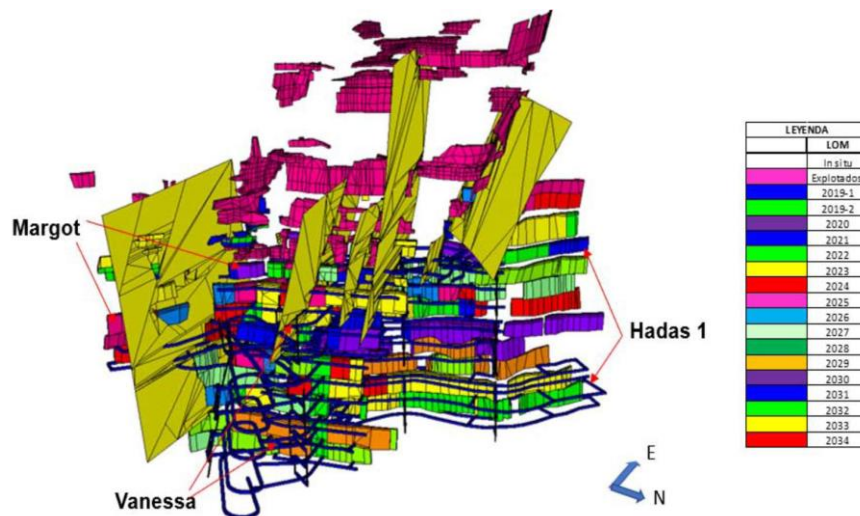
**Tabla 29:** Estimación de resistencia de relleno requerida

Zona	Método de Minado	Ancho Minado		Resistencia Relleno Requerida (Kpa)		
		Min	Máx	Min	Máx	
BOLSONADA HADAS	SLS Longitudinal	3.5	10.3	70	155	
BREKA	SLS transversal	13.0	13.0	180	180	
HADAS 1	SLS Transversal/Longitudinal	3.0	26.1	70	371	
HADAS 4	SLS Longitudinal	3.0	6.3	70	109	
HADAS 4 TECHO	SLS Longitudinal	3.0	13.6	70	184	
KAROL 1	Bench & Fill	3.0	6.1	70	107	
KATTY	Bench & Fill	3.0	9.5	70	146	
MARGOT	SLS Longitudinal	3.0	17.0	70	209	
RUBI	LSL Longitudinal	3.0	11.1	70	162	
SANTA ROSA	Bench & Fill	3.0	15.1	70	196	
SANTA ROSA NORTE	Bench & Fill	3.0	21.7	70	237	
VANESA	SLS Longitudinal	3.0	9.4	70	219	
				<i>Min/Máx</i>	70	371

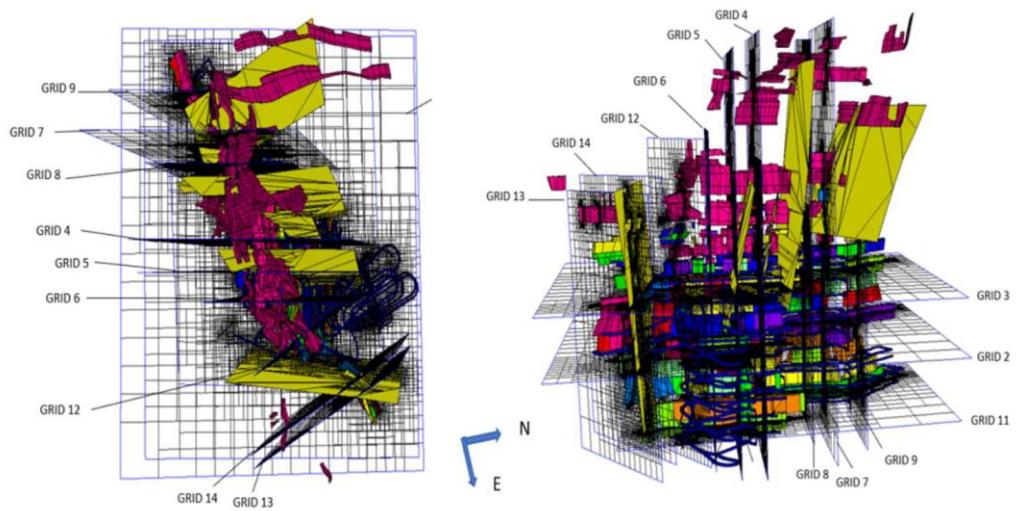
Fuente: Compañía Minera Raura

f. Modelo numérico y secuencia de minado

Figura 23: Modelo numérico 3D en las Etapas de minado.



**Figura 24:** Modelo numérico 3D y ubicación de las secciones de análisis.

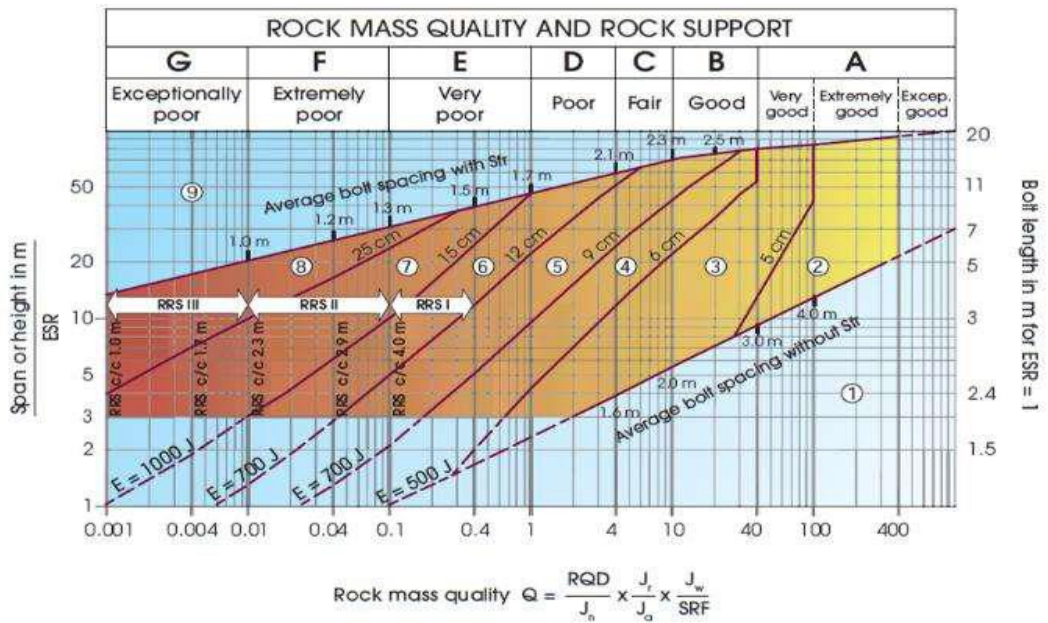


***Diseño de Sostenimiento de Labores Subterráneas en la Compañía Minera Raura***

**a. Diseño de sostenimiento**

Para realizar el cálculo de soporte en frentes de avance y tajeos de breasting y realce se aplicó el índice de calidad Q actualizado de la masa rocosa según Grimstad y Barton, 1993. Según la figura siguiente:

Figura 25: Estimación de soporte en frentes y tajeos



**Support categories**

- ① Unsupported or spot bolting
- ② Spot bolting, **SB**
- ③ Systematic bolting, fibre reinforced sprayed concrete, 5-6 cm, **B+Sfr**
- ④ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 6-9 cm, **Sfr (E500)+B**
- ⑤ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 9-12 cm + reinforced ribs of sprayed concrete and bolting, **Sfr (E700)+RRS I+B**
- ⑥ Fibre reinforced sprayed concrete >15 cm + reinforced ribs of sprayed concrete and bolting, **Sfr (E1000)+RRS II+B**
- ⑦ Cast concrete lining, **CCA** or **Sfr (E1000)+RRS III+B**
- ⑧ Special evaluation

Bolts spacing is mainly based on Ø20 mm  
 E = Energy absorption in fibre reinforced sprayed concrete  
 ESR = Excavation Support Ratio  
 Areas with dashed lines have no empirical data

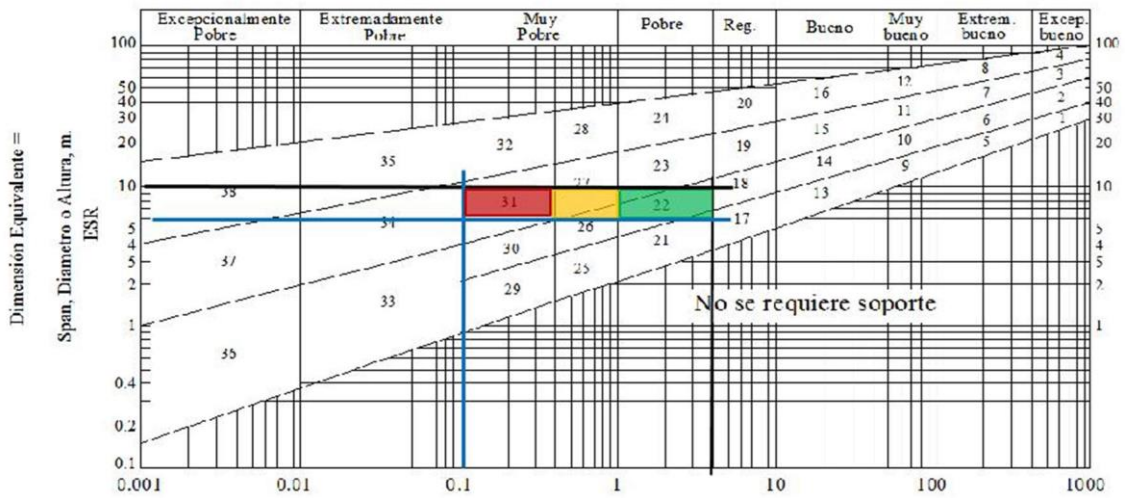
**RRS - spacing related to Q-value**

- SI30/6 Ø16 - Ø20 (span 10m)**  
D40/6+2 Ø16-20 (span 20m)
- SI35/6 Ø16-20 (span 5m)**  
**D45/6+2 Ø16-20 (span 10m)**  
D55/6+4 Ø20 (span 20m)
- D40/6+4 Ø16-20 (span 5 m)**  
**D55/6+4 Ø20 (span 10 m)**  
D70/6+6 Ø20 (span 20 m)

SI30/6 = Single layer of 6 rebars, 30 cm thickness of sprayed concrete  
 D = Double layer of rebars  
 Ø16 = Rebar diameter is 16 mm  
 c/c = RSS spacing, centre - centre

Para el criterio de sostenimiento en zonas de intersecciones se emplea el Índice de calidad Tunelera Q de Barton (1974). Ver figura 5.6.1.1.

**Figura 26: Estimación de soporte en intersecciones.**



**b. Tipo de sostenimiento**

Para la compañía minera Raura se tiene planificado de acuerdo al tipo de roca y estudio geomecánico el siguiente sostenimiento en la siguiente tabla:

**Tabla 30: Tipo de sostenimiento para las labores de Cía. Minera Raura**

Zona	COTA	TIPO	LABOR	SECCION	Tipo de pernos	Longitud de perno (pies)	Espaciamiento (mxm)	Espesor Shotcrete (pulgadas)
INFERIOR	[3500-4100]	Permanente	Rp profundización	5 x 4.5	Helicoidal	8	1.2x1.2	3
			Cámara	4 x 4	Helicoidal	8	1.5x1.5	2
		Temporal	Cámara temporal	4 x 4	Split Set	8	1.5X1.5	2
			Crucero de explotación	4 x 4	Split Set	8	1.5X1.5	2
			Rampa operativa	4 x 4	Split Set	8	1.5X1.5	2
			Nivel	4.5 x 4	Split Set	7	1.5x1.5	
			Subnivel	4 x 4	Split Set	7	1.5X1.5	
				4 x 4		8	1.5X1.5	
				4 x 4		7	1.5X1.5	
			Ventanas	4.5 x 4	Split Set	7	1.5X1.5	
By pass	4 x 4	Split Set	7	1.5X1.5				
SUPERIOR	<4100-4600]	Permanente	Cámara	3.5 x 3.5	Helicoidal	8	2 x 2	2
			Cámara temporal	3.5 x 3.5	Split Set	8	2 x 2	2
		Temporal	Crucero de explotación	3.5 x 3.5	Split Set	7	1.5 x 1.5	2
			Rampa operativa	3.5 x 3.5	Split Set	7	2x2	2
			Nivel	3.5 x 3.5	Split Set	7	2 x 2	2
			Subnivel	3.5 x 3.5	Split Set	7	2 x 2	
				3.5 x 3.5		7	2 x 2	2
				3.5 x 3.5		7	2x2	2
			Ventanas	3.5 x 3.5	Split Set	7	2 x 2	
			By pass	3.5 x 3.5	Split Set	8	2 x 2	
3.5 x 3.5	7	2x2						

Fuente: Compañía Minera Raura

### c. Evaluación geomecánica de labores temporales y permanentes

De acuerdo con lo descrito en los subcapítulos anteriores, se adopta la metodología para realizar el mapeo geomecánicos y dimensionar el tipo de sostenimiento requerido en las labores temporales y permanentes con respecto a las condiciones que se presentan en esta etapa de cuidado y mantenimiento de la mina, a continuación, se describe la clasificación geomecánica RMR y GSI y tipo de sostenimiento el cual se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla 31:** Caracterización geomecánica de labores y tipo de sostenimiento.

LABOR	VELA / CUERPO	NIVEL	VALOR RMR	GSI	TIPO RMR	CAL. DE ROCA	SOST. SEGÚN GSI	ANCHO PROGR AMADO	ALTURA PROGR AMADO	Q	ESR	ANCHO MAX CALCULADO	ALTURA MAX CALCULADO
RP663SE	Santa Rosa	490	45	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.12	2.5	6.21	6.23
VE633NE	Santa Rosa	490	51	MF/R	IIIB	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + Split set	3.5	3.5	2.18	2.4	7.82	6.55
VE665SE	Santa Rosa	490	52	MF/R	IIIA	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + Split set	3.5	3.5	2.43	2.4	8.19	6.85
VE647NE	Santa Rosa	490	38	IF/R-P	IVA	MALA	Shotcrete 2" + Malla + Split set	3.5	3.5	0.51	2.5	4.51	3.83
SN603NW	María José	490	45	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.12	2.5	6.21	5.23
VE798NW	Hadas 04	380	44	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.00	2.5	5.93	5.00
SN426EE	Hadas 04	380	45	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.12	2.5	6.21	6.23
VE718SW	Veta Karol 01	380	44	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.00	2.5	5.93	5.00
SN444EE	Veta Karol 01	380	35	IF/P	IVA	MALA	Shotcrete 2" + Malla + Hydrabolt	3.5	3.5	0.37	2.5	3.94	3.35
RP700EE	Santa Rosa Norte	380	47	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.40	2.5	6.80	5.71
VE002NN	Veta Karol 01	300	44	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.00	2.5	5.93	5.00
SN698EE	Veta Karol 01	300	48	MF/R	IIIB	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + Hydrabolt	3.5	3.5	1.56	2.5	7.11	5.97
BP645NN	Santa Rosa	380	48	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.56	2.5	7.11	5.97
CR707NE	Veta Karol 01	300	42	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	0.80	2.5	5.41	4.57
BP681NS	Veta Karol 01	300	42	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	0.80	2.5	5.41	4.57
CM831SW	Veta Karol 01	300	42	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	0.80	2.5	5.41	4.57
CM648SE	Santa Rosa	300	48	MF/R	IIIB	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	3.5	3.5	1.56	2.5	7.11	5.97
CM648NE	Santa Rosa	300	48	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	6.2	4.5	1.56	2.5	7.11	5.97
SN309WW	Hadas 01	200	48	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.56	2.5	7.11	5.97
BP370NN	Hadas 01	200	50	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.95	2.5	7.79	6.53
SN588NW	Hadas 01	150	45	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.12	2.5	6.21	5.23
SN588NE	Hadas 01	150	45	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.12	2.5	6.21	5.23
VE624SW	Hadas 01	150	50	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.95	2.5	7.79	6.53
CR640SW	Hadas 01	150	51	MF/R	IIIA	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	2.18	2.5	8.16	6.82
RP759NE	Ramal Santa Rosa	150	35	IF/P	IVA	MALA	Shotcrete 2" + Malla + Hydrabolt	3.5	3.5	0.37	2.5	3.94	3.35
GL616NN	Hadas 01	150	35	IF/P	IVA	MALA	Malla + Split set	3.5	3.5	0.37	2.5	3.94	3.35
VE629EE	Breka	150	35	IF/P	IVA	MALA	Shotcrete 2" + Malla + Hydrabolt	3.5	3.5	0.37	2.5	3.94	3.35
VE729NE	Breka	150	35	IF/P	IVA	MALA	Shotcrete 2" + Malla + Hydrabolt	3.5	3.5	0.37	2.5	3.94	3.35
CM615SW	Breka	150	35	IF/P	IVA	MALA	Shotcrete 2" + Malla + Hydrabolt	3.5	3.5	0.37	2.5	3.94	3.35
SN721SS	Breka	150	38	IF/R-P	IVA	MALA	Shotcrete 2" + Malla + Hydrabolt	3.5	3.5	0.51	2.50	4.51	3.83
VE753WW	Breka	150	35	IF/P	IVA	MALA	Shotcrete 2" + Malla + Hydrabolt	3.5	3.5	0.37	2.5	3.94	3.35

LABOR	VETA / CUERPO	NIVEL	VALOR RMR	GSI	TIPO RMR	CAL. DE ROCA	SOST. SEGÚN GSI	ANCHO PROGR AMADO	ALTURA PROGR AMADO	Q	ESR	ANCHO MAX CALCUL ADO	ALTURA MAX CALCUL ADO
SN750NW	Margot	150	46	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.25	2.5	6.49	5.46
GL667NN	Margot	150	35	IF/P	IVA	MALA	Shotcrete 2" + Malla + Hydrabolt	3.5	3.5	0.37	2.5	3.84	3.35
VE659SS	Margot	100	50	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.95	2.5	7.79	6.53
RP919NN	Margot	100	44	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.00	2.4	5.69	4.80
GL653NN	Hadas 01	100	50	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.95	2.4	7.48	6.27
VE697SS	Hadas 01	100	50	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	4.5	4.0	1.95	2.5	7.79	6.53
BP664NN	Hadas 01	100	51	MF/R	IIIA	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	4.5	4.0	2.18	2.5	8.15	6.82
RN600SE	Hadas 01	100	44	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.00	2.5	5.93	5.00
CM664NW	Hadas 01	100	51	MF/R	IIIA	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	5.2	4.5	2.18	2.5	8.15	6.82
SN574SS	Margot	100	50	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.95	2.5	7.79	6.53
SN074NN	Brunilda	050	44	MF/R	IIIA	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.00	2.5	5.93	5.00
BP728SS	Vanessa	050	50	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.95	2.5	7.79	6.53
BP626NW	Hadas 01	050	51	MF/R	IIIA	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	4.5	4.0	2.18	2.4	7.82	6.55
SN075SS	Margot	050	46	MF/R	IIIB	REGULAR	Malla + Split set	3.5	3.5	1.25	2.5	6.49	5.46
SN602SS	Hadas 01	050	51	MF/R	IIIA	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	3.5	3.5	2.18	2.5	8.15	6.82
CM867SW	Hadas 01	050	51	MF/R	IIIA	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	4.0	4.0	2.18	2.5	8.15	6.82
CR874WW	Hadas 01	050	51	MF/R	IIIA	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	4.5	4.0	2.18	2.5	8.15	6.82
CM886SE	Vanessa	050	52	MF/R	IIIA	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	3.5	3.5	2.43	2.4	8.19	6.85
CM880NE	Vanessa	000	51	MF/R	IIIA	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	4.0	4.0	2.18	2.4	7.82	6.55
CM743EE	Vanessa	000	50	MF/R	IIIB	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	3.5	3.5	1.95	2.5	7.79	6.53
CR845WW	Vanessa	000	51	MF/R	IIIA	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	3.5	3.5	2.18	2.5	8.15	6.82
CM888SW	Vanessa	000	51	MF/R	IIIA	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	4.0	4.0	2.18	2.5	8.15	6.82
CM895SE	Vanessa	000	50	MF/R	IIIB	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	3.5	3.5	1.95	2.5	7.79	6.53
CM896NW	Vanessa	000	50	MF/R	IIIB	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	4.5	4.0	1.95	2.5	7.79	6.53
RN796SE	Vanessa	000	52	MF/R	IIIA	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	4.5	4.0	2.43	2.5	8.53	7.13
CM897SW	Vanessa	000	52	MF/R	IIIA	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	4.0	4.0	2.43	2.5	8.53	7.13
CM883SW	Vanessa	000	48	MF/R	IIIA	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	4.0	4.0	1.56	2.5	7.11	5.97
CM882SE	Vanessa	000	50	MF/R	IIIB	REGULAR	Shotcrete 2" + Malla + P. Helicoidal	4.0	4.0	1.95	2.5	7.79	6.53

Fuente: Compañía Minera Raura

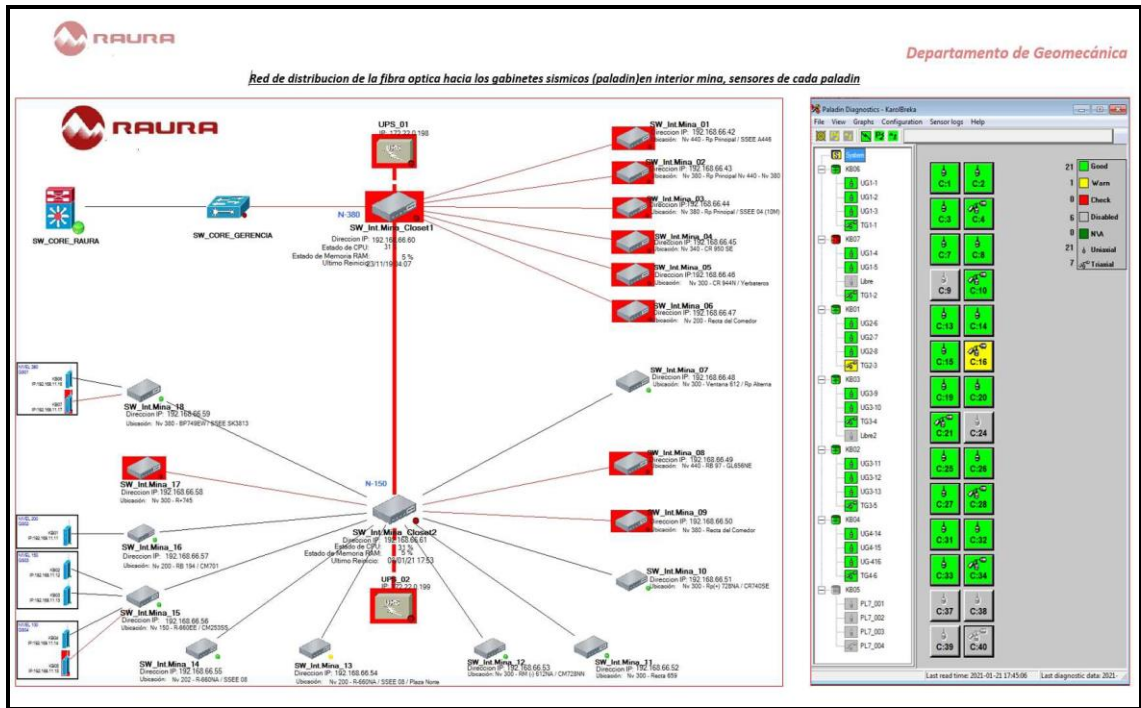
#### d. Instrumentación y monitoreo

El monitoreo sísmico aporta información relevante para establecer la eficiencia del sostenimiento para las características del macizo encontrado. La sismicidad puede comenzar con ruidos en el macizo rocoso, ello no significa que deba instalarse ya la instrumentación para el monitoreo, sino que antes se amerita una evaluación exhaustiva de la estabilidad de las excavaciones, del estado del sostenimiento, verificar si el relleno es oportuno y revisar el esquema de voladura.

Para ello Raura tiene instalado el monitoreo microsísmico es una herramienta muy útil en la prevención y control de inestabilidades potenciales en el macizo rocoso que podrían resultar en estallidos de rocas.

En la unidad minera Raura se tiene instalado 22 sensores distribuidos estratégicamente en diferentes puntos de la mina, de los cuales 06 son sensores triaxiales y 16 sensores uniaxiales, la cuales se vienen monitoreando desde el mes de noviembre de 2019.

**Figura 27: Distribución de los sensores en la Mina.**



El parámetro de nivel de riesgo se determina según el valor de magnitud momento, y se clasifica según la siguiente tabla:

**Tabla 32: Distribución de los sensores en la Mina**

Magnitud Momento (Mw)	Nivel de riesgo
-1 - 0.50	BAJO
0.51 - 2.00	MEDIO
> 2.10	ALTO

**Fuente:** Compañía Minera Raura

El parámetro de intensidad se determina según el valor de magnitud momento, y se clasifica según la siguiente tabla:

**Tabla 33: Distribución de los sensores en la Mina.**

Magnitud Momento (Mw)	Intensidad
-1 - 0.00	LEVE
0.01 - 1.00	REGULAR
1.01 - 2.00	FUERTE
2.01 - 3.00	MUY FUERTE



**Fuente:** Compañía Minera Raura

Las excavaciones mineras generan un cambio en los esfuerzos in-situ, de tal forma que se genera un nuevo estado tensional o de esfuerzos del macizo rocoso.

Los eventos microsísmicos y estallidos de roca involucran cambios inestables de energía en el macizo rocoso, también constituyen un problema en minas a profundidad y que involucran liberación y transmisión de energía desde la zona de influencia de la minería.

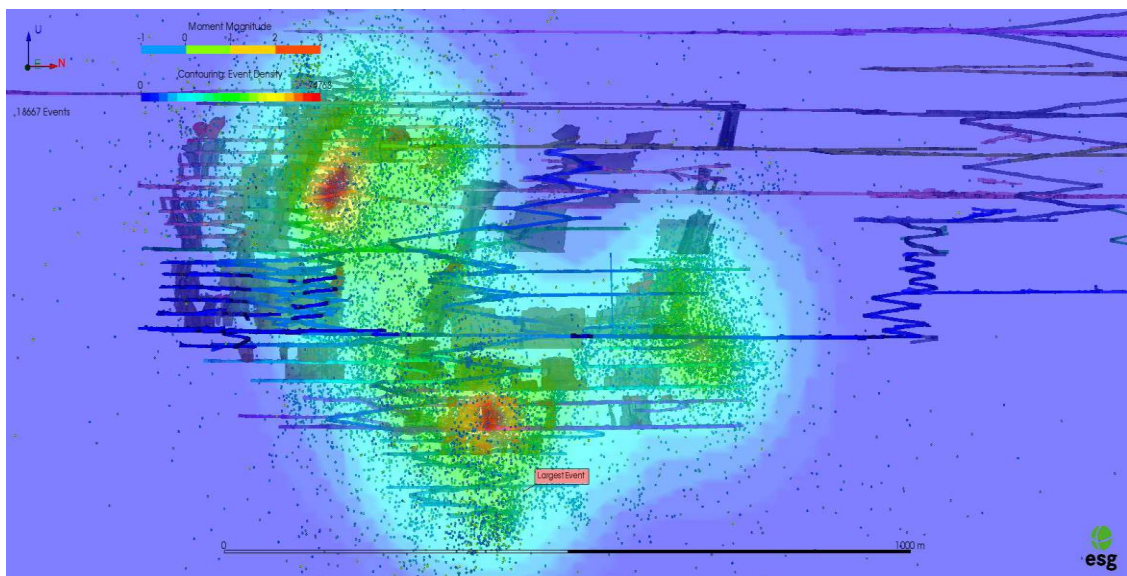
El evento microsísmico corresponde a la radiación de energía acústica en forma de ondas de terreno inducida por discontinuidad, deslizamiento o fracturamiento de roca.

El estallido de roca es el desplazamiento súbito, violento e inesperado producto de un impulso sísmico, que causa daño significativo en el contorno de la excavación.

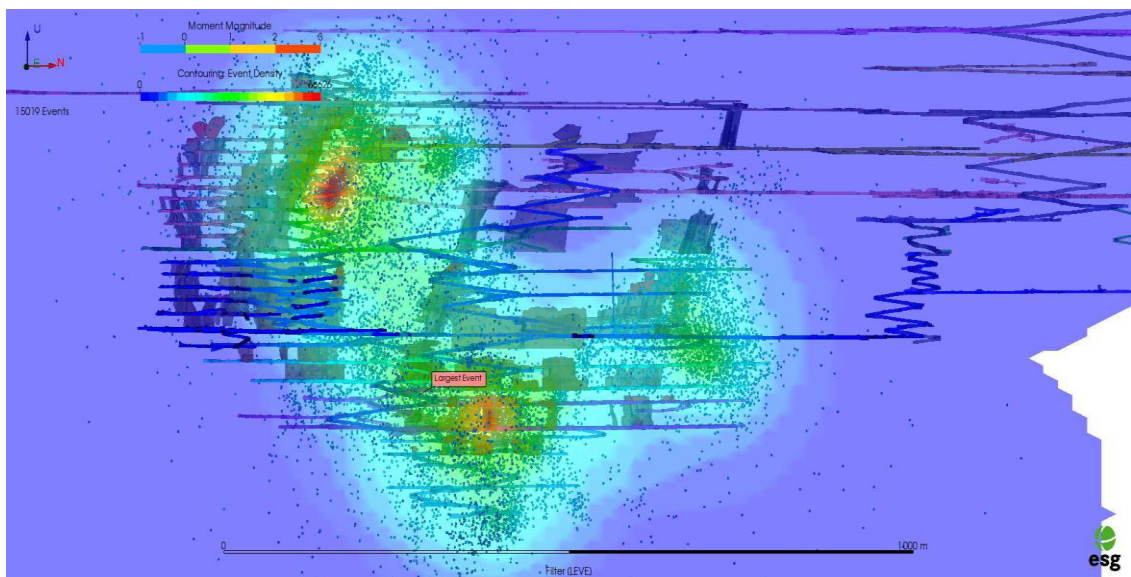
#### e. Análisis de concentración de eventos microsismicos por Mw

A continuación, se describe el análisis realizado por concentración de eventos microsísmicos, dicho análisis se detalla por magnitud del evento.

**Figura 28:** *Detalle de eventos microsísmicos en general durante la operación.*



**Figura 29:** *Detalle de eventos microsísmicos de magnitud leve durante la operación.*



### 4.3. Prueba de hipótesis

Nuestra hipótesis inicial de nuestra investigación fue como se menciona a continuación:

*“Los diseños de sostenimiento de labores subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A., teniendo las características geomecánicas serán Shotcrete, Malla electrosoldada, pernos Split Set, Pernos helicoidales, Pernos hydrabolt”.*

De nuestra investigación realizada podemos mencionar que nuestra hipótesis es válida ya que de acuerdo al estudio geomecánico evaluada durante el proceso de ejecución de la investigación se determinó que los tipos de sostenimientos utilizados son en la actualidad Shotcrete, Malla electrosoldada, pernos Split Set, Pernos helicoidales, Pernos hydrabolt, esto dependerá de acuerdo a la labor, veta, de su valor de RMR, del valor de GSI, del tipo RMR, calidad de roca tal como se puede ver en la tabla 31 de la presente investigación. Asimismo la calidad del macizo rocoso se tiene labores subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A se tiene de Normal (Regular) y Malo.

**Contrastación de la hipótesis:** Los diseños de sostenimiento de labores subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A., teniendo las características geomecánicas serán Shotcrete, Malla electrosoldada, pernos Split Set, Pernos helicoidales, Pernos hydrabolt.

**Tabla 34:** Prueba de normalidad

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>		
	Estadístico	gl	p
Tipo de sostenimiento	,506	61	,001
Calidad de Roca	,506	61	,001

a. Corrección de significación de Lilliefors

**Conclusión:** Como los datos son mayor a 50 se usa la prueba de Kolmogorov-Smirnov, asimismo analizando la normalidad nos sale  $p = 0,001$  por lo tanto podemos concluir que los datos no siguen una distribución normal ya que  $p = 0,001$  que es menor a  $<0,005$ , por tal motivo se usa una prueba no paramétrica. Por lo tanto para evaluar nuestra hipótesis utilizaremos la chi cuadrada.

**Tabla 35:** Tabla cruzada de calidad de roca/tipo de sostenimiento

Tabla cruzada Calidad de Roca*Tipo de sostenimiento							
			Tipo de sostenimiento				Total
			MALLA, SPLIT SET	SHOTCRETE, MALLA Y SPLIT SET	SHOTCRETE, MALLA Y HIDRABOLT	SHOTCRETE, MALLA Y PERNOS HELICOIDAL	
Calidad de Roca	MALA	Recuento	2a, b	1b, c	7c	0a	10
		% dentro de Calidad de Roca	20,0%	10,0%	70,0%	0,0%	100,0%
		Residuo	-3,1	,5	5,7	-3,1	
	REGULAR	Recuento	29a, b	2b, c	1c	19a	51
		% dentro de Calidad de Roca	56,9%	3,9%	2,0%	37,3%	100,0%
		Residuo	3,1	-,5	-5,7	3,1	
Total	Recuento	31	3	8	19	61	
	% dentro de Calidad de Roca	50,8%	4,9%	13,1%	31,1%	100,0%	

Cada letra del subíndice denota un subconjunto de Tipo de sostenimiento categorías cuyas proporciones de columna no difieren de forma significativa entre sí en el nivel ,05.

**Tabla 36: Prueba chi cuadrada**

<b>Pruebas de chi-cuadrado</b>			
	Valor	gl	Significación asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	36,101 <sup>a</sup>	3	<.001
Razón de verosimilitud	29,750	3	<.001
Asociación lineal por lineal	,416	1	,519
N de casos válidos	61		

a. 4 casillas (50,0%) han esperado un recuento menor que 5. El recuento mínimo esperado es ,49.

**Hipótesis estadística:**

Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): Existe una asociación significativa entre la calidad del macizo rocoso y el tipo de sostenimiento aplicado.

Hipótesis nula ( $H_0$ ): No existe asociación entre la calidad del macizo rocoso y el tipo de sostenimiento aplicado.

Para un 95% de nivel de confianza se rechaza la hipótesis nula, es decir se asevera que: Los diseños de sostenimiento de labores subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A., teniendo las características geomecánicas serán Shotcrete, Malla electrosoldada, pernos Split Set, Pernos helicoidales, Pernos hydrabolt.

**Interpretación:**

Dado que el valor de significancia es **menor a 0.001 (p o significancia asintótica < .001)**, se **rechaza la hipótesis nula** con un nivel de confianza del 99.9%.

Esto indica que existe una **asociación estadísticamente significativa** entre la **calidad del macizo rocoso (según RMR)** y el **tipo de diseño de sostenimiento utilizado** en las labores subterráneas de la Compañía Minera Raura S.A.

**¿Cómo se interpreta?**

- **p < 0.05** Rechazas la hipótesis nula, con un **95% de confianza**.
- **p > 0.005** No Rechazas la hipótesis nula , con un **95% de confianza**.

#### 4.4. Discusión de resultados

- Como se mencionó al inicio de la investigación el estudio de la geomecánica es una herramienta en la minería para la toma de decisiones en las operaciones de ello se busca lograr labores estables y seguras.
- En compañía minera Raura se realizó los ensayos de mecánica de rocas fueron realizados en el Laboratorio de mecánica de rocas de Golder Associates Perú y en el Laboratorio de mecánica de rocas de SRK.
- De los estudios se pudo determinar en el nivel 300 de la compañía minera Raura donde se aprecia que las litologías predominantes de la roca encajonante de los cuerpos y vetas en la zona Sur son el mármol, exoeskarn, intrusivo y volcánico.
- Los resultados geomecánicos de 14 niveles (Nivel 100, Nivel 100 intermedio, Nivel 150 intermedio, Nivel 150 2do intermedio, Nivel 200 1er intermedio, Nivel 200 2do intermedio, Nivel 300 3cer intermedio, Nivel 300 1er intermedio, Nivel 300 2do intermedio, Nivel 300 3cer intermedio, Nivel 300 4to intermedio, Nivel 380 base, Nivel 380 intermedio) realizados por la mina Raura en las labores de la zona Sur que involucran las estructuras mineralizadas: Farallón, Katy, Hadas, Santa rosa, Karol, Margot y Vanessa. Se observa claramente que las estructuras hacia el sur (Sector 1) como Farallón, Santa rosa, Karol y Katy presentan un RMR predominante entre 30 a 50 y las estructuras hacia el norte (Sector 2) como Hadas, Margot y Vanessa presentan un RMR entre 50 a 60.
- La compañía minera Raura ha medido las longitudes por tipo de roca se ha determinado la incidencia del tipo de roca por sector; es así como en el sector 1 el 28% de las labores actualmente presentan RMR entre 30 a 40 (predominantemente estructura mineralizada y cajas cercanas), 57% de las labores presentan RMR entre 40 a 50 (predominantemente rampas, cruceros, galerías, ventanas y cajas cercanas) y sólo un 15% de las labores con un RMR entre 50 a 60.

En la tabla 31 se puede observar el tipo de sostenimiento de acuerdo a las características geomecánicas, esto viene acompañado del tipo de veta o cuerpo de los cuales para calidad de roca mala para las vetas Santa Rosa y veta Karol 01 el tipo de sostenimiento Shotcrete + malla+ Split set, por otro lado en la misma calidad de roca mala para vetas Breka y una parte de Margot se aplica el tipo de sostenimiento Shotcrete + malla+ Hydrabolt.

En los tipos de rocas regular en las vetas Santa Rosa, se está aplicando el tipo de sostenimiento Shotcrete + malla+ Split set, para las vetas Hadas, Santa Rosa Norte, Santa Rosa, Karol 0, Hades 01, Margot se utiliza el tipo de sostenimiento Malla+ Split set.

Por otro lado en una parte de las vetas Karol 01, Santa Rosa, Ramal Santa Rosa, Breka, Hades 01 y Vaneza se utiliza el tipo de sostenimiento Malla+ pernos helicoidales.

## CONCLUSIONES

- I. La caracterización geomecánica del macizo rocoso se consolidó como un elemento determinante en el diseño y selección de sistemas de sostenimiento para labores subterráneas. El análisis detallado de parámetros fundamentales como el Rock Mass Rating (RMR), el índice Q de Barton y el Geological Strength Index (GSI) permitió diagnosticar con precisión las condiciones geotécnicas predominantes en cada sector de la Compañía Minera Raura S.A. Esta información resultó clave para orientar decisiones de diseño que optimicen la planificación minera, aumenten la estabilidad estructural y eleven los estándares de seguridad operacional.
- II. El estudio desarrollado en los 14 niveles evaluados evidenció una variación significativa de hasta 20 puntos en el índice RMR entre los diferentes sectores de la mina, lo que demuestra la naturaleza heterogénea del macizo rocoso. En el Sector Sur (Farallón, Santa Rosa, Karol y Katy), los valores de RMR fluctúan entre 30 y 50, clasificando las rocas como de calidad mala a regular; mientras que en el Sector Norte (Hadas, Margot y Vanessa), el RMR varía entre 50 y 60, correspondientes a roca de calidad regular a buena. Esta diferencia geomecánica confirma la necesidad de diseñar soluciones de sostenimiento diferenciadas y adaptadas a las condiciones específicas de cada zona para garantizar la estabilidad de las labores subterráneas.
- III. El análisis estadístico de la distribución de la calidad del macizo rocoso mostró que 28 % de las labores presentan condiciones de roca mala (RMR 30–40), 57 % condiciones regulares (RMR 40–50) y 15 % condiciones buenas (RMR 50–60). Esta caracterización cuantitativa permite optimizar la asignación de recursos geotécnicos, priorizar el refuerzo en zonas críticas y mejorar la estabilidad global del sistema subterráneo.
- IV. La correlación directa entre la calidad geomecánica del macizo rocoso y el sistema de sostenimiento implementado quedó plenamente demostrada. En zonas con roca de mala calidad, los sistemas más efectivos fueron Shotcrete + malla + Split Set o Shotcrete + malla + Hydrabolt, mientras que en sectores con roca regular o buena,

sistemas menos intensivos como Malla + Split Set o Malla + pernos helicoidales resultaron adecuados. Esta selección adaptada no solo garantiza la seguridad estructural, sino que también mejora la eficiencia técnica y económica del sostenimiento.

- V. La investigación confirma que un estudio geomecánico exhaustivo constituye un pilar fundamental para la gestión estratégica de la minería subterránea. Su aplicación permite reducir riesgos operativos, prolongar la vida útil de las excavaciones, optimizar el diseño de sostenimiento y fortalecer la toma de decisiones orientadas a la seguridad, productividad y sostenibilidad del yacimiento.

## RECOMENDACIONES

- I. Realizar campañas de caracterización geomecánica de manera continua y sistemática en todos los niveles de avance minero, con el propósito de actualizar los modelos geotécnicos del macizo rocoso y adaptar los diseños de sostenimiento a las condiciones reales del terreno, considerando la evolución temporal de las propiedades geomecánicas.
- II. Complementar los estudios geomecánicos con monitoreos geotécnicos in situ, instrumentación especializada y evaluación continua de la respuesta del terreno frente al sostenimiento implementado. Esto permitirá validar los modelos teóricos, identificar zonas de riesgo con antelación y garantizar la estabilidad estructural a largo plazo.
- III. Fortalecer la formación técnica del personal involucrado en el diseño e instalación del sostenimiento, promoviendo programas de capacitación sobre la interpretación de parámetros geomecánicos y la aplicación de tecnologías modernas. Esto asegurará que las medidas diseñadas sean ejecutadas con alta precisión y conforme a estándares internacionales.
- IV. Incorporar herramientas digitales de modelamiento geotécnico en 3D para optimizar el análisis espacial de las zonas críticas y facilitar la toma de decisiones estratégicas. La simulación tridimensional permitirá diseñar sostenimientos más precisos, mejorar la planificación minera y reducir costos asociados a intervenciones correctivas.
- V. Integrar los resultados de esta investigación en la planificación estratégica de mediano y largo plazo de la Compañía Minera Raura S.A., considerando la caracterización geomecánica como un elemento clave para la seguridad operacional, la sostenibilidad del yacimiento y la optimización económica de las labores subterráneas.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Cámara Minera del Perú. (2016). Optimización de operaciones mineras subterráneas. Perú.
- Celli, A. E., & Falcioni, F. E. (2022). Caracterización geomecánica del macizo rocoso de la Formación Santa Cruz en la zona de Condor Cliff, río Santa Cruz, Patagonia Argentina. Revista De La Asociación Geológica Argentina, . Argentina. Obtenido de Retrieved from <https://revista.geologica.org.ar/raga/art>.
- Cisterna, Carolina. (2018). Caracterización Geomecánica en faenas Subterráneas de pequeña minería, caso de estudio Mina Los Pequeños, Región de Coquimbo, Chile. Concepción Chile.
- Cotrado Laura. (2022). Caracterización geomecánica del macizo rocoso para el diseño de un sostenimiento adecuado en mina Chaparra, Caravelí, Arequipa - 2021". Lima-Perú: Universidad Tecnológica del Perú.
- Estrucplan. (2018). Minería Subterránea. Buenos Aires-Argentina.
- Herrera & Gómez . (2007 ). Diseño de Explotaciones e Infraestructuras Mineras Subterráneas. España: Universidad Politecnica de Madrid.
- IIMP. (2018). Minera Raura inició estudios para ampliar su producción. Perú: Instituto de Ingenieros del Perú.
- Lascano Fausto. (2022). Caracterización geomecánica para el diseño de sostenimiento de la abscisa 0+2100 a la 0+2400 del decline localizado en el área minera Cascabel. Ecuador.
- Lucas, Marco. (2019). Caracterización geomecánica para evaluar el sostenimiento subterráneo de la mina Huantajalla U.P. Uchucchacua Compañía Minera Buenaventura S.A.A. Pasco-Perú: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.
- Osinermin. (2017). Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas. Perú: Osinermin.
- Seguridad minera. (2013). Clasificación geomecánica de roca en minería subterránea. Perú: Seguridad minera.

Tapia Aguirre. (2019). Geomecanica: Herramienta de gestión operativa en la mina Rosaura. Perú.

Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. (2019). Reglamento de publicacion. Cerro de Pasco: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

Victor, Alfaro. (2021). Caracterización geomecánica para el diseño de sostenimiento del NV.2, mina nueva Esperanza, Consorcio Minero HNS – Algamarca, 2021. Cajamarca-Perú.

## ANEXOS

### Anexo 01: Instrumentos de Recolección de Datos

Descripción	Valor	Autor o fuente
Geotechnical Data Management System (GTDMS) - Logging Manual	Consideraciones para el logueo geotécnico de taladros diamantinos	SRK Consulting (UK), 2016
Clasificación geomecánica del macizo rocoso	RMR <sub>76</sub> , RMR <sub>89</sub> , Q	Bieniawski, 1976, 1989 Barton, 1974
Metodología para la caracterización del macizo rocoso y ensayos de laboratorio	Metodología sugerida para la descripción cuantitativa de las discontinuidades en macizos rocosos. Determinación de la resistencia de carga puntual. Determinación del contenido de agua, porosidad, densidad y propiedades relacionadas. Determinación de la resistencia de carga puntual.	ISRM, 2007
Normas para el ensayo de mecánica de rocas	C97 – Propiedades físicas. D2664 – Ensayo de compresión triaxial. D3967 – Ensayo de tracción indirecta. D5607 – Ensayo de corte directo D5731 – Ensayo de carga puntual. D7012 – Módulos elásticos.	ASTM (American Society for Testing and Materials)

Litología	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad (%)	Absorción (%)
Endoskarn	3.20	1.81	0.65
Exoskarn	3.01	1.43	0.46
Intrusivo	2.73	1.13	0.41
Mármol	2.82	0.59	0.19
Subvolcánico	2.79	2.40	0.90
Volcánico	2.71	1.70	0.60
Mineral	3.09	1.40	0.40

Litología	Cohesión (MPa)	Angulo de fricción interna (°)	mi
Endoskarn	15.82	49.65	9
Exoskarn	12.9	49.74	7
Intrusivo	28*	38.7*	10*
Mármol	13.45	52.52	11
Subvolcánico	12.61	56.78	27
Volcánico	12.61*	56.78*	27*
Mineral	18.41	56.16	12

\*Valor estimado, Fuente: Golder y PUCP, 2018

## ANEXO 02: Matriz de consistencia

### Caracterización Geomecánica para el Diseño de Sostenimiento de Labores Subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A.-2023

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Metodología
<p><b>Problema general</b> ¿Cómo influye la caracterización geomecánica del macizo rocoso en el diseño adecuado del sostenimiento de las labores subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A. durante el año 2023?</p> <p><b>Problema específico 1</b> ¿Cuál es la calidad geomecánica del macizo rocoso en las diferentes zonas de trabajo subterráneo de la Compañía Minera Raura S.A.?</p> <p><b>Problema específico 2</b> ¿Qué tipo de sostenimiento es el más apropiado según la caracterización geomecánica obtenida?</p> <p><b>Problema específico 3</b> ¿Cuáles son los parámetros geomecánicos para el diseño de sostenimiento de labores subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A.?</p>	<p><b>Objetivo general</b> Determinar la influencia de la caracterización geomecánica del macizo rocoso en el diseño adecuado del sostenimiento de las labores subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A. durante el año 2023.</p> <p><b>Objetivo específico 1</b> Determinar la calidad geomecánica del macizo rocoso en las diferentes zonas de trabajo subterráneo de la Compañía Minera Raura S.A.</p> <p><b>Objetivo específico 2</b> Establecer el tipo de sostenimiento más apropiado según la caracterización geomecánica del macizo rocoso.</p> <p><b>Objetivo específico 3</b> Identificar los parámetros geomecánicos clave para el diseño del sostenimiento en labores subterráneas</p>	<p><b>Hipótesis general</b> La caracterización geomecánica del macizo rocoso influye significativamente en el diseño adecuado del sostenimiento de las labores subterráneas en la Compañía Minera Raura S.A., permitiendo una selección más precisa y eficiente de los sistemas de soporte.</p> <p><b>Hipótesis específica 1</b> La calidad geomecánica del macizo rocoso varía en función de la zona de trabajo subterráneo, lo que incide en la necesidad de diferentes tipos de sostenimiento.</p> <p><b>Hipótesis específica 2</b> Un sostenimiento diseñado a partir de una caracterización geomecánica detallada mejora la estabilidad de las labores subterráneas y reduce los riesgos operativos.</p> <p><b>Hipótesis específica 3</b> Los parámetros geomecánicos como el RMR, Q de Barton y GSI son determinantes en el diseño del sistema de sostenimiento adecuado para cada tipo de macizo rocoso.</p>	<p><b>Variable independiente</b> Caracterización geomecánica del macizo rocoso.</p> <p><b>Variable dependiente</b> Diseño adecuado del sostenimiento de las labores subterráneas.</p>	<p><b>Paradigma,</b> Positivista</p> <p><b>Enfoque,</b> Cuantitativo</p> <p><b>Tipo,</b> Aplicada</p> <p><b>Nivel,</b> Descriptivo - Analítico</p> <p><b>Población,</b> Macizo rocoso de las labores subterráneas de la Compañía Minera Raura S.A.</p> <p><b>Muestra,</b> Sectores seleccionados de galerías, rampas y niveles representativos</p> <p><b>Prueba estadística</b> Descriptiva, Inferencial (Chi-cuadrado de Pearson)</p>

**ANEXO N° 03**  
**IMÁGENES DE LA INVESTIGACIÓN REALIZADA**



**Fotografía N° 001:** Vista de labores con sostenimiento en Compañía Minera RAURA



**Fotografía N° 002:** Vista de labores con sostenimiento en Compañía Minera RAURA



**Fotografía N° 003: Vista de labores con sostenimiento en Compañía Minera RAURA**



**Fotografía N° 004: Vista de labores con sostenimiento en Compañía Minera RAURA**



**Fotografía N° 005:** Vista de labores con sostenimeinto en Compañía Minera RAURA



**Fotografía N° 006:** Vista de labores con sostenimeinto en Compañía Minera RAURA



**Fotografía N° 007: Vista de labores con sostenimeinto en Compañía Minera RAURA**



**Fotografía N° 008: Vista de labores con sostenimeinto en Compañía Minera RAURA**