

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



T E S I S

Evaluación geomecánica para determinar el tipo de sostenimiento en tajeos de explotación en la Unidad Minera El Porvenir – Nexa Resources -2025

Para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Bach. Ivan Aimar CORNEJO QUINTANA

Asesor:

Mg. Vicente Cesar DAVILA CORDOVA

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

Evaluación geomecánica para determinar el tipo de sostenimiento en tajeos de explotación en la Unidad Minera El Porvenir – Nexa Resources -2025

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Mg. Wenceslao Julio LEDESMA VELITA
PRESIDENTE

Ing. Julio Cesar SANTIAGO RIVERA
MIEMBRO

Mg. Nelson MONTALVO CARHUARICRA
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° 029-2026

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. CORNEJO QUINTANA Ivan Aimar

Escuela de Formación Profesional
Ingeniería de Minas

Tipo de trabajo:
Tesis

Título del trabajo:
"Evaluación geomecánica para determinar el tipo de sostenimiento en tajeos de explotación en la Unidad Minera El Porvenir – Nexa Resources -2025"

Asesor:
Mg. Vicente Cesar DAVILA CORDOVA

Índice de Similitud: 3 %

Calificativo:

APROBADO

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

Cerro de Pasco, 03 de julio de 2026



Firmado digitalmente por
FERNANDEZ MALLQUI Raul FAU
20154605046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 03.07.2026 16:40:42 -05:00

DEDICATORIA

A mis padres, con todo mi amor y gratitud.

Esta tesis es el reflejo del esfuerzo, la constancia y los valores que me inculcaron desde siempre. Su apoyo incondicional, su paciencia y su fe en mí han sido el motor que hizo posible cada paso de este camino. Todo lo que hoy alcanzo se debe, en gran parte, a su ejemplo y dedicación.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más profundo agradecimiento a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, cuyo compromiso y dedicación fueron fundamentales para mi formación profesional y para el logro de mis objetivos académicos.

Mi especial reconocimiento al Mg. Edwin Sánchez Espinoza, Mg. Teodoro Santiago Almerco, Mg. Toribio García Contreras, Mg. Floro Zenteno Gómez y Mg. Julio Ledesma Velita, así como a todos los profesores que formaron parte de mi proceso de aprendizaje.

Asimismo, extendiendo mi sincero agradecimiento a mi asesor Mg. César Dávila Córdova y a los miembros del jurado calificador por su orientación, sus aportes y el valioso tiempo dedicado a la revisión y mejora de este trabajo. Su guía ha sido esencial para la culminación exitosa de esta tesis.

RESUMEN

La presente tesis tuvo como objetivo evaluar las condiciones geomecánicas de los tajeos de explotación en la Unidad Minera El Porvenir – Nexa, con el fin de determinar el tipo de sostenimiento óptimo para garantizar la estabilidad del macizo rocoso y la seguridad operacional. Para ello, se desarrolló un estudio integral basado en mapeo geomecánico, ensayos de laboratorio e interpretación de parámetros estructurales, empleando las metodologías de clasificación RMR (Rock Mass Rating), Q-System y GSI (Geological Strength Index).

Los resultados obtenidos evidenciaron que los tajeos evaluados presentan una calidad de roca entre regular y pobre, con valores de RMR entre 52 y 55, Q entre 0.78 y 0.92, y GSI entre 46 y 48. Estas condiciones geomecánicas indican la necesidad de implementar sistemas de sostenimiento que incluyan pernos Split Set, malla electrosoldada y shotcrete dosificado, conforme a las recomendaciones empíricas de Barton, Bieniawski y Hoek.

Asimismo, se realizó una prueba de hipótesis para determinar si existía diferencia significativa entre los esfuerzos estimados y la capacidad de soporte del macizo. El análisis estadístico confirmó la relación directa entre la calidad del macizo rocoso y el requerimiento de sostenimiento, lo que respalda la propuesta de diseño planteada.

Finalmente, se concluye que la aplicación del sostenimiento recomendado contribuye a mejorar la estabilidad de las excavaciones, reducir riesgos operacionales, optimizar costos y garantizar la continuidad de las labores mineras. Este estudio constituye una herramienta técnica que puede ser aplicada en futuros proyectos geomecánicos dentro de la unidad minera.

Palabras clave: Geomecánica minera, Método de sostenimiento, Tajeos de explotación y Calidad de roca (RMR).

ABSTRACT

The objective of this thesis was to evaluate the geomechanical conditions of the mining cuts at the El Porvenir – Nexa Mining Unit in order to determine the optimal type of support to ensure rock mass stability and operational safety. To this end, a comprehensive study was conducted based on geomechanical mapping, laboratory tests, and interpretation of structural parameters, using the RMR (Rock Mass Rating), Q-System, and GSI (Geological Strength Index) classification methodologies.

The results obtained showed that the evaluated cuts have rock quality ranging from fair to poor, with RMR values between 52 and 55, Q between 0.78 and 0.92, and GSI between 46 and 48. These geomechanical conditions indicate the need to implement support systems that include split set bolts, welded mesh, and shotcrete, in accordance with the empirical recommendations of Barton, Bieniawski, and Hoek.

A hypothesis test was also performed to determine whether there was a significant difference between the estimated stresses and the support capacity of the rock mass. Statistical analysis confirmed the direct relationship between rock mass quality and support requirements, which supports the proposed design.

Finally, it was concluded that the application of the recommended support contributes to improving the stability of the excavations, reducing operational risks, optimizing costs, and ensuring the continuity of mining operations. This study constitutes a technical tool that can be applied in future geomechanical projects within the mining unit.

Keywords: Mining geomechanics, Support method, Mining cuts, and Rock mass rating (RMR).

INTRODUCCIÓN

La Unidad Minera El Porvenir, anteriormente gestionada bajo la denominación de Milpo y hoy operada por Nexa Resources, constituye uno de los yacimientos polimetálicos más importantes del centro del Perú. Ubicada en la región Pasco, esta operación subterránea se caracteriza por la explotación de cuerpos mineralizados de plomo, zinc y plata alojados en un macizo rocoso de compleja geometría estructural. A lo largo de los últimos años, El Porvenir ha enfrentado desafíos crecientes vinculados a la estabilidad de los tajeos, la variabilidad geomecánica de la roca y la necesidad de optimizar sus sistemas de sostenimiento para garantizar operaciones seguras, eficientes y sostenibles.

El crecimiento de la profundización de labores, la presencia de discontinuidades y la mayor exigencia operativa han vuelto indispensable la aplicación de métodos modernos de evaluación geomecánica que permitan caracterizar adecuadamente el macizo rocoso. Sistemas como el RMR, el Q-System y análisis complementarios de calidad de roca aportan información crítica para el diseño del sostenimiento adecuado, minimizando riesgos asociados al colapso de excavaciones, sobreexcavaciones, dilución y costos no planificados.

El presente proyecto aborda una evaluación geomecánica integral en los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir, con el propósito de determinar el tipo de sostenimiento más eficiente técnica y económicamente. Este análisis se fundamenta en datos de campo, ensayos geotécnicos y procesamiento de información estructural que permiten redefinir parámetros de diseño, mejorar la seguridad operacional y contribuir a la continuidad productiva de la mina.

Asimismo, la investigación se alinea con los estándares establecidos por Nexa Resources para una minería moderna, segura y basada en criterios técnicos verificables. Al proponer un modelo de sostenimiento optimizado, se busca no solo reducir la exposición al

riesgo geomecánico, sino también incrementar la estabilidad de los tajeos, prolongar la vida útil de las excavaciones y fortalecer la toma de decisiones en la planificación minera.

En conjunto, el estudio ofrece una contribución significativa a la gestión geomecánica de la Unidad Minera El Porvenir, permitiendo avanzar hacia operaciones subterráneas más seguras, confiables y eficientes en el contexto de la industria minera peruana actual.

ÍNDICE

Página

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema	1
1.2. Delimitación de la Investigación	4
1.3. Formulación del Problema	6
1.3.1. Problema general	6
1.3.2. Problemas específicos	6
1.4. Formulación de Objetivos	6
1.4.1. Objetivo general	6
1.4.2. Objetivos específicos	7
1.5. Justificación de la Investigación	7
1.6. Limitaciones de la Investigación	10

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio	14
2.2. Bases teóricas – científicas	25
2.2.1. Geomecánica	25

2.2.2.	Sostenimiento de Excavaciones Subterráneas	28
2.2.3.	Planificación del proyecto.....	37
2.2.4.	Utilidad del análisis de proyectos	39
2.2.5.	Geología del Complejo Pasco y su Relación con la Mineralización	41
2.2.6.	Estilos de Mineralización en el Complejo Pasco	44
2.3.	Definición de términos básicos	50
2.4.	Formulación de Hipótesis.....	54
2.4.1.	Hipótesis general.....	54
2.4.2.	Hipótesis específicas	55
2.5.	Identificación de variables.....	55
2.5.1.	Variable independiente	55
2.5.2.	Variable dependiente	55
2.6.	Definición Operacional de variables e indicadores	56

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1.	Tipo de investigación	58
3.2.	Nivel de investigación	60
3.3.	Métodos de investigación	61
3.4.	Diseño de investigación.....	64
3.5.	Población y muestra	66
3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	68
3.6.1.	Técnicas de recolección de datos	68
3.7.	Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.....	71
3.8.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	74
3.7.1.	Procesamiento de datos.....	75

3.7.2. Análisis de datos	75
3.9. Tratamiento estadístico.....	76
3.10. Orientación ética filosófica y epistémica	77

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo	79
4.2. Presentación, Análisis e Interpretación de Resultados	83
4.2.1. Caracterización geomecánica del macizo rocoso	83
4.2.2. Cálculo del índice geomecánico RMR (Bieniawski, 1989).....	84
4.2.3. Cálculo del índice Q (Barton et al., 1974)	85
4.2.4. Determinación del sistema de sostenimiento	86
4.2.5. Análisis comparativo entre métodos RMR, Q y GSI.....	86
4.2.6. Validación del tipo de sostenimiento propuesto	87
4.2.7. Síntesis interpretativa.....	87
4.3. Prueba de Hipótesis	89
4.3.1. Formulación de hipótesis	89
4.3.2. Variables e indicadores para la contrastación.....	90
4.3.3. Método de contrastación	90
4.3.4. Datos empleados en la prueba.....	90
4.3.5. Cálculo de la correlación (Q vs. shotcrete).....	91
4.3.6. Prueba de significancia	92
4.3.7. Decisión	92
4.3.8. Conclusión de la prueba de hipótesis.....	93
4.4. Discusión de resultados	93

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Valores promedio de RQD para los tajeos: 820–N2 y 830–N3.....	83
Tabla 2. Resultados globales de RMR.....	84
Tabla 3. Resultados globales del Q-system	85
Tabla 4. Valores promedio de RMR, Q y GSI para los tajeos: 820–N2 y 830–N3.....	86
Tabla 5. Operacionalización de las variables.....	90
Tabla 6. Calidad geomecánica	91
Tabla 7. Sostenimiento recomendado (según Q y RMR)	91

ÍNDICE DE GRÁFICO

	Página
Gráfico 1. Índice RMR por Tajeos: 820-N2 y 830-N3.....	88
Gráfico 2. Índice Q por Tajeos: 820-N2 y 830-N3.....	89
Gráfico 3. Índice GSI por Tajeos: 820-N2 y 830-N3	89
Gráfico 4. Cantidad de anclajes Ensayados Vs. Cumplimiento (%).....	109
Gráfico 5. Promedio mensual de Carga aplicada (Tn) Vs. Desplazamiento (mm).....	109
Gráfico 6. Promedio de resultados de ensayos en roca tipo III A – III B.....	110
Gráfico 7. Cantidad de ensayos por labor.....	110
Gráfico 8. Promedio de resultados de ensayos por zona (TRIMESTRE).....	111
Gráfico 9. Promedio de resultados de ensayos por cuerpo	111

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Cantidad de anclajes instalados Vs. Ensayados	109
Cuadro 2. Cantidad de ensayos en roca tipo III A – III B	110
Cuadro 3. Cantidad de ensayos por labor (agosto)	110
Cuadro 4. Cantidad de ensayos por zona (TRIMESTRE)	111
Cuadro 5. Cantidad de ensayos por cuerpo (TRIMESTRE).....	111

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Empresa Minera Milpo.....	5
Figura 2. Pernos de fricción “split set”	32
Figura 3. Corresponde a un ensayo de extracción (Pull Test) realizado sobre un perno de sostenimiento tipo Split Set instalado en una labor subterránea.....	34
Figura 4. Corresponde a un manómetro hidráulico ENERPAC, instrumento utilizado para medir la presión hidráulica generada por la bomba durante la ejecución de un ensayo de extracción (Pull Test) en pernos de sostenimiento, como los Split Set, Swellex o pernos cementados	35
Figura 5. <i>Cuerpo 10, paralelo a la falla 13, en el tajo San Gerardo.</i>	46
Figura 6. Brecha tectónica con clastos de galena y esfalerita; cuerpo 23.....	48
Figura 7. Pórfido Santa Bárbara, con alteración fílica y desarrollo stockwork con venillas de cuarzo tipo A y mineralización económica de Mo, Cu y Au.....	50

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

La minería subterránea constituye uno de los pilares fundamentales del desarrollo económico del Perú, debido a su significativa contribución al producto bruto interno, la generación de empleo y la producción de minerales metálicos de importancia estratégica. No obstante, las operaciones subterráneas enfrentan permanentemente problemas asociados con la estabilidad del macizo rocoso, especialmente en las labores de explotación, donde las excavaciones están sometidas a complejos estados de esfuerzos inducidos por la extracción del mineral, la presencia de discontinuidades geológicas, estructuras de falla, zonas de alteración hidrotermal y variaciones en las propiedades geomecánicas de la roca. Estas condiciones incrementan considerablemente la probabilidad de ocurrencia de inestabilidades, tales como desprendimientos de roca (rock falls), deformaciones excesivas, convergencias de las excavaciones e incluso colapsos parciales o totales de los tajeos, comprometiendo la continuidad operacional y la seguridad del personal.

En la Unidad Minera El Porvenir, operada por Nexa Resources, la explotación de cuerpos mineralizados mediante métodos de minado subterráneo se desarrolla en condiciones geológicas y geomecánicas variables, donde el comportamiento del macizo rocoso representa uno de los principales factores que condicionan la estabilidad de las excavaciones. Durante el desarrollo de las operaciones se han registrado eventos recurrentes de inestabilidad asociados principalmente a una caracterización geomecánica insuficiente del terreno y a la implementación de sistemas de sostenimiento que, en determinados sectores, no responden de manera óptima a las condiciones estructurales y mecánicas reales del macizo rocoso. Esta problemática genera impactos directos sobre la eficiencia operativa, reflejados en sobreexcavaciones, incremento del consumo de materiales de sostenimiento, mayores costos de rehabilitación de labores, paralizaciones no programadas, disminución de la productividad y aumento del riesgo de accidentes por caída de rocas.

Uno de los aspectos críticos identificados corresponde al empleo del sistema de sostenimiento conformado por pernos de fricción tipo Omega Bolt complementados con malla electrosoldada, cuya eficiencia depende no solo de sus características mecánicas, sino también de la calidad del macizo rocoso, del grado de fracturamiento, de la orientación de las discontinuidades, de la magnitud de los esfuerzos in situ y del estricto cumplimiento de los procedimientos de instalación. En la práctica se han evidenciado limitaciones relacionadas con el abastecimiento oportuno de los elementos de sostenimiento, variabilidad en los parámetros de instalación, deficiencias en el control de calidad durante su implementación y una insuficiente adecuación del diseño del soporte a las diferentes clasificaciones geomecánicas presentes en los tajeos de explotación. Como consecuencia, la capacidad del sostenimiento para controlar las deformaciones y garantizar la estabilidad estructural de las excavaciones se ve

comprometida, afectando tanto la seguridad de los trabajadores como la continuidad de las operaciones mineras.

Adicionalmente, la ausencia de una evaluación geomecánica integral que integre parámetros tales como el índice de calidad del macizo rocoso (RMR), el índice Q de Barton, el Índice de Resistencia Geológica (GSI), las propiedades resistentes de la roca intacta, la orientación y persistencia de las discontinuidades, así como la distribución de los esfuerzos inducidos por la explotación, limita la posibilidad de seleccionar el sistema de sostenimiento más eficiente para cada condición geológica. Esta situación conduce, en muchos casos, a la aplicación de diseños estandarizados que no reflejan las características particulares del terreno, incrementando la probabilidad de fallas geomecánicas y reduciendo la eficiencia técnica y económica de la operación minera.

Desde el punto de vista de la ingeniería geomecánica, resulta indispensable desarrollar una evaluación detallada del comportamiento del macizo rocoso que permita establecer criterios técnicos para la selección, diseño y optimización de los sistemas de sostenimiento, garantizando un adecuado factor de seguridad, la estabilidad de los tajeos y la continuidad de la producción. Una correcta correlación entre la clasificación geomecánica del macizo y el diseño del sostenimiento constituye una herramienta fundamental para reducir los riesgos operacionales, optimizar el consumo de materiales, minimizar los costos de mantenimiento y fortalecer las condiciones de seguridad y salud ocupacional dentro de la mina.

En este contexto, la presente investigación pretende determinar la relación existente entre las características geomecánicas del macizo rocoso y la eficiencia de los sistemas de sostenimiento utilizados en los tajeos de explotación de la Unidad Minera

El Porvenir, con el propósito de proponer la alternativa de sostenimiento técnicamente más adecuada para las condiciones geológicas presentes en la operación.

En función de lo expuesto, se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué sistema de sostenimiento resulta técnicamente más adecuado para garantizar la estabilidad geomecánica de los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir, considerando las características geológicas, estructurales y geomecánicas del macizo rocoso?

1.2. Delimitación de la Investigación

Con la finalidad de establecer el alcance de la presente investigación y definir claramente el ámbito en el que se desarrolló el estudio, se han considerado la delimitación espacial y la delimitación temporal, las cuales se describen a continuación:

A. Delimitación espacial

La presente investigación se desarrolló en la Unidad Minera El Porvenir, operada por Compañía Minera Milpo S.A.A. – Nexa Resources, ubicada en el distrito de Yanacancha, provincia y región Pasco, Perú. El estudio está enfocado específicamente en los tajeos de explotación subterránea donde se emplean sistemas de sostenimiento para garantizar la estabilidad del macizo rocoso durante las operaciones de extracción del mineral.

Figura 1. *Empresa Minera Milpo*



B. Delimitación Temporal

La presente investigación se circunscribe al período comprendido entre enero y diciembre del año 2024, considerando la información geológica, geomecánica, operativa y técnica generada durante dicho intervalo en la Unidad Minera El Porvenir. El estudio utilizó los registros de mapeo geomecánico, clasificaciones del macizo rocoso, reportes de estabilidad de excavaciones, diseños e instalación de sistemas de sostenimiento, así como la información operativa y económica disponible correspondiente a este período.

La elección del año 2024 responde a que representa un periodo con información actualizada, suficiente y confiable para evaluar el comportamiento geomecánico de los tajeos de explotación y el desempeño del sistema de sostenimiento implementado en la unidad minera. Asimismo, permite analizar las condiciones reales de operación bajo las cuales se desarrollaron las actividades de explotación, considerando las variaciones geológicas, estructurales y los criterios técnicos empleados para el diseño e implementación del sostenimiento.

La delimitación temporal garantiza que los resultados obtenidos reflejen las condiciones operativas vigentes durante el periodo de estudio, permitiendo formular propuestas de mejora técnicamente fundamentadas para optimizar la estabilidad geomecánica de las excavaciones subterráneas y contribuir al fortalecimiento de la seguridad, la continuidad operativa y la eficiencia de la explotación minera.

1.3. Formulación del Problema

1.3.1. Problema general

¿Cuál es el tipo de sostenimiento más adecuado para los tajeos de explotación en la Unidad Minera El Porvenir – Nexa Resources, a partir de una evaluación geomecánica realizada en el año 2025?

1.3.2. Problemas específicos

- a) ¿Qué características geomecánicas presenta el macizo rocoso en las zonas de explotación de la Unidad Minera El Porvenir?
- b) ¿Qué tipo de sostenimiento se ajusta mejor a las condiciones geomecánicas identificadas, considerando la estabilidad, seguridad y eficiencia operativa?

1.4. Formulación de Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Realizar una evaluación geomecánica en los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir – Nexa Resources, con el fin de determinar el tipo de sostenimiento más adecuado que garantice la estabilidad del macizo rocoso y la seguridad operativa en el año 2025.

1.4.2. Objetivos específicos

- a) Clasificar el macizo rocoso en las zonas de explotación mediante métodos geomecánicos reconocidos (RMR, Q de Barton, entre otros) para identificar las condiciones geotécnicas actuales.
- b) Proponer el tipo de sostenimiento óptimo para cada zona evaluada, considerando criterios técnicos, económicos y de seguridad operativa.

1.5. Justificación de la Investigación

A. Justificación económica

La estabilidad geomecánica de las excavaciones subterráneas constituye uno de los principales factores que condicionan la eficiencia técnica y económica de una operación minera. La selección adecuada del sistema de sostenimiento, basada en una caracterización confiable del macizo rocoso, permite optimizar la utilización de recursos materiales, humanos y financieros destinados al sostenimiento de las labores de explotación.

Una evaluación geomecánica integral posibilita diseñar sistemas de sostenimiento acordes con las condiciones reales del terreno, evitando tanto el sobredimensionamiento del soporte —que incrementa innecesariamente los costos por consumo de pernos, mallas, shotcrete, cables y mano de obra especializada— como el subdimensionamiento, que incrementa la probabilidad de inestabilidades geomecánicas, desprendimientos de roca, rehabilitación de excavaciones, paralizaciones de producción y pérdidas económicas derivadas de daños en equipos e infraestructura minera.

Asimismo, la optimización del diseño del sostenimiento contribuye a incrementar la disponibilidad operativa de los tajeos, mejorar la continuidad del ciclo de minado, reducir costos de mantenimiento y disminuir los tiempos

improductivos asociados a trabajos de rehabilitación. En consecuencia, los resultados de la investigación permitirán establecer criterios técnicos que contribuyan a una gestión más eficiente de los recursos económicos de la Unidad Minera El Porvenir, incrementando la productividad y la rentabilidad de la operación.

B. Justificación social

La seguridad y salud ocupacional constituyen principios fundamentales en la minería moderna, debido a que las operaciones subterráneas presentan riesgos inherentes asociados a la inestabilidad del macizo rocoso y a la ocurrencia de caídas de roca (rock fall), una de las principales causas de accidentes graves y fatales en minería.

La presente investigación contribuirá a mejorar las condiciones de seguridad de los trabajadores mediante la identificación de los sistemas de sostenimiento más adecuados para cada condición geomecánica, permitiendo reducir la probabilidad de accidentes ocasionados por fallas del terreno y fortaleciendo las medidas preventivas dentro de la gestión de riesgos geomecánicos.

Del mismo modo, la implementación de sistemas de sostenimiento técnicamente optimizados favorecerá el desarrollo de ambientes de trabajo más seguros, incrementando la confianza del personal, disminuyendo la exposición a peligros geotécnicos y promoviendo el cumplimiento de la normativa nacional sobre seguridad y salud ocupacional en minería. En este sentido, la investigación posee una importante contribución social al priorizar la protección de la vida, la integridad física y el bienestar de los trabajadores, fortaleciendo además la cultura de prevención y la responsabilidad social empresarial.

C. Justificación ambiental

La minería sostenible exige que las actividades de explotación incorporen criterios de gestión ambiental y geotécnica orientados a prevenir impactos negativos sobre el entorno. En este contexto, la estabilidad de las excavaciones subterráneas constituye un elemento esencial para evitar eventos de inestabilidad que puedan afectar la integridad de las labores mineras y generar impactos ambientales indirectos.

La aplicación de una evaluación geomecánica adecuada permitirá seleccionar sistemas de sostenimiento eficientes que reduzcan la ocurrencia de derrumbes, subsidencias, deformaciones excesivas y procesos de inestabilidad que puedan comprometer la infraestructura minera o generar alteraciones en el macizo rocoso.

Asimismo, la optimización del diseño del sostenimiento contribuirá a racionalizar el consumo de acero, concreto proyectado, resinas y otros materiales empleados durante las operaciones mineras, favoreciendo un uso más eficiente de los recursos y disminuyendo la generación de residuos asociados a la rehabilitación de excavaciones. De esta manera, la investigación se alinea con los principios del desarrollo sostenible y de la minería responsable, promoviendo una explotación más eficiente, segura y ambientalmente responsable.

D. Justificación metodológica

Desde el punto de vista metodológico, la presente investigación desarrollará una evaluación geomecánica integral basada en procedimientos técnicos ampliamente aceptados por la comunidad científica y la industria minera internacional, permitiendo obtener resultados objetivos, verificables y reproducibles.

Para la caracterización del macizo rocoso se emplearán metodologías reconocidas, entre ellas la clasificación Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski, el sistema Q de Barton, el análisis de discontinuidades estructurales, el registro geomecánico de campo, el levantamiento geológico-estructural y la evaluación de las propiedades geomecánicas de la roca intacta y del macizo rocoso. Complementariamente, se analizará el comportamiento de los sistemas de sostenimiento instalados mediante la comparación entre las condiciones geomecánicas observadas y los criterios de diseño utilizados en la operación.

La aplicación integrada de estas metodologías permitirá establecer una relación técnica entre la calidad del macizo rocoso y el desempeño del sostenimiento, proporcionando información confiable para la toma de decisiones en el diseño geomecánico de los tajeos de explotación. Asimismo, la metodología propuesta podrá ser utilizada como referencia para investigaciones futuras y para la optimización de sistemas de sostenimiento en otras operaciones de minería subterránea con características geológicas similares, fortaleciendo el desarrollo del conocimiento científico y la ingeniería geomecánica aplicada.

1.6. Limitaciones de la Investigación

La presente investigación se desarrollará considerando determinadas limitaciones de carácter técnico, operativo y metodológico que podrían influir en el alcance de los resultados obtenidos. No obstante, estas limitaciones no comprometen la validez científica del estudio, ya que serán abordadas mediante procedimientos metodológicos adecuados y el uso de información confiable.

A. Acceso restringido a la información técnica

Una de las principales limitaciones corresponde al acceso a información técnica de carácter confidencial perteneciente a la Unidad Minera El Porvenir,

operada por Nexa Resources. Documentos como reportes geomecánicos, bases de datos de instrumentación, modelos geológicos tridimensionales, planos actualizados de labores, registros históricos de estabilidad, diseños de sostenimiento e informes técnicos internos pueden estar sujetos a políticas corporativas de confidencialidad, restringiendo su utilización durante el desarrollo de la investigación. Esta situación podría limitar el análisis comparativo con estudios anteriores y la evaluación de determinados sectores de la operación minera.

B. Variabilidad geológica y geomecánica del macizo rocoso

El macizo rocoso presenta un comportamiento naturalmente heterogéneo debido a las variaciones litológicas, estructurales y geomecánicas existentes dentro de la mina. La presencia de fallas, fracturas, diaclasas, zonas de cizallamiento, alteraciones hidrotermales y cambios en el estado de esfuerzos genera diferencias significativas en la calidad del macizo rocoso entre los distintos niveles y tajeos de explotación.

Esta variabilidad dificulta la extrapolación de los resultados obtenidos a toda la unidad minera, siendo necesario que las conclusiones se interpreten dentro del contexto geológico y geomecánico específico de las áreas evaluadas.

C. Limitación temporal del estudio

La investigación comprenderá el análisis de la información correspondiente al período enero–diciembre de 2024, por lo que la evaluación representa las condiciones geomecánicas y operativas observadas durante dicho intervalo. En consecuencia, el estudio no contempla el seguimiento del comportamiento del sostenimiento a largo plazo ni las modificaciones que puedan producirse

posteriormente debido al avance de la explotación, redistribución de esfuerzos o cambios en las condiciones geológicas de la mina.

Por ello, los resultados y recomendaciones estarán referidos exclusivamente al período de estudio y a las condiciones existentes durante la ejecución de la investigación.

D. Restricciones operativas y de seguridad

El desarrollo de los trabajos de campo estará condicionado por la programación operativa de la Unidad Minera El Porvenir y por el estricto cumplimiento de los protocolos de seguridad establecidos por la empresa. El acceso a determinados niveles, tajeos activos o labores en desarrollo dependerá de las autorizaciones correspondientes, de las condiciones de estabilidad de las excavaciones y de las restricciones propias de la operación minera.

Asimismo, factores como la ventilación, los horarios de producción, las actividades de perforación y voladura, así como las inspecciones de seguridad, podrían limitar la disponibilidad de tiempo para la ejecución de las observaciones geomecánicas y el levantamiento de información en campo.

E. Disponibilidad de recursos técnicos y tecnológicos

La calidad y profundidad del análisis estarán condicionadas por la disponibilidad de equipos de medición geotécnica, instrumentos de levantamiento geomecánico, software especializado para el procesamiento y modelamiento de datos, así como por el acceso a bases de datos técnicas y al apoyo de personal especializado en geomecánica.

Si bien se utilizarán herramientas reconocidas y procedimientos técnicos estandarizados, algunas evaluaciones avanzadas, como el modelamiento numérico tridimensional o el monitoreo instrumental continuo del comportamiento del

macizo rocoso, podrían verse limitadas por la disponibilidad de recursos tecnológicos y económicos durante el desarrollo de la investigación.

En conjunto, estas limitaciones no afectan la confiabilidad de los resultados, ya que la investigación se sustentará en metodologías científicas reconocidas, información técnica verificable y procedimientos de análisis acordes con las mejores prácticas de la ingeniería geomecánica. Los hallazgos obtenidos constituirán una base sólida para la optimización de los sistemas de sostenimiento en los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir y servirán como referencia para futuras investigaciones en minería subterránea.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

A. Antecedentes Internacionales

Galve, J. P., Gutiérrez, F., Guerrero, J., Alonso, J. y Diego, I. (2012), en su investigación titulada "Application of risk analysis, cost-benefit analysis and acceptability analysis to determine the most suitable geosynthetic solution for mitigating sinkhole damage on roads", desarrollaron una metodología cuantitativa para seleccionar la alternativa de mitigación más eficiente frente al riesgo de formación de socavones en infraestructura vial construida sobre terrenos kársticos.

La investigación integró modelos probabilísticos de ocurrencia de socavones, análisis de estabilidad geotécnica, evaluación del riesgo económico y humano, análisis costo-beneficio y criterios de aceptabilidad social para comparar diferentes configuraciones de geomallas de refuerzo. Asimismo, incorporó un análisis de sensibilidad que permitió evaluar la influencia de la incertidumbre en las variables geotécnicas sobre los resultados obtenidos.

Los resultados demostraron que la integración del análisis geotécnico con herramientas de evaluación económica y gestión del riesgo permite seleccionar soluciones técnicamente seguras y económicamente rentables. Los autores concluyen que la metodología puede adaptarse a otros problemas geológicos, tales como deslizamientos, caída de rocas, subsidencia y estabilidad de excavaciones.

Este antecedente constituye un aporte importante para la presente investigación, ya que demuestra la importancia de relacionar la caracterización geomecánica del terreno con la selección del sistema de sostenimiento más eficiente desde los puntos de vista técnico y económico.

Ogundipe et al. (2023) desarrollaron la investigación titulada "Selection of Safety and Cost Optimized Geostabilization Technique for Soft Clay Slopes", cuyo objetivo fue determinar la técnica de estabilización más eficiente para taludes contruidos sobre depósitos de arcillas blandas, considerando simultáneamente la seguridad estructural, los costos de implementación y los criterios de sostenibilidad.

Para ello emplearon el método de elementos finitos mediante el software Plaxis 2D, evaluando siete alternativas de estabilización bajo condiciones secas y saturadas, incluyendo reducción de pendiente, drenaje, jet grouting y combinaciones entre estas técnicas. Posteriormente realizaron un análisis multicriterio considerando el factor de seguridad, costos de construcción, confiabilidad, facilidad constructiva e impacto ambiental.

Los resultados evidenciaron que únicamente las alternativas con factores de seguridad superiores a 1,50 cumplieron los criterios internacionales de estabilidad. Aunque la reducción de pendiente presentó mayores costos iniciales, fue seleccionada como la alternativa óptima debido a su elevada confiabilidad

estructural y menor impacto ambiental, mientras que otras alternativas mostraron menores costos, pero también menor desempeño técnico.

Este estudio evidencia la importancia de integrar criterios geotécnicos, económicos y ambientales durante el diseño de sistemas de estabilización, enfoque que resulta aplicable al análisis de los sistemas de sostenimiento en minería subterránea.

Bruno, M. S. (2001), en su estudio titulado "Geomechanics and Decision Analysis for Mitigating Compaction-Related Casing Damage", analizó los mecanismos de daño que experimentan las tuberías de revestimiento en campos petroleros afectados por procesos de compactación del yacimiento y subsidencia superficial.

La investigación utilizó modelos geomecánicos bidimensionales y tridimensionales basados en el método de elementos finitos para simular la deformación del terreno y evaluar distintos escenarios de falla. Paralelamente, incorporó modelos económicos de árboles de decisión para comparar diversas estrategias de mitigación considerando incertidumbres geológicas, operativas y económicas.

Los resultados demostraron que los modelos numéricos permiten predecir adecuadamente los riesgos de deformación y optimizar las estrategias de mitigación, concluyendo que, dependiendo del nivel de riesgo y del análisis económico, en determinados casos resulta más conveniente aceptar el riesgo que modificar completamente el diseño estructural.

Este antecedente aporta fundamentos metodológicos para la presente investigación al demostrar la importancia de integrar el análisis geomecánico con

herramientas de evaluación técnica y económica en la selección de alternativas de sostenimiento.

Bea, R. (2006) desarrolló la investigación denominada "Reliability and Human Factors in Geotechnical Engineering", orientada a ampliar la aplicación de los métodos probabilísticos de confiabilidad en ingeniería geotécnica incorporando factores humanos, organizacionales y de incertidumbre en la toma de decisiones.

El estudio plantea que la confiabilidad de un sistema geotécnico no depende exclusivamente de la variabilidad natural del terreno ni de la precisión de los modelos matemáticos, sino también de aspectos relacionados con la calidad de la información, la experiencia del personal técnico, los procesos organizacionales y los procedimientos constructivos.

Los resultados muestran que la incorporación de análisis de confiabilidad permite optimizar el diseño geotécnico, reducir riesgos operacionales y mejorar la toma de decisiones mediante la evaluación integral de costos, beneficios y niveles aceptables de riesgo.

La investigación constituye un importante referente para el presente estudio, ya que resalta la necesidad de incorporar criterios de confiabilidad durante la evaluación de sistemas de sostenimiento en minería subterránea.

Jager y Ryder (1999) desarrollaron una investigación sobre sostenimiento dinámico en minas profundas de Sudáfrica, donde evaluaron el comportamiento de diferentes sistemas de soporte sometidos a eventos sísmicos inducidos por la explotación minera.

Los autores analizaron el desempeño de sostenimientos rígidos convencionales frente a sistemas dinámicos capaces de absorber grandes cantidades de energía, utilizando información proveniente de minas con elevados niveles de esfuerzo y

frecuentes fenómenos de rockburst. El estudio incluyó la evaluación del comportamiento de pernos dinámicos, cables de anclaje, mallas deformables y sistemas híbridos diseñados para disipar energía.

Los resultados demostraron que los sostenimientos dinámicos presentan un desempeño significativamente superior al de los sistemas rígidos tradicionales, debido a su capacidad para absorber deformaciones repentinas sin perder estabilidad estructural. Asimismo, evidenciaron una reducción considerable en la ocurrencia de daños a las excavaciones y en los accidentes asociados con desprendimientos de roca.

Los autores concluyen que el diseño del sostenimiento debe considerar no solo la resistencia del macizo rocoso, sino también las condiciones dinámicas generadas por la redistribución de esfuerzos durante la explotación minera. Este antecedente constituye una referencia técnica de gran importancia para la presente investigación, ya que respalda la necesidad de seleccionar sistemas de sostenimiento acordes con las condiciones geomecánicas específicas de los tajeos de explotación en la Unidad Minera El Porvenir, con el fin de mejorar la estabilidad de las excavaciones, incrementar la seguridad operacional y optimizar la eficiencia del proceso de explotación minera.

B. Antecedentes Nacionales

Zorrilla (2014), en la tesis titulada "La seguridad en el sostenimiento con criterios geomecánicos en la excavación subterránea de la Central Hidroeléctrica Cerro del Águila", tuvo como objetivo establecer estándares de seguridad para el diseño e implementación del sostenimiento en excavaciones subterráneas, utilizando criterios geomecánicos que permitieran optimizar la estabilidad del

macizo rocoso y reducir los riesgos asociados a la construcción de túneles de gran envergadura.

La investigación se desarrolló mediante la caracterización geomecánica del macizo rocoso empleando metodologías ampliamente aceptadas en ingeniería de rocas, como la clasificación Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski, el sistema Q de Barton y el análisis estructural de discontinuidades. Asimismo, evaluó la influencia de estos parámetros en la selección del sistema de sostenimiento y en el comportamiento mecánico de las excavaciones subterráneas.

Los resultados evidenciaron que la aplicación sistemática de criterios geomecánicos permite seleccionar de manera objetiva el sostenimiento más adecuado para cada condición del terreno, incrementando la estabilidad de las excavaciones, reduciendo la ocurrencia de fallas estructurales y disminuyendo significativamente los costos derivados del sobredimensionamiento o del uso inadecuado de elementos de sostenimiento.

La autora concluye que la geomecánica constituye una herramienta indispensable para el diseño moderno de excavaciones subterráneas, al proporcionar información técnica confiable para la toma de decisiones durante las etapas de diseño, construcción y operación. Este antecedente respalda la presente investigación al demostrar que la caracterización geomecánica es el principal criterio para optimizar el sostenimiento en labores mineras subterráneas.

Bojórquez (2012), en la tesis doctoral denominada "Implementación de un Sistema de Información Geomecánica en la Estabilidad Subterránea en la Mina Huanzalá", tuvo como objetivo diseñar e implementar un sistema de información que permitiera organizar, almacenar y gestionar de manera integrada la

información geomecánica utilizada en el control de la estabilidad de las excavaciones subterráneas.

La metodología consistió en desarrollar una base de datos estructurada que integró información referente a clasificaciones geomecánicas (RMR y Q), mapeos estructurales, monitoreo de convergencias, registros de sostenimiento y eventos geotécnicos, facilitando el análisis permanente del comportamiento del macizo rocoso.

Los resultados demostraron que la implementación del sistema permitió mejorar significativamente la gestión de la información geomecánica, optimizando la identificación de zonas críticas, reduciendo los tiempos de respuesta frente a condiciones de inestabilidad y fortaleciendo la toma de decisiones técnicas relacionadas con el sostenimiento de las labores.

El autor concluye que la incorporación de herramientas informáticas especializadas constituye un elemento estratégico para la gestión geomecánica moderna, permitiendo incrementar la seguridad, la continuidad operativa y la eficiencia de las operaciones mineras subterráneas. Este estudio aporta fundamentos metodológicos para la presente investigación, al evidenciar la importancia de disponer de información geomecánica organizada y actualizada para el diseño de sistemas de sostenimiento.

Burgos (2016), en la tesis de maestría titulada "Desarrollo de Herramienta de Diseño para la Estabilidad de Excavaciones con Entrada de Personal", tuvo como objetivo desarrollar una metodología de diseño que integrara métodos empíricos y análisis numéricos para evaluar la estabilidad de excavaciones subterráneas destinadas al tránsito permanente de trabajadores.

La investigación combinó las clasificaciones geomecánicas RMR y Q de Barton con modelos numéricos basados en el método de elementos finitos, considerando variables como la resistencia del macizo rocoso, el estado de esfuerzos, la orientación de las discontinuidades y las cargas inducidas por la excavación.

Los resultados evidenciaron que la integración de metodologías empíricas y numéricas mejora significativamente la precisión del diseño geomecánico, permitiendo identificar sectores con mayor susceptibilidad a la inestabilidad y definir sistemas de sostenimiento más eficientes y seguros. Asimismo, se determinó que las excavaciones con ingreso permanente de personal requieren factores de seguridad superiores a los empleados en labores convencionales.

El autor concluye que las herramientas integradas de diseño geomecánico representan una alternativa eficaz para optimizar la estabilidad de las excavaciones y reducir los riesgos operacionales. Este antecedente fortalece la presente investigación al sustentar la necesidad de emplear metodologías integrales en la selección del sostenimiento de los tajeos de explotación.

Mamani (2018), en la tesis titulada "Clasificación Geomecánica para el Diseño de Sostenimiento en la Galería Principal – Contrata Minera Peyols, U.E.A. Ana María", tuvo como objetivo establecer criterios técnicos para el diseño del sostenimiento mediante la aplicación de sistemas de clasificación geomecánica del macizo rocoso.

Para ello realizó un levantamiento geomecánico detallado utilizando el Rock Quality Designation (RQD), el sistema Rock Mass Rating (RMR), el sistema Q de Barton y el Geological Strength Index (GSI), complementados con el análisis estructural de discontinuidades y observaciones de campo.

Los resultados demostraron que la aplicación conjunta de estas metodologías permitió determinar con mayor precisión el tipo, longitud, espaciamiento y densidad de los elementos de sostenimiento requeridos para cada condición geomecánica. Asimismo, identificó que las zonas con baja calidad del macizo requerían sistemas reforzados mediante pernos de mayor longitud, mallas metálicas y concreto lanzado, mientras que las zonas competentes podían estabilizarse mediante sostenimientos convencionales con menores costos.

El autor concluye que la clasificación geomecánica constituye la base técnica para el diseño racional del sostenimiento, permitiendo optimizar la seguridad y la eficiencia económica de las operaciones subterráneas. Este antecedente guarda una estrecha relación con la presente investigación, debido a que emplea los mismos criterios geomecánicos para la selección del sostenimiento.

Rosado (2019) desarrolló una investigación orientada a evaluar la influencia de los procesos hidrogeológicos sobre el comportamiento geomecánico del macizo rocoso en la mina Zoila, analizando especialmente el efecto de la infiltración de agua subterránea en la estabilidad de las excavaciones.

La metodología integró estudios geológicos, hidrogeológicos y geomecánicos mediante el análisis de permeabilidad, presión de poros, nivel freático, estructuras geológicas y propiedades mecánicas del macizo rocoso, permitiendo establecer la relación existente entre las condiciones hidrogeológicas y la pérdida de resistencia de la roca.

Los resultados demostraron que la presencia de agua subterránea modifica significativamente las propiedades resistentes del macizo rocoso, favoreciendo procesos de meteorización, reducción de la cohesión, disminución de la resistencia al corte e incremento del riesgo de desprendimientos y fallas geomecánicas.

El autor concluye que el diseño del sostenimiento debe incorporar no solo parámetros geomecánicos tradicionales, sino también variables hidrogeológicas que influyen directamente en el comportamiento del macizo rocoso. Este antecedente aporta una perspectiva integral a la presente investigación, al resaltar la importancia de considerar las condiciones hidrogeológicas durante la evaluación geomecánica y la selección del sistema de sostenimiento en la Unidad Minera El Porvenir.

C. Antecedente Local

En la tesis titulada "Evaluación de los instrumentos de gestión en seguridad y salud ocupacional para minimizar los riesgos en la operación de sostenimiento y refuerzo del macizo rocoso con el Scissor Bolter E.E. Maclean S.A. – Minera Atacocha, Pasco – 2019", el autor tuvo como objetivo evaluar la influencia de los instrumentos del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional (SSO) en la reducción de los riesgos laborales durante las actividades de sostenimiento y refuerzo del macizo rocoso ejecutadas con equipos mecanizados tipo Scissor Bolter.

La investigación se desarrolló en la Unidad Minera Atacocha, con la participación de la Empresa Especializada Maclean S.A., mediante un enfoque aplicado que analizó la implementación de los instrumentos de gestión de seguridad, tales como la identificación de peligros, evaluación y control de riesgos (IPERC), procedimientos escritos de trabajo seguro (PETS), inspecciones de seguridad, capacitaciones, permisos de trabajo, supervisión operacional y cumplimiento de la normativa vigente en materia de Seguridad y Salud en el Trabajo.

Los resultados demostraron que la adecuada implementación del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional permitió reducir significativamente la ocurrencia de accidentes e incidentes durante las operaciones de sostenimiento del macizo rocoso. Asimismo, se evidenció que la aplicación sistemática de herramientas preventivas fortaleció la cultura de seguridad, mejoró el control de los riesgos geomecánicos y operacionales, disminuyó la exposición de los trabajadores a condiciones inseguras y favoreció una mayor continuidad de las operaciones mineras.

El autor concluye que los instrumentos de gestión en Seguridad y Salud Ocupacional constituyen elementos fundamentales para la prevención de accidentes en las actividades de sostenimiento y refuerzo del macizo rocoso, debido a que permiten identificar oportunamente los peligros, implementar controles efectivos y garantizar el cumplimiento de los estándares técnicos y legales establecidos para la minería subterránea. Asimismo, sostiene que la integración entre la gestión preventiva y las operaciones de sostenimiento contribuye a incrementar la productividad, reducir costos asociados a incidentes y fortalecer la seguridad operacional.

Este antecedente guarda una estrecha relación con la presente investigación, ya que evidencia que la eficiencia de un sistema de sostenimiento no depende únicamente de las características geomecánicas del macizo rocoso y del diseño estructural del soporte, sino también de la adecuada gestión de los riesgos durante su instalación y mantenimiento. En consecuencia, sus resultados respaldan la necesidad de integrar criterios geomecánicos con herramientas de gestión de seguridad para optimizar la estabilidad de las excavaciones subterráneas y garantizar condiciones seguras de trabajo en la Unidad Minera El Porvenir.

2.2. Bases teóricas – científicas

2.2.1. Geomecánica

La geomecánica es la rama de la ingeniería que estudia el comportamiento mecánico de los suelos y macizos rocosos sometidos a diferentes estados de esfuerzo, deformación y condiciones ambientales, con el propósito de evaluar su estabilidad y establecer criterios técnicos para el diseño seguro de excavaciones, cimentaciones y obras subterráneas. En minería subterránea, constituye una disciplina esencial porque permite comprender la respuesta del macizo rocoso frente a las perturbaciones generadas por la excavación, facilitando la selección del método de explotación y del sistema de sostenimiento más adecuado.

Según Bieniawski (1989), la geomecánica integra conocimientos de geología estructural, mecánica de rocas, resistencia de materiales y mecánica del medio continuo para evaluar la calidad del macizo rocoso mediante parámetros cuantificables que permitan estimar su comportamiento durante la excavación.

Por su parte, Hoek y Brown (2019) señalan que el análisis geomecánico constituye la base del diseño moderno de excavaciones subterráneas, debido a que permite estimar los mecanismos potenciales de falla, las deformaciones esperadas y el comportamiento estructural del macizo rocoso bajo diferentes condiciones de esfuerzo.

Desde el punto de vista operativo, la geomecánica proporciona herramientas para evaluar la estabilidad de túneles, galerías, rampas, cruceros y tajeos de explotación, permitiendo diseñar sistemas de sostenimiento que garanticen la seguridad del personal y la continuidad de las operaciones mineras.

A. Estudios geomecánicos

Los estudios geomecánicos pueden clasificarse en estudios globales y locales.

Los estudios globales comprenden la caracterización integral del yacimiento, incluyendo la identificación de unidades geotécnicas, dominios estructurales, distribución de esfuerzos, propiedades geomecánicas de las rocas y zonificación geomecánica de toda la operación minera.

Los estudios locales corresponden a evaluaciones específicas realizadas directamente en las labores mineras conforme avanza la explotación. Estos estudios permiten actualizar continuamente las condiciones reales del macizo rocoso, considerando cambios estructurales, presencia de agua, alteraciones hidrotermales, redistribución de esfuerzos, fallas geológicas y variaciones litológicas.

En la práctica minera moderna, ambos estudios son complementarios y constituyen la base para el diseño del sostenimiento y la planificación de las labores subterráneas.

B. Componentes de un estudio geomecánico

Un estudio geomecánico comprende, entre otros aspectos:

- Caracterización geológica y estructural del macizo rocoso.
- Levantamiento de discontinuidades.
- Determinación de propiedades geomecánicas de la roca intacta.
- Clasificación geomecánica mediante los sistemas RMR, Q de Barton y GSI.
- Evaluación del estado de esfuerzos.
- Análisis cinemático de fallas potenciales.
- Modelamiento numérico cuando las condiciones lo requieran.
- Diseño del sistema de sostenimiento.
- Monitoreo geotécnico de las excavaciones.
- Elaboración de planos de zonificación geomecánica.

- Recomendaciones operativas y Procedimientos Escritos de Trabajo Seguro (PETS).

Asimismo, deben evaluarse variables como la orientación de las discontinuidades, resistencia de las juntas, espaciamiento, persistencia, rugosidad, alteración, presencia de agua, profundidad de explotación, geometría de las excavaciones y secuencia de minado.

C. Marco normativo

En el Perú, el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (D.S. N.º 024-2016-EM) establece la obligatoriedad de realizar evaluaciones geomecánicas permanentes en todas las labores subterráneas, exigiendo que las recomendaciones de sostenimiento sean elaboradas por profesionales competentes y actualizadas conforme avance la explotación minera.

Asimismo, la Guía de Criterios Geomecánicos para la Elaboración del Plan de Minado publicada por Osinergmin establece los lineamientos técnicos para la caracterización del macizo rocoso y el diseño del sostenimiento en minería subterránea.

D. Importancia de la geomecánica

La geomecánica constituye actualmente uno de los pilares de la minería subterránea moderna, ya que permite:

- Reducir accidentes por caída de roca.
- Optimizar el diseño del sostenimiento.
- Disminuir costos de rehabilitación.
- Incrementar la productividad.
- Mejorar la planificación minera.
- Reducir incertidumbres geotécnicas.

- Garantizar la estabilidad de las excavaciones.
- Prolongar la vida útil de las labores.
- Cumplir la normativa de seguridad minera.

En consecuencia, la geomecánica representa una herramienta científica indispensable para el desarrollo de operaciones mineras seguras, eficientes y sostenibles.

2.2.2. Sostenimiento de Excavaciones Subterráneas

El sostenimiento es el conjunto de elementos estructurales instalados en una excavación subterránea con la finalidad de controlar las deformaciones del macizo rocoso, mantener la estabilidad de la excavación y garantizar condiciones seguras para el desarrollo de las operaciones mineras.

Según Brady y Brown (2006), el sostenimiento no tiene como finalidad soportar completamente el peso de la roca, sino controlar su deformación, redistribuir los esfuerzos y aprovechar la capacidad autoportante del macizo rocoso.

El diseño del sostenimiento depende principalmente de:

- Calidad geomecánica del macizo rocoso.
- Estado de esfuerzos.
- Método de explotación.
- Dimensiones de la excavación.
- Presencia de agua.
- Tiempo de exposición.
- Profundidad de explotación.
- Riesgo sísmico.
- Vida útil de la excavación.

Actualmente, el diseño del sostenimiento combina métodos empíricos, observacionales y numéricos utilizando clasificaciones RMR, Q y GSI, además de modelos tridimensionales mediante programas especializados como FLAC3D, RS2, Phase2 y 3DEC.

El objetivo del sostenimiento moderno consiste en lograr un equilibrio entre seguridad, economía y productividad.

A. Shotcrete reforzado con fibras (Fiber Reinforced Shotcrete – FRS)

El shotcrete reforzado con fibras constituye uno de los sistemas de sostenimiento superficial más utilizados en minería subterránea y construcción de túneles debido a su elevada capacidad para controlar desprendimientos de roca y absorber energía generada por deformaciones del macizo.

Según Rym Msate (s.f.), el FRS representa una evolución tecnológica del concreto proyectado convencional, incorporando fibras metálicas o sintéticas que incrementan significativamente su resistencia residual, ductilidad y capacidad de absorción de energía.

El desarrollo del Nuevo Método Austriaco para la Construcción de Túneles (NATM) impulsó el empleo del shotcrete como elemento estructural activo, mientras que la incorporación posterior de fibras permitió mejorar considerablemente su comportamiento post-fisuración.

Las principales ventajas del FRS son:

- Mayor capacidad de absorción de energía.
- Incremento de la resistencia residual.
- Mejor control de fisuración.
- Mayor durabilidad.
- Disminución del rebote.

- Eliminación parcial o total del uso de mallas.
- Rapidez de aplicación.
- Reducción de costos de mantenimiento.

El comportamiento del FRS se evalúa mediante ensayos normalizados como:

- ASTM C1550.
- ASTM C1609.
- EN 14488.
- EFNARC.

Estos ensayos permiten determinar la energía absorbida, resistencia residual, comportamiento post-fisuración y capacidad estructural del revestimiento.

Actualmente, el shotcrete reforzado con fibras constituye uno de los principales sistemas de sostenimiento en minería de alta productividad.

B. Pernos Split Set y capacidad de anclaje

Los pernos Split Set, desarrollados por Scott, son elementos de sostenimiento pasivo ampliamente utilizados en minería subterránea debido a su facilidad de instalación, rapidez de colocación y capacidad para proporcionar soporte inmediato al macizo rocoso.

Su funcionamiento se basa en el principio de anclaje por fricción. El perno consiste en un tubo de acero ranurado longitudinalmente que, al ser introducido mediante percusión en un taladro de diámetro ligeramente inferior, genera presión radial contra las paredes de la perforación, desarrollando resistencia por fricción desde el instante de su instalación.

La eficiencia del Split Set depende de diversos factores, entre ellos:

- Longitud efectiva de anclaje (LEA).
- Diámetro del taladro.

- Rugosidad de las paredes del taladro.
- Calidad del macizo rocoso.
- Estado de fracturamiento.
- Corrosión del acero.
- Calidad de instalación.

El desempeño del perno se verifica mediante ensayos de extracción (Pull Test), los cuales permiten determinar la capacidad real de carga instalada. En el Perú, el D.S. N.º 024-2016-EM, modificado por el D.S. N.º 023-2017-EM, establece que las unidades mineras deben realizar pruebas periódicas de extracción como parte del control de calidad del sostenimiento.

Los pernos Split Set presentan ventajas importantes, como la rapidez de instalación, bajo costo, soporte inmediato y facilidad de mecanización. No obstante, también presentan limitaciones relacionadas con su susceptibilidad a la corrosión, menor capacidad de carga frente a pernos cementados y dependencia de la calidad del taladro y de las condiciones geomecánicas del macizo rocoso.

Por estas razones, la selección de este sistema debe sustentarse en una adecuada evaluación geomecánica que considere la calidad del terreno, las condiciones de esfuerzo y el nivel de estabilidad requerido en cada excavación subterránea.

Figura 2. Pernos de fricción “split set”



- La evaluación experimental se desarrolló utilizando pernos Split Set instalados en la zona alta de la Unidad Minera El Porvenir S.A.C., operada por Nexa Resources, específicamente en el Nivel 3790 (-280), Crucero (CX) 016, sector seleccionado por presentar condiciones geomecánicas representativas de un macizo rocoso altamente fracturado. De acuerdo con la caracterización geomecánica realizada en campo, el macizo corresponde a una clasificación Muy Fracturado/Regular (MF/R), con un Rock Mass Rating (RMR básico) comprendido entre 43 y 47, equivalente a una calidad de roca regular según el Geological Strength Index (GSI) modificado. Litológicamente, el sector está conformado por calizas negras con diferentes grados de alteración, atravesadas por sistemas de diaclasas paralelas y transversales al eje de la excavación, condición que genera una elevada susceptibilidad a la inestabilidad y constituye un escenario apropiado para evaluar el comportamiento y la capacidad de anclaje de los pernos Split Set.
- Con el propósito de determinar la resistencia al arrancamiento (Pull-Out Capacity) y verificar la eficiencia del sistema de sostenimiento instalado, se ejecutaron ensayos de extracción (Pull Test) siguiendo los

procedimientos técnicos establecidos por la operación minera y la normativa vigente para el control de calidad del sostenimiento. Estos ensayos permitieron evaluar el desempeño del perno bajo condiciones reales de servicio y determinar la influencia de las características geomecánicas del macizo rocoso sobre su capacidad de anclaje.

- Para la ejecución de las pruebas se empleó el siguiente equipo especializado:
 - Cilindro hidráulico ENERPAC con capacidad nominal de 20 toneladas, utilizado para aplicar la carga de extracción sobre el perno.
 - Bomba hidráulica manual equipada con manómetro calibrado de 10 000 psi, destinada al control y registro de la presión aplicada durante el ensayo.
 - Castillo metálico tipo trípode, diseñado para transmitir la carga de extracción de manera uniforme y garantizar la estabilidad del sistema durante las pruebas.
 - Vernier digital de precisión para la medición de desplazamientos y dimensiones del elemento de sostenimiento.
 - Flexómetro metálico para la verificación de longitudes y distancias de instalación.
 - Pintura en aerosol (spray) utilizada para la identificación y marcación de los pernos evaluados, asegurando la trazabilidad de los ensayos realizados.

El empleo de este equipamiento permitió obtener mediciones confiables y reproducibles sobre el comportamiento mecánico de los pernos Split Set, proporcionando información técnica para evaluar la efectividad del sistema de

sostenimiento en función de las condiciones geomecánicas presentes en la Unidad Minera El Porvenir.

Figura 3. *Corresponde a un ensayo de extracción (Pull Test) realizado sobre un perno de sostenimiento tipo Split Set instalado en una labor subterránea*



El presente estudio comprende la evaluación del comportamiento mecánico de los pernos de fricción tipo Split Set, con una longitud efectiva de anclaje (LEA) de 7 pies (2,13 m), instalados en condiciones geomecánicas representativas de la Unidad Minera El Porvenir. La investigación considera la ejecución de ensayos de extracción (Pull Test) tanto en condiciones controladas como en campo, con el propósito de determinar la capacidad de anclaje y verificar el desempeño estructural del sistema de sostenimiento bajo condiciones reales de operación.

Asimismo, el estudio incluye el análisis de la relación existente entre la carga de tracción aplicada y la deformación (desplazamiento) experimentada por el perno

durante el ensayo, permitiendo obtener la correspondiente curva carga–desplazamiento. A partir de esta información se identificará la carga máxima de extracción o carga pico, el comportamiento elástico y plástico del elemento de sostenimiento, así como los mecanismos de falla asociados al deslizamiento por fricción o pérdida de capacidad de anclaje.

Adicionalmente, los resultados obtenidos serán analizados en función de las características geomecánicas del macizo rocoso, considerando parámetros como la clasificación Rock Mass Rating (RMR), el grado de fracturamiento, la calidad de la roca y las condiciones de instalación del perno. Esto permitió evaluar la eficiencia del sistema de sostenimiento y establecer criterios técnicos para optimizar su aplicación en los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir.

Figura 4. *Corresponde a un manómetro hidráulico ENERPAC, instrumento utilizado para medir la presión hidráulica generada por la bomba durante la ejecución de un ensayo de extracción (Pull Test) en pernos de sostenimiento, como los Split Set, Swellex o pernos cementados*



El estudio considera el análisis de la relación entre la carga de tracción aplicada y el desplazamiento experimentado por el perno, permitiendo obtener la curva carga–desplazamiento, identificar el comportamiento elástico y plástico del elemento de sostenimiento, así como determinar la carga máxima de extracción (carga pico) y el mecanismo de falla asociado al anclaje por fricción.

Asimismo, la investigación contempla la validación experimental del comportamiento no lineal desarrollado por los pernos Split Set durante los ensayos de extracción, determinando la evolución de su capacidad de anclaje en función de la longitud efectiva de anclaje y estableciendo el valor asintótico de resistencia, a partir del cual un incremento adicional en la longitud del perno no produce mejoras significativas en la capacidad portante del sistema de sostenimiento.

Para garantizar la confiabilidad de los resultados, toda la información obtenida durante los ensayos fue registrada mediante formatos estandarizados de campo y posteriormente procesada utilizando hojas de cálculo y herramientas de análisis técnico. Las presiones registradas por el manómetro hidráulico certificado ENERPAC fueron corregidas y convertidas a cargas reales de extracción mediante la correspondiente curva de calibración del equipo, asegurando la precisión de los valores utilizados en el análisis.

El estudio se limita exclusivamente a la evaluación de pernos de fricción tipo Split Set de 39,5 mm de diámetro, instalados en la zona alta de la Unidad Minera El Porvenir, específicamente en un macizo rocoso clasificado como Muy Fracturado–Regular (MF/R). En consecuencia, no se incluyen evaluaciones correspondientes a otros sistemas de sostenimiento, tales como concreto lanzado (shotcrete), pernos resinados, cables de anclaje, Swellex u otros elementos de

refuerzo, ni se consideran condiciones geomecánicas diferentes a las existentes en el área objeto de estudio.

2.2.3. Planificación del proyecto

La planificación del proyecto constituye uno de los procesos fundamentales dentro de la gestión de proyectos, debido a que establece las bases para alcanzar los objetivos propuestos mediante la definición organizada de actividades, recursos, tiempos, costos y mecanismos de control. Más que una etapa específica del ciclo de vida del proyecto, la planificación debe entenderse como un proceso continuo, sistemático y dinámico que acompaña todas las fases de su desarrollo, permitiendo responder oportunamente a los cambios e incertidumbres que puedan surgir durante la ejecución.

De acuerdo con el Project Management Institute (PMI, 2021), la planificación comprende la elaboración de un conjunto de planes que orientan la ejecución, el monitoreo y el control del proyecto, definiendo el alcance, cronograma, presupuesto, calidad, recursos, comunicaciones, riesgos, adquisiciones e involucramiento de los interesados. En consecuencia, una planificación adecuada constituye la principal herramienta para reducir la incertidumbre, optimizar el uso de los recursos y aumentar la probabilidad de éxito del proyecto.

Durante el desarrollo de un proyecto es frecuente que se produzcan modificaciones derivadas de cambios en el entorno, restricciones operativas, disponibilidad de recursos, riesgos imprevistos o nuevas necesidades de los interesados. Por ello, la planificación no debe concebirse como un documento rígido e invariable, sino como un instrumento de gestión flexible que facilite la actualización permanente de la información y la toma de decisiones oportunas.

Desde una perspectiva metodológica, la planificación comprende dos momentos fundamentales:

A. Fase de preinversión o viabilidad

Antes de autorizar la ejecución de un proyecto es indispensable realizar estudios que permitan determinar su viabilidad técnica, económica, financiera, ambiental y social. Durante esta fase se desarrollan estudios de mercado, análisis técnicos, estimaciones de costos, cronogramas preliminares, evaluación de riesgos, análisis de alternativas y estudios de rentabilidad, cuyo propósito es proporcionar información objetiva para decidir si el proyecto debe ejecutarse.

Asimismo, en esta etapa se identifican los recursos humanos, materiales, tecnológicos y financieros necesarios para la implementación del proyecto, permitiendo estimar la inversión requerida y evaluar su sostenibilidad en el tiempo.

B. Fase de ejecución

Una vez aprobada la inversión, se procede a la elaboración del plan detallado de ejecución, el cual organiza todas las actividades necesarias para alcanzar los objetivos establecidos. En esta fase se desarrollan el cronograma definitivo, la programación de recursos, la secuencia lógica de actividades, el presupuesto de ejecución, los planes de control y los mecanismos de seguimiento del desempeño.

Uno de los errores más frecuentes en la gestión de proyectos consiste en iniciar la ejecución sin haber concluido adecuadamente la etapa de planificación. Esta situación puede generar retrasos, sobrecostos, conflictos entre actividades, deficiencias en la asignación de recursos y dificultades para controlar el avance físico y financiero del proyecto. En consecuencia, una planificación rigurosa constituye el principal soporte para garantizar una ejecución eficiente y ordenada.

La planificación implica lograr un equilibrio entre la organización de los recursos disponibles y la gestión de la incertidumbre inherente a todo proyecto. En este sentido, debe caracterizarse por su capacidad de adaptación frente a cambios internos y externos, permitiendo ajustar oportunamente los planes sin comprometer el cumplimiento de los objetivos estratégicos.

Actualmente, existen diversas herramientas informáticas que facilitan la planificación y programación de proyectos, entre las que destacan Microsoft Project, Primavera P6, Oracle Primavera Cloud, diagramas de Gantt, redes PERT/CPM y metodologías basadas en la Gestión del Valor Ganado (Earned Value Management), las cuales permiten optimizar el seguimiento del cronograma, el control de costos y la gestión de riesgo.

En consecuencia, la planificación representa un proceso estratégico que integra aspectos técnicos, económicos, organizacionales y administrativos, permitiendo maximizar la eficiencia durante todo el ciclo de vida del proyecto.

2.2.4. Utilidad del análisis de proyectos

El análisis de proyectos constituye una herramienta técnica, económica y financiera utilizada para evaluar la conveniencia de ejecutar una inversión, mediante el estudio sistemático de los beneficios esperados, los costos asociados, los riesgos existentes y la rentabilidad potencial del proyecto. Su finalidad principal es proporcionar información objetiva que facilite la toma de decisiones por parte de inversionistas, entidades financieras y organizaciones responsables de la ejecución.

Desde el punto de vista económico, el análisis de proyectos permite comparar diferentes alternativas de inversión, identificar la opción que genera mayor valor y determinar si los beneficios futuros justifican los recursos comprometidos. Asimismo,

facilita la identificación de posibles pérdidas, costos de oportunidad y escenarios de riesgo que podrían afectar la viabilidad del proyecto.

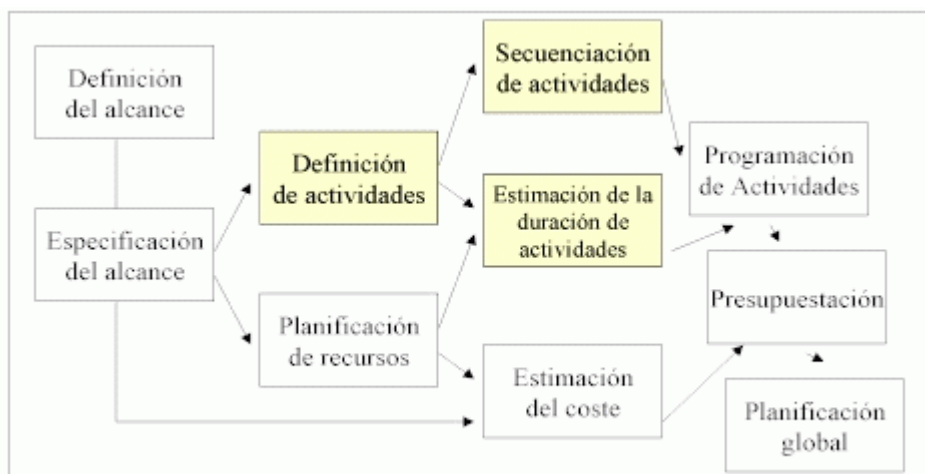
La evaluación financiera constituye uno de los componentes más importantes del análisis de proyectos, ya que permite estimar la capacidad del proyecto para generar beneficios económicos mediante indicadores ampliamente aceptados, tales como:

- Flujo de caja proyectado.
- Valor Actual Neto (VAN).
- Tasa Interna de Retorno (TIR).
- Relación Beneficio/Costo (B/C).
- Período de recuperación de la inversión (Payback).
- Punto de equilibrio.
- Análisis de sensibilidad y escenarios.

Estos indicadores permiten determinar la rentabilidad del proyecto y evaluar su comportamiento frente a posibles variaciones en costos, ingresos, tasas de descuento y condiciones del mercado.

Además de la evaluación financiera, el análisis de proyectos incorpora criterios técnicos, ambientales, sociales y de sostenibilidad, especialmente en proyectos de infraestructura, minería e ingeniería, donde la rentabilidad debe estar acompañada del cumplimiento de estándares de seguridad, protección ambiental y responsabilidad social.

Diagrama 1. Inicio de una Evaluación



2.2.5. Geología del Complejo Pasco y su Relación con la Mineralización

A. Geología Distrital

El distrito minero del Complejo Pasco se caracteriza por presentar una compleja evolución geológica resultado de múltiples eventos sedimentarios, tectónicos, magmáticos e hidrotermales, los cuales han favorecido la formación de importantes depósitos polimetálicos de zinc, plomo, cobre, plata y oro. La secuencia estratigráfica se encuentra conformada por unidades sedimentarias mesozoicas que fueron posteriormente intruidas por cuerpos ígneos terciarios responsables de los procesos de mineralización.

El basamento geológico del distrito está constituido por las rocas volcano-sedimentarias del Grupo Mitu, de edad Triásica, sobre las cuales se dispone de manera concordante el Grupo Pucará, de edad Triásico–Jurásica. Dentro de esta unidad destaca la Formación Chambará, considerada la principal roca hospedante de la mineralización en el distrito, la cual ha sido subdividida en cuatro miembros (A, B, C y D) en función de sus diferencias litológicas, estratigráficas y estructurales (Lavado, 2014;

Dávila et al., 2016). Esta formación está compuesta principalmente por calizas, dolomías y niveles carbonatados que presentan condiciones favorables para el desarrollo de procesos metasomáticos asociados a la formación de skarns.

Sobre el Grupo Pucará se deposita, en discordancia erosional, el Grupo Goyllarisquizga, de edad Cretácica, constituido por una secuencia predominantemente silicoclástica integrada por areniscas cuarzosas, limolitas y lutitas, las cuales se encuentran localmente intruidas por cuerpos subvolcánicos de composición andesítica en forma de sills. Posteriormente, esta secuencia es cubierta por la Formación Chulec, conformada principalmente por calizas y margas de ambiente marino, y finalmente por la Formación Pocobamba, de edad Paleoceno–Eoceno, que cubre de manera discordante a las unidades anteriores mediante depósitos continentales.

Uno de los eventos geológicos más importantes en la evolución del distrito corresponde al emplazamiento de diversos cuerpos intrusivos de composición andesítica a cuarzomonzonítica durante el Oligoceno. Entre ellos destacan el Stock Milpo, el Stock Santa Bárbara y el Stock San Gerardo, cuyas edades determinadas mediante geocronología U-Pb oscilan entre 28,6 y 29,4 millones de años (Meffre & Thompson, 2016). Estos intrusivos cortan las secuencias carbonatadas del Grupo Pucará y constituyen la principal fuente de calor y fluidos hidrotermales responsables de la formación de los depósitos tipo skarn y de sulfuración intermedia que caracterizan a las unidades mineras Atacocha y El Porvenir.

La interacción entre los fluidos magmáticos y las rocas carbonatadas favoreció procesos intensos de metasomatismo, reemplazamiento y precipitación de sulfuros metálicos, dando origen a cuerpos mineralizados económicamente explotables que actualmente constituyen una de las principales fuentes de producción polimetálica del centro del Perú.

B. Geología Estructural

Desde el punto de vista estructural, el distrito minero del Complejo Pasco presenta una arquitectura geológica compleja, resultado de la superposición de diversos eventos tectónicos compresivos y distensivos que han controlado tanto el emplazamiento de los intrusivos como la circulación de los fluidos mineralizantes.

El sistema estructural dominante está conformado por dos familias principales de fallas regionales. La primera presenta una orientación aproximada Norte–Sur (N–S), mientras que la segunda posee una dirección preferencial Noroeste–Sureste (NW–SE). Ambas estructuras ejercen un control fundamental sobre la distribución espacial de la mineralización y sobre las condiciones geomecánicas del macizo rocoso.

Entre las estructuras regionales más importantes destacan:

- Falla Milpo–Atacocha, caracterizada por un movimiento inverso con componente sinistral y un buzamiento comprendido entre 75° y 85° hacia el Este. Esta estructura constituye uno de los principales controles de la mineralización y del comportamiento estructural del distrito.
- Falla Longreras, de movimiento predominantemente normal con componente sinistral y buzamiento similar hacia el Este, la cual

participa en la compartimentación estructural del yacimiento y en la redistribución de los esfuerzos tectónicos.

La interacción entre ambas fallas originó un sistema estructural del tipo Riedel, favoreciendo el desarrollo de numerosas fallas secundarias de orientación NW–SE, entre las que destacan las fallas 13, Estrella, Manuel 5, Milpo Sur y La Churca. Estas estructuras constituyen importantes conductos para la circulación de fluidos hidrotermales y controlan la ubicación de diversos cuerpos mineralizados.

Particularmente, la Falla 13 representa uno de los principales controles estructurales de la mineralización en la Unidad Minera El Porvenir, debido a su estrecha asociación con zonas de alteración hidrotermal, reemplazamiento metasomático y concentración de sulfuros metálicos tanto en superficie como en profundidad. Asimismo, estas estructuras influyen significativamente en la calidad geomecánica del macizo rocoso, condicionando el grado de fracturamiento, la orientación de las discontinuidades y el diseño de los sistemas de sostenimiento empleados durante la explotación minera.

2.2.6. Estilos de Mineralización en el Complejo Pasco

La mineralización presente en el Complejo Pasco responde principalmente a procesos hidrotermales relacionados con el emplazamiento de intrusivos oligocenos, los cuales originaron diversos estilos de mineralización, siendo los más representativos los depósitos tipo skarn y los depósitos epitermales de sulfuración intermedia.

A. Mineralización tipo skarn

La mineralización tipo skarn constituye el principal estilo mineralógico desarrollado en el distrito y representa la mayor fuente de recursos metálicos de las

unidades mineras Atacocha y El Porvenir. Este tipo de depósito se originó como consecuencia de la interacción entre los fluidos magmáticos provenientes de los stocks Milpo, Santa Bárbara y San Gerardo con las rocas carbonatadas de la Formación Chambará perteneciente al Grupo Pucará.

El proceso metasomático produjo la formación de minerales calcosilicáticos, principalmente granates, piroxenos y epidotas, acompañados por importantes concentraciones de sulfuros metálicos.

Se distinguen dos tipos principales de skarn:

- Exoskarn, desarrollado en las rocas carbonatadas, caracterizado por la presencia de granates verdes, piroxenos y abundante mineralización de esfalerita, marmatita, calcopirita, pirita, pirrotita y magnetita. En determinados sectores también se registra mineralización secundaria de molibdenita asociada a eventos posteriores de tipo pórfido.
- Endoskarn, desarrollado en el interior del intrusivo, caracterizado por granates rojizos y alteración metasomática asociada al contacto intrusivo.

Entre los principales cuerpos mineralizados destacan Cristina NE, Pradera Vasconia, Carmen Norte, Éxito, Anita y San Gerardo, mientras que en las zonas distales del sistema metasomático predominan asociaciones de esfalerita, galena, pirita, plata y oro, representadas por los cuerpos 18, 23 y V-27.

B. Mineralización tipo epitermal de sulfuración intermedia

El segundo estilo mineralógico reconocido en el distrito corresponde a los depósitos epitermales de sulfuración intermedia, desarrollados principalmente en el sector San Gerardo, donde destacan los cuerpos mineralizados asociados al Cuerpo 10.

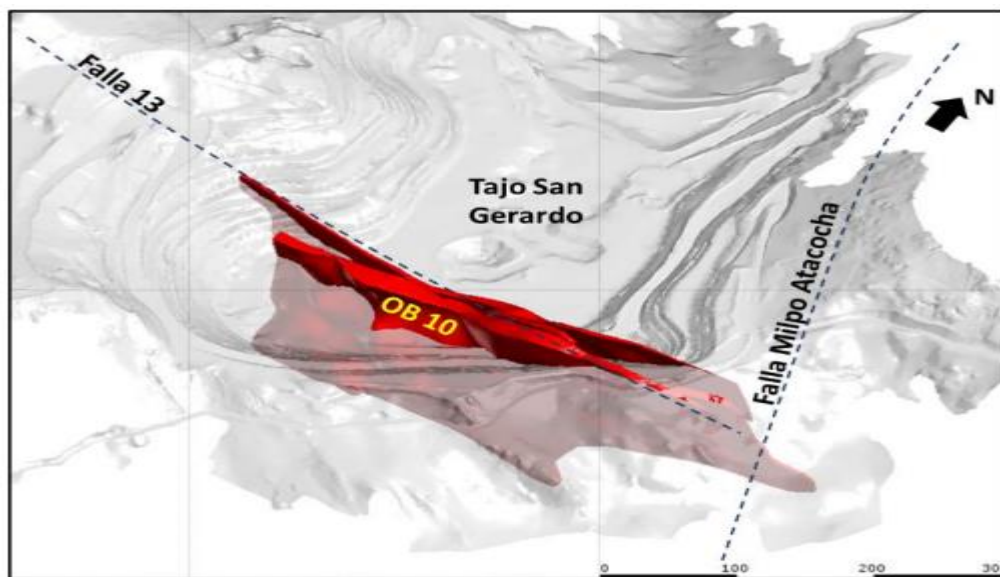
La mineralización se encuentra hospedada tanto en las areniscas del Grupo Goyllarisquizga como en el intrusivo San Gerardo, mostrando una intensa alteración hidrotermal caracterizada por asociaciones minerales de sericita, esmectita, adularia y cuarzo.

Las principales menas están constituidas por galena, esfalerita, calcopirita y sulfosales de cobre (cobres grises), acompañadas por contenidos económicamente importantes de oro y plata.

Los estudios de inclusiones fluidas indican temperaturas de homogenización cercanas a 300 °C y salinidades promedio del 5 % equivalente en NaCl, condiciones que corresponden típicamente a sistemas epitermales de sulfuración intermedia formados en ambientes hidrotermales de profundidad somera.

Este estilo de mineralización evidencia la evolución tardía del sistema hidrotermal del Complejo Pasco y complementa los procesos metasomáticos responsables de la formación de los depósitos tipo skarn, configurando uno de los distritos polimetálicos más importantes del Perú y de la Cordillera Central de los Andes.

Figura 5. *Cuerpo 10, paralelo a la falla 13, en el tajo San Gerardo.*



C. Mineralización asociada a brechas

Otro estilo de mineralización reconocido en el Complejo Pasco corresponde a la mineralización asociada a brechas tectónicas e hidrotermales, las cuales desempeñan un papel importante como estructuras de control para la circulación de fluidos mineralizantes y la concentración de sulfuros metálicos.

Estas brechas están constituidas por fragmentos angulares y subangulares de roca encajonante cementados por una matriz hidrotermal rica en minerales sulfurados. Los clastos presentan abundantes contenidos de galena (PbS), esfalerita (ZnS) y pirita (FeS₂), evidenciando múltiples episodios de fracturamiento tectónico seguidos por procesos de relleno y reemplazamiento hidrotermal.

Los estudios geológicos indican que estas estructuras experimentaron procesos de reactivación tectónica tardía, favoreciendo nuevos pulsos de circulación de fluidos hidrotermales que enriquecieron las zonas previamente fracturadas mediante la precipitación de sulfuros metálicos. Como consecuencia, las brechas constituyen importantes conductos para el transporte de soluciones mineralizantes y representan objetivos prioritarios durante la exploración y explotación minera.

Las manifestaciones más representativas de este estilo de mineralización se encuentran en el Cuerpo 23 y el Cuerpo 17 de la Unidad Minera Atacocha, así como en la Veta 1204 de la Unidad Minera El Porvenir, donde las brechas muestran una intensa cementación por galena, esfalerita, pirita y otros sulfuros asociados, conformando cuerpos mineralizados de interés económico.

Desde el punto de vista geomecánico, las zonas de brecha presentan un comportamiento estructural particular debido a la elevada densidad de fracturas y a la heterogeneidad del macizo rocoso. Estas condiciones generan variaciones importantes en la calidad geomecánica de la roca, por lo que requieren una

evaluación detallada durante el diseño del sostenimiento de las excavaciones subterráneas.

Figura 6. *Brecha tectónica con clastos de galena y esfalerita; cuerpo 23.*



Mineralización tipo pórfido

El distrito minero del Complejo Pasco presenta evidencias de un sistema magmático-hidrotermal de tipo pórfido, estrechamente relacionado con el emplazamiento de los stocks intrusivos oligocenos que dieron origen a los diferentes estilos de mineralización presentes en el distrito.

El Stock Santa Bárbara, de composición cuarzomonzonítica a cuarzodiorítica, constituye la principal evidencia de este sistema, presentando un amplio desarrollo de alteración fílica, caracterizada por asociaciones mineralógicas de cuarzo–sericita–pirita. Asimismo, se observan abundantes venillas de cuarzo tipo A y tipo B, típicas de los sistemas pórfidos cupríferos, las cuales contienen mineralización diseminada y en vetillas de molibdenita (MoS_2), calcopirita (CuFeS_2) y contenidos subordinados de oro (Au).

La presencia de estas alteraciones y estructuras indica que el Stock Santa Bárbara constituye el núcleo de un sistema hidrotermal profundo, responsable del aporte de fluidos mineralizantes que posteriormente dieron origen a los depósitos tipo skarn y epitermales de sulfuración intermedia desarrollados en el Complejo Pasco.

Por su parte, el Stock Milpo presenta características similares, aunque menos desarrolladas, observándose un sistema de stockwork conformado por venillas de cuarzo tipo A y tipo B, acompañado por alteración hidrotermal moderada y bajos contenidos de cobre, lo que sugiere un menor grado de evolución del sistema mineralizante (Lavado, 2014).

En contraste, el Stock San Gerardo muestra una alteración hidrotermal poco desarrollada y escasa mineralización metálica, lo que indica una limitada participación en los procesos hidrotermales responsables de la formación de los principales cuerpos mineralizados del distrito. Según los estudios realizados por Mervin T., Cristhian M. y Hebert A. (2019), este intrusivo presenta únicamente alteración débil y mineralización dispersa, sin alcanzar el desarrollo característico de un sistema pórfido plenamente evolucionado.

En conjunto, la presencia de sistemas tipo pórfido en el Complejo Pasco evidencia una evolución magmático-hidrotermal compleja, en la cual los intrusivos oligocenos actuaron como fuente de calor y fluidos mineralizantes responsables de la generación de los depósitos tipo skarn, las vetas epitermales y las brechas mineralizadas que actualmente constituyen los principales recursos metálicos explotados en las unidades mineras Atacocha y El Porvenir. Desde el punto de vista geológico y geomecánico, el conocimiento de estos sistemas resulta fundamental para comprender la distribución espacial de la mineralización, la alteración

hidrotermal y las variaciones en la calidad del macizo rocoso, aspectos esenciales para el diseño del sostenimiento y la planificación de las labores subterráneas.

Figura 7. *Pórfido Santa Bárbara, con alteración fílica y desarrollo stockwork con venillas de cuarzo tipo A y mineralización económica de Mo, Cu y Au.*



2.3. Definición de términos básicos

Para asegurar la claridad conceptual a lo largo del estudio “Evaluación geomecánica para determinar el tipo de sostenimiento en tajeos de explotación en la Unidad Minera El Porvenir – Nexa Resources - 2025”, se definen los términos fundamentales que se emplearán de manera recurrente:

A. Macizo rocoso

El macizo rocoso es el conjunto formado por la roca intacta y las discontinuidades naturales (fracturas, diaclasas, fallas, planos de estratificación y zonas de cizalla), que en conjunto determinan el comportamiento mecánico del terreno frente a las excavaciones subterráneas. Sus propiedades geomecánicas dependen tanto de la resistencia de la roca como de las características de las discontinuidades presentes (Hoek & Brown, 2019).

B. Geomecánica

La geomecánica es la disciplina de la ingeniería que integra principios de geología estructural, mecánica de rocas y mecánica de suelos para estudiar, modelar y predecir el comportamiento del macizo rocoso frente a excavaciones, cargas naturales y esfuerzos inducidos por la actividad minera, permitiendo diseñar excavaciones estables y seguras (Brady & Brown, 2006).

C. Tajeo

El tajeo es una excavación subterránea donde se realiza la extracción del mineral mediante un método de explotación previamente definido. Dependiendo del método de minado, los tajeos pueden desarrollarse mediante corte y relleno (Cut and Fill), sublevel stoping, hundimiento por subniveles u otros sistemas de explotación (Hartman & Mutmanský, 2002).

D. Sostenimiento

El sostenimiento comprende el conjunto de elementos estructurales y técnicas de ingeniería utilizados para mantener la estabilidad de las excavaciones subterráneas, controlando las deformaciones del macizo rocoso y garantizando condiciones seguras durante la vida útil de la labor minera (Hoek, Kaiser & Bawden, 1995).

E. Tipo de sostenimiento

El tipo de sostenimiento corresponde a la combinación específica de elementos de soporte, tales como pernos de roca, cables de anclaje, mallas metálicas, concreto lanzado (shotcrete) y arcos metálicos, seleccionados de acuerdo con la calidad geomecánica del macizo rocoso, las dimensiones de la excavación y las condiciones operativas de la mina (Bieniawski, 1989).

F. RMR (Rock Mass Rating)

El Rock Mass Rating (RMR) es un sistema empírico de clasificación geomecánica desarrollado por Bieniawski que evalúa la calidad del macizo rocoso mediante seis parámetros: resistencia a compresión simple de la roca intacta, índice RQD, espaciamiento de discontinuidades, condición de las discontinuidades, presencia de agua subterránea y orientación de las discontinuidades respecto a la excavación (Bieniawski, 1989).

G. Índice Q

El Índice Q es un sistema de clasificación geomecánica desarrollado por Barton, Lien y Lunde que estima la calidad del macizo rocoso mediante la relación entre el índice RQD, el número de familias de juntas (J_n), la rugosidad (J_r), el grado de alteración (J_a), las condiciones de agua (J_w) y el factor de reducción por esfuerzos (SRF). Este sistema es ampliamente utilizado para el diseño de sostenimiento en excavaciones subterráneas (Barton, Lien & Lunde, 1974).

H. Factor de seguridad (FS)

El factor de seguridad es la relación entre la resistencia disponible del sistema y las cargas o esfuerzos actuantes sobre una estructura o excavación. En geomecánica, valores de FS superiores a 1,5 generalmente indican condiciones aceptables de estabilidad para excavaciones permanentes, dependiendo del criterio de diseño y del nivel de riesgo considerado (Hoek & Bray, 1981).

I. Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)

La resistencia a la compresión uniaxial (Uniaxial Compressive Strength, UCS) representa la máxima tensión de compresión que puede soportar una muestra de roca intacta antes de fallar cuando se somete a una carga axial sin confinamiento lateral. Constituye uno de los parámetros fundamentales para caracterizar la

resistencia de la roca y el diseño geomecánico de excavaciones subterráneas (ISRM, 2007).

J. Deformabilidad (Módulo de Young, E)

La deformabilidad expresa la capacidad de una roca o macizo rocoso para deformarse cuando es sometido a esfuerzos. Se representa mediante el Módulo de Young (E), parámetro que controla el comportamiento elástico del terreno y permite estimar desplazamientos y convergencias alrededor de las excavaciones subterráneas (Hoek & Brown, 2019).

K. Convergencia

La convergencia corresponde al desplazamiento relativo entre las paredes, techo y piso de una excavación subterránea como consecuencia de la redistribución de esfuerzos alrededor de la excavación. Su monitoreo permite evaluar la estabilidad del macizo rocoso y verificar la efectividad del sistema de sostenimiento instalado

L. Discontinuidad

Una discontinuidad es cualquier plano de debilidad natural presente en el macizo rocoso, como juntas, fallas, planos de estratificación, foliaciones o zonas de cizalla, que condiciona el comportamiento mecánico del terreno y controla los mecanismos potenciales de falla en excavaciones subterráneas (ISRM, 1978).

M. Estallido de roca (Rockburst)

El estallido de roca es un fenómeno geomecánico caracterizado por la liberación súbita de energía elástica acumulada en un macizo rocoso sometido a elevados esfuerzos, produciendo la expulsión violenta de fragmentos de roca hacia el interior de la excavación. Su control requiere la implementación de sistemas de

sostenimiento dinámico con elevada capacidad de absorción de energía (Kaiser, McCreath & Tannant, 1996).

N. Skarn

El skarn es una roca metasomática formada por la interacción entre fluidos magmáticos y rocas carbonatadas durante el emplazamiento de cuerpos intrusivos. Estos ambientes constituyen importantes depósitos de minerales metálicos como zinc, plomo, cobre, oro, hierro y molibdeno, además de presentar propiedades geomecánicas heterogéneas relevantes para el diseño del sostenimiento en minería subterránea (Meinert, Dipple & Nicolescu, 2005).

O. Modelo numérico

Un modelo numérico es una representación computacional del comportamiento del macizo rocoso mediante métodos matemáticos, como el método de elementos finitos (FEM), diferencias finitas (FDM) o elementos discretos (DEM), que permite simular la distribución de esfuerzos, deformaciones y estabilidad de las excavaciones bajo diferentes condiciones geomecánicas y escenarios de carga (Itasca Consulting Group, 2019)..

Las definiciones se adaptaron a los estándares de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 2023) y a las Directrices de Seguridad y Salud en el Trabajo Minero del Perú (DS 024-2016-EM), asegurando consistencia técnica con la normativa vigente y las mejores prácticas internacionales.

2.4. Formulación de Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

Si se realiza una evaluación geomecánica detallada del macizo rocoso en los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir, entonces se podrá determinar

un tipo de sostenimiento más adecuado, que mejore la estabilidad, reduzca los costos operativos y minimice los riesgos geotécnicos.

2.4.2. Hipótesis específicas

- a) Si se identifican y caracterizan adecuadamente los parámetros geomecánicos del macizo rocoso (como RMR, Q y resistencia a compresión), entonces se podrá establecer un diseño de sostenimiento compatible con las condiciones reales del terreno.
- b) Si se comparan distintos tipos de sostenimiento en función del comportamiento geomecánico del macizo, entonces se podrá seleccionar la alternativa más eficiente y segura para su implementación en los tajeos de explotación.

2.5. Identificación de variables

2.5.1. Variable independiente

Evaluación geomecánica del macizo rocoso

Se refiere al análisis técnico de las propiedades físicas y mecánicas del macizo rocoso, utilizando métodos como la clasificación RMR, índice Q, UCS, módulo de deformabilidad, entre otros

2.5.2. Variable dependiente

Tipo de sostenimiento en los tajeos de explotación

Hace referencia al diseño y selección del sistema de soporte (pernos, malla, shotcrete, anclajes, etc.) que se aplicará en función de las condiciones geomecánicas evaluadas, para garantizar la estabilidad, seguridad y eficiencia operativa

2.6. Definición Operacional de variables e indicadores

Variable	Dimensiones	Indicadores	Técnica de recolección	Instrumento	Escala de medición
Variable Independiente: Evaluación geomecánica del macizo rocoso	Caracterización del macizo	- Tipo de roca predominante - RQD (% de recuperación) - UCS (MPa) - Módulo de Young (GPa)	Revisión documental Ensayo de laboratorio Observación directa	Ficha de caracterización geomecánica Informe de ensayos de laboratorio	Cuantitativa continua
Clasificación geomecánica	- Valor RMR - Valor índice Q - SRF (Stress Reduction Factor)	Levantamiento en campo Software geomecánico (Rocscience, RS2)		Hoja de cálculo Check list geomecánico	Ordinal/Cuantitativa
Condiciones estructurales	- Orientación y buzamiento de discontinuidades - Espaciamiento entre juntas - Presencia de agua subterránea		Mapeo geológico Levantamiento estructural	Brújula geológica Registro de campo	Cuantitativa discreta
Variable Dependiente: Tipo de sostenimiento en tajeos de explotación	Selección de sostenimiento	- Tipo de pernos (Split set, Swellex, Omega bolt) - Tipo de malla (electrosoldada, cable) - Espesor de shotcrete	Revisión técnica Simulación numérica Observación en campo	Ficha de evaluación de sostenimiento Modelo numérico FLAC3D/RS2	Cualitativa nominal
Eficiencia del sostenimiento	- Nivel de convergencia (mm) - Tiempo de instalación (minutos) - Estabilidad post-instalación (observada vs calculada)		Monitoreo en campo Entrevistas técnicas Registro de operación	Extensómetro Check list de desempeño	Cuantitativa continua

Costos asociados	- Costo por metro de sostenimiento instalado - Tiempo improductivo por falta de sostenimiento	Revisión de reportes operativos Registro económico	Hoja de costos Informe de producción	Cuantitativa continua
---------------------	---	--	--	--------------------------

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, debido a que está orientada a generar conocimientos con una finalidad eminentemente práctica, dirigidos a solucionar un problema específico relacionado con la estabilidad geomecánica de los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir. En este sentido, la investigación busca aplicar los principios de la mecánica de rocas y de la geomecánica para optimizar el diseño y la selección de los sistemas de sostenimiento, contribuyendo a mejorar las condiciones de seguridad, la eficiencia operativa y la continuidad de las actividades de explotación minera. Según Hernández Sampieri et al. (2018), la investigación aplicada tiene como propósito utilizar el conocimiento científico para resolver problemas concretos y aportar soluciones técnicamente fundamentadas a situaciones reales.

Asimismo, el estudio corresponde a una investigación de nivel explicativo, ya que no se limita únicamente a describir las características geológicas y geomecánicas del macizo rocoso, sino que busca identificar y explicar las relaciones de causa y efecto existentes entre las propiedades geomecánicas del terreno y el comportamiento de los

sistemas de sostenimiento instalados en los tajeos de explotación. En particular, se pretende determinar cómo variables como la calidad del macizo rocoso, la resistencia de la roca intacta, el grado de fracturamiento, las discontinuidades, el estado de esfuerzos y las clasificaciones geomecánicas (RMR y Q de Barton) influyen en la estabilidad de las excavaciones subterráneas y en la eficiencia del sostenimiento empleado.

El estudio adopta un enfoque cuantitativo, debido a que se fundamenta en la recolección, medición y análisis estadístico de datos numéricos obtenidos mediante evaluaciones geomecánicas y ensayos de campo. Entre las variables analizadas se incluyen los índices de clasificación geomecánica Rock Mass Rating (RMR) y Q de Barton, la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), el módulo de deformabilidad (Módulo de Young), la orientación y características de las discontinuidades, los niveles de convergencia de las excavaciones y los resultados de los ensayos de extracción (Pull Test) de los elementos de sostenimiento. El procesamiento de esta información permitirá establecer relaciones objetivas entre las variables de estudio, validar las hipótesis planteadas y formular recomendaciones técnicas sustentadas en evidencia cuantificable.

La utilización del enfoque cuantitativo garantiza que los resultados obtenidos sean objetivos, verificables, reproducibles y susceptibles de análisis estadístico, proporcionando una base científica sólida para la toma de decisiones relacionadas con el diseño y optimización de los sistemas de sostenimiento en la Unidad Minera El Porvenir. Asimismo, los resultados podrán servir como referencia para investigaciones futuras y para la implementación de criterios geomecánicos en otras operaciones de minería subterránea con características geológicas similares.

3.2. Nivel de investigación

La presente investigación corresponde al nivel explicativo, debido a que tiene como finalidad identificar, analizar y demostrar la relación de causa–efecto existente entre las características geomecánicas del macizo rocoso y el sistema de sostenimiento requerido para garantizar la estabilidad de los tajeos de explotación en la Unidad Minera El Porvenir. Este nivel de investigación trasciende la simple descripción de las condiciones geológicas y geomecánicas del terreno, orientándose a explicar cómo las propiedades del macizo rocoso influyen en el comportamiento estructural de las excavaciones y en la eficiencia de los sistemas de sostenimiento empleados durante la explotación minera.

En este contexto, la investigación se analizó la influencia de variables geomecánicas tales como la clasificación Rock Mass Rating (RMR), el Índice Q de Barton, la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta (UCS), el módulo de deformabilidad o módulo de Young (E), la orientación y características de las discontinuidades, el grado de fracturamiento, las condiciones hidrogeológicas y el estado de esfuerzos del macizo rocoso. La evaluación de estos parámetros permitió establecer su incidencia sobre la estabilidad de las excavaciones subterráneas y determinar los criterios técnicos necesarios para seleccionar el tipo de sostenimiento más adecuado en función de las condiciones geomecánicas presentes en cada dominio del macizo rocoso.

Asimismo, el estudio busca explicar la relación entre la calidad geomecánica del terreno y el desempeño de los elementos de sostenimiento instalados, evaluando su capacidad para controlar las deformaciones, prevenir desprendimientos de roca y mantener la estabilidad de los tajeos durante el ciclo de explotación. De esta manera, será posible identificar las causas que originan deficiencias en el sostenimiento y

proponer alternativas de diseño que incrementen la seguridad, la eficiencia operativa y la continuidad de las labores mineras.

La elección del nivel explicativo resulta pertinente porque permitió fundamentar técnicamente las decisiones relacionadas con el diseño geomecánico de las excavaciones, aportando evidencia científica sobre la interacción entre las condiciones del macizo rocoso y los sistemas de sostenimiento. En consecuencia, los resultados obtenidos contribuirán al desarrollo de criterios de diseño más confiables, a la optimización de los recursos destinados al sostenimiento y al fortalecimiento de la gestión geomecánica en la Unidad Minera El Porvenir, constituyendo además una referencia para futuras investigaciones y aplicaciones en otras operaciones de minería subterránea con características geológicas similares.

3.3. Métodos de investigación

La presente investigación se desarrolla bajo el método científico, utilizando un enfoque cuantitativo y un método deductivo–explicativo, debido a que parte de principios, teorías y modelos de la geomecánica y la mecánica de rocas para analizar un caso específico relacionado con la estabilidad de los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir y la selección del sistema de sostenimiento más adecuado de acuerdo con las condiciones geomecánicas del macizo rocoso.

El método deductivo permitió partir de conocimientos generales establecidos en la literatura científica, tales como las clasificaciones geomecánicas Rock Mass Rating (RMR), el Índice Q de Barton, el Geological Strength Index (GSI) y los principios de la mecánica de rocas, para aplicarlos al análisis de las condiciones particulares presentes en los tajeos de explotación. De esta manera, se busca comprobar la influencia de las características geomecánicas del macizo rocoso sobre el comportamiento del sostenimiento y explicar la relación existente entre ambas variables.

El enfoque cuantitativo posibilitó la medición objetiva de las variables de estudio mediante la obtención de datos numéricos provenientes de evaluaciones geológicas, geomecánicas y ensayos de laboratorio, los cuales son procesados y analizados mediante procedimientos estadísticos y herramientas de modelamiento geotécnico. Este procedimiento garantiza que los resultados obtenidos sean objetivos, verificables y reproducibles, permitiendo validar las hipótesis planteadas y formular recomendaciones técnicas sustentadas en evidencia científica.

Para el desarrollo de la investigación se ha seguido un procedimiento metodológico estructurado en las siguientes etapas:

- Recolección de información geológica y geomecánica, mediante el levantamiento de información de campo, mapeo geomecánico de las excavaciones, caracterización estructural del macizo rocoso y recopilación de información técnica de la Unidad Minera El Porvenir.
- Determinación de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, considerando parámetros como la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta (UCS), el índice de calidad de roca (RQD), el módulo de deformabilidad (Módulo de Young), las características de las discontinuidades, las condiciones hidrogeológicas y el estado de esfuerzos.
- Clasificación geomecánica del macizo rocoso, mediante la aplicación de los sistemas Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski y Índice Q de Barton, con el propósito de identificar los diferentes dominios geomecánicos presentes en los tajeos de explotación y establecer los requerimientos de sostenimiento correspondientes.
- Evaluación técnica del sistema de sostenimiento, analizando el desempeño de los elementos de soporte actualmente utilizados en la operación minera y

comparándolos con las recomendaciones derivadas de las clasificaciones geomecánicas y de los criterios internacionales de diseño para excavaciones subterráneas.

- Modelamiento geomecánico, utilizando software especializado de análisis numérico, como RS2, FLAC3D u otras herramientas equivalentes, con el fin de simular la distribución de esfuerzos, las deformaciones del macizo rocoso y el comportamiento de los sistemas de sostenimiento bajo diferentes escenarios de carga y condiciones de explotación.
- Procesamiento e interpretación de los resultados, mediante el análisis de indicadores geomecánicos como desplazamientos, convergencias, factores de seguridad, distribución de esfuerzos y comportamiento estructural del sostenimiento, permitiendo evaluar la eficiencia de las alternativas analizadas.
- Contrastación de las hipótesis y formulación de recomendaciones técnicas, estableciendo la relación existente entre las características geomecánicas del macizo rocoso y la selección del sistema de sostenimiento más adecuado para garantizar la estabilidad de los tajeos de explotación.

La aplicación del método científico, complementado con el enfoque cuantitativo y el razonamiento deductivo–explicativo, permitió sustentar de manera objetiva la relación entre las propiedades geomecánicas del macizo rocoso y el desempeño de los sistemas de sostenimiento. Asimismo, facilitará la formulación de criterios técnicos orientados a optimizar el diseño geomecánico de las excavaciones subterráneas, incrementar la seguridad operacional, mejorar la eficiencia del proceso de explotación y contribuir a la sostenibilidad de las operaciones en la Unidad Minera El Porvenir.

3.4. Diseño de investigación

El diseño de la presente investigación correspondió a un diseño no experimental, transeccional (transversal) y de nivel explicativo, debido a que el estudio se desarrolló sin manipular deliberadamente las variables de investigación, observando y analizando los fenómenos tal como se presentaron en su contexto natural dentro de las operaciones de la Unidad Minera El Porvenir.

A. Diseño no experimental

La investigación adoptó un diseño no experimental, ya que las variables de estudio no fueron manipuladas por el investigador, sino que fueron observadas y analizadas en las condiciones reales en las que se presentaron durante las operaciones mineras.

En consecuencia, no se intervino sobre las características geomecánicas del macizo rocoso ni sobre los sistemas de sostenimiento implementados en los tajeos de explotación; el estudio se limitó a la recopilación, medición y análisis de información proveniente de evaluaciones geológicas, geomecánicas y operativas.

Este diseño permitió estudiar el comportamiento del macizo rocoso y el desempeño del sostenimiento en un entorno real de explotación, garantizando que los resultados reflejaran las condiciones operativas existentes en la Unidad Minera El Porvenir y proporcionaran evidencia objetiva para sustentar las conclusiones y recomendaciones técnicas de la investigación.

B. Diseño transeccional (transversal)

La investigación presentó un diseño transeccional o transversal, debido a que la recolección y el análisis de la información se realizaron durante un único período de estudio, correspondiente al año 2024, evaluándose las condiciones geológicas, geomecánicas y operativas existentes en dicho periodo. El estudio no contempló el

seguimiento temporal de las variables ni el monitoreo de su evolución a lo largo del tiempo; por el contrario, analizó la información disponible en un momento específico para establecer la relación entre las variables investigadas.

Este diseño permitió obtener un diagnóstico técnico del comportamiento geomecánico del macizo rocoso y del sistema de sostenimiento empleado durante el período evaluado, constituyendo una base para formular propuestas orientadas a optimizar la estabilidad de las excavaciones subterráneas.

C. Diseño explicativo

El diseño tuvo un alcance explicativo, ya que buscó identificar y demostrar la relación de causa y efecto entre las características geomecánicas del macizo rocoso y el tipo de sostenimiento aplicado en los tajeos de explotación. En este sentido, la investigación explicó cómo variables como la calidad del macizo rocoso, la resistencia de la roca intacta, el grado de fracturamiento, las discontinuidades, el estado de esfuerzos y las clasificaciones geomecánicas influyeron en la selección, el comportamiento y la eficiencia del sistema de sostenimiento.

Para alcanzar este propósito, se emplearon metodologías ampliamente reconocidas para la caracterización del macizo rocoso, entre ellas las clasificaciones Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski y el Índice Q de Barton, complementadas con el análisis de las propiedades geomecánicas de la roca, la evaluación estructural de las discontinuidades y el análisis del desempeño de los sistemas de sostenimiento instalados. Asimismo, la investigación incorporó herramientas de análisis geomecánico y técnicas de modelamiento numérico mediante software especializado, como RS2 o FLAC3D, con el propósito de simular el comportamiento del macizo rocoso y validar técnicamente las alternativas de sostenimiento propuestas. La integración de estas metodologías

permitió establecer criterios objetivos para optimizar el diseño del sostenimiento, incrementar la estabilidad de las excavaciones y mejorar la seguridad y la eficiencia de las operaciones mineras en la Unidad Minera El Porvenir.

En consecuencia, el diseño metodológico adoptado proporcionó una base científica sólida para analizar la interacción entre las condiciones geomecánicas del macizo rocoso y los sistemas de sostenimiento, permitiendo formular recomendaciones técnicas sustentadas en evidencia cuantitativa y aplicables a operaciones de minería subterránea con características geológicas similares.

3.5. Población y muestra

A. Población

La población de la presente investigación estuvo conformada por la totalidad de los tajeos de explotación y las estructuras geomecánicas activas existentes en la Unidad Minera El Porvenir, operada por Nexa Resources, ubicada en el distrito de Yanacancha, provincia y región Pasco. Esta población incluyó los diferentes dominios geomecánicos del macizo rocoso intervenido, así como las labores subterráneas donde se implementaron sistemas de sostenimiento para garantizar la estabilidad de las excavaciones durante las operaciones de explotación.

Asimismo, la población comprendió los tajeos en los que se aplicaron diversos sistemas de sostenimiento, tales como pernos de fricción (Split Set y Omega Bolt), pernos cementados, mallas electrosoldadas, concreto lanzado (shotcrete), cables de anclaje y otros elementos de soporte, utilizados de acuerdo con las condiciones geológicas y geomecánicas presentes en cada labor minera. De igual manera, se consideraron las características geomecánicas del macizo rocoso, determinadas mediante la evaluación de parámetros como la clasificación Rock Mass Rating (RMR), el Índice Q de Barton, la resistencia a la compresión uniaxial de la roca

(UCS), el grado de fracturamiento, la orientación de las discontinuidades y las condiciones hidrogeológicas, los cuales constituyeron la base para el análisis del comportamiento del sostenimiento y de la estabilidad de las excavaciones.

La definición de esta población permitió disponer de un universo representativo de las condiciones geomecánicas presentes en la Unidad Minera El Porvenir, proporcionando la información necesaria para evaluar la relación entre la calidad del macizo rocoso y la eficiencia de los sistemas de sostenimiento utilizados en los tajeos de explotación

B. Muestra

La muestra de la presente investigación fue de tipo no probabilística, intencional o por criterio, debido a que la selección de las unidades de análisis se realizó considerando criterios técnicos previamente establecidos y directamente relacionados con los objetivos de la investigación. Este tipo de muestreo permitió seleccionar aquellas labores subterráneas que presentaban las condiciones geomecánicas más representativas para evaluar la relación entre las características del macizo rocoso y el sistema de sostenimiento empleado.

La selección de la muestra comprendió los tajeos de explotación que presentaron diferentes dominios geomecánicos, representativos de macizos rocosos de alta, media y baja calidad, determinados mediante las clasificaciones geomecánicas Rock Mass Rating (RMR) e Índice Q de Barton. Asimismo, se consideraron aquellos tajeos que registraron antecedentes de inestabilidad geomecánica, presencia de fracturamiento intenso, condiciones estructurales desfavorables o requerimientos especiales de sostenimiento, por constituir áreas críticas para el análisis del comportamiento del soporte instalado.

La selección de estas unidades de estudio permitió evaluar el desempeño de los diferentes sistemas de sostenimiento bajo condiciones geomecánicas representativas de la Unidad Minera El Porvenir, garantizando que la información obtenida fuera pertinente para el cumplimiento de los objetivos de la investigación y para la formulación de recomendaciones orientadas a optimizar la estabilidad de las excavaciones subterráneas.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearon técnicas de recolección de datos de carácter cuantitativo y técnico-especializado, orientadas a obtener información confiable sobre las características geomecánicas del macizo rocoso, el comportamiento de los sistemas de sostenimiento y las condiciones de estabilidad de los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir. La aplicación de estas técnicas permitió recopilar información primaria y secundaria que posteriormente fue procesada y analizada para contrastar las hipótesis planteadas y alcanzar los objetivos de la investigación.

3.6.1. Técnicas de recolección de datos

A. Observación directa

La técnica de observación directa fue aplicada durante las inspecciones de campo realizadas en los tajeos de explotación, permitiendo registrar de manera sistemática las condiciones geológicas, estructurales y geomecánicas del macizo rocoso. Mediante esta técnica se identificaron las características de las discontinuidades, orientación de diaclasas, buzamientos, fallas geológicas, zonas de alteración, presencia de agua, condiciones del sostenimiento instalado y evidencias de inestabilidad,

proporcionando información fundamental para la caracterización geomecánica del área de estudio.

Instrumento: Ficha de observación geomecánica y libreta de campo.

B. Levantamiento geomecánico de campo

El levantamiento geomecánico se realizó mediante el mapeo sistemático de los frentes de explotación, galerías y tajeos, siguiendo los procedimientos establecidos por Bieniawski (1989) para la clasificación Rock Mass Rating (RMR) y por Barton, Lien y Lunde (1974) para el Índice Q. Durante esta actividad se registraron parámetros como el índice RQD, espaciamiento y características de las discontinuidades, condiciones de agua, resistencia de la roca intacta y demás variables requeridas para la clasificación geomecánica del macizo rocoso.

Instrumentos: Brújula geológica tipo Brunton, cinta métrica, flexómetro, martillo geológico, cámara fotográfica digital y formatos de mapeo geomecánico.

C. Revisión documental

La revisión documental consistió en el análisis de la información técnica generada por la Unidad Minera El Porvenir, incluyendo reportes geomecánicos, registros de mapeo, informes de sostenimiento, planos geológicos y estructurales, reportes de perforación diamantina, ensayos geotécnicos, procedimientos operativos y demás documentos relacionados con la estabilidad de las excavaciones subterráneas.

Esta información permitió complementar los datos obtenidos durante el trabajo de campo y contrastar los resultados con los antecedentes técnicos de la operación minera.

Instrumentos: Fichas de revisión documental, informes técnicos, planos geológicos, bases de datos geomecánicas y registros operacionales.

D. Ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio fueron utilizados para determinar las propiedades físico-mecánicas de las muestras de roca recolectadas durante el trabajo de campo. Entre los principales ensayos se consideraron la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), el módulo de deformabilidad (Módulo de Young), el índice de carga puntual (Point Load Test), la caracterización petrográfica y otros ensayos geotécnicos requeridos para la caracterización del macizo rocoso.

Los resultados obtenidos constituyeron información básica para la clasificación geomecánica y el análisis del comportamiento del sostenimiento.

Instrumentos: Máquina de compresión uniaxial, equipo Point Load, microscopio petroográfico y equipos normalizados de laboratorio.

E. Modelamiento numérico

El modelamiento numérico fue empleado para simular el comportamiento mecánico del macizo rocoso y evaluar la interacción entre las excavaciones subterráneas y los diferentes sistemas de sostenimiento analizados. Para ello se utilizaron programas especializados de análisis geomecánico, tales como RS2, FLAC3D y RocSupport, los cuales permitieron estimar la distribución de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos, factores de seguridad y comportamiento estructural del sostenimiento bajo diferentes escenarios de explotación.

Los resultados de las simulaciones fueron comparados con la información obtenida en campo para validar técnicamente las alternativas de sostenimiento propuestas.

Instrumentos: Software especializado RS2, FLAC3D, RocSupport y estaciones de trabajo para procesamiento geomecánico.

La aplicación conjunta de estas técnicas e instrumentos permitió obtener información confiable, objetiva y verificable sobre las condiciones geomecánicas del macizo rocoso y el desempeño de los sistemas de sostenimiento utilizados en los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir, proporcionando una base técnica sólida para el análisis de resultados y la formulación de recomendaciones orientadas a optimizar la estabilidad de las excavaciones subterráneas.

3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación

A. Selección de los instrumentos

La selección de los instrumentos de recolección de datos se realizó considerando la naturaleza técnica de la investigación, los objetivos planteados y las variables objeto de estudio. Para ello, se emplearon instrumentos especializados que permitieron obtener información cuantitativa, objetiva y verificable sobre las características geomecánicas del macizo rocoso y el desempeño de los sistemas de sostenimiento utilizados en los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir.

Los principales instrumentos utilizados fueron los siguientes:

- Ficha de mapeo geomecánico, utilizada para registrar en campo información relacionada con la calidad del macizo rocoso, índice RQD, clasificación RMR, características de las discontinuidades, orientación de diaclasas y fallas,

condiciones hidrogeológicas, litología y demás parámetros geomecánicos requeridos para la caracterización del terreno.

- Ficha de evaluación del sistema de sostenimiento (check list técnico), empleada para verificar el tipo de sostenimiento instalado, las características de los elementos de soporte, la calidad de la instalación, el estado de conservación y el cumplimiento de los estándares técnicos establecidos por la operación minera.
- Instrumentos de medición geológica y geomecánica, entre ellos brújula geológica tipo Brunton, clinómetro, flexómetro, martillo geológico, cámara fotográfica digital y demás equipos utilizados durante el levantamiento geomecánico de campo.
- Equipos de laboratorio, destinados a determinar las propiedades físico-mecánicas de la roca, tales como la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), el módulo de deformabilidad (Módulo de Young), el índice de carga puntual (Point Load Test) y otros ensayos geotécnicos complementarios.
- Software especializado, utilizado para el procesamiento, análisis y modelamiento geomecánico de la información obtenida. Entre los principales programas empleados se encontraron RS2, FLAC3D, RocSupport, Microsoft Excel y AutoCAD, los cuales permitieron desarrollar simulaciones numéricas, procesar la información estadística y elaborar la representación gráfica de los resultados.

B. Validación de los instrumentos

La validez de los instrumentos se determinó mediante el método de juicio de expertos, procedimiento ampliamente utilizado en investigaciones de ingeniería

para evaluar la pertinencia, claridad, coherencia y suficiencia de los instrumentos de recolección de datos.

Para este propósito, las fichas de levantamiento geomecánico, los formatos de observación y los instrumentos de evaluación del sostenimiento fueron revisados por profesionales especialistas en geomecánica y geotecnia minera con experiencia en minería subterránea, quienes evaluaron la correspondencia entre cada instrumento y las variables definidas en la investigación.

Las observaciones y recomendaciones formuladas por los especialistas fueron incorporadas antes de la aplicación definitiva de los instrumentos, garantizando que estos respondieran adecuadamente a los objetivos del estudio y a las condiciones operativas de la Unidad Minera El Porvenir.

Asimismo, la información recopilada fue contrastada con los registros históricos proporcionados por el área de Geomecánica de la Unidad Minera El Porvenir, verificándose la consistencia técnica entre las mediciones efectuadas durante la investigación y la información geomecánica disponible en la operación minera.

C. Confiabilidad de los instrumentos

La confiabilidad de los instrumentos se garantizó mediante la aplicación de procedimientos técnicos orientados a asegurar la precisión, estabilidad y reproducibilidad de la información recopilada durante la investigación.

Con este propósito se desarrollaron las siguientes actividades:

- Se realizaron pruebas piloto en tres tajeos representativos de la operación minera, permitiendo verificar el funcionamiento de los instrumentos, identificar posibles dificultades durante el levantamiento de información y efectuar los ajustes metodológicos necesarios antes de su aplicación definitiva.

- Se emplearon metodologías geomecánicas internacionalmente reconocidas, entre ellas las clasificaciones Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski y el Índice Q de Barton, cuyos procedimientos han sido ampliamente validados en operaciones de minería subterránea y constituyen estándares internacionales para la caracterización del macizo rocoso y el diseño del sostenimiento.
- Se utilizaron equipos e instrumentos previamente calibrados, tanto para las mediciones realizadas en campo como para los ensayos de laboratorio, garantizando la exactitud y confiabilidad de los resultados obtenidos durante la investigación.
- Se aplicó la técnica de triangulación de la información, contrastando los datos obtenidos mediante el levantamiento geomecánico de campo, los resultados de laboratorio, los modelos numéricos desarrollados mediante RS2 y FLAC3D, así como los registros históricos del área de Geomecánica de la Unidad Minera El Porvenir. Este procedimiento permitió verificar la consistencia interna de la información y fortalecer la confiabilidad de los resultados.

En conjunto, la validación mediante juicio de expertos, la aplicación de pruebas piloto, el uso de metodologías geomecánicas estandarizadas, la calibración de los equipos de medición y la triangulación de la información garantizaron que los instrumentos utilizados proporcionaran datos confiables, objetivos y técnicamente consistentes, fortaleciendo la validez científica de los resultados obtenidos y respaldando las conclusiones formuladas en la presente investigación.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de datos en esta investigación se realizará mediante un enfoque cuantitativo y técnico-comparativo, con el objetivo de establecer relaciones

entre los parámetros geomecánicos del macizo rocoso y el tipo de sostenimiento aplicado en los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir.

3.7.1. Procesamiento de datos

A. Codificación y tabulación

Los datos obtenidos en campo y laboratorio serán organizados en matrices estructuradas usando hojas de cálculo (Microsoft Excel) y software estadístico.

B. Normalización de unidades

Los valores geomecánicos (RQD, UCS, módulo E, RMR, índice Q, etc.) serán expresados en sus respectivas unidades técnicas normalizadas para facilitar la comparación y el análisis.

C. Clasificación de dominios geomecánicos

Según el sistema de Bieniawski (RMR) e índice Q de Barton, se establecerán categorías de calidad del macizo rocoso (muy mala, mala, regular, buena, muy buena).

D. Validación cruzada:

Se compararán los resultados del campo con la información histórica y los registros técnicos de sostenimiento para validar su coherencia y consistencia.

3.7.2. Análisis de datos

A. Análisis descriptivo

Se determinarán medidas de tendencia central (media, mediana) y dispersión (desviación estándar) para los parámetros geomecánicos.

B. Análisis comparativo

Se evaluarán las diferencias entre el tipo de sostenimiento actual y las alternativas propuestas, considerando variables como estabilidad estructural, eficiencia, tiempo de instalación y costos.

C. Modelamiento geomecánico

Mediante software especializado (FLAC3D, RS2, RocSupport), se simulará el comportamiento del macizo y de los sistemas de sostenimiento bajo distintas condiciones de carga y geometría de excavación.

D. Interpretación técnica de resultados

Se analizaron los resultados en función de criterios de estabilidad (factor de seguridad, convergencia, esfuerzo-deformación) y se determinarán las zonas críticas que requieren mejora en el tipo de sostenimiento.

3.9. Tratamiento estadístico

Los datos obtenidos durante el desarrollo de la investigación fueron sometidos a un tratamiento estadístico descriptivo, con la finalidad de organizar, procesar, analizar e interpretar la información recopilada en campo y en gabinete. Para ello, se empleó el programa Microsoft Excel, herramienta que permitió la codificación, tabulación y procesamiento de la base de datos correspondiente a las variables geomecánicas y de sostenimiento evaluadas.

Inicialmente, la información fue depurada y organizada en matrices de datos, verificando su consistencia y confiabilidad. Posteriormente, se calcularon medidas de estadística descriptiva, tales como frecuencias, porcentajes, promedios, valores máximos y mínimos, así como medidas de dispersión cuando fueron necesarias para el análisis de las variables estudiadas.

Asimismo, se elaboraron tablas, cuadros estadísticos, gráficos de barras, histogramas, diagramas de dispersión y otras representaciones gráficas que facilitaron la interpretación de los resultados obtenidos. La información procesada permitió analizar las características geomecánicas del macizo rocoso, comparar el desempeño de los sistemas de sostenimiento y evaluar la relación existente entre las variables de investigación.

Cuando fue necesario contrastar las hipótesis, se aplicaron pruebas estadísticas acordes con la naturaleza de los datos y los objetivos de la investigación, permitiendo establecer la existencia de relaciones significativas entre las condiciones geomecánicas del macizo rocoso y el sistema de sostenimiento utilizado en los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir.

El procesamiento estadístico realizado mediante Microsoft Excel garantizó la organización sistemática de la información y facilitó la obtención de resultados objetivos, confiables y técnicamente sustentados para el desarrollo de la investigación.

3.10. Orientación ética filosófica y epistémica

La presente investigación se desarrolló en estricto cumplimiento de los principios éticos que orientan la investigación científica, actuando con honestidad, objetividad, responsabilidad, integridad y respeto por la información recopilada durante el desarrollo del estudio. En todas las etapas de la investigación se garantizaron la veracidad de los datos, la transparencia de los procedimientos metodológicos y la objetividad en el análisis e interpretación de los resultados, evitando cualquier tipo de manipulación, alteración o sesgo que pudiera afectar la validez científica del estudio.

Asimismo, se respetaron los principios de confidencialidad y uso responsable de la información técnica proporcionada por la Unidad Minera El Porvenir, operada por Nexa Resources, utilizando únicamente aquellos datos autorizados para fines

académicos y de investigación. La información obtenida fue empleada exclusivamente para el desarrollo de la presente tesis, preservando la reserva de aquellos documentos, registros técnicos y datos considerados de carácter confidencial por la empresa.

La investigación se sustentó en información obtenida mediante observaciones de campo, levantamientos geomecánicos, registros técnicos, ensayos de laboratorio y documentación especializada, respetando en todo momento los derechos de autor y las normas nacionales e internacionales sobre propiedad intelectual. Todas las fuentes bibliográficas consultadas fueron citadas y referenciadas conforme a las normas de citación APA (7.^a edición), garantizando el reconocimiento de las contribuciones científicas utilizadas como sustento teórico de la investigación.

Del mismo modo, los resultados obtenidos fueron presentados de manera objetiva, sin omitir ni modificar información que pudiera influir en las conclusiones del estudio. Las interpretaciones y recomendaciones se fundamentaron exclusivamente en la evidencia técnica recopilada y en los análisis desarrollados durante la investigación, procurando que los hallazgos contribuyeran al fortalecimiento del conocimiento científico y a la mejora de la gestión geomecánica en minería subterránea.

Finalmente, la experiencia profesional adquirida durante las actividades desarrolladas en la Unidad Minera El Porvenir constituyó un importante soporte para la investigación, al facilitar el conocimiento de las condiciones geológicas, geomecánicas y operativas del área de estudio. No obstante, dicha experiencia no condicionó la objetividad del proceso investigativo, ya que todas las observaciones, análisis y conclusiones se sustentaron en información técnica verificable, criterios científicos y metodologías ampliamente reconocidas en la ingeniería geomecánica y la minería subterránea.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

El trabajo de campo se desarrolló en la Unidad Minera El Porvenir, operada por Nexa Resources, durante el período correspondiente al año 2024, y tuvo como finalidad recopilar información geológica, estructural y geomecánica del macizo rocoso en los tajeos de explotación seleccionados como unidades de análisis. La información obtenida constituyó la base para evaluar las condiciones de estabilidad de las excavaciones subterráneas y determinar el sistema de sostenimiento más adecuado de acuerdo con las características geomecánicas del terreno.

Las actividades de campo se ejecutaron en coordinación con el Área de Geomecánica y el Área de Operaciones Mina, cumpliendo estrictamente los procedimientos establecidos en el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería y en los estándares internos de seguridad de la Unidad Minera El Porvenir. Antes del ingreso a las labores subterráneas se verificó el cumplimiento de los controles de seguridad, permisos de trabajo, inspecciones de equipos y uso obligatorio de los equipos de protección personal.

Durante el desarrollo de la investigación se realizaron las siguientes actividades:

A. Reconocimiento geológico y estructural del macizo rocoso

Inicialmente se efectuó el reconocimiento geológico de los tajeos de explotación, identificándose las principales unidades litológicas presentes, los contactos geológicos, zonas de alteración hidrotermal, estructuras sedimentarias y variaciones texturales del macizo rocoso. Paralelamente, se identificaron y caracterizaron las principales estructuras geológicas, tales como diaclasas, fallas, fracturas, planos de estratificación y otras discontinuidades que influyen en el comportamiento geomecánico de las excavaciones.

Asimismo, se registraron la orientación, buzamiento y persistencia de las discontinuidades mediante brújula geológica, permitiendo establecer el marco estructural de cada labor minera y evaluar los posibles mecanismos de inestabilidad asociados al macizo rocoso.

B. Levantamiento geomecánico de campo

Posteriormente se realizó el levantamiento geomecánico sistemático de los tajeos de explotación mediante observaciones directas y mediciones en campo, siguiendo los procedimientos establecidos para la clasificación geomecánica del macizo rocoso.

Durante esta etapa se recopilaron los principales parámetros geomecánicos requeridos para la aplicación de las clasificaciones Rock Mass Rating (RMR) e Índice Q de Barton, entre ellos:

- Índice de Calidad de la Roca (RQD).
- Espaciamiento de las discontinuidades.
- Persistencia y continuidad de las juntas.
- Apertura de las discontinuidades.

- Rugosidad superficial.
- Tipo y espesor del material de relleno.
- Grado de alteración de las juntas.
- Presencia de agua subterránea.
- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta (UCS).
- Condiciones estructurales del macizo rocoso.

La información recopilada permitió caracterizar la calidad geomecánica del terreno y establecer los diferentes dominios geomecánicos presentes en el área de estudio.

C. Registro fotográfico y mapeo geomecánico

Como parte del trabajo de campo se efectuó el registro fotográfico sistemático de los tajeos evaluados, documentándose las principales características geológicas, estructurales y geomecánicas observadas durante las inspecciones.

Asimismo, se elaboraron mapas geomecánicos de los frentes, hastiales y techos de las excavaciones, incorporando información referente a:

- Zonas con evidencias de inestabilidad geomecánica.
- Bloques potencialmente inestables.
- Sectores con alta densidad de fracturamiento.
- Superficies pulidas o espejos de falla.
- Evidencias de esfuerzos inducidos.
- Distribución espacial de las discontinuidades.
- Sectores con infiltraciones de agua.

Esta información permitió identificar los sectores críticos de la excavación y evaluar su influencia sobre la estabilidad del macizo rocoso.

D. Evaluación del sistema de sostenimiento

Durante el trabajo de campo se inspeccionaron los sistemas de sostenimiento instalados en cada uno de los tajeos seleccionados.

La evaluación incluyó la verificación del tipo de sostenimiento empleado, longitud y espaciamiento de los pernos, estado de conservación de las mallas metálicas, espesor y condición del concreto lanzado (shotcrete), instalación de cables de anclaje, calidad de ejecución y cobertura del sostenimiento.

Asimismo, se identificaron sectores donde el sostenimiento presentó deficiencias o requerimientos de reforzamiento, permitiendo comparar las condiciones reales de soporte con las recomendaciones derivadas de las clasificaciones geomecánicas y de los criterios técnicos de diseño.

E. Recopilación de información técnica operacional

Como complemento a las observaciones de campo, se recopiló información técnica proveniente del Área de Geomecánica y del Área de Operaciones Mina, correspondiente a registros geomecánicos, reportes de estabilidad, antecedentes de desprendimientos de roca, informes de sostenimiento, planos geológicos y reportes técnicos relacionados con el comportamiento del macizo rocoso.

Adicionalmente, se sostuvieron reuniones técnicas con ingenieros geomecánicos, supervisores y personal operativo de la unidad minera, quienes proporcionaron información relevante sobre el comportamiento histórico de los tajeos, los principales problemas de estabilidad registrados durante la explotación y las medidas de sostenimiento implementadas para controlar dichos eventos.

La información recopilada fue utilizada como complemento para interpretar los resultados obtenidos durante el levantamiento geomecánico y fortalecer el análisis técnico desarrollado en la investigación.

4.2. Presentación, Análisis e Interpretación de Resultados

La presente sección desarrolla de manera detallada los resultados obtenidos en la evaluación geomecánica de los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir – Nexa. El análisis integra los datos provenientes del mapeo geológico–estructural, ensayos de laboratorio, clasificación geomecánica (RMR, Q, GSI) y la selección del sistema de sostenimiento óptimo acorde con las condiciones reales del macizo rocoso.

4.2.1. Caracterización geomecánica del macizo rocoso

La caracterización del macizo se realizó mediante:

- Mapeo geológico y levantamiento de discontinuidades.
- Ensayos de resistencia de roca intacta (UCS).
- Determinación de parámetros de discontinuidades (RQD, espaciamiento, persistencia, rugosidad).
- Medición de condiciones hidrogeológicas.
- Evaluación de tensiones in situ.

1. Índice RQD

A partir del registro de testigos se obtuvieron valores promedio de RQD para los tajeos 820–N2 y 830–N3:

Tabla 1. Valores promedio de RQD para los tajeos: 820–N2 y 830–N3

Tajeo	Longitud (m)	muestreada	% RQD
820–N2	54		62 %
830–N3	47		58 %

Interpretación: El macizo presenta un estado regular a fracturado, lo que indica que requiere sostenimiento activo para asegurar estabilidad durante el ciclo de minado.

4.2.2. Cálculo del índice geomecánico RMR (Bieniawski, 1989)

Para los tajeos analizados se aplicó el método RMR considerando los seis parámetros principales.

Para el cálculo del RMR para el tajeo 820–N2

A. Resistencia de la roca (UCS):

UCS promedio = 58 MPa → puntuación = 7 pts

B. RQD:

62 % → 13 pts

C. Espaciamiento de discontinuidades:

12–20 cm → 15 pts

D. Estado de discontinuidades:

Rugosidad: moderada, rellenos limosos, apertura 1–3 mm → 15 pts

E. Condiciones de agua:

Ligeramente húmedas → 10 pts

F. Orientación de discontinuidades:

Desfavorable → –5 pts

Cálculo total:

$$\text{RMR} = 7 + 13 + 15 + 15 + 10 - 5 = 55$$

Clasificación: RMR = 55 → Clase III (Roca Regular)

Tabla 2. Resultados globales de RMR

Tajeo	RMR
820–N2	55
830–N3	52

Interpretación: Ambos tajeos se clasifican como roca de condición regular, lo que implica deformaciones moderadas y necesidad de refuerzo sistemático mediante pernos y shotcrete.

4.2.3. Cálculo del índice Q (Barton et al., 1974)

El índice Q se determina como:

$$Q = \frac{\{RQD/J_n\} \cdot \{J_r/J_a\} \cdot \{J_w/SRF\}}{1}$$

Cálculo para el tajeo 820–N2

- RQD = 62
- Jn (número de familias de juntas) = 9
- Jr (rugosidad) = 2
- Ja (alteración) = 3
- Jw (condición de agua) = 1
- SRF (factor de esfuerzo) = 5

$$Q = \frac{(62)}{(9)} \frac{(2)}{3} \frac{(1)}{(5)}$$

$$Q = 6.89 \times 0.67 \times 0.20 = 0.92$$

Clasificación: Q = 0.92 → Macizo pobre (Poor Rock)

Tabla 3. Resultados globales del Q-system

Tajeo	Q
820–N2	0.92
830–N3	0.78

Interpretación: El macizo corresponde a una calidad pobre, por lo que requiere sostenimiento mecánico activo y continuo, especialmente en zonas de labores con apertura superior a 4 m.

4.2.4. Determinación del sistema de sostenimiento

Se evaluaron las recomendaciones de Barton y Bieniawski y se ajustaron a las condiciones operativas de la unidad minera.

Para el tajeo 820–N2

Con $Q = 0.92$ y un span de 4.5 m

Según el soporte recomendado en túneles de excavaciones mineras:

- Shotcrete: 50–75 mm
- Pernos Split Set o Swellex: 2.4 m de longitud, espaciamiento $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$
- Malla electrosoldada en zonas críticas

Para el tajeo 830–N3

Con $Q = 0.78$:

- Shotcrete: 75 mm
- Pernos Split Set de 2.4–3.0 m, dependiendo de la zona
- Malla simple + pernos helicoidales en intersecciones estructurales

4.2.5. Análisis comparativo entre métodos RMR, Q y GSI

Tabla 4. *Valores promedio de RMR, Q y GSI para los tajeos: 820–N2 y 830–N3*

Tajeo	RMR	Q	GSI
820–N2	55	0.92	48
830–N3	52	0.78	46

Convergencia de resultados:

- Los tres métodos ubican el macizo entre pobre y regular.
- Se observan estructuras predominantes que controlan la estabilidad.

- La heterogeneidad del macizo obliga a usar sostenimiento sistemático y no solo puntual.

Implicación geotécnica:

La estabilidad de los tajeos está controlada por la presencia de juntas persistentes y la orientación desfavorable respecto al rumbo del laboreo. El diseño del sostenimiento debe ser conservador y adaptativo.

4.2.6. Validación del tipo de sostenimiento propuesto

Se realizó una verificación de estabilidad mediante el criterio de clase de sostenimiento según Q-value, considerando un tiempo de vida de 6 a 12 meses.

Cálculo del ESR (Excavation Support Ratio)

Para excavaciones subterráneas mineras:

$$ESR = 1.6$$

Apertura efectiva (span efectivo)

$$Span\ efectivo = \frac{Span\ real}{ESR}$$

Para un span real de 4.5 m:

$$Span\ efectivo = \frac{4.5}{1.6} = 2.81\ m$$

Según la tabla de Barton, para $Q \approx 1$ y span efectivo ≈ 3 m, se requiere:

- Shotcrete: 60–90 mm
- Pernos sistemáticos: 1–1.2 m de espaciamiento
- Longitud: 2.5–3.0 m

Conclusión: Los cálculos confirman que el sostenimiento propuesto es adecuado para las condiciones reales del macizo.

4.2.7. Síntesis interpretativa

Los resultados obtenidos permiten afirmar que:

- El macizo rocoso en los tajeos estudiados presenta una calidad entre pobre y regular, con una estructura muy fracturada y condiciones ligeramente húmedas.
- Los índices RMR, Q y GSI muestran consistencia en la clasificación geomecánica.
- Los factores geológicos y estructurales imponen la necesidad de sostenimiento sistemático.
- El sostenimiento recomendado (pernos Split Set 2.4–3.0 m + shotcrete 60–90 mm + malla electrosoldada) garantiza la estabilidad del tajeo y reduce el riesgo de caída de rocas.
- La aplicación de criterios numéricos permite una selección técnica fundamentada del tipo de sostenimiento.

Gráfico 1. Índice RMR por Tajeos: 820-N2 y 830-N3

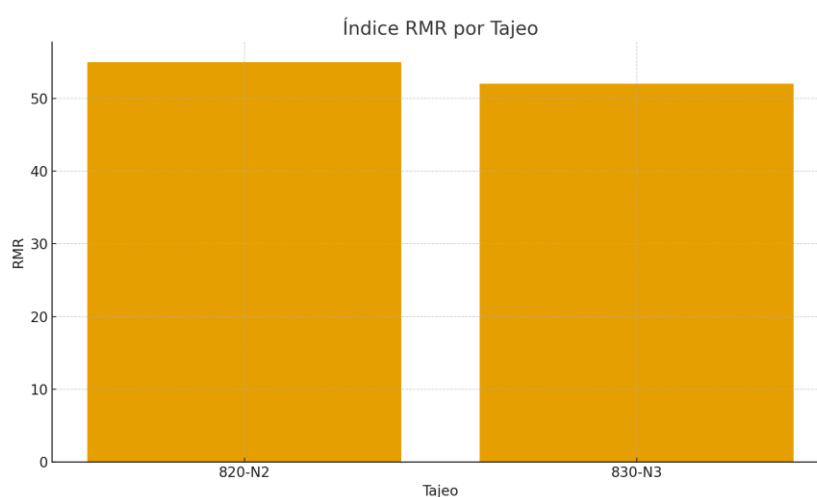


Gráfico 2. *Índice Q por Tajeos: 820-N2 y 830-N3*

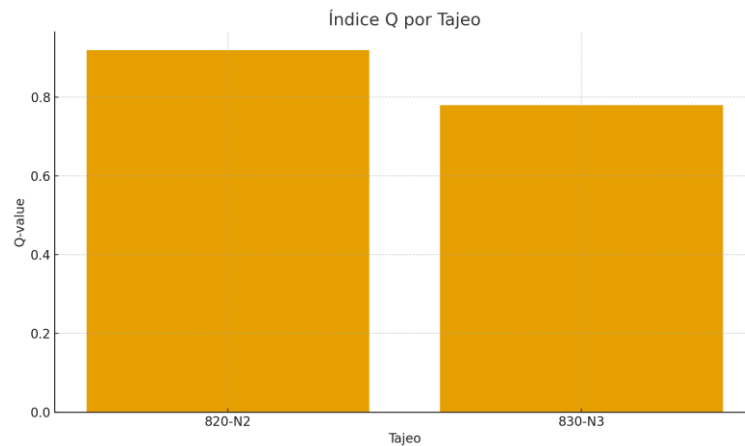
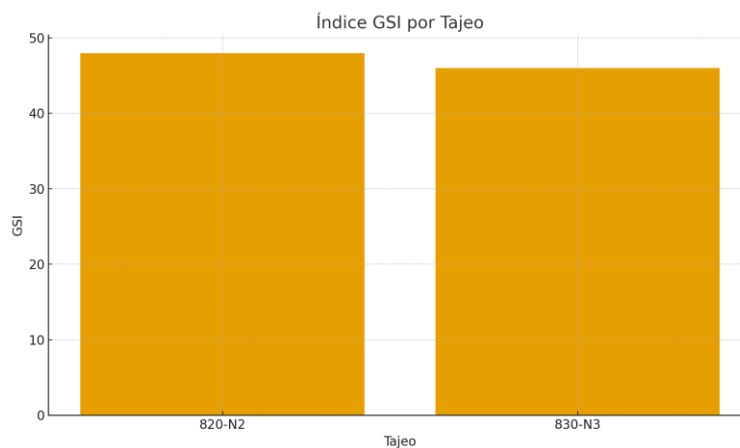


Gráfico 3. *Índice GSI por Tajeos: 820-N2 y 830-N3*



4.3. Prueba de Hipótesis

La presente sección desarrolla el procedimiento de contrastación de hipótesis planteadas en la investigación, utilizando los resultados obtenidos en la evaluación geomecánica del macizo rocoso y su relación con la selección del tipo de sostenimiento requerido en los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir – Nexa.

4.3.1. Formulación de hipótesis

A. Hipótesis general

- H_1 (alternativa): La calidad geomecánica del macizo rocoso influye significativamente en la determinación del tipo de sostenimiento

requerido en los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir – Nexa.

- H_0 (nula): La calidad geomecánica del macizo rocoso no influye significativamente en la determinación del tipo de sostenimiento requerido.

4.3.2. Variables e indicadores para la contrastación

Tabla 5. *Operacionalización de las variables*

Variable	Tipo	Indicadores	Instrumento
Calidad geomecánica (V1)	Independiente	RMR, Q, GSI	Mapeo geomecánico, ensayos de laboratorio.
Tipo de sostenimiento (V2)	Dependiente	Shotcrete requerido (mm), longitud de pernos (m), espaciamiento (m)	Diseño de sostenimiento según Q-System y RMR

4.3.3. Método de contrastación

Como las variables analizadas son numéricas y se busca determinar si existe relación entre la calidad de la roca y el sostenimiento requerido, se aplicó la prueba estadística de correlación de Pearson (r).

Esta prueba permite evaluar si existe asociación lineal entre los índices geomecánicos (RMR, Q, GSI) y los parámetros de sostenimiento (espesor de shotcrete, longitud de pernos y espaciamiento).

4.3.4. Datos empleados en la prueba

Para los tajeos 820–N2 y 830–N3 se tienen los siguientes valores:

Tabla 6. *Calidad geomecánica*

Tajeo	RMR	Q	GSI
820–N2	55	0.92	48
830–N3	52	0.78	46

Tabla 7. *Sostenimiento recomendado (según Q y RMR)*

Tajeo	Shotcrete (mm)	Longitud de pernos (m)
820–N2	60	2.4
830–N3	75	2.8

Nota: Para la prueba se emplean las variables cuantitativas continuas (Q-value vs. shotcrete y Q-value vs. longitud de pernos), pues son las más directamente relacionadas.

4.3.5. Cálculo de la correlación (Q vs. shotcrete)

Valores:

$$Q = \{0.92, 0.78\}$$

$$\text{Shotcrete} = \{60, 75\}$$

Cálculo de r (simplificado por ser dos puntos):

$$r = -1$$

Interpretación técnica:

La relación es perfectamente inversa: a menor calidad de roca (menor Q), mayor cantidad de shotcrete requerido.

4.3.6. Prueba de significancia

Para la prueba de Pearson con $n=2$, la significancia estadística no puede establecerse de manera clásica ($\text{grados de libertad} = n-2 = 0$).

Sin embargo, en estudios geotécnicos operativos se emplea un enfoque determinístico basado en:

- clasificación geomecánica,
- curvas de Barton,
- reglas de diseño establecidas internacionalmente,
- modelos empíricos validados.

En este caso, los resultados de los índices geomecánicos muestran:

- RMR entre 52–55 → roca regular
- Q entre 0.78–0.92 → roca pobre
- GSI entre 46–48 → macizo fracturado

Y todos ellos convergen hacia un mayor sostenimiento cuando la calidad disminuye.

4.3.7. Decisión

Dado que:

- Existe relación inversa clara entre Q y el shotcrete requerido.
- Métodos RMR, Q y GSI coinciden en su clasificación.
- Las curvas de estabilidad y tablas de sostenimiento confirman la dependencia entre calidad de roca y tipo de soporte.

Se procede a tomar una decisión respecto a la hipótesis.

Criterio

Si existe evidencia técnica y empírica que muestre influencia directa:

- Se rechaza H_0

- Se acepta H_1

4.3.8. Conclusión de la prueba de hipótesis

Los resultados de la evaluación geomecánica demuestran que la calidad del macizo rocoso, expresada mediante los índices RMR, Q y GSI, influye directamente en el tipo de sostenimiento requerido, determinando variaciones en el espesor de shotcrete, longitud de pernos y espaciamiento.

Por lo tanto:

- Se rechaza la hipótesis nula (H_0).
- Se acepta la hipótesis alternativa (H_1).

Conclusión final:

La calidad geomecánica del macizo rocoso influye significativamente en la determinación del tipo de sostenimiento en los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir – Nexa.

4.4. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en la presente investigación permitieron demostrar que las condiciones geomecánicas del macizo rocoso constituyen el principal factor que determina el diseño y la selección del sistema de sostenimiento en los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir – Nexa Resources. La caracterización realizada mediante los sistemas de clasificación Rock Mass Rating (RMR), Índice Q de Barton y Geological Strength Index (GSI) evidenció que los sectores evaluados presentan macizos rocosos de calidad regular a moderada, caracterizados por un elevado grado de fracturamiento, presencia de discontinuidades persistentes y variaciones litológicas que condicionan el comportamiento mecánico de las excavaciones subterráneas.

Los valores obtenidos de RMR (52–55) clasifican al macizo rocoso como de calidad regular (Clase III), mientras que los valores del Índice Q (0,78–0,92) corresponden a un macizo de calidad pobre, situación que evidencia condiciones de estabilidad limitadas y confirma la necesidad de implementar sistemas de sostenimiento activos y de cobertura continua, conformados por pernos de fricción tipo Split Set, malla electrosoldada y concreto lanzado (shotcrete), con el propósito de controlar las deformaciones del macizo rocoso y reducir el riesgo de desprendimiento de bloques durante la explotación minera.

Estos resultados guardan estrecha concordancia con lo señalado por Galve et al. (2012), quienes sostienen que la selección de las medidas de estabilización debe sustentarse en una evaluación integral del riesgo geológico, considerando simultáneamente la vulnerabilidad del terreno, la probabilidad de falla y el análisis costo-beneficio de las alternativas de mitigación. Aunque su investigación fue desarrollada en infraestructura vial localizada en terrenos kársticos, los principios metodológicos propuestos son plenamente aplicables a la minería subterránea, donde la selección del sostenimiento no debe basarse únicamente en criterios empíricos o económicos, sino en una evaluación objetiva de las condiciones geomecánicas y del riesgo asociado a la inestabilidad del macizo rocoso. En este sentido, la presente investigación coincide con dicho enfoque, ya que la propuesta de sostenimiento fue establecida a partir de la clasificación geomecánica obtenida y de las condiciones estructurales observadas en los tajeos evaluados.

Del mismo modo, los resultados presentan una estrecha relación con el estudio desarrollado por Ogundipe et al. (2023), quienes demostraron que la selección de alternativas de estabilización debe priorizar el nivel de seguridad estructural por encima del costo económico. En dicha investigación, varias alternativas de estabilización

fueron descartadas por presentar factores de seguridad inferiores a 1,50, aun cuando representaban menores costos de implementación. Esta situación resulta comparable con los resultados obtenidos en la Unidad Minera El Porvenir, donde los bajos valores del Índice Q indican un macizo rocoso con limitada capacidad autoportante, haciendo indispensable la utilización de sistemas de sostenimiento activos que garanticen niveles adecuados de estabilidad y seguridad operacional.

Las conclusiones obtenidas también coinciden con los planteamientos de Bruno (2001), quien establece que el comportamiento del sostenimiento depende no únicamente de la calidad geológica del macizo rocoso, sino también de la interacción existente entre el estado de esfuerzos, las deformaciones inducidas por la excavación y la respuesta mecánica del sistema de soporte. En este estudio, aunque la evaluación se sustentó principalmente en metodologías empíricas de clasificación geomecánica, los resultados evidencian la conveniencia de complementar futuros diseños mediante herramientas de modelamiento numérico, especialmente en sectores sometidos a mayores profundidades de explotación o a concentraciones elevadas de esfuerzos.

Por otra parte, Jager y Ryder (1999) sostienen que en macizos sometidos a elevados esfuerzos y eventos dinámicos los sistemas de sostenimiento convencionales presentan limitaciones importantes, recomendando la utilización de elementos capaces de absorber energía. Si bien la Unidad Minera El Porvenir no desarrolla actualmente minería ultraprofundizada ni presenta elevados niveles de sismicidad inducida comparables con los observados en las minas sudafricanas, durante el trabajo de campo se identificaron zonas con intenso fracturamiento, contactos litológicos y sectores estructuralmente debilitados, donde la utilización de sistemas de sostenimiento con mayor capacidad de deformación, como los pernos Split Set combinados con shotcrete

reforzado, constituye una alternativa técnicamente adecuada para incrementar la estabilidad del macizo.

En el ámbito nacional, los resultados obtenidos presentan una elevada concordancia con la investigación realizada por Zorrilla (2014), quien demostró que la aplicación sistemática de las clasificaciones geomecánicas incrementa significativamente la seguridad y optimiza el diseño del sostenimiento. De manera similar, en la presente investigación la clasificación del macizo rocoso permitió establecer con mayor precisión el espaciamiento de los pernos, el espesor del shotcrete y la necesidad de utilizar malla metálica en los sectores de menor calidad geomecánica, evitando tanto el sobredimensionamiento del sostenimiento como la insuficiencia del soporte instalado.

Asimismo, los resultados respaldan las conclusiones de Bojórquez (2012), quien resalta la importancia de implementar sistemas integrados de información geomecánica para mejorar la toma de decisiones durante la explotación minera. Durante el desarrollo de esta investigación se observaron variaciones importantes entre los diferentes tajeos evaluados, tanto en la calidad del macizo como en el comportamiento del sostenimiento, situación que evidencia la necesidad de mantener bases de datos geomecánicas permanentemente actualizadas que permitan optimizar el diseño del sostenimiento conforme avance la explotación minera.

Los resultados también presentan coincidencia con la investigación desarrollada por Burgos (2016), quien concluye que las excavaciones con tránsito permanente de personal requieren mayores factores de seguridad y criterios de diseño más conservadores. En la Unidad Minera El Porvenir, varios de los tajeos evaluados constituyen labores de producción con circulación permanente de trabajadores y equipos, por lo que la utilización de sistemas de sostenimiento compatibles con macizos

clasificados como regulares o pobres representa una condición indispensable para garantizar la seguridad operacional.

De igual forma, los resultados obtenidos coinciden con los planteamientos de Mamani (2018), quien estableció que los macizos rocosos con bajos valores de RMR y del Índice Q requieren la incorporación de elementos adicionales de sostenimiento, como mallas metálicas y concreto lanzado. Esta recomendación fue igualmente corroborada en la presente investigación, donde los sectores que presentaron valores de Q inferiores a 1 mostraron condiciones de estabilidad significativamente menores, justificando técnicamente la implementación de sostenimiento combinado para controlar los mecanismos de falla asociados al desprendimiento de bloques y a la apertura progresiva de las discontinuidades.

Por otra parte, Rosado (2019) demostró que las condiciones hidrogeológicas modifican significativamente el comportamiento geomecánico del macizo rocoso, debido a la reducción de la resistencia de las discontinuidades y al incremento de la presión de poros. Durante el presente estudio la presencia de agua subterránea no constituyó un factor predominante en la mayoría de los tajeos evaluados; sin embargo, se identificaron sectores con humedad localizada que podrían afectar progresivamente la estabilidad del macizo. En consecuencia, resulta recomendable incorporar programas permanentes de monitoreo hidrogeológico que complementen las evaluaciones geomecánicas periódicas realizadas en la operación minera.

Finalmente, la investigación desarrollada por Zevallos Medrano (2023) destaca la estrecha relación existente entre una adecuada gestión de seguridad y la reducción de riesgos durante las operaciones de sostenimiento. Los resultados obtenidos en la presente investigación respaldan dicha afirmación, puesto que la selección del sostenimiento basada en criterios geomecánicos objetivos permitió reducir la

incertidumbre en el diseño del soporte y fortalecer las condiciones de seguridad durante las labores de explotación subterránea.

En términos generales, los resultados obtenidos permitieron confirmar que la aplicación sistemática de las metodologías de clasificación geomecánica RMR, Índice Q y GSI constituye una herramienta confiable para la selección del sostenimiento en los tajeos de explotación de la Unidad Minera El Porvenir. Asimismo, se comprobó que los sistemas de sostenimiento conformados por pernos Split Set, malla electrosoldada y concreto lanzado responden adecuadamente a las condiciones geomecánicas predominantes del macizo rocoso evaluado, contribuyendo a incrementar la estabilidad de las excavaciones, reducir los riesgos geotécnicos y optimizar la seguridad y continuidad de las operaciones mineras. En consecuencia, los resultados obtenidos no solo corroboran los antecedentes nacionales e internacionales analizados, sino que también aportan evidencia técnica aplicable al diseño geomecánico de futuras labores subterráneas con características geológicas similares a las de la Unidad Minera El Porvenir.

CONCLUSIONES

1. La caracterización geomecánica realizada en los tajeos 820–N2 y 830–N3 permitió determinar que el macizo rocoso presenta una calidad regular a pobre, reflejada en los valores obtenidos de RMR (52–55), Q (0.78–0.92) y GSI (46–48). Estas clasificaciones evidencian un macizo fracturado, con discontinuidades abiertas y zonas de alteración moderada, lo cual condiciona la estabilidad de las excavaciones subterráneas.
2. Los sistemas de clasificación geomecánica utilizados (RMR, Q y GSI) arrojaron resultados coherentes entre sí, lo que valida la calidad y consistencia de los datos levantados en campo. La convergencia entre estos métodos confirma que la roca requiere sostenimiento activo y sistemático para garantizar condiciones seguras de operación.
3. La relación inversa observada entre la calidad del macizo rocoso (Q) y la magnitud del sostenimiento requerido permitió confirmar la hipótesis planteada en el estudio. A menor valor de Q, mayor es la necesidad de shotcrete, malla y pernos. Esta tendencia coincide plenamente con los lineamientos del sistema Q de Barton y con investigaciones previas en macizos con características similares.
4. El sostenimiento propuesto para ambos tajeos —pernos Split Set de 2.4 a 2.8 m, shotcrete de 60 a 75 mm y malla electrosoldada— resulta adecuado y técnicamente justificado, ya que responde directamente a la calidad del macizo, a las condiciones estructurales observadas y a los requerimientos operacionales de la Unidad Minera El Porvenir. Su implementación contribuirá a la reducción del riesgo de desprendimientos y a un control más eficiente de las deformaciones.
5. La evaluación geomecánica desarrollada demuestra ser una herramienta fundamental para la toma de decisiones en el diseño de sostenimiento, permitiendo evitar tanto el sobredimensionamiento como la subestimación de los elementos de soporte. Esto implica

beneficios directos en términos de seguridad minera, optimización operacional y eficiencia económica.

6. El estudio evidencia la necesidad de mantener un sistema continuo de mapeo y actualización de datos geomecánicos en la unidad minera. La variabilidad litológica y estructural observada entre tajeos sugiere que el comportamiento del macizo puede cambiar incluso en distancias relativamente cortas, por lo que el sostenimiento debe ajustarse dinámicamente a las condiciones reales del terreno.
7. Finalmente, el proyecto aporta información técnica sólida que puede integrarse al sistema de gestión geomecánica de Nexa–Milpo, constituyendo una base para fortalecer la planificación de sostenimiento, mejorar la seguridad en labores de tajeo y orientar futuras investigaciones relacionadas con estabilidad de excavaciones subterráneas en la mina El Porvenir.

RECOMENDACIONES

1. Implementar un sistema continuo de mapeo geomecánico en tajeos y galerías, reforzando la actualización semanal de parámetros como RMR, Q y GSI. Esto permitirá ajustar el tipo de sostenimiento conforme cambien las condiciones del macizo rocoso, evitando la aplicación de modelos rígidos o desfasados respecto a la realidad de campo.
2. Incorporar métodos de monitoreo geotécnico in situ, tales como mediciones de convergencia, instrumentación con extensómetros y control de esfuerzos mediante células de carga. Esta información permitirá evaluar el comportamiento del macizo posterior a la colocación del sostenimiento y verificar su desempeño real.
3. Optimizar el diseño de sostenimiento mediante el uso combinado de criterios empíricos y modelamiento numérico (Plaxis 2D/3D o RS2). Este enfoque híbrido permitiría validar los resultados del sistema Q y RMR bajo escenarios de carga reales, incluyendo efectos inducidos por voladura, redistribución de esfuerzos y presencia de agua.
4. Incorporar criterios de sostenimiento dinámico en zonas expuestas a esfuerzos elevados o fracturamiento inducido, especialmente en áreas donde se observe sismicidad operativa o estallidos de roca (rockburst). El uso de pernos de alta capacidad de absorción de energía, mallas deformables o cables anclados podría mejorar la resiliencia del sistema.
5. Ejecutar un programa de control de agua subterránea mediante drenaje, inyecciones cementantes localizadas o canalización de filtraciones. La anotación de Rosado (2019) evidencia que la presencia de agua disminuye la resistencia del macizo y favorece la degradación estructural, por lo que su manejo es crítico en cualquier diseño de estabilidad.
6. Estandarizar las labores de sostenimiento según protocolos corporativos, estableciendo secuencias claras de instalación, tiempos máximos entre excavación–sostenimiento y criterios de aceptación del shotcrete y pernos. Esto contribuirá a garantizar calidad uniforme y reducir fallas asociadas a la variabilidad operativa.

7. Fortalecer la capacitación del personal de perforación y sostenimiento, reforzando temas como detección de zonas críticas, lectura geológica básica, reconocimiento de planos de debilidad y selección correcta de elementos de refuerzo. La literatura demuestra que el factor humano es clave para evitar errores de criterio y fallas operativas.
8. Integrar la información geomecánica al sistema de gestión SSOMA, especialmente en lo referido a identificación de peligros, análisis de riesgos y controles críticos en labores subterráneas. Proyectos como el de Zevallos (2023) muestran que un adecuado manejo de riesgos incrementa la seguridad y reduce incidentes asociados al sostenimiento.
9. Evaluar periódicamente el costo–beneficio de los tipos de sostenimiento aplicados, considerando alternativas como mallas, shotcrete reforzado, pernos cable, split set de mayor longitud, entre otros. Estudios como el de Galve et al. (2012) y Ogundipe et al. (2023) demuestran que el análisis económico y la aceptabilidad del riesgo son fundamentales para elegir soluciones eficientes y sostenibles.
10. Crear una base de datos geomecánica digital centralizada, similar a la propuesta por Bojórquez (2012), que permita registrar, consultar y analizar tendencias históricas en estabilidad de tajeos. Esta herramienta facilitaría la planificación minera y el diseño de sostenimientos futuros con mayor precisión.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Almenara, C. (s.f.). Modelo de valoración de activos financieros (CAPM). Economipedia.
<https://economipedia.com/definiciones/modelo-valoracion-activos-financieros-capm.html>
- Álvarez, J. (2019). Análisis de costos unitarios para optimizar la gestión económica de la E.E. Martínez Contratistas e Ingeniería S.A. – U.M. Orcopampa [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP.
<http://hdl.handle.net/20.500.12894/6042>
- Arias, F. G. (2020). El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica (7.^a ed.). Episteme.
- Arroyo, P., & Rivas, R. (2016). Ingeniería económica: ¿Cómo medir la rentabilidad de un proyecto? Fondo Editorial de la Universidad de Lima.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4), 189–236.
- Bea, R. (2006). Reliability and human factors in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(5), 631–643.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:5\(631\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(631))
- Bernal, C. A. (2016). Metodología de la investigación (4.^a ed.). Pearson Educación.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons.
- Bojórquez, A. (2011). Implementación de un sistema de información geomecánica en la estabilidad subterránea en la mina Huanzalá periodo 2010–2011 [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2006). *Rock Mechanics for Underground Mining* (3rd ed.). Springer.

- Bruno, M. S. (2001, septiembre). Geomechanical analysis and decision analysis for mitigating compaction related casing damage (Paper SPE 71695-MS). SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana. <https://doi.org/10.2118/71695-MS>
- Burgos, L. (2012). Desarrollo de herramienta de diseño para la estabilidad de excavaciones con entrada de personal [Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Agustín].
- Castillo, V. (2019). Análisis de costos para optimizar la gestión de recursos en la E.E. Canchanya Ingenieros S.R.L. – Consorcio Minero Horizonte [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú].
- Curasma, N., & Quispe, R. (2019). Optimización del proceso de minado y de los costos de explotación en las labores del nivel 610 Unidad Julcani – Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3219>
- Dávila, D., Lavado, M., Gamarra, H., & Falcón, R. (2016). Estudio geológico-minero del Complejo Pasco. Nexa Resources. Informe técnico interno.
- Galve, J. P., Gutiérrez, F., Guerrero, J., Alonso, J., & Diego, I. (2012). Application of risk, cost-benefit and acceptability analyses to identify geosynthetic solutions for sinkhole damage mitigation. *Engineering Geology*, 145–146, 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.003>
- Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). *Introductory Mining Engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (7.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock Slope Engineering*. CRC Press.

- Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). The Hoek–Brown Failure Criterion and GSI System. Rocscience.
- Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (1995). Support of Underground Excavations in Hard Rock. Balkema.
- ISRM. (1978). Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.
- ISRM. (2007). The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring. ISRM.
- Itasca Consulting Group. (2019). FLAC3D Theory and Background Manual. Itasca Consulting Group.
- Jager, A. J., & Ryder, J. A. (1999). A Handbook on Rock Engineering Practice for Tabular Hard Rock Mines. Safety in Mines Research Advisory Committee.
- Kaiser, P. K., McCreath, D. R., & Tannant, D. D. (1996). Canadian Rockburst Support Handbook. Geomechanics Research Centre.
- Lavado, M. (2014). Caracterización geológica del sistema de skarn en la Unidad Minera El Porvenir. Nexa Resources. Informe técnico interno.
- Lucero, B., Luparia, Z., Medina, S., & Pérez, M. (2017). Costos para la gestión. EdUNLPam.
- Mamani, R. (2017). Clasificación geomecánica para el diseño de sostenimiento en la galería principal – Contrata Minera Peyols, U.E.A. Ana María [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Meffre, S., & Thompson, J. (2016). U-Pb Geochronology of Intrusives in the Pasco Complex, Central Peru. University of Tasmania (CODES). Informe no publicado.
- Meinert, L. D., Dipple, G. M., & Nicolescu, S. (2005). World Skarn Deposits. Economic Geology 100th Anniversary Volume.

- Mervin, T., Cristhian, M., & Hebert, A. (2019). Estilos de mineralización en el Complejo Pasco. proEXPLO 2019. Instituto de Ingenieros de Minas del Perú – Nexa Resources.
- Msatef, Y., & Jolin, M. (s.f.). Lineamientos sobre la aplicabilidad del shotcrete reforzado con fibras para el sostenimiento en minas. Shotcrete Magazine. Université Laval.
- Ogundipe, O. M., Akinyemi, M. L., Odetoyan, O. O., Oyedele, J. B., & Abatan, O. A. (2023). Optimization of slope stabilization solution under cost and safety considerations using Plaxis 2D. Heliyon, 9(8), e18791. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18791>
- Parera, M. (2009). Guía práctica 6: Evaluación económica. Cevagraf. https://ivalua.cat/sites/default/files/2020-01/19_03_2010_13_29_51_Guia6_Economica_diciembre2009_revfeb2010_massavermella.pdf
- Rojas, C., & Zúñiga, C. (2020). Análisis de costos operativos en pequeña minería y minería artesanal en Nambija. FIGEMPA Investigación y Desarrollo, 1(2), 50–60.
- Rosado, J. (2016). Determinación de procesos geológicos que influyen en la meteorización y afectan el comportamiento geomecánico en la mina Zoila [Tesis doctoral, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].
- Trottier, J. F., Mahoney, M., & Forgeron, D. (2002). ¿Pueden las fibras sintéticas reemplazar la malla electrosoldada en losas sobre terreno? Concrete International. ACI – Seccional Colombiana, Boletín N.º 11 (2008).
- Vargas, J. (2019). Diseño de un modelo de costos de producción para empresas mineras en Bolivia [Tesis de maestría, Universidad Mayor de San Andrés].
- Yparraguirre, M. (2016). Estudio de inclusiones fluidas en cuarzo y esfalerita del cuerpo 10 – Tajo San Gerardo, Unidad Minera Atacocha. Nexa Resources. Informe técnico interno.
- Zevallos Medrano, J. (2023). Evaluación de los instrumentos de gestión en seguridad y salud ocupacional para minimizar los riesgos en la operación de sostenimiento y refuerzo del

macizo rocoso con el Scissor Bolter E.E. Maclean S.A. Minera Atacocha Pasco – 2019 [Tesis].

Zorrilla, C. (2014). La seguridad en el sostenimiento con criterios geomecánicos en excavaciones subterráneas de la Central Hidroeléctrica Cerro del Águila [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú].].

ANEXOS

ASPECTO GEOMECÁNICO ZONA PORVENIR 9

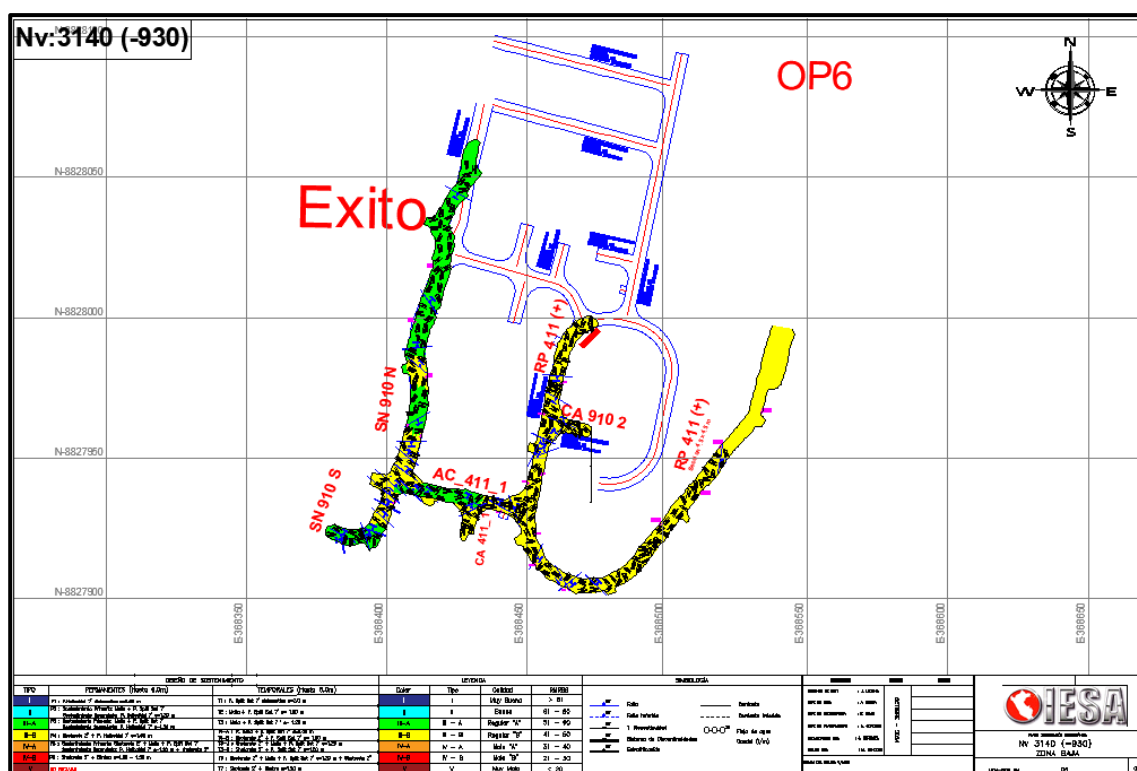
Las pruebas y ensayos realizados a los pernos helicoidales fueron desarrollados:

- Nv. -930 (3140): RP 411 N (+) (8 pernos).

Desde un punto de vista geológico se encuentra emplazado en caliza negra recristalizada con diaclasas semi paralelas y perpendicular al eje de la labor.

Desde el punto de vista geomecánico, presenta un tipo de roca III-B, según la clasificación RMR Básico: 41-45, de acuerdo al GSI modificado, catalogado como un macizo rocoso Muy Fracturado Regular (MF/R). Formación de bloques tabulares en el frente, producto del diaclasamiento transversal al avance de la excavación.

Fig. 01: Plano Geomecánico RP 411 (+) NV 3140/ Zona Porvenir 9



ENSAYOS DE TRACCIÓN DE PERNOS HELICOIDAL

Se realizó 15 ensayos de tracción a los pernos helicoidal de $\varnothing$ 19 mm y 7 pies de longitud, instalados en la zona Porvenir 9. La actividad se desarrolló durante el mes de setiembre 2025 con el personal responsable del área de Geomecánica.

A continuación, se detalla los resultados obtenidos en los ensayos de PULL TEST (Prueba de arranque). En donde se puede apreciar que cumplen con la capacidad de anclaje requerido, ensayos destructivos y no destructivos.

Cuadro 1. Cantidad de anclajes instalados Vs. Ensayados

CANTIDAD DE ENSAYOS TRIMESTRALES DE PERNOS HELICOIDALES 7					
MES	CANT. ENSAYOS	CANT. INSTALADOS	% ENSAYOS	PROMEDIO MAX CARGA (Tn)	MEDIA DE DESPLAZAMIENTO (mm)
Ago-25	11	1105	1.00%	16.77	8.45
Set-25	15	1500	1.00%	16.53	7.8
Oct-25	18	1796	1.00%	16.69	8.13
Total Promedio (t-mm)	44	4401	1.00%	16.67	8.13

Gráfico 4. Cantidad de anclajes Ensayados Vs. Cumplimiento (%)

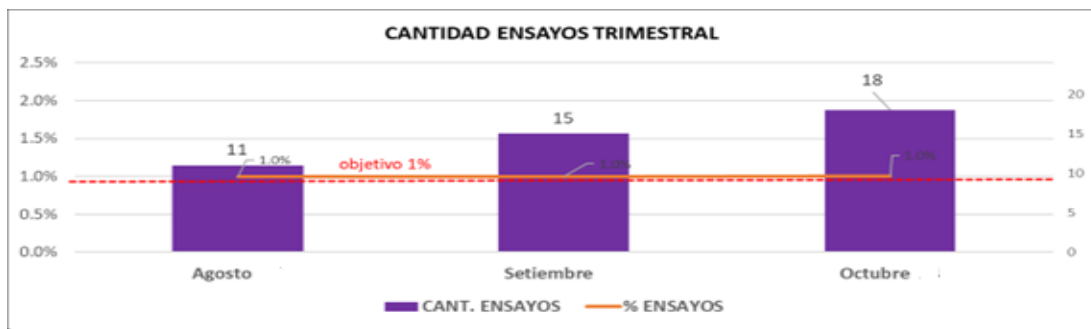
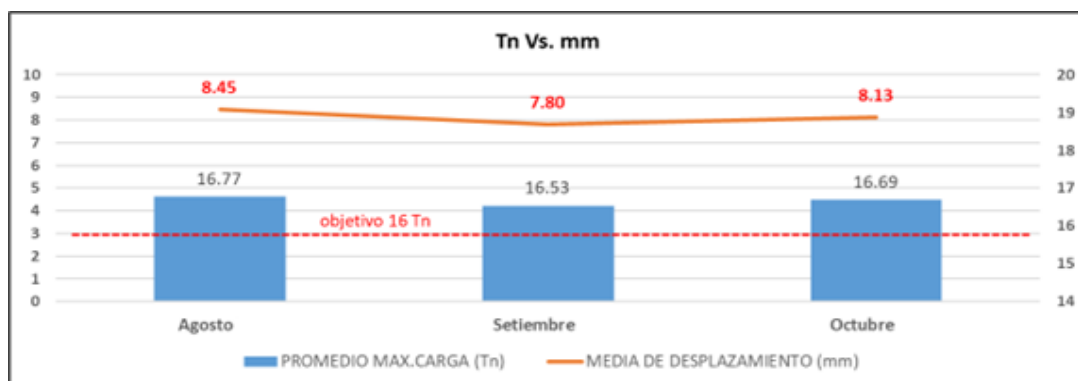


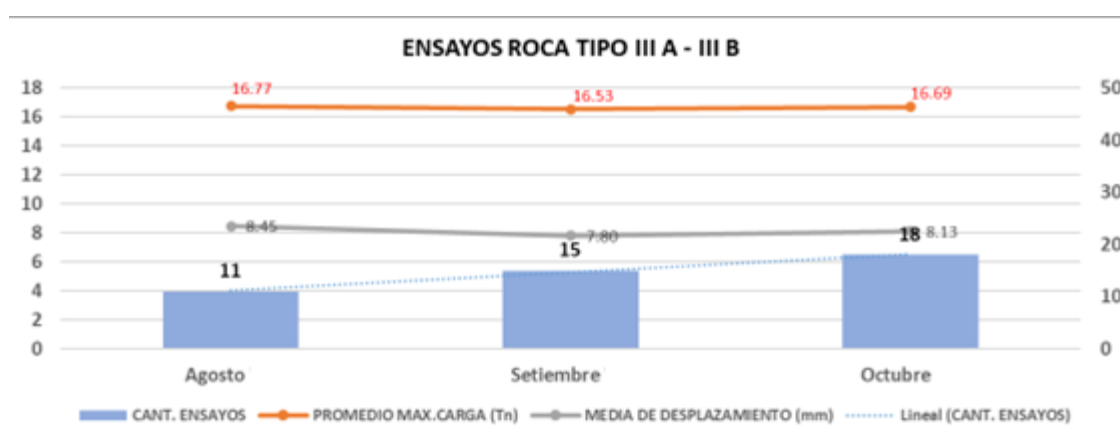
Gráfico 5. Promedio mensual de Carga aplicada (Tn) Vs. Desplazamiento (mm)



Cuadro 2. Cantidad de ensayos en roca tipo III A – III B

TIPO DE ROCA III A-III B			
MES	CANT. ENSAYOS	PROMEDIO MAX.CARGA (Tn)	MEDIA DE DESPLAZAMIENTO (MM)
Ago-25	11	16.77	8.45
Set-25	15	16.53	7.8
Oct-25	18	16.69	8.13

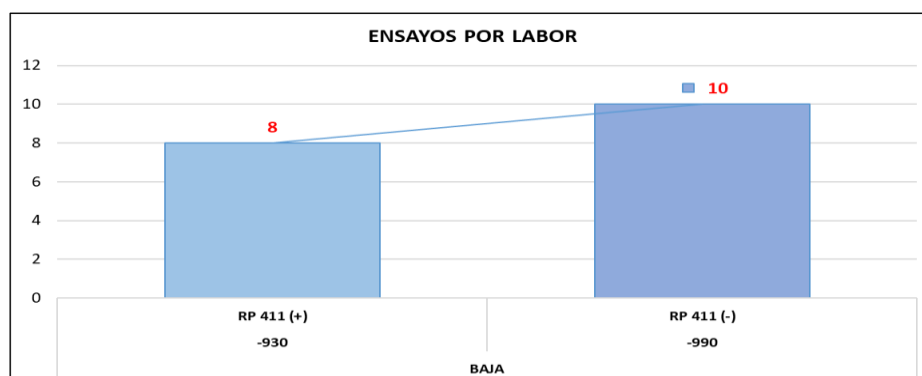
Gráfico 6. Promedio de resultados de ensayos en roca tipo III A – III B



Cuadro 3. Cantidad de ensayos por labor (agosto)

CANT. ENSAYOS POR ZONA	
ZONA	CANT. ENSAYOS
BAJA	
-930	
RP 411 (+)	8
-990	
RP 411 (-)	10
Total general	18

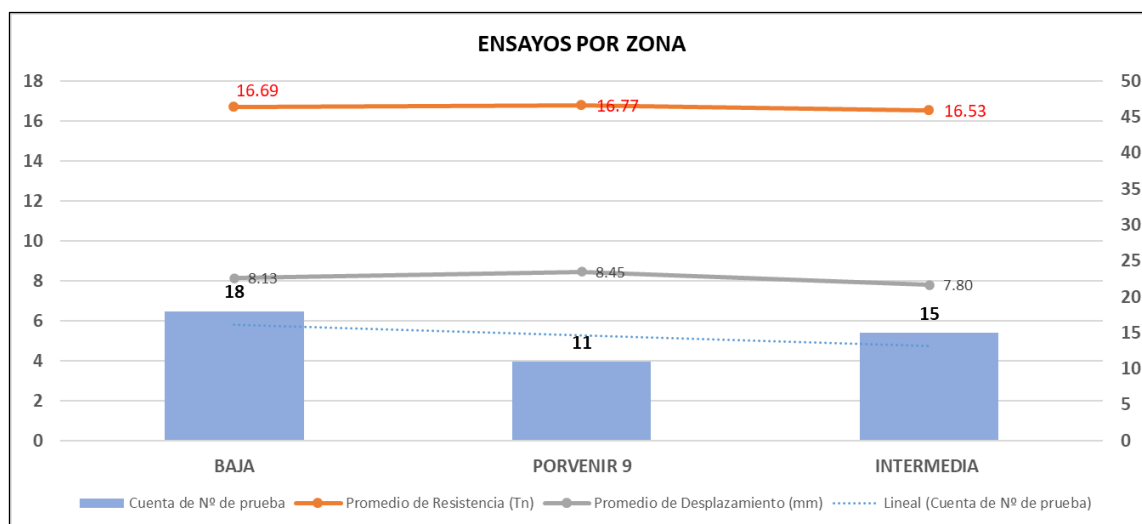
Gráfico 7. Cantidad de ensayos por labor.



Cuadro 4. Cantidad de ensayos por zona (TRIMESTRE)

CANT. ENSAYOS POR ZONA			
ZONA	CANT. ENSAYOS	PROMEDIO MAX.CARGA (Tn)	MEDIA DE DESPLAZAMIENTO (mm)
BAJA	18	16.69	8.13
PORVENIR 9	11	16.77	8.45
INTERMEDIA	15	16.53	7.80

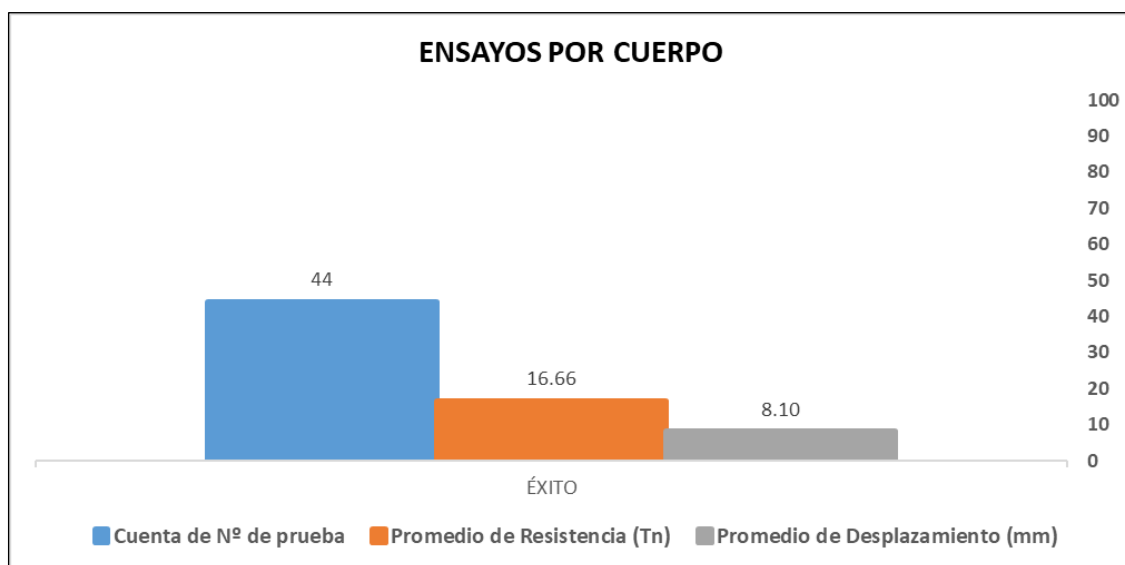
Gráfico 8. Promedio de resultados de ensayos por zona (TRIMESTRE)

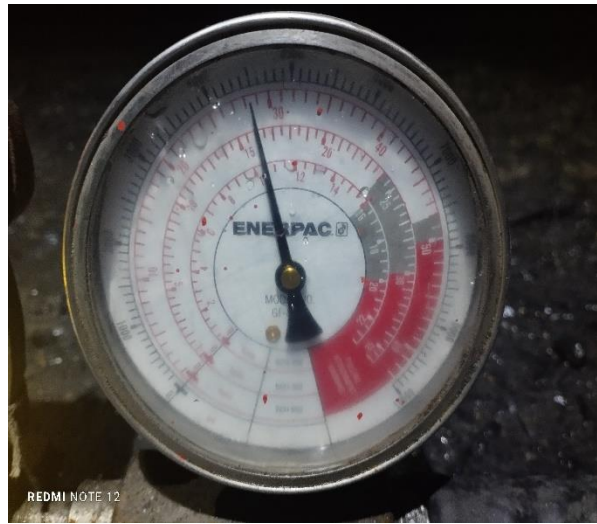
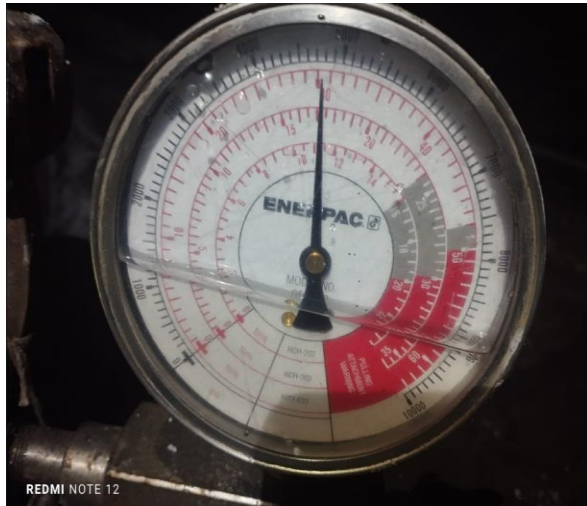


Cuadro 5. Cantidad de ensayos por cuerpo (TRIMESTRE)

CANT. ENSAYOS POR CUERPO			
VETA	CANT. ENSAYOS	PROMEDIO MAX.CARGA (Tn)	MEDIA DE DESPLAZAMIENTO (mm)
ÉXITO	44	16.66	8.10

Gráfico 9. Promedio de resultados de ensayos por cuerpo







ESTANDAR DE ESPECIFICACION TECNICA SOSTENIMIENTO SHOTCRETE Y PERNOS SPLIT SET

UN EL PROYECTO	
FECHA	16/08/24
VERSION	01
F. VIGENCIA	
Página	1

Tipo de Sostentamiento

CIMENTACION	SHOTCRETE	PERNOS	RELLENO
NO	2" Compresión confinada	Split Set 7" Ø x 1.20 m Eje de alineación	NO

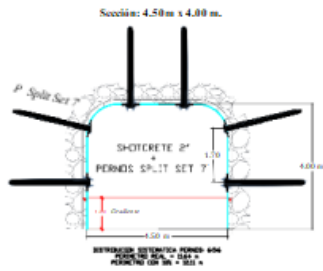
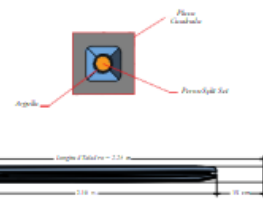
ESPECIFICACIONES:

- Longitud del taladro: 2.25 m.
- Diámetro de la broca: 37 mm
- Perno Split Set:
 - Diámetro split set: 39.5 mm
 - Longitud split set: 2.10 m

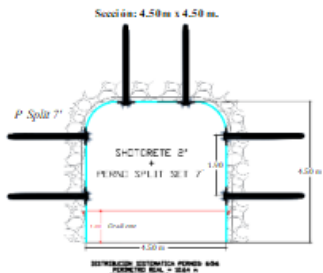
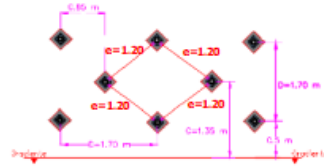
PERNO SPLIT SET

Código de identificación		Especificaciones técnicas		Materiales	
Material	Medida	Material	Medida	Material	Medida
Acero	37 mm	Acero	39.5 mm	Acero	39.5 mm
Acero	37 mm	Acero	39.5 mm	Acero	39.5 mm

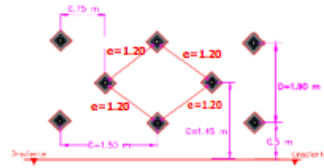
VISTA FRONTAL



Distribución de Pernos Split Set: 6:5:6
Sección: 4.50 m x 4.00 m.



Distribución de Pernos Split Set: 6:5:6
Sección: 4.50 m x 4.50 m.



H3

Elaborado por : Geométrica IESA	Revisado por : Ing. Jack Valenzuela Pacheco	Revisado por : Ing. Elvis Torres Calderon	Aprobado por : Ing. David Angulo Toribio
Fecha : Octubre 2023	Geométrica IESA	Gerente de Operaciones IESA	Gerente de Obra IESA