

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**TESIS**

**MEJORA DE LA VOLADURA DE PRECORTE MEDIANTE LA APLICACIÓN DE DATA ANALYTICS EN EL CONSUMO DE EXPLOSIVOS Y SU RELACIÓN CON LA SOBRE EXCAVACIÓN EN EL CRUCERO 2745 DE LA ZONA BALCÓN DE LA UNIDAD MINERA PARCOY, CONSORCIO MINERO HORIZONTE, LA LIBERTAD**

**PRESENTADO POR**

Br. ALBERTO GUTIERREZ VILCA

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO DE MINAS**

**ASESOR**

MGT. JOSE ALFREDO OLAVE APAZA

**CUSCO - PERÚ**

**2026**



# Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

## INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor MGT. JOSE ALFREDO OLAVE APAZA quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada: MEJORA DE LA VOLADURA de PRECORTE MEDIANTE LA APLICACION DE DATA ANALYTICS EN EL CONSUMO DE EXPLOSIVOS Y SU RELACION CON LA SOBRE EXCAVACION EN EL CRUCEO 2745 DE LA ZONA BALCON DE LA UNIDAD MINERA PARCOY, CONSORCIO MINERO HORIZONTE, LA LIBERTAD

Presentado por: ALBERTO GUTIERREZ VILCA DNI N° 46594007 ;  
 presentado por: ..... DNI N°: .....  
 Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO DE MINAS

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 10 %.

### Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	<input checked="" type="checkbox"/>
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	<input type="checkbox"/>
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	<input type="checkbox"/>

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 27 de Abril de 2026

  
 .....  
 Firma

Post firma MGT. JOSE ALFREDO OLAVE APAZA

Nro. de DNI 23929435

ORCID del Asesor 0009-0001-3581-8959

#### Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:583941607

# MEJORA DE LA VOLADURA DE PRECORTE MEDIANTE LA APLICACIÓN DE DATA ANALYTICS EN EL CONSUMO DE EXPL...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

## Detalles del documento

Identificador de la entrega

**trn:oid:::27259:583941607**

**171 páginas**

Fecha de entrega

**27 abr 2026, 9:04 p.m. GMT-5**

**33.356 palabras**

**187.099 caracteres**

Fecha de descarga

**27 abr 2026, 10:41 p.m. GMT-5**

Nombre del archivo

**MEJORA DE LA VOLADURA DE PRECORTE MEDIANTE LA APLICACIÓN DE DATA ANALYTICS EN EL ....docx**

Tamaño del archivo

**7.4 MB**




## 10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

### Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 9%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**  
10 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## DEDICATORIA

A Dios padre por regalarme la vida e iluminar mi sendero, por estar a mi lado en cada paso que doy. Gracias por este logro más y por darme perseverancia para seguir en los momentos difíciles.

A mis padres: Antero Gutierrez Roque y Flora Vilca Salas; por su amor, sus consejos, paciencia y apoyo incondicional, por su motivación para hacer realidad mis anhelos. Padres, a ustedes dedico este logro.

A todos mis hermanos y hermanas, por su motivación, apoyo incondicional y comprensión.

## AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a la plana de ingenieros del área de geomecánica y operación de Consorcio Minero Horizonte Unidad - Parcoy, quienes permitieron la realización de este trabajo, y colaboraron compartiendo información y experiencia pertinente para cumplir con la finalidad de este mismo.

A mi alma mater, la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, a la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalurgia, y en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas donde aprendí las primeras lecciones mineras.

Asimismo, mi eterna gratitud a cada uno de los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, quienes contribuyeron a la formación profesional, al asesor Mgt. Jose Alfredo Olave Apaza por compartir sus conocimientos y experiencia, por guiarme en cada momento del presente trabajo de investigación para este logro académico.

## INTRODUCCIÓN

La minería subterránea enfrenta constantes desafíos relacionados con la estabilidad del macizo rocoso y la eficiencia de las operaciones de voladura. En la Unidad Minera Parcoy, de Consorcio Minero Horizonte, el uso de la voladura controlada mediante pre-corte se ha implementado para mejorar la estabilidad de las labores de desarrollo. Sin embargo, la aplicación empírica del método ha generado problemas como sobreroturas, incrementos en los costos operativos y disminución de la seguridad en las excavaciones.

La presente investigación busca mejorar la voladura controlada mediante la aplicación de Data Analytics, permitiendo un análisis más preciso de los parámetros de voladura y la calidad del macizo rocoso. La integración de herramientas analíticas proporcionará información clave para la toma de decisiones en tiempo real, reduciendo la variabilidad de los resultados y mejorando la eficiencia operativa.

El estudio se centrará en la zona Balcón de la Unidad Minera Parcoy, donde se evaluarán distintos factores que influyen en la eficiencia de la voladura controlada, como la calidad geomecánica de la roca, la configuración de la malla de perforación y la selección de explosivos. La investigación empleará modelos matemáticos y técnicas avanzadas de análisis de datos para mejorar los parámetros operativos y reducir los costos asociados a la sobreexcavación y el sostenimiento de las labores mineras.

La investigación se dividió en los siguientes capítulos:

**Capítulo I:** Define el problema de investigación, los objetivos del estudio y la metodología aplicada en la investigación.

**Capítulo II:** Presenta la base teórica sobre geomecánica, clasificación de macizos, voladura controlada y el uso de Data Analytics en minería.

**Capítulo III:** Describe la recopilación y análisis de datos, los indicadores operativos y la comparación entre el diseño actual y el optimizado de voladura.

**Capítulo IV:** Expone los resultados logrados, con reducción de sobrerotura, menor consumo de explosivos y mejora de productividad y estabilidad del contorno.

Los resultados de esta investigación contribuirán al desarrollo de un modelo replicable en otras unidades mineras, promoviendo la implementación de tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia y seguridad en la minería subterránea.

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo mejorar la voladura de precorte en el Crucero 2745 de la Zona Balcón de la Unidad Minera Parcoy, Consorcio Minero Horizonte, mediante la aplicación de Data Analytics en el análisis del consumo de explosivos y su relación con la sobreexcavación. El estudio se desarrolló en una labor subterránea de sección 3.5 m × 3.5 m, evaluando 30 disparos consecutivos a partir de registros operativos de perforación y voladura. La información fue depurada, estandarizada y analizada para comparar un escenario base con un escenario optimizado bajo condiciones geomecánicas similares. Los ajustes propuestos incluyeron una mejor relación espaciamento/burden, taco inerte, control de carga lineal y ejecución adecuada del precorte. Los resultados evidenciaron una reducción del factor de potencia de 0.74 kg/t a 0.68 kg/t y una disminución de la sobreexcavación de 10 % a 7 %. Asimismo, el P80 se redujo de 18 cm a 16 cm, los bolones por disparo disminuyeron de 6 a 4 unidades y el avance acumulado en 30 días aumentó de 96 m a 111 m. Económicamente, el costo de explosivos por metro se redujo aproximadamente en 8 % y el costo total por metro excavado entre 12 % y 15 %. Se concluye que Data Analytics permite optimizar el control de la voladura, reducir daños al macizo rocoso y mejorar la productividad operativa.

**Palabras clave:** Voladura de precorte, Análisis de datos, Consumo específico de explosivos, Sobre excavación, Control estadístico del proceso.

## ABSTRACT

This research aimed to improve pre-split blasting in Crosscut 2745 of the Balcón Zone at the Parcoy Mining Unit, Consorcio Minero Horizonte, through the application of Data Analytics to explosive consumption and its relationship with overbreak. The study was carried out in a 3.5 m × 3.5 m underground excavation, evaluating 30 consecutive blasts based on drilling and blasting operational records. The collected information was cleaned, standardized, and analyzed to compare a baseline scenario with an optimized scenario under similar geomechanical conditions. The proposed adjustments included an improved spacing-to-burden ratio, inert stemming, linear charge control, and proper pre-split blasting execution. The results showed a reduction in the powder factor from 0.74 kg/t to 0.68 kg/t and a decrease in overbreak from 10% to 7%. Likewise, P80 was reduced from 18 cm to 16 cm, the number of boulders per blast decreased from 6 to 4 units, and the cumulative advance over 30 days increased from 96 m to 111 m. From an economic perspective, the explosive cost per meter decreased by approximately 8%, while the total cost per excavated meter was reduced by 12% to 15%. It is concluded that Data Analytics enables better blasting control, reduces damage to the rock mass, and improves operational productivity.

**Keywords:** Pre-split blasting, Data analytics, Explosive specific consumption, Overbreak, Statistical process control.

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
INTRODUCCIÓN .....	iv
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT .....	vii
1.    CAPÍTULO I .....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.1.    Planteamiento del problema .....	1
1.2.    Formulación del problema.....	2
1.2.1.  Problema general.....	2
1.2.2.  Problemas específicos .....	2
1.3.    Justificación.....	3
1.4.    Objetivos de la investigación.....	4
1.4.1.  Objetivo general .....	4
1.4.2.  Objetivos específicos.....	4
1.5.    Delimitación de la investigación .....	4
1.5.1.  Delimitación espacial .....	4
1.5.2.  Delimitación temporal.....	5
1.6.    Metodología de la investigación.....	5
1.6.1.  Tipo de investigación .....	5

1.6.2.	Nivel de investigación.....	5
1.6.3.	Diseño de la investigación.....	6
1.6.4.	Población y muestra .....	6
1.6.5.	Técnicas e instrumentos de investigación .....	7
2.	CAPÍTULO II.....	11
	MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL .....	11
2.1.	Antecedentes de la investigación.....	11
2.1.1.	Antecedentes internacionales .....	11
2.1.2.	Antecedentes nacionales .....	12
2.1.3.	Antecedentes locales .....	13
2.2.	Bases teóricas .....	14
2.2.1.	Minería subterránea.....	14
2.2.2.	Mecánica de rocas .....	14
2.2.3.	Clasificación del macizo rocoso .....	15
2.2.4.	Voladura controlada .....	22
2.2.5.	Fragmentación de roca .....	24
2.2.6.	Accesorios de voladura .....	26
2.2.7.	Explosivos .....	27
2.2.8.	Control de calidad (qa/qc) en la mejora del proceso de voladura .....	30
2.2.9.	Big data analytics en el proceso minero.....	32

2.3.	Marco conceptual .....	34
2.4.	Hipótesis .....	36
2.4.1.	Hipótesis general .....	36
2.4.2.	Hipótesis específicas .....	36
2.4.3.	Variables e indicadores .....	37
2.5.	Operacionalización de las variables .....	37
3.	CAPÍTULO III.....	40
	PROCESAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN .....	40
3.1.	Caracterización geomecánica del macizo rocoso en el Crucero 2745 y su influencia en la voladura de precorte .....	40
3.1.1.	Estudio de la evaluación geomecánica en el Crucero 2745 – Zona Balcón. 40	
3.1.2.	Contextualización geológica y operativa del Crucero 2745.....	41
3.1.3.	Metodología de evaluación geomecánica aplicada .....	48
3.1.4.	Recomendaciones de sostenimiento.....	60
3.2.	Voladura empleada en el Crucero 2745 de la Zona Balcón .....	60
3.2.1.	Accesorios y elementos para la voladura .....	61
3.2.2.	Diseño de la malla de perforación.....	61
3.2.3.	Presentación de la malla de operación .....	66
3.3.	Análisis de datos aplicado consumo de explosivos .....	66
3.3.1.	Escenario base de estudio.....	66

3.3.2.	Recolección de información.....	71
3.3.3.	Procesamiento de datos .....	74
3.3.4.	Análisis de datos mediante Data Analytics .....	77
3.3.5.	Ajustes derivados del análisis .....	101
3.3.6.	Comparación de escenarios.....	107
4.	CAPÍTULO IV.....	113
	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	113
4.1.	Síntesis de resultados.....	113
4.1.1.	Relación entre consumo de explosivos y sobreexcavación.....	114
4.1.2.	Impacto de los ajustes en la mejora del proceso de precorte .....	115
4.1.3.	Principales hallazgos que responden al problema de investigación.....	116
4.2.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	117
4.2.1.	Evaluar la calidad del macizo rocoso mediante análisis geomecánico para mejorar la ejecución de la voladura de precorte .....	117
4.2.2.	Identificar e implementar estrategias basadas en Data Analytics para mejorar la voladura de precorte y disminuir la sobreexcavación.....	118
4.2.3.	Analizar el impacto del uso de Data Analytics en la reducción de costos de sostenimiento por disminución de sobreexcavación.....	119
4.2.4.	Mejorar el proceso de voladura de precorte mediante la aplicación de Data Analytics en el consumo de explosivos y reducir la sobreexcavación .....	120
4.2.5.	Análisis de costos .....	121

CONCLUSIONES .....	126
RECOMENDACIONES .....	128
BIBLIOGRAFÍA .....	130
5. ANEXOS .....	1
ANEXO 1 .....	1
5.1.  Ámbito de Estudio y Geología .....	1
5.1.1.  Ubicación Geográfica.....	1
5.1.2.  Accesibilidad.....	2
5.1.3.  Clima y Vegetación.....	2
5.1.4.  Topografía y Drenaje .....	3
5.1.5.  Geomorfología .....	3
5.1.6.  Geología General.....	4
5.1.7.  Geología Regional.....	4
5.1.8.  Geología Local .....	6
5.1.8.7.  Grupo Pucará.....	8
5.1.9.  Geología Estructural.....	10
5.1.10.  Geología Económica .....	12
ANEXO 2.....	15

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Parámetros del RMR .....	18
<b>Tabla 2</b>	Parámetros del RQD.....	20
<b>Tabla 3</b>	Guía de sostenimiento según autores.....	21
<b>Tabla 4</b>	Operacionalización de las variables .....	37
<b>Tabla 5</b>	Propiedades del macizo rocoso en la zona de estudio .....	49
<b>Tabla 6</b>	Tabla de Valoración RMR respecto a la Compresión Uniaxial .....	49
<b>Tabla 7</b>	Características del macizo rocoso.....	50
<b>Tabla 8</b>	Tabla de Valoración RMR según el RQD .....	52
<b>Tabla 9</b>	Tabla de Valoración RMR según la distancia entre las juntas .....	52
<b>Tabla 10</b>	Tabla de Valoración RMR: Persistencia.....	53
<b>Tabla 11</b>	Tabla de Valoración RMR: Apertura.....	53
<b>Tabla 12</b>	Tabla de Valoración RMR: Rugosidad.....	54
<b>Tabla 13</b>	Tabla de Valoración RMR: Relleno .....	54
<b>Tabla 14</b>	Tabla de Valoración RMR: Interperismo .....	55
<b>Tabla 15</b>	Tabla de Valoración RMR considerando la presencia de Agua Subterránea .....	55
<b>Tabla 16</b>	Tabla de Valoración RMR considerando la dirección de las discontinuidades.....	56
<b>Tabla 17</b>	Tabla de Corrección según la orientación que poseen las discontinuidades en nuestra labor	56
<b>Tabla 18</b>	Cálculo del RMR .....	57
<b>Tabla 19</b>	Uso de explosivos en la voladura del Crucero 2745 de la Zona Balcón.....	61
<b>Tabla 20</b>	Consumo de explosivos por metro de avance.....	123
<b>Tabla 21</b>	Impacto económico de la sobreexcavación.....	124
<b>Tabla 22</b>	Comparación de indicadores operativos .....	125

<b>Tabla 23</b>	Acceso a la Unidad Minera Parcoy por vía terrestre .....	2
<b>Tabla 24</b>	Acceso a la Unidad Minera Parcoy por vía aérea .....	2

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Grado de afectación de la voladura convencional vs voladura controlada.....	23
<b>Figura 2</b>	Gránulos de ANFO .....	29
<b>Figura 3</b>	Ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act) aplicado a la perforación y voladura .....	31
<b>Figura 4</b>	Ciclo de vida de un proyecto de big data analytics.....	32
<b>Figura 5</b>	Plano del Crucero 2745 – Zona Balcon .....	43
<b>Figura 6</b>	Columna estratigráfica-área Parcoy - Pataz (CMH) .....	45
<b>Figura 7</b>	Mapa estructural de Parcoy (CMH).....	47
<b>Figura 8</b>	Método de Cálculo RQD mediante el método volumétrico.....	51
<b>Figura 9</b>	Cartilla Geomecánica CM Horizonte – 1.....	58
	Fuente: Departamento de Geomecánica CM Horizonte .....	58
<b>Figura 10</b>	Cartilla Geomecánica CM Horizonte - 2 .....	59
	.....	59
<b>Figura 11</b>	Código 1 .....	82
<b>Figura 12</b>	Código 2.....	83
<b>Figura 13</b>	Resumen estadístico (antes): kg de explosivo, % sobrerotura, factor de potencia, factor de carga y consumo lineal. ....	85
<b>Figura 14</b>	Distribución y relación (antes): histogramas de kg y % sobrerotura, y dispersión % vs. kg de explosivo.....	85
<b>Figura 15</b>	Resumen estadístico (después): kg de explosivo, % sobrerotura, factor de potencia, factor de carga y consumo lineal. ....	86
<b>Figura 16</b>	Distribución y relación (después): histogramas de kg y % sobrerotura, y dispersión % vs. kg de explosivo. ....	86
<b>Figura 17</b>	Código 3.....	87

<b>Figura 18</b>	Código 4.....	88
<b>Figura 19</b>	KPIs diarios de voladura (primeras filas). ....	88
<b>Figura 20</b>	KPIs semanales de voladura (consolidado). ....	88
<b>Figura 21</b>	Evolución diaria de KPIs de consumo: kg/t, kg/m <sup>3</sup> y kg/m. ....	89
<b>Figura 22</b>	Indicadores semanales: kg/t global y % de sobrerotura promedio. ....	89
<b>Figura 23</b>	Código 5.....	91
<b>Figura 24</b>	Base vs. optimizado: variación relativa de KPIs ( $\Delta\%$ ). ....	92
<b>Figura 25</b>	Tendencia por disparo (base vs. optimizado): kg/t, kg/m y % sobrerotura. ....	92
<b>Figura 26</b>	Avance acumulado (m) por disparo: base vs. optimizado. ....	92
<b>Figura 27</b>	Ubicación de la Unidad Minera Parcoy .....	1
<b>Figura 28</b>	Mapeo Geomecánico – Crucero 2745 Veta Lourdes .....	1
<b>Figura 29</b>	Estándar de Sostenimiento aplicado en el Crucero 2745 de la Zona Balcón.....	2
<b>Figura 30</b>	Malla de Perforación usada en el Cx 2745 – Zona Balcón.....	3

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Planteamiento del problema

En la Unidad Minera Parcoy, la ejecución del Crucero 2745 de la zona Balcón, el cual presenta una sección de labor de  $3.5 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$ , constituye una actividad fundamental dentro del desarrollo de la mina. Hasta la etapa de estudio del proyecto se registra un avance aproximado de 197 metros, teniendo como longitud total proyectada del crucero alrededor de 800 metros. Este crucero tiene gran importancia dentro de la operación minera, debido a que permitirá brindar acceso a nuevas zonas de mineralización, posibilitando la ejecución de galerías y labores de desarrollo necesarias para la explotación del yacimiento.

Sin embargo, durante la ejecución de esta labor se han identificado diversas deficiencias en el proceso de voladura de precorte, las cuales afectan la eficiencia de las operaciones. Uno de los principales problemas es el consumo ineficiente de explosivos, situación que genera sobreexcavación en el contorno de la excavación. Esta condición no solo incrementa los costos operativos asociados al sostenimiento y retrabajos, sino que también compromete la estabilidad del macizo rocoso, obligando a reforzar las labores con sistemas de sostenimiento adicionales a los previstos inicialmente.

Entre los principales factores que influyen en la eficiencia del método de precorte se encuentran el burden, el espaciamiento de la malla de perforación, la distribución de la carga explosiva, el tipo de roca —particularmente en macizos de calidad geomecánica III-B, IV-A, IV-B, y la precisión de la perforación, los cuales requieren un control técnico constante. Cuando estos parámetros no son adecuadamente controlados, se generan resultados deficientes en la voladura,

produciendo daños estructurales en los hastiales y la corona de la labor, incrementando los riesgos de seguridad y afectando la calidad del contorno de excavación.

Asimismo, una voladura deficiente genera bloques sobredimensionados (bolones) y mayores irregularidades en el contorno de la excavación, lo que incrementa la necesidad de voladuras secundarias, mayores tiempos de limpieza y escalado, y un mayor consumo de horas de equipos, afectando directamente la productividad del ciclo de desarrollo.

## **1.2. Formulación del problema**

### ***1.2.1. Problema general***

- ¿Cómo mejorar el proceso de voladura de precorte mediante la aplicación de Data Analytics en el consumo de explosivos y su relación con la sobre excavación en el crucero 2745 de la zona Balcón de la Unidad Minera Parcoy, Consorcio Minero Horizonte, La Libertad?

### ***1.2.2. Problemas específicos***

- ¿Cómo evaluar la calidad del macizo rocoso en el crucero 2745 de la zona Balcón de la Unidad Minera Parcoy, Consorcio Minero Horizonte, La Libertad?
- ¿Qué estrategias basadas en Data Analytics se pueden implementar para mejorar la voladura de precorte mediante el análisis de consumo de explosivos en el crucero 2745 de la zona Balcón de la Unidad Minera Parcoy, Consorcio Minero Horizonte, La Libertad?
- ¿Cuál es el impacto del uso de Data Analytics en el proceso de voladura de precorte sobre los costos de sostenimiento generados por la sobre excavación en el crucero 2745 de la zona Balcón de la Unidad Minera Parcoy, Consorcio Minero Horizonte, La Libertad?

### **1.3. Justificación**

La presente investigación presenta una importancia significativa tanto a nivel práctico como teórico, en el contexto de la mejora de la voladura controlada mediante la aplicación de data analytics, desde el punto de vista práctico, esta investigación aborda una problemática clave relacionada con las malas prácticas en las operaciones de perforación y voladura controlada, las cuales generan elevados costos de sostenimiento, extracción y producción y al integrar Data Analytics permitirá relacionar información clave sobre la calidad del macizo, el consumo de explosivos y el impacto de cada voladura, facilitando decisiones más precisas y basadas en datos reales, en lugar de depender de estimaciones o pruebas manuales.

Pero esto no es solo una cuestión económica. Al minimizar la sobre excavación, se reduce la alteración del macizo rocoso, lo que significa menos vibraciones, menor riesgo de derrumbes y un ambiente de trabajo mucho más seguro para los operarios. En minería subterránea, un derrumbe por una voladura mal ejecutada puede poner en riesgo vidas humanas y generar interrupciones costosas en la operación.

Desde un enfoque teórico, esta investigación contribuirá al avance del conocimiento en el área de la voladura controlada, integrando métodos matemáticos y análisis de datos con variables operativas propias del entorno minero. El estudio permitirá desarrollar un marco metodológico innovador y replicable para evaluar y mejorar los sistemas de voladura en otras unidades mineras. Además, se busca fomentar la adopción de estándares internacionales y buenas prácticas mediante la implementación de tecnologías avanzadas en la gestión de operaciones subterráneas.

## **1.4. Objetivos de la investigación**

### ***1.4.1. Objetivo general***

- Mejorar el proceso de voladura de precorte mediante la aplicación de Data Analytics en el consumo de explosivos y reducir la sobre excavación en el crucero 2745 de la zona Balcón de la Unidad Minera Parcoy, Consorcio Minero Horizonte, La Libertad.

### ***1.4.2. Objetivos específicos***

- Evaluar la calidad del macizo rocoso mediante análisis geomecánico en el crucero 2745 de la zona Balcón de la Unidad Minera Parcoy, Consorcio Minero Horizonte, La Libertad.
- Identificar e implementar estrategias basadas en Data Analytics para mejorar la voladura de precorte mediante el análisis del consumo de explosivos en el crucero 2745 de la zona Balcón de la Unidad Minera Parcoy, Consorcio Minero Horizonte, La Libertad.
- Analizar el impacto del uso de herramientas de Data Analytics en el proceso de voladura de precorte para reducir los costos de sostenimiento asociados a la sobre excavación en el crucero 2745 de la zona Balcón de la Unidad Minera Parcoy, Consorcio Minero Horizonte, La Libertad.

## **1.5. Delimitación de la investigación**

### ***1.5.1. Delimitación espacial***

El estudio se desarrolla en el Crucero 2745, Zona Balcón, Unidad Minera Parcoy, ubicada en la región La Libertad, Perú. Esta delimitación comprende las labores y frentes directamente vinculados al diseño y control de la voladura de precorte en el ámbito señalado.

### ***1.5.2. Delimitación temporal***

La presente investigación se realizó en el periodo de junio a diciembre de 2024, tomando como data la información operativa registrada en ese mismo intervalo. Durante dicho periodo se llevan a cabo la recopilación de registros de voladura, mediciones de sobreexcavación, consumos específicos de explosivos y evidencias fotográficas, así como el proceso de depuración, análisis y contraste de los resultados frente a los valores de referencia de la operación. De este modo, tanto la recolección como la evaluación de la información se enmarcan dentro del mismo horizonte temporal, garantizando coherencia cronológica entre las actividades de obtención de datos y su posterior interpretación.

## **1.6. Metodología de la investigación**

### ***1.6.1. Tipo de investigación***

La presente investigación es de tipo básica y cuantitativa, ya que se basa en el análisis numérico y el tratamiento de datos cuantitativos relacionados con el consumo de explosivos y la sobre excavación en el proceso de voladura de precorte. Se considera básica porque genera nuevos conocimientos que puedan servir de base para futuras investigaciones en el ámbito de la minería y mejora de voladuras, más que resolver un problema inmediato (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

### ***1.6.2. Nivel de investigación***

La presente investigación se enmarca en el nivel correlacional, debido a que tiene como propósito principal analizar la relación que existe entre la aplicación de técnicas de Data Analytics en el diseño y control de la voladura de precorte (variable independiente) y la reducción de la sobreexcavación, así como la mejora de la precisión del contorno en el Crucero 2745 (variable dependiente). En este sentido, se evalúa en qué medida el uso sistemático del análisis de datos –a

partir de indicadores como porcentaje de sobreexcavación, consumos específicos de explosivo, desviación respecto al contorno teórico y calidad del perfil obtenido— se asocia con un mejor desempeño del precorte y una disminución de los retrabajos posteriores.

De acuerdo con Hernández-Sampieri y Mendoza Torres (2018), los estudios correlacionales se orientan a medir el grado de asociación entre dos o más variables en un contexto no experimental, sin manipularlas directamente, observando su comportamiento en condiciones reales. Este enfoque se ajusta al presente trabajo, ya que las variables se registran a partir de la operación habitual de la unidad minera y luego se determina estadísticamente el nivel de relación entre la implementación de Data Analytics en la voladura de precorte y los resultados obtenidos en términos de control geométrico y estabilidad del macizo rocoso.

### ***1.6.3. Diseño de la investigación***

El diseño de la investigación es no experimental y de corte transversal, ya que los datos serán recolectados en un solo periodo de tiempo sin manipulación de variables (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018). El estudio se centrará en el análisis de los datos obtenidos de las voladuras realizadas en el crucero 2745 de la zona Balcón en la Unidad Minera Parcoy.

### ***1.6.4. Población y muestra***

#### **1.6.4.1. Población**

La población será la zona Balcón, una zona utilizada para la ampliación de reservas de mineral en la Unidad Minera Parcoy.

#### **1.6.4.2. Muestra**

La muestra de la investigación es no probabilística y se delimita al Crucero 2745, ubicado en la zona Balcón en la Unidad Minera Parcoy,

## ***1.6.5. Técnicas e instrumentos de investigación***

### **1.6.5.1. Técnicas de recolección de datos**

Para el desarrollo de la investigación se emplean las siguientes técnicas de recolección, cada una de ellas respaldada con evidencias gráficas que se incorporan en los anexos:

- Trabajos de campo y gabinete
  - Observación directa estructurada: Aplicada en frentes y labores asociadas al Crucero 2745, con el fin de registrar condiciones operativas, de seguridad y ambientales, así como la geometría del precorte, la presencia de sobreexcavación y la ejecución de la perforación y voladura. Estas observaciones se documentan en el diario de campo y se complementan con registros fotográficos.
  - Análisis documental: Consiste en la revisión sistemática de informes técnicos, reportes de producción, bitácoras de voladura, expedientes de control de calidad y planos históricos/actualizados. De este proceso se obtienen datos de diseño, consumos específicos y resultados de voladuras previas, los cuales se organizan mediante fichas y formatos de registro, dejando evidencia del análisis mediante fotografías de los documentos consultados.
  - Registro audiovisual: Comprende la captura de fotografías y cuando corresponde, videos antes, durante y después de los disparos. Estas evidencias permiten verificar en gabinete la correcta aplicación de la malla de precorte, las condiciones del contorno resultante y los sectores con

sobreexcavación; además, sirven como respaldo visual de las observaciones consignadas en el diario de campo y en las guías de observación.

#### **1.6.5.2. Instrumentos de recolección de datos**

- Los principales instrumentos utilizados para sistematizar la información son:
  - Diario de campo: Cuaderno de registro donde se consignan, de manera cronológica y detallada, las condiciones de los frentes, la configuración de la malla, la secuencia de perforación y voladura, así como incidencias operativas. Se incluyen fotografías del propio diario como evidencia del trabajo de campo.
  - Formatos, fichas y checklists de registro: Instrumentos estructurados que permiten ordenar y clasificar datos provenientes de informes, planos, planillas de voladura, consumos de explosivos y mediciones de sobreexcavación. Estos formatos se diseñan para garantizar trazabilidad de la información y se documentan con imágenes de los instrumentos utilizados.
  - Guía de observación: Matriz con ítems de verificación para el levantamiento de evidencias en campo y en los registros audiovisuales, considerando variables como alineamiento de taladros, burden y espaciamiento, condición del contorno, porcentaje de sobreexcavación y cumplimiento del diseño de precorte.
  - Registro fotográfico y capturas de pantalla: Incluye fotos del diario de campo, de los instrumentos empleados (formatos, fichas, checklists), de los documentos analizados (expedientes, reportes, registros) y de las pantallas

de trabajo en AutoCAD y en las plataformas de análisis de datos. Estas imágenes se incorporan como anexos para evidenciar el proceso metodológico.

### **1.6.5.3. Procesamiento y análisis de datos**

La información recolectada es procesada y analizada con el propósito de cuantificar y correlacionar los parámetros de la voladura de precorte con la sobreexcavación obtenida. Para ello se emplean las siguientes herramientas:

- Microsoft Excel: Utilizado para depurar, organizar y tabular los datos de campo y gabinete; calcular indicadores como consumos específicos, porcentajes de sobreexcavación y parámetros estadísticos básicos; y generar gráficos de tendencia y comparaciones antes–después.
- AutoCAD y AutoCAD Civil 3D: Empleados para elaborar y revisar los planos de perforación, secciones y perfiles del Crucero 2745, verificando la geometría de la malla de precorte, los alineamientos y la correspondencia entre diseño y contorno real. Se generan capturas de los planos y perfiles, que se adjuntan como evidencia del análisis geométrico.
- Python (Data Analytics): Utilizado para el procesamiento avanzado de datos, mediante scripts que permiten calcular indicadores técnicos, evaluar relaciones entre variables y generar resúmenes estadísticos y gráficos. Los resultados del análisis (tablas, gráficos y dashboards exportados) se documentan mediante capturas de pantalla que forman parte de los anexos.

- Microsoft Office (Word, PowerPoint): Herramientas de apoyo para la elaboración de tablas, cuadros comparativos, reportes y presentaciones de resultados, integrando los productos de Excel, AutoCAD y Python en documentos y diapositivas que facilitan la interpretación de los hallazgos.

De este modo, las técnicas, instrumentos y herramientas de análisis no solo permiten recolectar y procesar la información de manera sistemática, sino que además cuentan con evidencias fotográficas y documentales que respaldan cada etapa del procedimiento metodológico.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

##### 2.1.1. *Antecedentes internacionales*

- Carreño & Correa (2015) "**Implementación de Precorte en un Diagrama de Voladura en Minería Subterránea**". Tesis para optar al grado de Ingeniero de Minas presentada en la Universidad Nacional de Catamarca - Argentina.

Presenta un caso de diez pruebas secuenciales de precorte con control de perforación, carguío y evaluación post-disparo, documenta parámetros operativos y ajustes progresivos hasta lograr techo regular y sin “medias cañas”, y establece criterios prácticos como  $B = 0,40$  m con  $E \approx 0,30$  m ( $0,75 \cdot B$ ), taladro vacío intermedio y retacado del cebo en fondo para evitar soplados; estos lineamientos técnicos serán tomados como base comparativa para el diseño y verificación geométrica del precorte en el Crucero 2745.

- Mendoza (2014) “**Mejora de la voladura controlada aplicando un modelo matemático en la unidad minera Paraíso-Ecuador**” Tesis para optar al grado de Ingeniero de Minas presentada en la Universidad Nacional del Centro del Perú - Huancayo.

Propone mejorar parámetros de perforación y carguío mediante modelos de Holmberg y criterios de Chiappetta implementados en hojas de cálculo, realiza diagnóstico de altos factores de carga y costos por metro y, tras la mejora, evidencia disminución de sobreexcavación y costo unitario con referencia de 4,78 \$/t, atribuyendo las mejoras al desacoplamiento, presión de detonación adecuada y carga

lineal equilibrada; estos hallazgos se utilizarán para contrastar el efecto de la mejora soportada por Data Analytics en Python sobre la sobreexcavación y el costo por tonelada en Parcoy.

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

- Pomasoncco (2021) “**Aplicación de la voladura de pre-corte en las labores de desarrollo de la mina MARSA para la reducir la sobrerotura en el macizo rocoso**” Tesis para optar al grado de Ingeniero de Gestión Minera presentada en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas - Lima.

La investigación compara mallas de precorte y configuración de explosivos frente a la práctica convencional mediante pruebas de campo y simulación operativa, evidencia disminución de sobrerotura de 16 % a 8 % junto con mejoras en estabilidad del perímetro y ahorro anual por labor, y concluye que el ajuste de burden–espaciamiento y desacoplamiento de carga eleva la calidad del contorno; estos valores servirán de referencia para discutir la reducción de sobreexcavación obtenida en la Zona Balcón con mejora guiada por análisis de datos.

- Estela & Estela (2020) “**Voladura controlada para reducir la deficiencia en los avances de las labores en mina subterránea**” Tesis para optar al grado de Ingeniero de Minas presentada en la Universidad Cesar Vallejo - Lima.

El estudio plantea disminuir la deficiencia de avances mediante la aplicación sistemática de voladura controlada y microrretardos, emplea enfoque cuantitativo con observación de frente y planillas de perforación–carguío, y reporta mejoras en regularidad del contorno y avance efectivo con reducción de sobreexcavación desde niveles altos a rangos controlados cercanos al 10–12 %, concluyendo que el control de

paralelismo, espaciamiento y retacado del cebo es determinante; estos resultados se contrastarán con los obtenidos en el Crucero 2745 bajo soporte de Data Analytics para verificar la magnitud de la reducción alcanzada.

### **2.1.3. Antecedentes locales**

- Azurín (2023) “**Mejora de perforación y voladura para reducir sobrerotura en el bypass 2843 del Consorcio Minero Horizonte S.A. - Retamas 2021**” Tesis para optar al grado de Ingeniero de Minas presentada en la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac - Abancay.

La investigación tuvo como propósito mejorar la perforación y la voladura para disminuir la sobrerotura y los costos de carguío–acarreo en el bypass 2843 (NV 1665) de la mina Balcón; con enfoque aplicado y explicativo, se utilizó diseño experimental manipulando parámetros de voladura y comparando resultados entre voladuras iniciales y de recorte, apoyado en reportes de campo y herramientas como hojas de cálculo, AutoCAD y GeoGebra. Los hallazgos muestran una reducción de sobrerotura de 25.59% a 6.25% en 20 disparos, con presión de gases controlada en 57.86 MPa para una roca de  $R_c = 48$  MPa, y disminución de costos por disparo: carguío/limpieza con R1300G de \$126.82 a \$111.47 y acarreo con EJC417 de \$118.89 a \$103.60. Estos resultados evidencian el impacto del recorte controlado sobre la estabilidad del contorno y los costos operativos, y servirán como referencia para contrastarlos con la reducción de sobreexcavación y los ahorros obtenidos en el Crucero 2745 – Zona Balcón mediante mejora con Data Analytics en Python.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Minería subterránea**

La minería subterránea es un método de extracción de minerales que se lleva a cabo debajo de la superficie terrestre, a diferencia de la minería a cielo abierto, que se realiza en la superficie (Andrade & Gavilanes, 2004).

Este enfoque implica la construcción de túneles, galerías y pozos para alcanzar los depósitos de minerales ubicados a gran profundidad, inaccesibles mediante técnicas convencionales de extracción superficial. Este método permite la obtención de diversos recursos, como metales preciosos y no preciosos, incluyendo oro, plata, cobre, hierro y zinc, así como minerales no metálicos como carbón, sal y piedra caliza (Andrade & Gavilanes, 2004).

La minería subterránea desempeña un papel significativo en la industria minera global y se implementa en numerosos países alrededor del mundo (Andrade & Gavilanes, 2004).

### **2.2.2. Mecánica de rocas**

Brown señala que la Mecánica de Rocas comenzó a consolidarse formalmente como una disciplina dentro de los programas de ingeniería a partir de la década de 1960, desde entonces, ha sido reconocida como una materia de carácter interdisciplinario, con aplicaciones que abarcan campos como la geología, la ingeniería de minas, la petrología y la ingeniería civil. Su utilidad se extiende también a proyectos vinculados al desarrollo energético, el transporte y las infraestructuras de defensa (Hoek & Marron, 2019).

Esta disciplina se encarga de analizar el comportamiento de las masas rocosas, prestando especial atención a las propiedades que inciden en su resistencia estructural; es fundamental diferenciar entre las propiedades obtenidas a partir de muestras de laboratorio y aquellas que se determinan mediante el análisis del macizo rocoso en su estado natural o *in situ*, ya que estas

últimas reflejan de manera más representativa las condiciones reales del terreno (Hoek & Marron, 2019).

### ***2.2.3. Clasificación del macizo rocoso***

Los sistemas de clasificación del macizo rocoso representan una metodología que permite estimar sus propiedades a gran escala, sirviendo como una herramienta fundamental en el ámbito de la ingeniería geotécnica aplicada a la minería. En particular, índices como el GSI (Geological Strength Index), y sistemas ampliamente reconocidos como el RMR (Rock Mass Rating) y el Q-System, se utilizan frecuentemente como parámetros de entrada para diversos métodos de diseño empírico, así como en modelos numéricos que simulan el comportamiento del macizo rocoso (Hoek & Marron, 2019).

Estas clasificaciones geomecánicas buscan condensar en un único valor representativo las propiedades de resistencia de un macizo rocoso, el cual, por naturaleza, suele presentar una marcada anisotropía estructural. Por esta razón, es común que una misma formación rocosa pueda ser evaluada desde distintos sistemas de clasificación, cada uno con sus propios criterios y parámetros. Desde principios de la década de 1970, el uso de sistemas de calificación y clasificación geotécnica ha ganado terreno, permitiendo establecer una “calidad geotécnica” a través de un índice cuantificable que facilita la toma de decisiones durante el diseño de obras en roca (Bieniawski, 1989).

En la actualidad, estos sistemas no solo constituyen una parte esencial del diseño empírico de minas, sino que también se integran cada vez más con herramientas analíticas y de modelación numérica avanzada. De hecho, varios enfoques metodológicos enlazan directamente los índices geomecánicos con propiedades del macizo como el Módulo de Elasticidad o los parámetros  $m$  y  $s$

del criterio de falla de Hoek & Brown, permitiendo así un modelamiento más realista del comportamiento de la roca en proyectos subterráneos.

Conforme señala Bieniawski (1989), la caracterización geomecánica de macizos rocosos debe contemplar varios aspectos fundamentales:

- La identificación de los parámetros clave que influyen en el comportamiento del macizo.
- La segmentación de una formación rocosa en clases o dominios con características similares.
- El establecimiento de una base conceptual que facilite la comprensión de cada tipo de roca.
- La posibilidad de extrapolar experiencias geotécnicas de un sitio a otro, con el fin de mejorar la planificación y el diseño.
- La creación de un lenguaje técnico común que permita una comunicación clara y efectiva entre los distintos profesionales involucrados en proyectos de ingeniería geotécnica.

Bieniawski destaca que esta clasificación debe ser sencilla, significativa en sus términos, y basada en parámetros que puedan ser medidos rápida y económicamente en campo. Entre sus principales ventajas se incluyen:

- La mejora en la calidad de las investigaciones geotécnicas del sitio, requiriendo un conjunto mínimo de datos clave.
- La provisión de información cuantitativa útil para propósitos de diseño.
- El fortalecimiento del juicio de ingeniería y la comunicación efectiva en el desarrollo del proyecto.

En resumen, las clasificaciones geomecánicas tienen como objetivo evaluar y representar la calidad de un macizo rocoso mediante un conjunto de parámetros cuantificables, lo que permite obtener un índice característico que guía decisiones como la selección de métodos de excavación

o sistemas de sostenimiento. Estas herramientas resultan especialmente valiosas en el diseño y construcción de obras subterráneas, aunque su aplicación adecuada requiere conocimiento técnico y experiencia especializada por parte del ingeniero.

Es importante subrayar que las clasificaciones geomecánicas no pretenden reemplazar a los estudios analíticos detallados. Sin embargo, en la práctica minera, han demostrado ser una herramienta robusta y sistemática para orientar decisiones de diseño (Bieniawski, 1989).

Asimismo, permiten delimitar los dominios geomecánicos en el entorno de la mina, facilitando una planificación más precisa. El ingeniero geotécnico tiene la responsabilidad de interpretar los valores de clasificación de manera realista, considerando la finalidad específica de cada sistema, dado que existen distintas aplicaciones dependiendo del enfoque del diseño (Hoek & Marron, 2019).

En lo sucesivo, se presentarán los principales sistemas de clasificación geomecánica empleados en el contexto minero del Perú.

#### **2.2.3.1. Rock Mass Rating (RMR).**

El sistema Rock Mass Rating (RMR) fue desarrollado por Z.T. Bieniawski como un método integral para clasificar la calidad de los macizos rocosos, asignándoles un puntaje que varía entre 0 y 100 (Bieniawski, 1989), donde un valor de 0 representa una roca de muy mala calidad, mientras que 100 indica una roca de excelente calidad. Esta puntuación se obtiene a partir de la evaluación de diversos parámetros geotécnicos que reflejan las condiciones del macizo (Bieniawski, 1989).

Las versiones más reconocidas y ampliamente utilizadas en la ingeniería geotécnica son el RMR76 y el RMR89, correspondientes a las actualizaciones propuestas por Bieniawski en 1976 y

1989, respectivamente. Ambas versiones comparten una base metodológica común, incorporando cinco factores fundamentales para la clasificación:

- Resistencia de la roca intacta, normalmente determinada a través de ensayos de compresión simple.
- Índice de calidad de la roca (RQD), que indica el grado de fracturamiento del macizo.
- Espaciamiento de las discontinuidades, que influye directamente en la estabilidad de las excavaciones subterráneas.
- Condición de las discontinuidades, evaluando parámetros como rugosidad, apertura, relleno y continuidad.
- Condiciones del agua subterránea, considerando su presencia, presión o flujo dentro del macizo, debido a su impacto en la resistencia efectiva y estabilidad.

**Tabla 1**

*Parámetros del RMR*

<b>RMR</b>	<b>Descripción</b>	<b>Clase</b>	<b>Tipo medio de autosostenimiento</b>	<b>Ángulo de fricción de masa rocosa</b>	<b>Cohesión (kPa)</b>
0 – 20	Muy pobre	V	30 min / 1 m de apertura	< 15°	< 100
21 – 40	Pobre	IV	10 horas / 2.5 m de apertura	15° – 25°	100 – 200
41 – 60	Regular	III	1 semana / 5 m de apertura	25° – 35°	200 – 300
61 – 80	Bueno	II	1 año / 10 m de apertura	35° – 45°	300 – 400
81 – 100	Muy bueno	I	15 años / 15 m de apertura	45° – 50°	400 – 500

Fuente: Extraído de Bieniawski (1989)

### **2.2.3.2. RQD (Rock Quality Designation)**

La estimación del índice RQD (Rock Quality Designation) requiere seguir ciertos lineamientos técnicos que aseguren su representatividad y precisión como indicador de la calidad geotécnica del macizo rocoso. De acuerdo con Deere (inicialmente desarrollado en 1964 y consolidado en 1967, y revisada en publicaciones posteriores, incluyendo la revisión de Deere y Deere 1988), este índice representa una mejora respecto al simple porcentaje de recuperación de

testigos, ya que se enfoca en cuantificar únicamente los fragmentos de núcleo que reflejan integridad estructural del macizo rocoso, permitiendo una evaluación más confiable de su calidad geomecánica.

Entre las recomendaciones clave para su correcta determinación, destacan las siguientes (Deere & Deere, 1988).:

- El diámetro del testigo de perforación debe ser de al menos 50 mm, recomendándose tamaños equivalentes o mayores al NX (54.7 mm), de acuerdo con las recomendaciones de la ISRM.
- Cuando un núcleo se encuentra roto debido a maniobras de perforación o manipulación, se deben ajustar los fragmentos frescos en su posición original para ser contados como un solo segmento continuo.
- Materiales notablemente más débiles que la roca circundante, como rellenos preconsolidados o suelos interestratificados, deben ser excluidos del cómputo, incluso si presentan longitudes mayores a 10 cm.
- La medición de cada segmento del núcleo debe realizarse a lo largo del eje central del mismo. Esta práctica evita penalizar los valores de RQD por fracturas que son paralelas al eje de perforación, las cuales no necesariamente afectan la estabilidad del macizo.

Asimismo, se sugiere que el RQD no se calcule necesariamente sobre longitudes fijas, sino que se adapte a las condiciones estructurales del macizo (Deere & Deere, 1988).

Es recomendable realizar la evaluación por estratos, dominios estructurales o zonas de debilidad, lo que permite identificar variaciones espaciales en la calidad de la roca y delimitar con mayor exactitud las zonas problemáticas (Deere & Deere, 1988).

El RQD se define como el porcentaje de la longitud total del sondeo ocupado por fragmentos de núcleo “sanos” con una longitud igual o mayor a 100 mm (4 pulgadas). Desde su introducción hace más de tres décadas, este índice ha sido utilizado extensamente como una herramienta de diagnóstico preliminar, facilitando la identificación de sectores de baja competencia que requieren mayor atención en las etapas de diseño, excavación o sostenimiento de obras subterráneas (Deere & Deere, 1988).

Finalmente, la relación cualitativa entre el valor del RQD y la calidad del macizo rocoso, según Deere & Deere (1988), permite categorizar el macizo en rangos que van desde roca muy mala (0–25%) hasta excelente (90–100%), proporcionando una referencia rápida y efectiva para decisiones de ingeniería geotécnica.

**Tabla 2**

*Parámetros del RQD*

<b>RQD (%)</b>	<b>Calidad de Roca</b>
< 25	Muy pobre
25 a 50	Pobre
50 a 75	Regular
75 a 90	Buena
90 a 100	Excelente

Fuente: Extraído de Deere (1988)

### **2.2.3.3. Guía de sostenimiento.**

Según Merritt (1972), el índice RQD puede no ser un parámetro determinante por sí solo para definir el sostenimiento requerido en túneles excavados en roca dura. En sus investigaciones, Merritt comparó los criterios de diseño de sostenimiento en función del ancho de la excavación, y observó que en ciertos contextos geomecánicos, especialmente en formaciones masivas y competentes, el RQD no refleja con precisión todos los factores que afectan la estabilidad (Merritt, 1972).

Sin embargo, con el tiempo, el RQD se ha consolidado como un parámetro estándar en la geotecnia minera e ingenieril, especialmente para el registro sistemático de núcleos de perforación. Su facilidad de cálculo, reproducibilidad y valor interpretativo lo han convertido en una herramienta fundamental en la caracterización preliminar del macizo rocoso (Merrit, 1972).

Actualmente, el RQD forma parte esencial de los dos sistemas de clasificación geomecánica más utilizados a nivel mundial: el Rock Mass Rating (RMR) y el Q-System. En ambos, se integra como uno de los factores principales para evaluar la calidad del macizo y orientar decisiones de diseño relacionadas con sostenimiento, excavación y modelamiento numérico. Aunque no es una medida absoluta de estabilidad, el RQD proporciona una base cuantitativa valiosa que, combinada con otros parámetros, permite una caracterización más completa del comportamiento de la roca (Merrit, 1972).

**Tabla 3**

*Guía de sostenimiento según autores*

<b>Autor</b>	<b>No necesita sostenimiento o pernos localizados</b>	<b>Diseño de pernos</b>	<b>Marcos de acero</b>
Deere (1970)	RQD 50 a 75	RQD 50 a 75. Espaciado de 1.5 a 1.8 m	RQD 50 a 70, marcos ligeros, espaciado de 1.5 a 1.8 m, alternativa de pernos
	RQD 25 a 50	RQD 25 a 50. Espaciado de 0.90 a 1.5 m	RQD 25 a 50, marcos ligeros, espaciado de 0.90 a 1.5 m, alternativa de pernos RQD 0 a 25, marcos ligeros, espaciado de 0.60 a 0.90 m, alternativa de pernos
Cecil (1970)	RQD 82 a 100	RQD 52 a 82. Alternativamente con hormigón lanzado de 40 a 60 mm de espesor	RQD 0 a 25, marcos reforzados con hormigón lanzado
Merritt (1972)	RQD 72 a 100	RQD 52 a 82. Espaciados de 1.20 a 1.80 m	RQD 0 a 23

Fuente: Extraído de Merrit (1972)

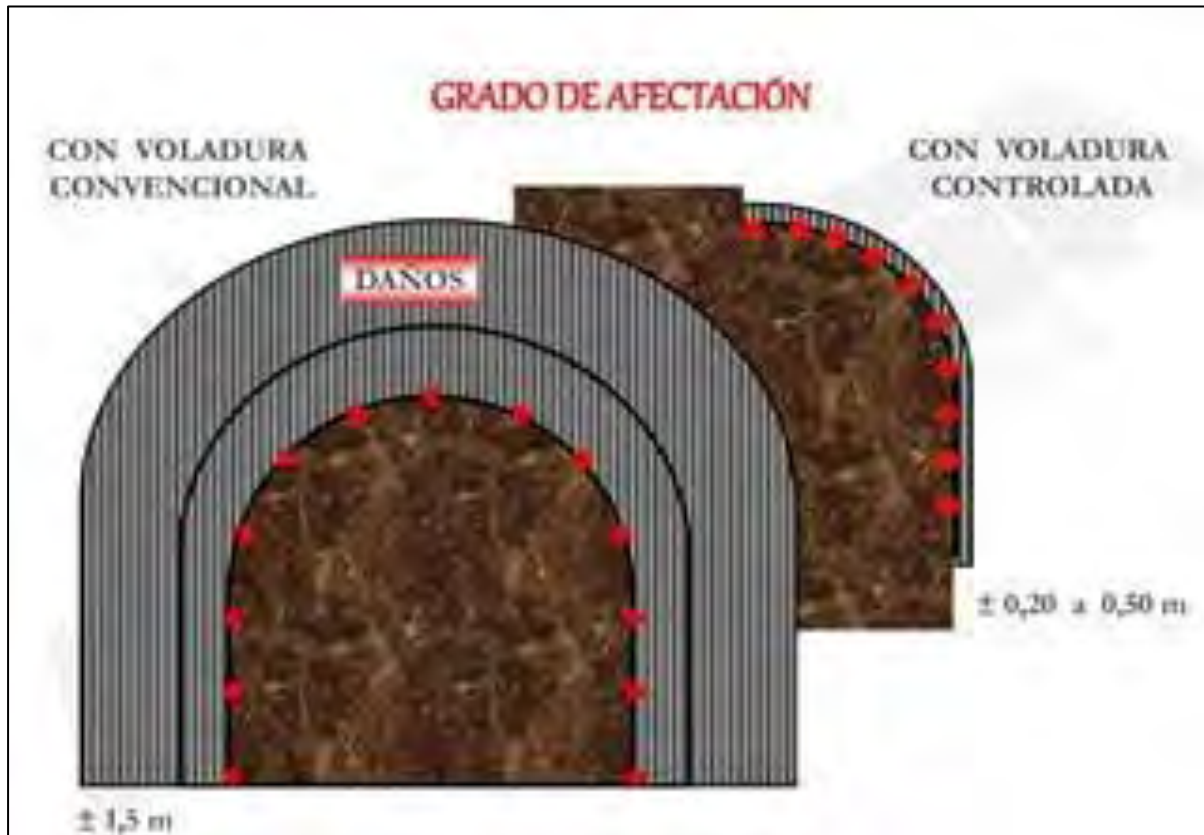
#### **2.2.4. Voladura controlada**

La voladura controlada, también conocida como voladura de contorno, es una técnica empleada para minimizar los daños a la roca remanente tras una voladura principal, mejorando la estabilidad del contorno de la excavación. Este método se enfoca en mitigar los efectos de la onda de choque y la alta presión generada por los gases explosivos durante la detonación (Persson et al., 1994).

A través del uso de diversas técnicas y estrategias, se busca preservar la integridad estructural del macizo rocoso en las zonas delimitadas de la excavación (Ministerio para la Transición Ecológica, 2017). Este tipo de voladura tiene como propósito principal garantizar la estabilidad y el diseño adecuado de las excavaciones, con objetivos específicos como minimizar las grietas y fisuras en la roca, reducir la sobre-rotura para respetar el diseño de las paredes o taludes, considerar la resistencia dinámica del material rocoso frente a eventos como explosiones, evitar daños en estructuras adyacentes para proteger infraestructuras cercanas, y delimitar con precisión el perímetro de las áreas de trabajo evitando fracturamientos adicionales (Konya & Konya, 1995).

**Figura 1**

*Grado de afectación de la voladura convencional vs voladura controlada*



Fuente: Famesa Explosivos

### **2.2.4.1. Técnicas de voladura controlada**

#### **2.2.4.1.1. Voladura de Pre- corte**

Su objetivo es crear un plano de fractura antes de realizar la voladura principal. Consiste en perforar una fila de taladros que luego se cargan con explosivos desacoplados. Esta técnica disminuye las vibraciones y mejora el control del daño al perímetro, garantizando una mayor estabilidad estructural (Persson et al., 1994).

#### **2.2.4.1.2. Voladura de Recorte**

Los taladros cargados con explosivos desacoplados son detonados tras la voladura principal. Este método dirige la salida de roca hacia una cara libre y es menos costoso que el precorte. Es ideal para mejorar la limpieza, el acabado y la estabilidad de las paredes en túneles y galerías, generando superficies más uniformes y reduciendo el fracturamiento excesivo (Persson et al., 1994).

#### **2.2.4.2. Modelo de voladura controlada**

Este modelo considera la importancia de un diseño técnico adecuado para prevenir daños al perímetro de las excavaciones. Los estudios realizados por instituciones como el **NIOSH** han evidenciado problemas comunes, como la imprecisión en la perforación y diseños basados en la experiencia más que en cálculos técnicos. Los daños perimetrales, derivados de prácticas inadecuadas, pueden resultar en:

- Sobrerotura que amplía innecesariamente las excavaciones.
- Paredes y techos rugosos que incrementan el riesgo de desprendimientos de roca.
- Necesidad de sostenimientos adicionales, como pernos y accesorios, debido a daños estructurales.

El diseño de la voladura debe considerar parámetros como la malla, el espaciamiento entre taladros, el uso de taladros desacoplados y la carga explosiva necesaria, respetando los límites de daño práctico (Konya & Konya, 1995).

#### **2.2.5. Fragmentación de roca**

La fragmentación de roca constituye una etapa clave dentro del ciclo de explotación minera, dado que permite la reducción del tamaño de los macizos rocosos hasta volúmenes manejables que facilitan las operaciones de carga, transporte y procesamiento del mineral. La

eficiencia de esta etapa incide directamente en diversos indicadores operativos, tales como la productividad, el consumo energético, el desgaste de los equipos y, en consecuencia, los costos globales de operación (Persson et al., 1994)

El método más extendido para lograr la fragmentación es la perforación y voladura, debido a su eficacia en una amplia variedad de condiciones geológicas. Sin embargo, el desarrollo de nuevas tecnologías ha ampliado el abanico de opciones, incluyendo métodos como el corte con chorro de agua a alta presión, sistemas de corte mecánico continuo y el fracturamiento hidráulico. Estas alternativas proporcionan ventajas como un mayor control del proceso, reducción de daños colaterales en la masa rocosa y una mejora en las condiciones de seguridad operativa (Persson et al., 1994).

La fragmentación optimizada ofrece múltiples beneficios en términos técnicos y económicos. Entre estos destacan:

- a) Mejor rendimiento del sistema de acarreo y carga, lo cual incrementa la productividad general del ciclo minero.
- b) Reducción del consumo de energía en procesos posteriores, especialmente en las etapas de conminución, donde la eficiencia energética es crítica.
- c) Disminución del desgaste mecánico sobre los equipos involucrados en la manipulación del material fragmentado.
- d) Incremento de la seguridad operacional, al reducir fenómenos indeseados como la proyección de roca o la generación de bloques sobredimensionados.
- e) Menor impacto ambiental, mediante la reducción del uso de explosivos, la minimización de residuos finos y la mejora en el uso de recursos energéticos.

Para el diseño eficiente de una estrategia de fragmentación, es indispensable considerar múltiples factores, tales como la resistencia del macizo rocoso, la geometría del tajo, los requerimientos del proceso metalúrgico, y las limitaciones ambientales del entorno (Konya & Konya, 1995). El empleo de herramientas digitales para la simulación de voladuras, análisis automatizado de fragmentación y monitoreo sísmico, ha permitido elevar los estándares de control y previsibilidad en esta etapa crítica del proceso minero (Konya & Konya, 1995).

Asimismo, la incorporación de sistemas de aseguramiento y control de calidad (QA/QC) resulta esencial para verificar la adecuada ejecución de los diseños de perforación y voladura, permitiendo implementar ajustes correctivos en tiempo real y promoviendo una cultura de mejora continua orientada a la sostenibilidad y eficiencia operativa (Muñoz & Lafont de Sentenac, 2023).

#### **2.2.6. *Accesorios de voladura***

Los accesorios de voladura son elementos esenciales que permiten la correcta ejecución de las voladuras en minería, facilitando el control preciso de la detonación y su secuenciación. Estos dispositivos aseguran la eficiencia de la voladura y ayudan a minimizar los efectos no deseados, como las vibraciones excesivas, el sobre-rompimiento de la roca o el daño a las estructuras cercanas. La selección adecuada de accesorios, así como su correcta implementación, es crucial para obtener resultados óptimos y seguros durante las operaciones de voladura (Konya & Konya, 1995).

Entre los accesorios más utilizados en minería se encuentran:

##### **2.2.6.1. Detonadores Eléctricos y no Eléctricos (NONEL)**

Los detonadores eléctricos son dispositivos que utilizan una señal eléctrica para iniciar la detonación de los explosivos. Estos se conectan a los explosivos mediante cables y permiten una detonación precisa según la secuencia deseada. En cambio, los detonadores no eléctricos, como

los Nonel, emplean ondas de choque para iniciar la detonación sin la necesidad de conexiones eléctricas, lo que los hace más seguros en ambientes con riesgo de interferencias eléctricas. Los detonadores no eléctricos son especialmente útiles en minería subterránea, donde la seguridad es fundamental (Persson et al., 1994).

#### **2.2.6.2. Cordón detonante**

Accesorio flexible que sirve para transmitir la onda de detonación entre las diferentes cargas explosivas. Este componente está compuesto por un material explosivo, como el PETN, recubierto con una capa protectora (Persson et al., 1994). El cordón detonante se utiliza para sincronizar detonaciones entre varios barrenos o para conectar cargas explosivas en una secuencia controlada. Su función es esencial para garantizar que la detonación de los explosivos ocurra de manera programada, optimizando la fragmentación y minimizando los efectos no deseados (Ministerio para la Transición Ecológica, 2017).

#### **2.2.6.3. Retardadores de detonación**

Son dispositivos que se insertan en el sistema de voladura para retrasar la detonación de una carga en relación con las demás. Esta demora en la iniciación de las cargas permite controlar de manera precisa la secuenciación de la voladura, lo que resulta en beneficios como una fragmentación más eficiente y la reducción de las vibraciones generadas. Además, los retardadores ayudan a minimizar el daño a las paredes del túnel o a las estructuras cercanas. El uso de retardadores es clave en voladuras que requieren un control exacto de la secuencia temporal y espacial de las detonaciones (Persson et al., 1994).

#### **2.2.7. Explosivos**

Los explosivos son sustancias químicas diseñadas para liberar una gran cantidad de energía en forma de gases y calor, lo que permite inducir fracturas controladas en la roca. En minería, estos

materiales se utilizan principalmente para romper el macizo rocoso, facilitando su excavación y removimiento (Ministerio para la Transición Ecológica, 2017).

El tipo de explosivo elegido depende de diversas condiciones, como la naturaleza de la roca, la estabilidad geotécnica del área y los objetivos específicos de la voladura, como la fragmentación deseada y la minimización de efectos colaterales como el daño a las paredes del túnel o las vibraciones excesivas (Konya & Konya, 1995).

Existen varios tipos de explosivos en minería, y su clasificación se realiza en función de su composición y aplicación. Los explosivos más comunes se agrupan principalmente en dos categorías: los explosivos a granel, como el ANFO, y los explosivos encartuchados o de alta sensibilidad, como las emulsiones y dinamitas modernas. La elección de un explosivo adecuado requiere una evaluación técnica detallada, para garantizar una combinación óptima entre seguridad, eficiencia y control sobre los efectos no deseados de la voladura, como el sobre-rompimiento (overbreak) o la generación de vibraciones excesivas (Konya & Konya, 1995).

#### **2.2.7.1. Tipos Comunes de Explosivos en Minería**

##### **- ANFO (AMMONIUM NITRATE FUEL OIL)**

El ANFO es uno de los explosivos más utilizados en minería debido a su bajo costo, facilidad de fabricación y manejo. Este explosivo consiste en una mezcla de nitrato de amonio (un agente oxidante) y diésel (un combustible). Se emplea principalmente en operaciones a cielo abierto, donde se requiere una voladura a gran escala. Aunque es efectivo, su sensibilidad es limitada, lo que lo hace menos adecuado para trabajos en ambientes húmedos o donde se requiera una detonación más controlada (Persson et al., 1994).

##### **- EMULSIONES EXPLOSIVAS**

Las emulsiones explosivas son mezclas formadas por una fase acuosa, generalmente nitrato de amonio, y una fase oleosa, como los hidrocarburos. Esta mezcla estabilizada permite obtener un explosivo con una mayor resistencia a la humedad y una mayor seguridad en comparación con los explosivos a base de dinamita. Son especialmente eficaces en minería subterránea y en ambientes húmedos, donde otras opciones pueden no funcionar adecuadamente. Su control de energía permite obtener fragmentaciones más precisas y menos daño colateral (Ministerio para la Transición Ecológica, 2017).

- EXPLOSIVOS ENCARTUCHADOS (GELATINAS Y DINAMITAS)

Los explosivos encartuchados como las gelatinas y dinamitas modernas siguen siendo utilizados en ciertas aplicaciones donde se requiere una alta sensibilidad y potencia. Están compuestos por una mezcla de nitroglicerina u otros componentes sensitivos que permiten una detonación rápida y controlada. Son empleados en voladuras más precisas y específicas, como las que requieren un control más estricto sobre el daño de las paredes o cuando se enfrenta roca especialmente dura (Konya & Konya, 1995).

**Figura 2**

*Gránulos de ANFO*



Fuente: Bohanek y Škrlec (2013). Influence of the Initiation Energy on the Velocity of Detonation of ANFO Explosive, Central European Journal of Energetic Materials, volumen (10).

### ***2.2.8. Control de calidad (qa/qc) en la mejora del proceso de voladura***

El sistema de Aseguramiento y Control de Calidad (QA/QC) constituye un componente esencial en la gestión eficiente de los procesos mineros, su aplicación rigurosa garantiza que las operaciones de perforación y voladura se ejecuten conforme a los diseños técnicos establecidos, lo cual es clave para mantener la seguridad, eficiencia y sostenibilidad en la extracción de recursos minerales (Muñoz & Lafont de Sentenac, 2023).

Una correcta medición de parámetros como la ubicación de los taladros, el tipo y la cantidad de explosivo utilizado, así como la secuencia de iniciación, permite mejorar los resultados de la voladura. Este control preciso incide directamente en la calidad de la fragmentación, reduciendo los impactos negativos en las personas, el medio ambiente y los costos operativos. Además, una voladura bien ejecutada minimiza la sobre excavación, mejora la estabilidad de los frentes y optimiza el rendimiento del ciclo de minado (Muñoz & Lafont de Sentenac, 2023).

En este marco, el ciclo PHVA (Planificar–Hacer–Verificar–Actuar) se consolida como un modelo de gestión eficaz, ampliamente utilizado en sistemas de calidad y productividad industrial.

A continuación, se presenta un esquema que ilustra cómo se adapta el ciclo PHVA a las operaciones de perforación y voladura, y cómo cada fase contribuye al aseguramiento de la calidad y la mejora continua en campo:

### Figura 3

*Ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act) aplicado a la perforación y voladura*



Fuente: Rocha Blast Engineers (s.f.) Blaststatistics. Recuperado de [https://www.rochablastengineers.com/wp-content/uploads/2021/01/BlaststatisticsOP\\_10.20.pdf](https://www.rochablastengineers.com/wp-content/uploads/2021/01/BlaststatisticsOP_10.20.pdf)

De acuerdo con Muñoz & Lafont de Sentenac (2023), QA/QC representa además desafíos y oportunidades como:

- A. Gestión del Cambio en Operaciones Mineras: La gestión del cambio es clave para implementar mejoras tecnológicas y operativas en minería. Requiere simplificar procesos, considerar la cultura organizacional y capacitar al personal para asegurar transiciones eficientes y sostenibles.
- B. Integración de Sistemas QA/QC: Una integración efectiva entre los sistemas de control de calidad y ejecución operativa permite automatizar el flujo de datos, reducir errores, mejorar la trazabilidad y aumentar la eficiencia operativa.

- C. Mejora del Recurso y Sostenibilidad: Mejorar la voladura permite reducir la dilución del mineral, maximizar la recuperación del recurso y disminuir impactos ambientales, lo cual mejora la rentabilidad y fortalece la sostenibilidad del proyecto.
- D. Big Data e Inteligencia Artificial en Minería: El uso de big data e inteligencia artificial facilita el análisis de grandes volúmenes de información, permitiendo tomar decisiones basadas en datos para mejorar indicadores clave como productividad, consumo energético y eficiencia operativa.

### 2.2.9. *Big data analytics en el proceso minero*

El análisis de big data, o Big Data Analytics, es una herramienta clave en la mejora de procesos industriales, permitiendo extraer información útil de grandes volúmenes de datos para apoyar la toma de decisiones. En el contexto minero, su aplicación resulta particularmente valiosa en áreas como la perforación y voladura, ya que permite mejorar el uso de explosivos, reducir costos operativos y minimizar impactos negativos en el entorno (López, s.f.).

En la figura se esquematiza el proceso integral que conforma el ciclo de vida de un proyecto basado en big data analytics.

#### **Figura 4**

*Ciclo de vida de un proyecto de big data analytics*



Fuente: López (s.f.), Gestión de los datos y su uso: Data Analytics (p. 7), Universitat Oberta de Catalunya.

El ciclo de vida de un proyecto de Big Data Analytics consta de varias etapas fundamentales (López, s.f.):

- **Definición del problema:**

Todo análisis comienza con la identificación del problema a resolver o de las preguntas clave a contestar (López, s.f.). Por ejemplo, en minería, puede tratarse de predecir fallos en los equipos o determinar patrones de sobre excavación relacionados con el diseño de voladura.

- Identificación de los datos requeridos:

Una vez planteado el problema, se definen los datos necesarios para su análisis: su origen, cantidad, calidad y formato (López, s.f.). Esto incluye, por ejemplo, datos históricos de voladuras, consumo de explosivos y lecturas de sensores.

- Recolección de datos:

Esta etapa implica la recopilación de datos desde diferentes fuentes, como sensores en tiempo real, registros históricos y bases de datos especializadas, lo cual permite construir una base sólida para el análisis posterior (López, s.f.).

- Preprocesamiento:

En esta fase, los datos se limpian, organizan y estandarizan. Esto es crucial, ya que en entornos industriales los datos suelen presentarse desordenados o incompletos. Se eliminan errores y se integran múltiples fuentes para generar un conjunto de datos coherente (López, s.f.).

- Análisis de datos (Analytics)

Se aplican técnicas estadísticas y algoritmos de machine learning para extraer patrones y responder a las preguntas planteadas inicialmente (López, s.f.). En el contexto minero, esto puede implicar predecir comportamientos anómalos en la voladura o evaluar el rendimiento de diferentes diseños de precorte.

- Visualización de resultados:

La información procesada se presenta en formatos gráficos comprensibles para facilitar la toma de decisiones, incluso por parte de usuarios con poca experiencia técnica. Herramientas como Tableau, QlikView o dashboards personalizados permiten presentar indicadores clave, alertas y predicciones de forma clara y efectiva (López, s.f.).

Cabe destacar que el éxito de estos proyectos requiere experiencia previa en el proceso que se busca mejorar. No basta con aplicar algoritmos a los datos; es necesario un enfoque artesanal, donde intervienen profesionales con conocimientos del proceso industrial, estadística y tecnología.

### **2.3. Marco conceptual**

#### **a) Minería Subterránea**

La minería subterránea es un método de extracción de minerales que se realiza bajo la superficie terrestre mediante la construcción de túneles, galerías y pozos. Este método permite acceder a depósitos minerales ubicados a grandes profundidades, que no son viables mediante minería superficial. Es ampliamente utilizado para la extracción de recursos metálicos (oro, plata, cobre) y no metálicos (carbón, sal, piedra caliza). Este método se caracteriza por su capacidad de reducir el impacto ambiental en comparación con la minería a cielo abierto. (Salama, 2014).

#### **b) Mecánica de Rocas**

La mecánica de rocas es una disciplina interdisciplinaria que estudia el comportamiento y las propiedades de las masas rocosas, fundamentales para proyectos de ingeniería como minería, infraestructura y energía. Su formalización como campo de estudio data de 1960. Se distingue entre propiedades obtenidas de muestras pequeñas y estudios in situ del macizo rocoso. (Brown, 1960).

#### **c) Voladura Controlada**

La voladura controlada es una técnica que busca minimizar los daños al macizo rocoso remanente durante la excavación mediante estrategias específicas como el precorte y el recorte. Su objetivo es preservar la estabilidad estructural, reducir grietas y fisuras, y delimitar el perímetro de las áreas de trabajo.

#### **d) Voladura de Precorte**

Técnica utilizada en minería para crear una superficie de fractura controlada antes de la voladura principal, con el objetivo de minimizar la sobreexcavación y mejorar la estabilidad del macizo rocoso. Se logra mediante la perforación de una serie de barrenos con explosivos de baja energía que generan una línea de debilidad en la roca.

#### **e) Explosivos**

Sustancias químicas capaces de liberar una gran cantidad de energía en forma de gases y presión tras una reacción de detonación. Se utilizan en minería y construcción para fragmentar rocas y facilitar su extracción. Se clasifican en convencionales (dinamita, ANFO) y emulsiones explosivas, que ofrecen mayor seguridad y resistencia al agua.

#### **f) Detonadores**

Dispositivos que activan la detonación de los explosivos. Se dividen en eléctricos, no eléctricos y electrónicos. Su uso en voladuras de precorte es clave para controlar los tiempos de detonación y mejorar la fragmentación de la roca.

#### **g) Data Analytics**

El análisis de datos en minería consiste en la recopilación y análisis de información operativa para mejorar procesos y recursos. Herramientas como Python, R, Tableau o Power BI permiten identificar patrones de ineficiencia, predecir desgaste de equipos y reducir costos operativos mediante el monitoreo en tiempo real y el análisis predictivo.

## **h) Sostenimiento**

El sostenimiento se refiere a las técnicas, materiales y estructuras utilizadas para estabilizar y reforzar macizos rocosos en excavaciones subterráneas o superficiales, garantizando la seguridad y la integridad de las obras. Es una medida preventiva y correctiva que se implementa para evitar el colapso o desprendimiento de materiales rocosos, especialmente en túneles, galerías, taludes y otras estructuras relacionadas con minería, ingeniería civil o geotecnia.

### **2.4. Hipótesis**

#### ***2.4.1. Hipótesis general***

- La aplicación de Data Analytics en el proceso de voladura de precorte mejorará el consumo de explosivos y reducirá la sobre excavación en el crucero 2745 de la zona Balcón de la Unidad Minera Parcoy, Consorcio Minero Horizonte, La Libertad.

#### ***2.4.2. Hipótesis específicas***

- La evaluación de la calidad del macizo rocoso mediante análisis geomecánicos permitirá identificar sus características estructurales y mecánicas, optimizando la ejecución de la voladura en el crucero 2745 de la zona Balcón de la Unidad Minera Parcoy, Consorcio Minero Horizonte, La Libertad.
- La implementación de estrategias basadas en Data Analytics permitirá mejorar la voladura de precorte mediante un análisis preciso del consumo de explosivos, mejorando la eficiencia y reduciendo la sobre excavación en el crucero 2745 de la zona Balcón de la Unidad Minera Parcoy, Consorcio Minero Horizonte, La Libertad.
- La aplicación de herramientas de Data Analytics en la voladura de precorte permitirá reducir los costos de sostenimiento al disminuir la sobre excavación en el

crucero 2745 de la zona Balcón de la Unidad Minera Parcoy, Consorcio Minero Horizonte, La Libertad.

### 2.4.3. Variables e indicadores

#### 2.4.3.1.VARIABLE INDEPENDIENTE

X1: Aplicación de Data Analytics en la voladura controlada.

#### 2.4.3.2.VARIABLE DEPENDIENTE

Y1: Calidad del macizo rocoso.

Y2: Eficiencia de la voladura controlada.

Y3: Impacto en sostenimiento.

## 2.5. Operacionalización de las variables

**Tabla 4**

*Operacionalización de las variables*

VARIABLE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
<b>Variable independiente:</b> Aplicación de Data Analytics en el consumo de explosivos para la voladura de precorte	Uso de herramientas de análisis de datos para registrar, depurar, procesar, comparar e interpretar información técnica del consumo de explosivos y del comportamiento de la voladura de precorte, con fines de optimización operativa.	<b>Gestión y procesamiento de datos</b>	Base de datos de voladuras depurada; número de registros analizados; frecuencia de actualización de datos
		<b>Análisis técnico del consumo de explosivos</b>	Consumo de explosivo por disparo (kg); consumo específico de explosivo (kg/m); factor de potencia (kg/t)
		<b>Control y optimización del diseño de voladura</b>	Relación espaciamiento/burden; longitud de taco inerte (m); carga lineal (kg/m);

			secuencia de iniciación del precorte
<b>Variable dependiente 1:</b> Calidad del macizo rocoso	Condición geomecánica del macizo rocoso del Crucero 2745, evaluada mediante parámetros de clasificación y caracterización estructural, que influyen en la respuesta del contorno frente a la voladura de precorte.	<b>Clasificación geomecánica</b>	RMR (Rock Mass Rating); Q de Barton; GSI (Geological Strength Index)
		<b>Condición estructural del macizo</b>	RQD (%); espaciamiento de discontinuidades (m); persistencia de discontinuidades; apertura de discontinuidades; presencia de agua
<b>Variable dependiente 2:</b> Eficiencia de la voladura de precorte	Nivel de desempeño técnico y operativo de la voladura de precorte en función del control del contorno, el consumo de explosivos y la reducción de la sobreexcavación.	<b>Control del contorno excavado</b>	Porcentaje de sobreexcavación (%); desviación del contorno teórico (m o cm)
		<b>Desempeño del consumo explosivo</b>	Factor de voladura (kg/t); cantidad de explosivo empleado por metro de avance (kg/m)
		<b>Resultado operativo de la voladura</b>	Avance por disparo (m/disparo); P80 de fragmentación (cm); número de bolones por disparo
<b>Variable dependiente 3:</b> Impacto en sostenimiento	Efecto de la calidad de la voladura de precorte sobre el requerimiento de sostenimiento y los costos asociados al control de la estabilidad de la excavación.	<b>Costo de sostenimiento</b>	Costo total de sostenimiento por metro (US\$/m); costo adicional por sobreexcavación (US\$/m)
		<b>Condición de estabilidad del contorno</b>	Reducción de fallas estructurales (%); longitud de sostenimiento

			adicional requerido (m); incidencia de zonas inestables
--	--	--	---

Fuente: Elaboración Propia

## CAPÍTULO III

### PROCESAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

#### **3.1. Caracterización geomecánica del macizo rocoso en el Crucero 2745 y su influencia en la voladura de precorte**

La caracterización geomecánica constituye un aspecto fundamental para determinar las condiciones de estabilidad del macizo rocoso y su incidencia en la eficiencia de las voladuras controladas, particularmente en operaciones de precorte. En el caso del Crucero 2745, ubicado en la zona Balcón, se requiere un análisis detallado de sus propiedades estructurales, litológicas y geotécnicas, con el propósito de definir parámetros de diseño que aseguren un control adecuado de la sobreexcavación y una reducción de daños colaterales en las excavaciones subterráneas. Esta caracterización permite integrar la información geológica con la respuesta mecánica del macizo, estableciendo así una base técnica confiable para la planificación de los trabajos mineros en dicha área.

##### ***3.1.1. Estudio de la evaluación geomecánica en el Crucero 2745 – Zona Balcón***

El estudio geomecánico en el Crucero 2745 se desarrolló mediante observaciones de campo, mapeos estructurales y clasificación del macizo rocoso con sistemas reconocidos como RMR, Q-System y GSI. La zona Balcón presenta características que la convierten en un área crítica dentro de la operación, tanto por la complejidad de sus estructuras como por su influencia en el desarrollo de labores adyacentes. La evaluación realizada ha permitido determinar la calidad del macizo, identificar las principales discontinuidades y establecer la influencia de estas en el comportamiento global de la excavación. Dichos resultados son indispensables para la correcta aplicación de técnicas de voladura de precorte, en donde la respuesta del macizo es determinante para la eficiencia del corte y la estabilidad posterior.

### ***3.1.2. Contextualización geológica y operativa del Crucero 2745***

El Crucero 2745, emplazado en la zona Balcón, constituye una de las áreas críticas para el desarrollo de las labores subterráneas de la unidad minera. Geológicamente, este sector se caracteriza por la presencia de rocas volcánicas e intrusivas, principalmente andesitas y dioritas, que han sido afectadas por procesos de alteración hidrotermal de distinta intensidad. Dichas alteraciones, identificadas en campo y en reportes de avance, incluyen sericitización, cloritización y silicificación parcial, lo que conlleva una disminución local en la resistencia del macizo y una mayor heterogeneidad en su comportamiento mecánico.

Desde la perspectiva estructural, se han identificado sistemas de discontinuidades y fracturas con orientaciones predominantes N-S y E-W, acompañados de buzamientos intermedios a altos. Estas estructuras condicionan el grado de estabilidad del macizo y representan planos de debilidad que deben considerarse al diseñar tanto los patrones de perforación como el sostenimiento. En particular, la presencia de rellenos arcillosos y óxidos en las juntas incrementa el riesgo de sobreexcavación durante la voladura controlada de precorte.

En el plano operativo, el Crucero 2745 cumple un rol estratégico al conectar zonas de preparación con áreas de explotación dentro del nivel de la zona Balcón. Es utilizado para el tránsito de equipos de acarreo, transporte de mineral y desmonte, así como para facilitar la ventilación hacia sectores adyacentes. Esto convierte al crucero en un punto neurálgico donde cualquier inestabilidad del macizo no solo repercute en la seguridad del personal, sino también en la continuidad de la operación y en los costos de sostenimiento.

El análisis integrado de la información geológica y operativa evidencia que el Crucero 2745 se encuentra en una zona de transición litológica- estructural, donde la interacción de las alteraciones hidrotermales, la litología y las estructuras define un macizo de calidad variable. Esta

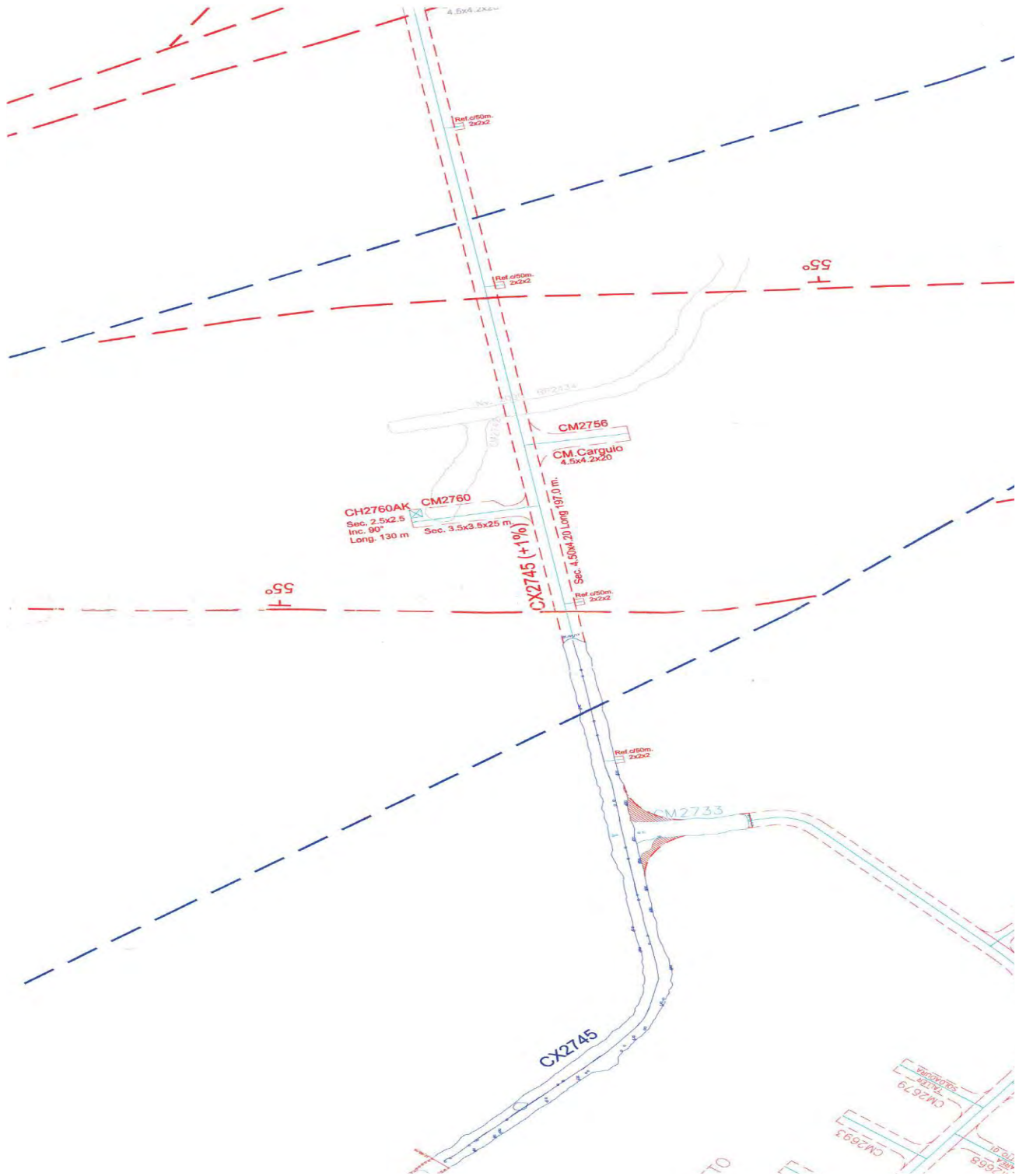
variabilidad hace indispensable un estudio geomecánico riguroso que permita ajustar los diseños de voladura y sostenimiento en función de las condiciones reales del terreno.

#### **3.1.2.1.Ubicación dentro de la zona Balcón**

El Crucero 2745 se localiza en la Zona Balcón, específicamente en el Nivel 1965, desarrollándose sobre la veta Lourdes. Esta labor constituye un punto estratégico de acceso y conexión dentro del sistema de galerías, además de servir como referencia para los trabajos de profundización futura de la mina, al proyectarse hacia niveles inferiores de explotación.

**Figura 5**

*Plano del Crucero 2745 – Zona Balcon*



Fuente: Elaboración Propia

### **3.1.2.2.Litología predominante**

La litología en el Crucero 2745 está conformada principalmente por andesitas y dioritas, rocas de origen ígneo que presentan un grado variable de compactación, fracturamiento y resistencia mecánica. La andesita, de textura generalmente porfirítica a afanítica, presenta valores referenciales de resistencia a compresión simple (UCS) comprendidos entre 80 y 180 MPa, dependiendo del grado de alteración, densidad de fracturas y contenido mineralógico. Por su parte, la diorita, roca intrusiva de grano medio a grueso y mayor competencia mecánica, suele registrar valores de UCS entre 120 y 250 MPa, pudiendo alcanzar valores superiores cuando se presenta fresca y masiva.

Estas unidades litológicas se encuentran afectadas localmente por intrusiones menores y por procesos de alteración hidrotermal, los cuales modifican sus propiedades físicas y mecánicas, reduciendo en algunos sectores la resistencia original de la roca. Asimismo, la presencia de vetillas de cuarzo y sulfuros en menor proporción constituye un indicador del control estructural de la mineralización y de eventos tectono-hidrotermales posteriores.

Desde el punto de vista geomecánico, la variabilidad litológica condiciona directamente la resistencia a compresión simple (UCS), la respuesta al fracturamiento inducido por voladura y la clasificación final del macizo rocoso según sistemas como RMR, Q y GSI. En ese sentido, sectores dominados por diorita fresca tienden a presentar mayor competencia estructural, mientras que zonas con andesita alterada o intensamente diaclasada muestran comportamientos menos favorables frente a la excavación.

Por ello, la identificación precisa de estas unidades resulta fundamental para correlacionar la calidad del macizo rocoso con la efectividad de las voladuras de precorte, permitiendo ajustar



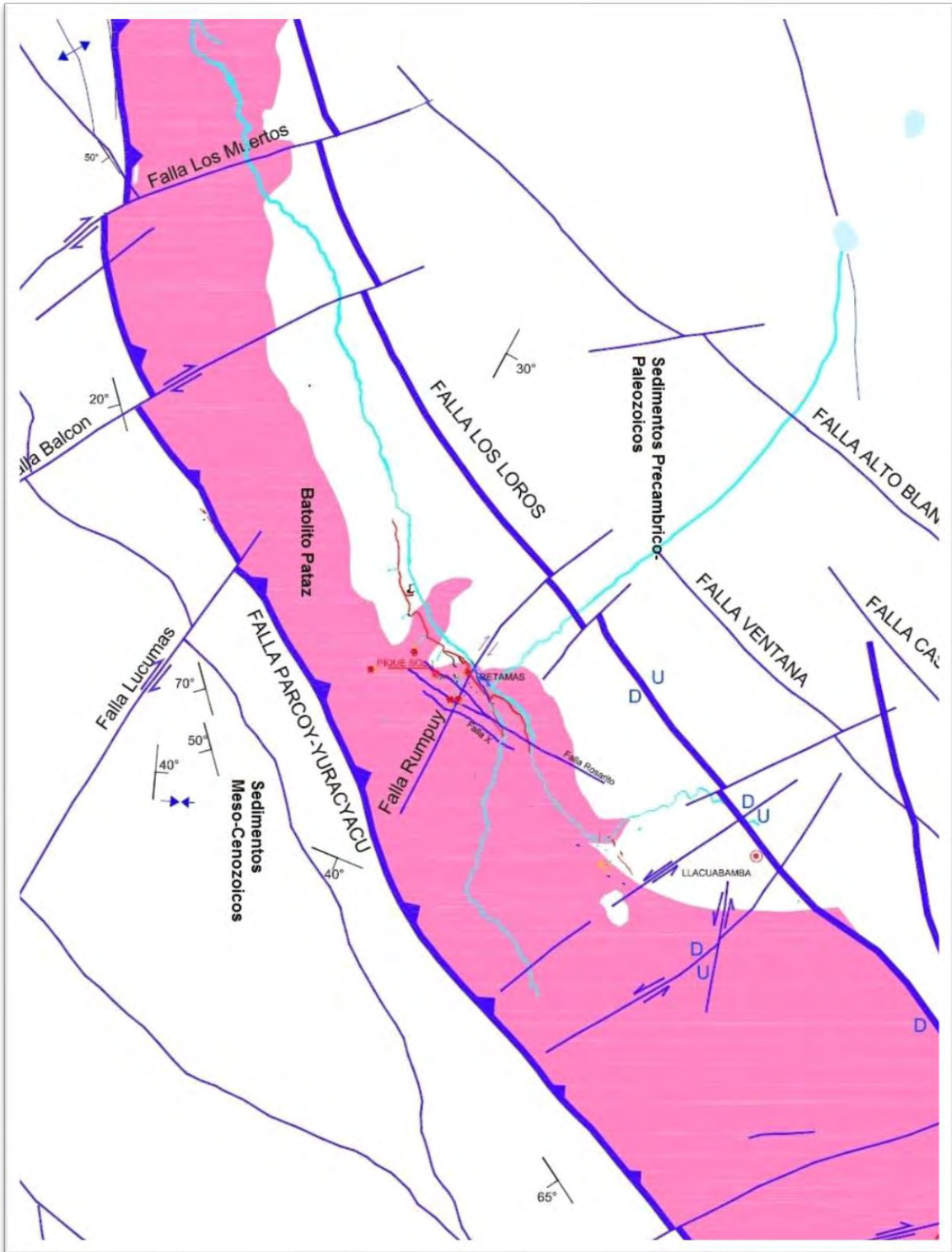
### **3.1.2.3.Alteraciones y estructuras principales**

En el Crucero 2745, ubicado en la Zona Balcón – Veta Lourdes – Nivel 1965, se identifican procesos de alteración hidrotermal que modifican la composición de las rocas encajonantes, predominando la silicificación y la argilización, asociadas a la circulación de fluidos mineralizantes. Estas alteraciones influyen directamente en la variación de la resistencia del macizo rocoso y en la continuidad de la veta.

Respecto a las estructuras, el área presenta sistemas de fracturas y fallas locales, principalmente con orientaciones Noreste-Suroeste y Noroeste-Sureste, que condicionan el emplazamiento y buzamiento de la veta Lourdes. Estas estructuras controlan tanto la geometría del mineral como la estabilidad de las labores, siendo factores críticos para el diseño de la voladura de precorte y la futura profundización de la mina.

**Figura 7**

*Mapa estructural de Parcoy (CMH)*



Fuente: Elaboración Propia

### **3.1.3. Metodología de evaluación geomecánica aplicada**

La evaluación geomecánica en el Crucero 2745 – Zona Balcón – Nivel 1965, Veta Lourdes se realizó mediante levantamiento de campo:

#### **3.1.3.1. Sistema de clasificación utilizado**

Se emplearon sistemas reconocidos de clasificación geomecánica, tales como el Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski, el sistema de Q de Barton y el Geological Strength Index (GSI) de Hoek, con el propósito de cuantificar la calidad del macizo rocoso en el Crucero 2745.

##### **3.1.3.1.1. Alcance del levantamiento**

El estudio de evaluación geomecánica en el Crucero 2745 – Zona Balcón – Nivel 1965, Veta Lourdes tuvo como alcance un levantamiento sistemático a lo largo de una longitud de 150 metros, considerada como tramo de referencia representativo de las condiciones del macizo rocoso. Este alcance permitió cubrir las variaciones litológicas, estructurales y de alteración presentes en el crucero, asegurando que los resultados obtenidos constituyan una base técnica sólida para la caracterización geomecánica y su relación con la voladura de precorte, el plano de Mapeo Geomecánico se encuentra en los anexos.

#### **3.1.3.2. Parámetros evaluados según clasificación RMR**

El Rock Mass Rating (RMR) es un sistema que evalúa y categoriza la calidad del macizo rocoso, constituyendo un indicador fundamental para el análisis geomecánico en el Crucero 2745 – Zona Balcón – Nivel 1965, Veta Lourdes. Este método considera seis parámetros principales que permiten clasificar de manera integral las condiciones del macizo y establecer lineamientos para su aplicación en la voladura de precorte.

### 3.1.3.2.1. Resistencia a la Compresión Uniaxial (Primer Parámetro)

Para la caracterización de la resistencia del macizo rocoso en el Crucero 2745 se realizaron ensayos de Compresión Simple ( $\sigma_c$ ) en el laboratorio de Mecánica de Rocas, complementados con evaluaciones in situ mediante el uso de herramientas como el Martillo Schmidt. La información fue recopilada a partir de los reportes del Área de Geomecánica de la empresa, donde se determinó que la granodiorita, roca predominante en la zona, posee una resistencia a la compresión uniaxial de 25 a 50 Mpa y un peso específico de 2,7 t/m<sup>3</sup>, como se muestra en la tabla 5, para posteriormente valorar este parámetro.

**Tabla 5**

*Propiedades del macizo rocoso en la zona de estudio*

Litología	Tipo de roca	$\sigma_c$ (MPa)	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )
Roca Ígnea	Granodiorita	25 – 50	2.7

Fuente: Departamento de Geomecánica de CMH

**Tabla 6**

*Tabla de Valoración RMR respecto a la Compresión Uniaxial*

Descripción	Resistencia sometida Compresión Simple (MPa)	RMR
	>1	0
<b>Muy Baja</b>	1-5	1
	5-25	2
<b>Baja</b>	25-50	4
<b>Medio</b>	50-100	7
<b>Alta</b>	100-250	12
<b>Muy Alta</b>	>250	15

Fuente: Elaboración Propia en base a la teoría RMR de Bieniawski

### 3.1.3.2.2. Índice de calidad de la roca (RQD) (Segundo Parámetro)

Según Barton, N., Lienn, R., y Lunde, J. (1988), el índice “Jv” suele obtenerse con la frecuencia, se define como el número de juntas por m<sup>3</sup>, obtenido al sumar las juntas presentes por m<sup>3</sup> para cada una de las familias existentes.

**Tabla 7**

*Características del macizo rocoso*

<b>Jv</b>	<b>- Características del macizo rocoso</b>
<1	- Bloques masivos
1-3	- Bloques grandes
3-10	- Bloques tamaño medio
10-30	- Bloques pequeños
>30	- Bloques muy pequeños

Fuente: Barton, N., Lienn, R., y Lunde, J.

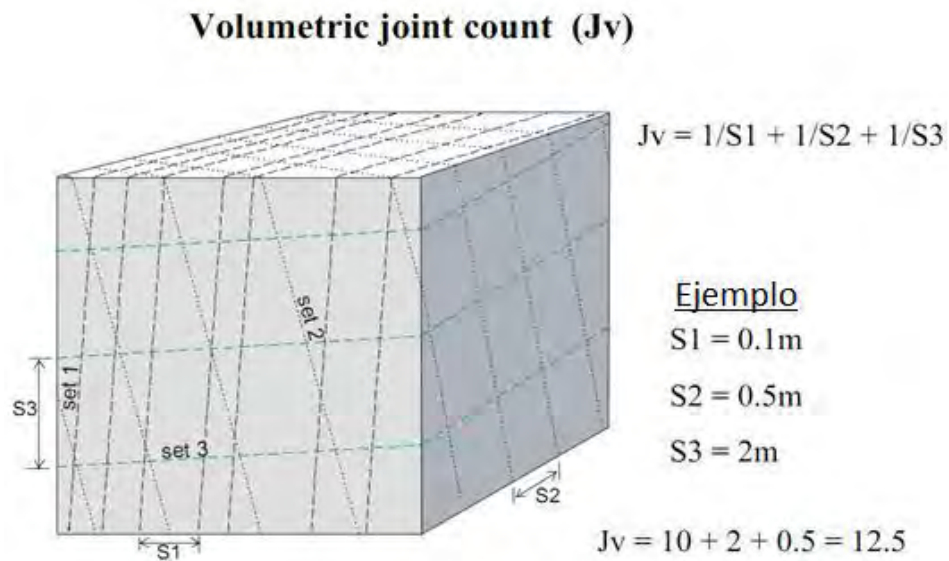
La relación entre el índice “Jv” y el RQD es de acuerdo con Plasmstrom, de la siguiente forma:

$$RQD = 115 - 3.3Jv$$

Según las orientaciones de estas juntas los bloques conformando in-situ presentaran diferentes geometrías, afectando doblemente a la fragmentación de la roca y a la dirección de salida más útil del disparo.

## Figura 8

Método de Cálculo RQD mediante el método volumétrico



Fuente: Fuente: Barton, N., Lienn, R., y Lunde, J.

Entonces calculamos el RQD, en el campo se observa:

El 24 no proviene del dibujo; proviene del levantamiento de campo.

Lo que falta es mostrar la tabla o la operación que suma las familias de juntas hasta llegar a 24.

Jv: 24

$RQD = 115 - 3.3(24)$

$RQD = 35\%$

**Tabla 8***Tabla de Valoración RMR según el RQD*

<b>Calidad de la Roca</b>	<b>RQD</b>	<b>VALOR</b>
<b>Muy Mala</b>	0-25 %	3
<b>Mala</b>	25-50 %	7
<b>Regular</b>	50-75 %	13
<b>Buena</b>	75-90 %	17
<b>Excelente</b>	90-100 %	20

Fuente: Elaboración Propia en base a la teoría RMR de Bieniawski

**3.1.3.2.3. Espaciamiento de las discontinuidades (Tercer Parámetro)**

Este parámetro mide la distancia entre las superficies de las discontinuidades, esta información se recopiló en campo.

**Tabla 9***Tabla de Valoración RMR según la distancia entre las juntas*

<b>Descripción Estructural</b>	<b>Distancia entre Juntas</b>	<b>Tipos de macizos rocosos</b>	<b>VALOR</b>
Muy Cerrado	<0.06 metros	Machacado	3
Cerrado	0.06-0.2 metros	Fracturado	8
Moderadamente Cerrado	0.2-0.6 metros	En bloques	13
Ancho	0.6-2 metros	Masivo	17
Muy Ancho	>2 metros	Solido	20

Fuente: Elaboración Propia en base a la teoría RMR de Bieniawski

**3.1.3.2.4. Condición de las discontinuidades (Cuarto Parámetro)**

Este parámetro evalúa las discontinuidades, mediante 5 aspectos, los cuales se detallan en las siguientes tablas:

Se analizó la persistencia, esta es el tamaño o extensión que tiene una discontinuidad, evaluado en el campo.

**Tabla 10***Tabla de Valoración RMR: Persistencia*

<b>Grado Estructural</b>	<b>Descripción</b>	<b>Distancia entre Superficie de Contacto</b>	<b>VALOR</b>
1	Muy Pequeña	< 1metros	6
2	Pequeña	1-3m	4
3	Mediana	3-10m	2
4	Alta	10-20m	1
5	Muy Alta	>20m	0

Fuente: Elaboración Propia en base a la teoría RMR de Bieniawski

Se analizo la apertura, siendo esta la distancia entre las superficies de las discontinuidades, esta información observada en campo.

**Tabla 11***Tabla de Valoración RMR: Apertura*

<b>Grado Estructural</b>	<b>Valoración</b>	<b>Separación de las superficies</b>	<b>VALOR</b>
1	Abierta	>5 milímetros	0
2	Moderadamente abierta	1-5 milímetros	2
3	Cerrada	0.1-1 milímetros	4
4	Cerrada	<0.1 milímetros	5
5	No tiene	0 milímetros	6

Fuente: Elaboración Propia en base a la teoría RMR de Bieniawski

Se evaluó la rugosidad como un factor determinante de la resistencia al corte, esta redujo su valor conforme aumentó la apertura.

**Tabla 12***Tabla de Valoración RMR: Rugosidad*

<b>Grado Estructural</b>	<b>Descripción</b>	<b>VALOR</b>
1	Muy rugosa	5
2	Rugosa	4
3	Ligeramente rugosa	3
4	Suave	1
5	Espejo de falla	0

Fuente: Elaboración Propia en base a la teoría RMR de Bieniawski

Se observo el relleno que presenta las superficies de contacto de las discontinuidades, observado en campo:

**Tabla 13***Tabla de Valoración RMR: Relleno*

<b>Grado Estructural</b>	<b>Descripción</b>	<b>VALOR</b>
1	Relleno suave mayor a 5 milímetros	0
2	Relleno suave menor a 5 milímetros	1
3	Relleno duro mayor a 5 milímetros	2
4	Relleno duro menor a 5 milímetros	4
5	Limpio	6

Fuente: Elaboración Propia en base a la teoría RMR de Bieniawski

Al analizar el Interperismo se tomó en consideración el grado de fracturamiento, meteorización y erosión, que presenta la roca.

**Tabla 14***Tabla de Valoración RMR: Interperismo*

<b>Grado Estructural</b>	<b>Descripción</b>	<b>VALOR</b>
1	Descompuesta	0
2	Muy intemperizada	2
3	Moderadamente intemperizada	3
4	Ligeramente intemperizada	5
5	Sana	6

Fuente: Elaboración Propia en base a la teoría RMR de Bieniawski

**3.1.3.2.5. Condiciones de agua subterránea (Quinto Parámetro)**

La presencia de agua subterránea afecta la estabilidad de nuestras labores, pues las discontinuidades y aperturas conducen el flujo que termina en filtraciones y goteo dentro de ellas.

**Tabla 15***Tabla de Valoración RMR considerando la presencia de Agua Subterránea*

<b>Grado Estructural</b>	<b>Descripción</b>	<b>VALOR</b>
1	Seco	15
2	Húmedo	10
3	Mojado	7
4	Goteo	4
5	Flujo	0

Fuente: Elaboración Propia en base a la teoría RMR de Bieniawski

**3.1.3.2.6. Orientación de las discontinuidades (Sexto Parámetro)**

La falla cielo representa la discontinuidad más preponderante en nuestras labores, ya que se encuentra en contra del sentido de avance y presenta un buzamiento de 60°. Esta condición incrementa significativamente los riesgos de inestabilidad, lo que exige un análisis detallado del sostenimiento y de las medidas de control geomecánico a aplicar.

**Tabla 16**

*Tabla de Valoración RMR considerando la dirección de las discontinuidades.*

Rumbo en referencia al eje de la Excavación	Dirección	Buzamiento	Estabilidad
Perpendicular al eje de la excavación	Considerando el buzamiento	45°-90°	Muy favorable
		20°-45°	Favorable
	En contra del buzamiento	45°-90°	Regular
		20°-45°	Desfavorable
Paralelo al eje de la Excavación	-	45°-90°	Muy desfavorable
Paralelo al eje de la Excavación	-	20°-45°	Regular
Independiente del rumbo de la Excavación	-	0°-20°	Desfavorable

Fuente: Elaboración Propia en base a la teoría RMR de Bieniawski

**Tabla 17**

*Tabla de Corrección según la orientación que poseen las discontinuidades en nuestra labor*

Orientación del Rumbo y Buzamiento		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable
Valores	Túneles y Minas	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Fuente: Elaboración Propia en base a la teoría RMR de Bieniawski

### 3.1.3.3.CÁLCULO Y CLASIFICACIÓN DEL VALOR RMR

Se analizó todas las características geomecánicas del Macizo rocoso, tomando en consideración todos parámetros presentados anteriormente, para ello se podrá determinar el RMR (Índice de Clasificación Geomecánica de Bienawski) de la roca en el Zona balcon, esto se presenta en la tabla 26.

**Tabla 18***Cálculo del RMR*

<b>Parámetro</b>	<b>Sub-Parámetro</b>	<b>Valoración</b>
Resistencia a compresión simple	-	4
RQD	-	7
Espaciamiento	-	8
Condición de Juntas	Persistencia	2
	Apertura	4
	Rugosidad	3
	Relleno	1
	Intemperización	2
Agua Subterránea	-	4
Valor de RMR		<b>35</b>
Ajuste por orientación		-5
Valor RMR Total		30

Fuente: Elaboración Propia






Se evaluó la roca utilizando la tabla de clasificación RMR, determinándose que pertenece a la Clase IV – Mala, lo cual refleja baja calidad del macizo rocoso, con estabilidad limitada y resistencia deficiente.

#### **3.1.3.4. Evaluación mediante el índice GSI**

Para este análisis se usó la cartilla geomecánica elaborada por el departamento de Geomecánica de Consorcio Minero Horizonte el cual determina dos aspectos a considerar; la condición estructural y la calidad de la estructura, para ello se presenta en la figura 10.

Figura 9

Cartilla Geomecánica CM Horizonte – 1

 <p>SIST. SEGUN SER MONTADO LADOS TEMPORALES Y PERMANENTES SECCION 3.20m-4.30m</p> <p><b>A</b> SIN SOPORTE O PERNO PUNTUAL (CONTROL DE BLOQUES INESTABLES)</p> <p><b>B</b> PERNO SISTEMATICO. (1.5x1.5 m) MALLA OCASIONAL</p> <p><b>C</b> PERNO SISTEMATICO. (1.2x1.2 m) CON MALLA ELECTROBOLDADA O SOTOCHETE 2"</p> <p><b>D</b> SOTOCHETE 2" = PERNOS SISTEMATICOS ESPACIADOS 1.20m X 1.20m.</p> <p><b>E</b> SOTOCHETE 2" CON FIBRA MULT. MALLA + PERNOS SISTEMATICOS ESPACIADOS 1.00m X 1.00m.</p> <p><b>F</b> CIMBRAS METALICAS O CUADROS DE MADERA ESPACIADOS DE. 1.20m - 1.50m.</p> <p>ESTRUCTURA</p>	CONDICION SUPERFICIAL			
 <p><b>FRACTURADA (F)</b> MUY BIEN TRABADA, NO DISTURBADA BLOQUES CUBICOS FORMADOS POR TRES SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES ORTOGONALES. (RQD 50 - 75) (10 A 12 FRACT. POR METRO)</p>	BUENA (MUY RESISTENTE, LEVEMENTE ALTERADA) (B) DISCONTINUIDADES RUGOSAS, LEVEMENTE ALTERADAS. MANCHAS DE OXIDACION LEGERAMENTE ABIERTAS. (Rc 100 - 200 MPa) (SE ROMPE CON VARIOS GOLPES DE PICOTA)	REGULAR (RESISTENTE, LEVEMENTE ALTERADA) (R) DISCONTINUIDADES LISAS, MODERADAMENTE ALTERADA. LEGERAMENTE ABIERTAS (Rc 80 A 100 MPa) (Rc 50 A 100 MPa) (SE ROMPE CON DOS A TRES GOLPES DE PICOTA)	MALA (MODER. RESIST. LEVE A MODER. ALTER.) (M) SUPERFICIES PULIDAS O CON ESTRACIONES, MUY ALTERADAS RELLENO COMPACTO O CON FRAGMENTOS DE ROCA (Rc 25 A 50 MPa) (SE ROMPE CON UN GOLPE DE PICOTA O INCIERTA SUPERFICIALMENTE)	MUY MALA (BLANDA, MUY ALTERADA) (MM) SUPERFICIE PULIDA Y CON ESTRACIONES, MUY ABIERTAS CON RELLENO DE ARCILLAS BLANDAS. (Rc < 25 MPa) (SE DISGREGA O INCIERTA PROFUNDAMENTE)
 <p><b>MUY FRACTURADA (MF)</b> MODERADAMENTE TRABADA, PARCIAL- MENTE DISTURBADA, BLOQUES ANGULO- SOS FORMADOS POR CUATRO O MAS SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES (RQD 25 - 50) (12 A 20 FRACT. POR METRO)</p>	F/B	F/R	F/M	
 <p><b>INTENSAMENTE FRACTURADA (IF)</b> PLEGAMIENTO Y FALLAMIENTO, MUCHAS DISCONTINUIDADES INTERDEP- TADAS FORMANDO BLOQUES ANGULOSOS O IRREGULARES (RQD 0 - 25) (MAS DE 20 FRACT. POR METRO)</p>	MF/B	MF/R	MF/M	MF/MM
 <p><b>TRITURADA O RELLENO (T)</b> LEGERAMENTE TRABADA, MASA ROCOSA EXTREMADAMENTE ROTA CON UNA MEZCLA DE FRAGMENTOS FACILMENTE DISCREGABLES, ANGULOSOS Y REDONDEADOS. (SIN RQD)</p>	IF/B	IF/R	IF/M	IF/MM
	T/B	T/R	T/M	T/MM

Fuente: Departamento de Geomecánica CM Horizonte

## Figura 10

### Cartilla Geomecánica CM Horizonte - 2

#### Metodología de aplicación

El desprendimiento de roca se evita colocando el soporte adecuado en el momento oportuno

##### Aplicación sin factores influyentes

Para la aplicación de esta tabla se determina in situ una vez lavadas las paredes y el techo de la labor a mapear, la cantidad de fracturas por metro lineal utilizando un flexómetro (parámetros de estructuras) y la resistencia de la roca definida por la cantidad de golpes de picota con las que se rompe o se indenta la roca, o la condición de las fracturas (abertura, relleno y alteración) (parámetros de condiciones).

Cada recuadro de calidad de roca presenta algunas subdivisiones aplicándose el sostenimiento designado en el recuadro superior cuando no se presentan factores influyentes, los mismos que son descritos en el párrafo siguiente.

##### Correcciones por factores influyentes

La presencia de agua, orientaciones desfavorables de las discontinuidades, ocurrencia de esfuerzos (encampane mayor de 800m, labores cercanas o presencia y cercanía a fallas) y demoras en la colocación de soporte que afecten a un determinado tipo de roca en una labor, originara que el soporte asignado por su condición al momento de la excavación requiera ser reforzado, para lo cual se deberá colocar el siguiente soporte, tanto en elementos de soporte como en tiempos de colocación, debiendo considerarse una sola corrección.

Ejemplo. - Rampa de 3.0x3.0m muy fracturada pobre (MF/P), el soporte sin factores influyentes correspondería a pernos de 1.2x1.2m, con malla de refuerzo o cinta ocasional (soporte tipo C) y el tiempo de colocación a 15 días. Con presencia de agua, orientación desfavorable de discontinuidades, aberturas cercanas o influencia de esfuerzos se deberá colocar soporte tipo D y su tiempo de colocación será de 5 días.

##### Medidas preventivas y de control

- La primera medida preventiva es el uso de "voladura controlada" en especial en las bóvedas, para lo cual, se deberá disminuir el espaciamiento de taladros a 0.5m y distribuir mejor su carga, así mismo, evitar concentraciones de vibraciones que originen micro fracturas en paredes, techo y frente de la labor.
- Ejecución de mapeo geomecánico de inmediato y colocación del soporte de acuerdo al tipo y tiempo recomendado en la tabla.
- Revisar y cumplir en forma estricta con el manual de procedimientos de colocación de los diferentes elementos de soporte que se apliquen.
- Efectuar periódicamente ensayos de arranque en los pernos colocados, limpieza y reparación de mallas rellenas con fragmentos, reemplazar los pernos mal colocados o sueltos y los tramos con shotcrete deteriorado.
- Capacitación permanente del personal de operaciones (Jefes de Guardia, Capataces, perforistas y ayudantes) en la aplicación de la tabla y colocación de sostenimiento.
- Compromiso de la Gerencia General y de Operaciones con la aplicación correcta y oportuna de esta actividad.

##### Formas de colocación terminantemente prohibidas

- Iniciar la colocación de soporte sin haber desatado correctamente o asegurado el techo.
- Perforar para pernos y no colocarlos inmediatamente después de perforar el taladro
- Colocar pernos en las fracturas o muy inclinados o en zonas en que la picota se hunde profundamente, o en labores con anchos menores de 2.0 m
- Colocar el shotcrete sobre malla rellena de fragmentos de roca.
- Colocar shotcrete a una distancia mayor de 1.5 m, o con la superficie no limpiada con agua a presión (entre 3 y 5 bares).
- Colocar las cimbras sin apoyo en el piso, no verticales y sin asegurar, previo techo asegurado, o varias cimbras a la vez.
- Reemplazar el uso de elementos de madera (cuadros, puntales, etc.), por soporte flexible, sin tener el conocimiento y la experiencia suficiente.

Fuente: Departamento de Geomecánica CM Horizonte

#### **3.1.3.4.1. *Determinación del rango de fracturamiento***

Se observó la presencia de aproximadamente 15 fracturas por metro lineal, lo que evidencia un macizo muy fracturado, con bloques de reducido tamaño y sin continuidad estructural significativa. Esta característica condiciona la clasificación de la roca como Muy Fracturada (MF).

#### **3.1.3.4.2. *Condiciones superficiales de las discontinuidades***

Al ser sometida a golpes con la picota, la roca presenta fracturamiento inmediato desde los primeros impactos, reflejando una baja cohesión y resistencia del macizo. En consecuencia, la calidad de las discontinuidades se considera Mala (M), confirmando el bajo grado de competencia del macizo rocoso.

#### **3.1.3.4.3. *Estimación del valor de GSI***

Se determinó que la Roca presente en el Crucero 2745 de la Zona Balcón, se determinó que posee una Calidad **Muy Fracturada – Mala MF/M**.

#### **3.1.4. *Recomendaciones de sostenimiento***

Para la labor de sección  $3.5 \times 3.5$  m se estableció la aplicación de shotcrete de 2” reforzado con fibra metálica, con la opción de adicionar 1” según la evaluación geomecánica. El sostenimiento se complementa con pernos Swellex de 7 pies, dispuestos en malla cuadrada de  $1.2 \times 1.2$  m, garantizando el confinamiento del macizo. No se requiere el uso de cimbras ni malla metálica, ya que el esquema adoptado cubre adecuadamente las condiciones de estabilidad del crucero, el plano referencial se encuentra en los anexos.

#### **3.2. *Voladura empleada en el Crucero 2745 de la Zona Balcón***

La ejecución de la voladura en el Crucero 2745 de la Zona Balcón se realizó bajo un procedimiento técnico estandarizado que permitió garantizar la fragmentación controlada y minimizar la sobreexcavación. Para ello se emplearon explosivos encartuchados y sistemas de

iniciación no eléctricos, definidos de acuerdo con las condiciones geomecánicas presentes en el macizo rocoso. En este apartado se describen los accesorios utilizados, el diseño de la malla de perforación y la presentación final de la malla de operación, como parte del proceso aplicado en campo.

### **3.2.1. Accesorios y elementos para la voladura**

En el crucero se emplearon accesorios específicos que aseguran la correcta iniciación y el confinamiento de la energía. Se detallan los explosivos encartuchados, cebos, detonadores no eléctricos, cordón detonante y el material de taponamiento, los cuales fueron seleccionados por su compatibilidad con el diámetro de perforación y la necesidad de controlar la energía liberada en cada disparo.

**Tabla 19**

*Uso de explosivos en la voladura del Crucero 2745 de la Zona Balcón*

<b>Parámetro</b>	<b>Detalle</b>
<b>Explosivo principal</b>	Emulsión encartuchada EMULNOR 1000 (7/8" × 7")
<b>Tipo de carga</b>	Cartuchos desacoplados
<b>Densidad</b>	1.13 g/cm <sup>3</sup>
<b>Velocidad de detonación</b>	5 800 m/s
<b>Sensibilidad</b>	Fulminante N°8, compatible con Nonel
<b>Presentación</b>	Cartucho de 22.2 mm de diámetro × 178 mm de longitud
<b>Sistema de iniciación</b>	Detonadores no eléctricos (Nonel) con retardos milisegundo

Fuente: Elaboración Propia

### **3.2.2. Diseño de la malla de perforación**

El diseño de la malla en el Crucero 2745 se estableció considerando la calidad geomecánica del macizo, el diámetro de perforación de 45 mm y el uso de cartuchos desacoplados. Se definen los parámetros de burden, espaciamento, profundidad y factor de potencia, así como la secuencia de retardos que permiten direccionar la rotura y obtener una fragmentación uniforme.

El diseño de una malla de perforación requiere establecer parámetros que se relacionan entre sí y que determinan la eficiencia del arranque. El primer paso es calcular el diámetro equivalente del vacío, ya que este valor gobierna directamente los burdens, espaciamientos, retacados y tacos de la cuña quemada. A partir de este parámetro se definen las condiciones iniciales de liberación de esfuerzos, lo que permite calcular posteriormente los valores de auxiliares, piso y contorno. Finalmente, la incorporación de la secuencia de retardos asegura que la voladura se ejecute de manera progresiva y controlada. De esta forma, cada cálculo no es aislado, sino parte de un procedimiento integral que busca lograr un avance eficiente, con buena fragmentación y control del perfil de la labor.

### **3.2.2.1. Determinación del diámetro equivalente del vacío**

Para el diseño del corte quemado se consideró la presencia de dos taladros vacíos de diámetro 102 mm. El parámetro que gobierna la geometría del arranque es el diámetro equivalente del vacío (DH), calculado con la siguiente expresión:

$$DH = d_H \cdot \sqrt{N}$$

Donde:

$d_H$  = diámetro de cada barreno vacío (mm).

N = número de taladros vacíos.

$$DH = 102 \times \sqrt{2}$$

$$DH = 0.1443m$$

El diámetro equivalente de 144 mm representa un vacío único con la misma capacidad de alivio que los dos barrenos de 102 mm. Este valor es fundamental porque un mayor DH reduce el confinamiento inicial, lo cual es crítico en rocas duras como la granodiorita. Así se asegura que la

cuña pueda abrir con mayor confiabilidad y se evite el fenómeno de bloqueo o “choke” del arranque.

### **3.2.2.2. Profundidad de perforación y avance esperado**

El avance de la labor se determinó considerando la profundidad de perforación  $H$  y la relación con el rendimiento efectivo del disparo. Se aplicó la siguiente fórmula:

$$L = 0.95 \cdot H$$

Donde:

$H$  = longitud perforada (m).

$L$  = avance esperado (m).

$$L = 0.95 \cdot 3.00\text{m}$$

$$L = 2.85\text{m}$$

Por lo tanto, el avance teórico estimado por disparo es de 2.85 m. Sin embargo, los valores obtenidos durante el análisis de los 30 disparos evaluados muestran que el avance real promedio del desarrollo fue de 3.20 m/disparo en el escenario base y 3.70 m/disparo en el escenario optimizado, debido a mejoras en la fragmentación, reducción de sobreexcavación y optimización del diseño de voladura.

### **3.2.2.3. Dimensionamiento geométrico de la cuña**

Con el diámetro equivalente se calcularon los valores de burden ( $B$ ), espaciamento ( $E$ ), retacado ( $R$ ) y taco ( $T$ ) para cada cuadrante de la cuña. Las expresiones generales son:

$$B_i = f_B \cdot DH, \quad E_i = f_E \cdot DH, \quad R_i = f_R \cdot DH, \quad T_i = f_T \cdot DH$$

Donde los factores  $f_B, f_E, f_R, f_T$  dependen del cuadrante considerado.

#### 3.2.2.3.1. *Primer Cuadrante*

$$B_1 = 1.5 \cdot 0.1443 = 0.216 \text{ m}, \quad E_1 = 2.12 \cdot 0.1443 = 0.306 \text{ m}$$

$$R_1 = 1.5 \cdot 0.1443 = 0.216 \text{ m}, \quad T_1 = 1.5 \cdot 0.1443 = 0.216 \text{ m}$$

#### 3.2.2.3.2. *Segundo Cuadrante*

$$B_2 = 2.12 \cdot 0.1443 = 0.306 \text{ m}, \quad E_2 = 4.5 \cdot 0.1443 = 0.649 \text{ m}$$

$$R_2 = 3.8 \cdot 0.1443 = 0.548 \text{ m}, \quad T_2 = 1.06 \cdot 0.1443 = 0.153 \text{ m}$$

#### 3.2.2.3.3. *Tercer Cuadrante*

$$B_3 = 4.5 \cdot 0.1443 = 0.649 \text{ m}, \quad E_3 = 9.54 \cdot 0.1443 = 1.376 \text{ m}$$

$$R_3 = 6.75 \cdot 0.1443 = 0.974 \text{ m}, \quad T_3 = 2.25 \cdot 0.1443 = 0.325 \text{ m}$$

La progresión de estos valores asegura que los anillos iniciales concentren la energía en torno al vacío, facilitando la iniciación, mientras que los anillos externos se benefician del alivio generado. Esto garantiza que el arranque se propague de manera controlada y eficiente, minimizando riesgos de sobrecarga o falla en la cuña.

#### 3.2.2.4. **Burden y espaciamiento de taladros auxiliares y de piso**

El burden de auxiliares y piso se calculó con la fórmula empírica que relaciona las densidades del explosivo y de la roca con el diámetro del cartucho:

$$B = 0.012 \left( \frac{2 \cdot SG_e}{SG_r} + 1.5 \right) De$$

Donde:

$SG_e$  = densidad del explosivo ( $\text{g/cm}^3$ ).

$SG_r$  = densidad de la roca ( $\text{g/cm}^3$ ).

$D_e$  = diámetro del cartucho (mm).

$$B = 0.012 \left( \frac{2 \cdot 1.13}{2.8} + 1.5 \right) 22.225$$

$$B = 0.012 (0.807 + 1.5) 22.225 = 0.012 \cdot 2.307 \cdot 22.225 = 0.615 \text{ m}$$

$$S = 1.1 \cdot B = 0.677 \text{ m.}$$

$$T_{aux} = 0.5 \cdot B = 0.308 \text{ m}$$

$$T_{piso} = 0.2 \cdot B = 0.123 \text{ m}$$

Los valores obtenidos muestran que la malla trabaja con espaciamientos de  $\sim 0.68$  m, lo que asegura solapamiento suficiente de cráteres. Los tacos diferenciados responden a la función de cada taladro: los auxiliares requieren mayor confinamiento para transmitir la energía, mientras que en el piso se necesita un taco más corto para evitar la formación de talones.

### 3.2.2.5. Parámetros de contorno

El espaciamiento de recorte se fijó en 0.55 m, con burden estimado como 1.3 veces el espaciamiento:

$$B_{cont} = 1.3 \cdot S_{rec} = 1.3 \cdot 0.55 = 0.72 \text{ m}$$

El taco en este caso se asume equivalente al burden:

$$T_{cont} \approx B_{cont} = 0.72 \text{ m}$$

El espaciamiento de 0.55 m es adecuado para mantener la sección de  $3.5 \times 3.5$  m dentro de tolerancias aceptables. El efecto de desacople entre la broca de 45 mm y el cartucho de 22.2 mm (relación 0.49) reduce la energía lineal en el perímetro, controlando el daño al macizo remanente y limitando la sobreexcavación.

### **3.2.3. *Presentación de la malla de operación***

La malla se presenta en el siguiente plano. Los parámetros fueron cálculos sin embargo a nivel de practicidad estos fueron ubicados redondeando valores así como también por tema de experiencia y practicidad en las operaciones. Este formato permitió al personal de campo ejecutar la voladura con precisión y dejar un registro técnico para el análisis posterior del consumo de explosivo, el control de sobreexcavación y la evaluación de la fragmentación alcanzada, el plano de la malla se encuentra en los anexos.

## **3.3. *Análisis de datos aplicado consumo de explosivos***

### **3.3.1. *Escenario base de estudio***

El proceso de voladura de precorte constituye una técnica especializada dentro de las operaciones de perforación y voladura, cuyo propósito principal es garantizar que el avance de la labor subterránea respete las dimensiones de diseño y preserve la estabilidad de los hastiales y la corona. Para lograr este objetivo, resulta fundamental el diseño de una malla de perforación adaptada a las condiciones del macizo rocoso, así como la correcta selección del explosivo y de los parámetros de carguío.

En el caso del crucero 2745 de la zona Balcón, el macizo rocoso presenta una clasificación geomecánica de RMR entre 21 y 30, correspondiente a una calidad Mala – B, con presencia de fracturas, debilidades estructurales y baja resistencia a compresión. Estas condiciones geológicas incrementan el riesgo de sobrerotura durante la excavación, por lo que la aplicación del método de precorte resulta indispensable. En este contexto, la malla de perforación se diseñó con taladros de diámetro de 45 mm para el arranque y de 102 mm para los de alivio, con una sección de labor de 3.5 × 3.5 metros, y un patrón de taladros que combina el arranque central con el contorno perimetral.

La disposición de los taladros en la malla de precorte se basa en la colocación de taladros perimetrales cargados con cartuchos de EMULNOR 1000 7/8" × 7" (T) desacoplados, con espaciamiento de aproximadamente 0.50 a 0.55 metros entre cartuchos y tacos inertes controlados. Este diseño busca limitar la energía transmitida a la roca, favoreciendo la generación de un plano de fractura limpio y reduciendo la sobreexcavación. La correcta ejecución de esta malla permite evaluar con precisión la relación entre consumo de explosivos, sobrerotura y productividad, lo que constituye la base del análisis de datos planteado en esta investigación.

Con el fin de estructurar el estudio, se establecieron dos escenarios operativos diferenciados. El Escenario 1 corresponde a la condición base de la operación, en la cual se ejecuta un disparo diario, con una profundidad de perforación promedio de 3.0 m y un avance efectivo aproximado de 3.2 m por disparo, considerando las condiciones reales de fragmentación, limpieza y escalado. Este escenario constituye la línea base del análisis, permitiendo evaluar una secuencia de treinta días de operación continua, cuyos resultados fueron registrados, sistematizados y procesados mediante herramientas de análisis de datos.

Posteriormente, a partir de los hallazgos obtenidos mediante técnicas de Data Analytics, se definió un Escenario 2 optimizado, en el cual se implementan ajustes en los parámetros operativos de la voladura, tales como la longitud del taco inerte, el espaciamiento de los cartuchos explosivos y el control del consumo específico de explosivos. Estas modificaciones permitieron mejorar la eficiencia del proceso de voladura y el control del contorno de excavación, logrando incrementar el avance promedio hasta aproximadamente 3.7 m por disparo, sin comprometer la estabilidad del macizo rocoso ni la calidad geométrica de la excavación.

De este modo, el escenario base no solo representa las condiciones iniciales de la operación, sino que también establece el punto de comparación frente a un segundo escenario optimizado. La

contrastación de ambos permite determinar en qué medida la aplicación del análisis de datos contribuye a mejorar el control de la sobreexcavación y mejorar el consumo de explosivos en macizos rocosos de baja calidad, como los presentes en el crucero 2745 de la Unidad Minera Parcoy.

### **3.3.1.1. Definición del escenario de trabajo**

El escenario de trabajo considerado como base para la investigación corresponde a la ejecución de la voladura de precorte en el crucero 2745 de la zona Balcón, bajo la condición de realizar un solo disparo por día con un avance promedio de 3.0 metros por disparo. Esta configuración se definió como el Escenario 1 y constituye la línea base del análisis, pues permite obtener un conjunto de datos continuos y comparables a lo largo de treinta jornadas de operación.

La elección de un avance de 3.0 metros responde a criterios tanto operativos como geomecánicos. En primer lugar, se trata de un avance que asegura un ciclo de perforación, carguío y disparo controlado, evitando la acumulación excesiva de material en el frente y reduciendo los riesgos asociados a la sobreexcavación en macizos de calidad geomecánica baja (RMR 21–30). En segundo lugar, el avance de 3.0 metros permite un mayor número de ciclos de voladura en un mismo tramo, lo que incrementa la cantidad de datos disponibles para el análisis, fortaleciendo la aplicación de herramientas de Data Analytics y facilitando la identificación de patrones y tendencias en el consumo de explosivos y el control de la sobreexcavación.

De esta manera, el escenario base se define como un ciclo de trabajo diario, con un avance unitario constante, parámetros de perforación y carguío estandarizados, y registro exhaustivo de las variables operativas y de control geomecánico. Este planteamiento constituye la base para evaluar posteriormente la transición hacia un segundo escenario optimizado, donde se implementan ajustes derivados del análisis de datos.

### 3.3.1.2. Condiciones iniciales del crucero de análisis

El crucero 2745 de la zona Balcón se caracteriza por una longitud total de 150 metros, siendo una labor subterránea destinada al desarrollo de accesos y preparación de áreas de explotación. Su sección transversal es de  $3.5 \times 3.5$  metros, lo que representa un área de  $12.25 \text{ m}^2$ . Esta geometría se mantuvo constante a lo largo de todo el tramo, permitiendo homogenizar los cálculos de volumen y tonelaje en función del avance logrado en cada disparo.

Desde el punto de vista geomecánico, el macizo rocoso de la zona presenta una clasificación RMR en el rango de 21–30, lo que corresponde a una calidad de roca catalogada como “Mala – B”. Esta condición implica un comportamiento inestable, con presencia de fracturas y debilidades estructurales que condicionan el diseño de la voladura. La baja resistencia del macizo incrementa la susceptibilidad a la sobrerotura, razón por la cual se requiere un diseño de precorte con cargas desacopladas, tacos inertes adecuados y espaciamiento controlado entre cartuchos, a fin de garantizar que la excavación se ajuste a la sección teórica y no se comprometa la estabilidad de los hastiales y la corona.

En cuanto al ciclo operativo, se estableció un ritmo de un disparo diario, lo que permite compatibilizar la etapa de perforación, carguío, voladura, ventilación, limpieza y sostenimiento. Este esquema operativo asegura la recolección de información homogénea por día, posibilitando el análisis de tendencias y la aplicación de correlaciones estadísticas entre variables como consumo de explosivo, sobreexcavación, fragmentación y tiempos de limpieza.

Por lo tanto, las condiciones iniciales del crucero de análisis se caracterizan por: una longitud de 150 metros, sección transversal de  $12.25 \text{ m}^2$ , avance unitario de 3.0 metros por disparo, macizo rocoso de calidad deficiente (RMR 21–30) y un esquema de un disparo por día. Estas condiciones fueron asumidas como referencia para la construcción del escenario base.

### **3.3.1.3. Características del explosivo seleccionado para precorte**

El explosivo seleccionado para la ejecución del precorte corresponde al EMULNOR 1000 7/8" × 7" (T), producido por FAMESA, donde la abreviatura (T) hace referencia a la presentación encartuchada o tipo tubo del explosivo, utilizada para diferenciarla de otras presentaciones comerciales del mismo producto. Esta elección se realizó tras el análisis comparativo con el explosivo previamente utilizado, el EXSABLOCK de EXSA, cuya comercialización se ha discontinuado. En ese contexto, el EMULNOR 1000 constituye la alternativa más cercana en términos de diámetro, longitud y presentación física, lo que permite mantener la compatibilidad con taladros de 45 mm y asegurar la continuidad de los parámetros de diseño aplicados en la voladura de precorte.

El EMULNOR 1000 es un explosivo de tipo emulsión encartuchada, con densidad aproximada de 1.13 g/cc y una velocidad de detonación confinada cercana a los 5,800 m/s. Su potencia relativa es superior a la del EXSABLOCK, lo que obliga a aplicar estrategias de control específicas en el carguío: incremento de la longitud de taco inerte, mayor espaciamiento entre cartuchos y disposición discontinua de la columna explosiva en los taladros de contorno. Estos ajustes permiten mantener el factor de potencia dentro del rango óptimo de 0.66–0.70 kg/t, evitando incrementos innecesarios en la sobreexcavación.

La presentación en cartuchos de 7/8" × 7" asegura una adecuada relación de desacople entre el diámetro del explosivo (22.2 mm) y el del taladro de perforación (45 mm), alcanzando un factor de desacople cercano a 2.0, condición esencial para el control de energía en voladuras de precorte. Asimismo, el explosivo cuenta con sensibilidad a fulminante N°8 y compatibilidad con sistemas de iniciación no eléctricos, lo que facilita su aplicación en secuencias de retardo diseñadas para reducir la concentración de energía en el perímetro.

En conclusión, la selección del EMULNOR 1000 7/8" × 7" (T) se justifica por su similitud geométrica con el explosivo previo, su disponibilidad en el mercado nacional y su capacidad de ser adaptado mediante ajustes en la metodología de carguío, garantizando un desempeño controlado en labores de precorte en macizos de baja calidad geomecánica.

### **3.3.2. *Recolección de información***

El análisis de datos en voladura de precorte requiere la definición clara de las variables que serán objeto de medición, así como la metodología de registro que permita asegurar la consistencia de los resultados. En este estudio, la recolección de información se realizó considerando tanto las variables fijas de diseño, que permanecen constantes a lo largo de la campaña de voladura, como las variables dinámicas, que se registran diariamente en cada disparo. Esta estructura garantiza que los cálculos posteriores de volumen, tonelaje, consumo de explosivos y sobrerotura puedan ser interpretados de manera confiable.

#### **3.3.2.1. Variables fijas de diseño**

Las variables fijas de diseño corresponden a aquellos parámetros establecidos desde el inicio de la operación y que no presentan cambios entre los diferentes días de trabajo. Estas variables se relacionan con la geometría de la labor, la malla de perforación y las características del explosivo empleado. Entre ellas se consideran:

- **Sección transversal de la labor:** 3.5 × 3.5 metros, equivalente a un área de 12.25 m<sup>2</sup>.
- **Longitud total del crucero:** 150 metros, correspondiente al tramo de avance programado en la zona Balcón.
- **Diámetro de perforación:** 45 mm para los taladros de arranque y contorno, y 102 mm para los taladros de alivio.

- **Explosivo empleado para el precorte:** EMULNOR 1000 7/8" × 7" (T), en cartuchos desacoplados.
- **Factor de desacople:** cercano a 2.0, resultado de la relación entre el diámetro del cartucho (22.2 mm) y el diámetro del taladro (45 mm).
- **Secuencia de disparo:** iniciación no eléctrica con retardos milisegundo, empleando Pentacord Exsanel como transmisor.
- **Avance proyectado por disparo:** 3.0 metros en el Escenario 1 y 3.7 metros en el Escenario 2.

Estas variables definen las condiciones de diseño y permiten asegurar que las comparaciones entre escenarios se realicen bajo un marco homogéneo.

### 3.3.2.2. Variables registradas diariamente

Las variables dinámicas son aquellas que se registran en cada disparo y que reflejan la variabilidad propia de la operación. Estas variables permiten aplicar técnicas de análisis de datos para identificar patrones, correlaciones y causas de desviación respecto al diseño. Entre las más relevantes se encuentran:

- **Avance real (m):** medido tras cada disparo, permite determinar el progreso acumulado.
- **Volumen excavado (m<sup>3</sup>):** calculado como el producto de la sección transversal y el avance real.
- **Tonelaje (t):** obtenido multiplicando el volumen por la densidad del macizo (2.7 t/m<sup>3</sup>).
- **Número de taladros perforados y cargados:** diferenciando entre taladros de contorno, alivio y arranque.
- **Burden y espaciamentos reales (m):** medidos en campo, comparados con el diseño teórico.

- **Longitud de taco inerte (m):** controlada en taladros de contorno para evaluar su efecto en la sobrerotura.
- **Consumo de explosivo (kg):** verificado en los vales de consumo diario, discriminando por cartuchos utilizados.
- **Tiempos operativos (min):** perforación, carguío, limpieza, escalado y ventilación.
- **Fragmentación (P80 en cm):** estimación del tamaño predominante del material.
- **Número de bolones (>40 cm):** conteo de bloques sobredimensionados.
- **Porcentaje de sobrerotura (%):** diferencia entre el área excavada real y el área de diseño, expresada en porcentaje.
- **Condiciones geomecánicas observadas:** clasificación RMR/Q en el frente y presencia de estructuras activas.

Estas variables constituyen la base para los cálculos de factores de carga, potencia y consumo específico, así como para la evaluación de la calidad del contorno.

### **3.3.2.3.Registro de los datos diarios durante el periodo de estudio**

Durante los 30 días de operación considerados en el Escenario 1, se implementó un registro sistemático de la información en formato de planilla digital, complementado con verificaciones en campo. Cada jornada se documentó el avance real, el consumo de explosivo, los parámetros de perforación y carguío, así como los indicadores de sobreexcavación y fragmentación. El registro fue diseñado de tal manera que permitiera diferenciar las variables fijas de las dinámicas, asegurando que las primeras se mantuvieran constantes y que las segundas reflejaran la variabilidad natural de la operación.

La información recolectada se consolidó en una base de datos estructurada en Excel, con filas correspondientes a los días de operación y columnas a cada variable medida. Esta base de

datos fue posteriormente exportada a entornos de análisis en Python (Google Colab), donde se realizaron los cálculos automatizados de factores e indicadores. La estructura de la base incluyó además la identificación de outliers y eventos atípicos, como disparos con consumos de explosivo fuera del rango normal o incrementos abruptos en el porcentaje de sobrerotura.

De esta manera, el registro diario durante el periodo de estudio permitió disponer de un conjunto de datos robusto y confiable, adecuado para la aplicación de técnicas de Data Analytics y para la comparación de escenarios en el marco del presente trabajo de investigación.

### **3.3.3. *Procesamiento de datos***

El procesamiento de datos constituye una fase esencial dentro del análisis, ya que permite transformar la información recolectada diariamente en indicadores cuantitativos capaces de reflejar el desempeño real de la voladura de precorte. A partir de los registros obtenidos durante los 30 días de operación en el Escenario 1, se efectuaron cálculos de volumen, tonelaje, factores operativos, sobrerotura, fragmentación y productividad acumulada. Estos cálculos constituyen la base para evaluar la eficiencia de la operación y la correspondencia entre el diseño teórico y los resultados alcanzados en campo.

#### **3.3.3.1. Cálculo de volumen y tonelaje por disparo**

El primer paso en el procesamiento de datos consistió en determinar el volumen de material excavado en cada disparo, a partir del producto entre el avance real registrado y la sección transversal teórica de la labor ( $3.5 \times 3.5 \text{ m} = 12.25 \text{ m}^2$ ). Para cada jornada se aplicó la relación:

$$\text{Volumen (m}^3\text{)} = \text{Avance real (m)} \times 12.25 \text{ (m}^2\text{)}$$

Posteriormente, el volumen fue convertido en tonelaje utilizando una densidad promedio de  $2.7 \text{ t/m}^3$ , valor correspondiente al macizo rocoso de la zona Balcón:

$$\text{Tonelaje (t)} = \text{Volumen (m}^3\text{)} \times 2.7 \text{ (t/m}^3\text{)}$$

De esta manera, para un avance promedio de 3.0 metros por disparo, se obtuvo un volumen aproximado de 36.75 m<sup>3</sup> y un tonelaje de 99.23 t por ciclo de voladura. Este procedimiento permitió homogenizar los resultados de cada día y establecer un punto de partida para la evaluación de los factores de consumo de explosivos.

### 3.3.3.2. Cálculo de factores operativos

Una vez determinado el tonelaje, se procedió a calcular los factores operativos que permiten evaluar la eficiencia del consumo de explosivos en cada disparo:

- **Factor de carga (kg/m<sup>3</sup>):** expresa la cantidad de explosivo empleada por unidad de volumen excavado. Se obtiene dividiendo los kilogramos de explosivo consumidos entre el volumen real.

$$\text{Factor de carga} = \frac{\text{Kg de explosivo}}{\text{Volumen (m}^3\text{)}}$$

- **Factor de potencia (kg/t):** representa la cantidad de explosivo consumida por tonelada de material extraído. Se calcula dividiendo los kilogramos de explosivo entre el tonelaje obtenido.

$$\text{Factor de potencia} = \frac{\text{Kg de explosivo}}{\text{Tonelaje (t)}}$$

- **Consumo lineal (kg/m):** corresponde a la relación entre la cantidad de explosivo y el avance alcanzado en cada disparo.

$$\text{Consumo lineal} = \frac{\text{Kg de explosivo}}{\text{Avance real (m)}}$$

Estos indicadores fueron evaluados día a día, generando un rango de variabilidad que permitió identificar disparos dentro del comportamiento esperado y disparos con consumos atípicos, los cuales suelen estar asociados a problemas de perforación, carguío o condiciones geomecánicas adversas.

### **3.3.3.3. Estimación de sobreexcavación y fragmentación**

La sobreexcavación fue estimada a partir de la comparación entre el área real excavada en el frente y el área de diseño. Para ello se empleó la siguiente relación:

$$\% \text{ Sobrerotura} = \frac{\text{Área real} - \text{Área teórica}}{\text{Área teórica}} \times 100$$

El área real se determinó mediante levantamientos de campo realizados en el contorno de la labor, registrando las desviaciones en hastiales y corona. Este indicador es crítico para evaluar la calidad de la voladura de precorte, ya que un valor elevado refleja un exceso en la transmisión de energía a la roca, lo que compromete la estabilidad de la excavación y eleva los costos de sostenimiento.

En cuanto a la fragmentación, se utilizó como indicador el P80, definido como el tamaño de partícula que corresponde al 80% del material volado. Este parámetro fue estimado mediante observación directa y análisis fotográfico de los fragmentos resultantes en cada disparo. Asimismo, se realizó un conteo de bolones mayores a 40 cm, los cuales representan material fuera de especificación que demanda mayor tiempo de manipulación y acarreo.

### **3.3.3.4. Productividad y avance acumulado**

La productividad se evaluó considerando el avance diario alcanzado y el tiempo total del ciclo operativo (perforación, carguío, disparo, ventilación, limpieza y sostenimiento). Este análisis

permitió identificar la eficiencia de la operación en términos de metros avanzados por jornada, así como los cuellos de botella asociados a tiempos excesivos de limpieza o escalado.

El avance acumulado fue determinado como la sumatoria de los avances diarios durante los 30 días del Escenario 1, alcanzando la longitud total de 150 metros del crucero. Este parámetro es fundamental para evaluar la coherencia entre el plan de trabajo y la ejecución real, y sirve como referencia para proyectar la mejora esperada en el Escenario 2.

La combinación de productividad, factores de consumo y control de la sobrerotura constituye la base para el análisis comparativo de escenarios, permitiendo identificar oportunidades de mejora en el proceso de voladura de precorte mediante la aplicación de técnicas de Data Analytics.

#### **3.3.4. *Análisis de datos mediante Data Analytics***

Esta sección describe el enfoque analítico que se aplicará sobre el registro de treinta días del escenario base y sobre los datos que se generen tras los ajustes operativos. El propósito es transformar mediciones de campo en información útil para la toma de decisiones sobre el consumo de explosivos y el control de la sobreexcavación en el crucero analizado. El trabajo se organizará en etapas encadenadas que van desde la definición del objetivo hasta la emisión de conclusiones operativas, de modo que cada etapa alimente a la siguiente con insumos consistentes y trazables.

##### **3.3.4.1. Definición del objetivo del análisis**

Se establecerá con precisión qué preguntas debe responder el estudio y qué métricas permitirán verificar su cumplimiento. Se fijarán metas cuantitativas para consumo específico de explosivos y para la sobreexcavación, y se delimitará el alcance temporal y espacial del análisis. Con ello se aseguran criterios claros para evaluar el desempeño del escenario base y para justificar la transición a un escenario optimizado.

En esta etapa se establecen con precisión las preguntas que el estudio debe responder y las métricas con las que se verificará su cumplimiento. El objetivo rector es mejorar el proceso de voladura de precorte mediante la aplicación de técnicas de análisis de datos en el consumo de explosivos y reducir la sobreexcavación en el crucero 2745, Zona Balcón, Parcoy.

#### **3.3.4.1.1. Preguntas guía**

- ¿Cuál es el nivel real de consumo específico de energía explosiva y su variabilidad en el periodo base?
- ¿Qué relación existe entre el consumo específico y la sobreexcavación del contorno?
- ¿Qué parámetros operativos influyen con mayor peso en la sobreexcavación y cómo deben ajustarse?
- ¿Qué reducción de sobreexcavación y qué estabilidad de consumo pueden lograrse al pasar a un escenario optimizado?

#### **3.3.4.1.2. Métricas de verificación**

- Consumo de explosivos: kg por disparo, kg por metro, kg por metro cúbico, kg por tonelada.
- Control de contorno: porcentaje de sobreexcavación respecto de la sección teórica  $3.5 \times 3.5$  m.
- Apoyo al diagnóstico: burden real, espaciamiento real, longitud de taco inerte, fragmentación P80, número de bolones, tiempos de limpieza y escalado.

#### **3.3.4.1.3. Metas cuantitativas**

- Mantener el consumo específico dentro de rangos compatibles con un precorte controlado, con especial seguimiento del factor de potencia kg por tonelada y de la carga lineal kg por metro.

- Reducir el porcentaje de sobreexcavación frente a los niveles observados en el escenario base y estabilizar su variabilidad.
- Mejorar la consistencia operativa, evidenciada por la disminución de la dispersión en los indicadores clave y por el acoplamiento entre consumo y resultado de contorno.

#### **3.3.4.1.4. Alcance temporal y espacial**

- Temporal: serie de treinta disparos consecutivos del escenario base y subsecuente contraste con el escenario optimizado.
- Espacial: sección  $3.5 \times 3.5$  m del crucero 2745, con foco en el anillo de contorno y su respuesta a los parámetros de carga y perforación.

Con este marco se fijan criterios claros para evaluar el desempeño del escenario base y justificar técnicamente la transición a un escenario optimizado, garantizando coherencia entre objetivo, métricas y decisiones operativas.

#### **3.3.4.2. Recolección y organización de los datos**

Se consolidará en una sola base la información diaria registrada en campo, cuidando la consistencia de nombres, unidades y códigos. Se documentará el linaje de cada dato desde su captura hasta su incorporación a la base, y se definirán diccionarios de variables y calendarios de referencia. El resultado será un conjunto ordenado y listo para su tratamiento en herramientas analíticas.

Se consolidará en una sola base la información diaria registrada en campo, cuidando la consistencia de nombres, unidades y códigos. El resultado será un conjunto ordenado y listo para su tratamiento en herramientas analíticas.

##### **3.3.4.2.1. Estructura de la base**

- Identificación del disparo: fecha, día de campaña, frente.

- Variables fijas de diseño: sección de la labor, diámetros de perforación, tipo de explosivo de precorte, criterios de iniciación.
- Variables dinámicas: avance real, consumo de explosivo, burden real, espaciamiento real, taco inerte, P80, número de bolones, porcentaje de sobreexcavación, tiempos de limpieza y escalado.
- Variables derivadas para análisis: volumen, tonelaje, factor de carga kg por metro cúbico, factor de potencia kg por tonelada, consumo lineal kg por metro, banderas de calidad y de atípicos.

#### **3.3.4.2.2. *Consistencia de nombres, unidades y códigos***

- Normalización de encabezados con una convención única y diccionario de variables que especifique definición, unidad, rango de plausibilidad y regla de cálculo cuando aplique.
- Homogeneización de unidades a metros, metros cúbicos, toneladas, kilogramos por metro, kilogramos por metro cúbico y kilogramos por tonelada.
- Codificación clara de faltantes y valores no aplicables para evitar ambigüedades en el procesamiento.

#### **3.3.4.2.3. *Linaje del dato y trazabilidad***

- Registro del origen de cada medición desde su captura en campo hasta su incorporación a la base consolidada, incluyendo responsables, instrumentos y soportes de verificación.
- Vinculación de consumos con vales de explosivo y de sobreexcavación con croquis y mediciones de contorno.
- Bitácora de transformaciones que documente conversiones de unidades, cálculos derivados, imputaciones y depuraciones.

#### **3.3.4.2.4. *Calendarios y referencias***

- Calendario de trabajo que permita agrupar por día, semana y fase operativa, y que habilite comparaciones consistentes entre periodos.
- Referencias espaciales del frente para análisis por zona y para imputaciones condicionadas al frente cuando sea necesario.

#### **3.3.4.2.5. *Resultado esperado***

- Un conjunto de datos único, limpio y documentado, con columnas estandarizadas, unidades consistentes, variables derivadas calculadas y banderas de calidad listas para ser consumidas por los módulos de análisis, visualización y comparación de escenarios. De este modo se garantiza reproducibilidad, auditabilidad y solvencia técnica del análisis posterior.

#### **3.3.4.3. Limpieza y validación de la información**

Se aplicarán controles para detectar y corregir errores de digitación, duplicados y valores fuera de rango. Se verificará la coherencia entre consumos, avances y tiempos, y se distinguirán los atípicos reales de los espurios. La salida de esta etapa es un conjunto depurado que preserva la variabilidad operativa sin arrastrar inconsistencias.

Figura 11

Código 1

```
import pandas as pd, numpy as np, re
import matplotlib.pyplot as plt
from IPython.display import display
RUTA = "datos_balcon.xlsx" # cambia si es necesario
AREA, RHO = 3.5*3.5, 2.7 # m², t/m³
KG_MIN, KG_MAX = 70, 85 # regla de negocio
SOB_UMBRAL = 20.0 # %
df = pd.read_excel(RUTA)
df.columns = (df.columns.str.lower().str.strip()
              .str.replace(r"\s+", "_", regex=True).str.replace("%", "pct"))
alias = {
    "avance_real_m": ["avance_real_m", "avance_m", "avance"],
    "kg_explosivo": ["kg_explosivo", "explosivo_kg", "kg"],
    "sobrerotura_pct": ["sobrerotura_pct", "sobrerotura", "sobrexexcavacion_pct", "sobrexexcavacion"],
    "taco_inerte_m": ["taco_inerte_m", "taco", "taco_inerte"],
    "frente": ["frente", "face", "zona", "sector"],
    "volumen_m3": ["volumen_m3", "volumen"], "tonelaje_t": ["tonelaje_t", "tonelaje"]}
for dst, opts in alias.items():
    for o in opts:
        if o in df.columns: df[dst] = df[o]; break
def to_num(x):
    if pd.isna(x): return np.nan
    if isinstance(x, (int, float, np.number)): return float(x)
    m = re.findall(r"[-+]?[d*\.\.?]+\d+", str(x)); return float(m[0].replace(",",".")) if m else np.nan
for c in ["avance_real_m", "kg_explosivo", "sobrerotura_pct", "taco_inerte_m", "volumen_m3", "tonelaje_t"]:
    if c in df: df[c] = df[c].apply(to_num)
if "volumen_m3" not in df and "avance_real_m" in df: df["volumen_m3"] = df["avance_real_m"]*AREA
if "tonelaje_t" not in df and "volumen_m3" in df: df["tonelaje_t"] = df["volumen_m3"]*RHO
if {"kg_explosivo", "volumen_m3"}.issubset(df): df["factor_carga_kg_m3"] = df["kg_explosivo"]/df["volumen_m3"]
if {"kg_explosivo", "tonelaje_t"}.issubset(df): df["factor_potencia_kg_t"] = df["kg_explosivo"]/df["tonelaje_t"]
if {"kg_explosivo", "avance_real_m"}.issubset(df): df["consumo_lineal_kg_m"] = df["kg_explosivo"]/df["avance_real_m"]
pre = df.copy()
def resumen(x):
    s = x.dropna();
    return pd.Series({"n":s.size, "media":s.mean(), "mediana":s.median(), "std":s.std(),
                    "min":s.min(), "q1":s.quantile(.25), "q3":s.quantile(.75), "max":s.max()})
def iqr_keep(s):
    s2 = s.dropna();
    if s2.empty: return pd.Series(True, index=s.index)
    q1, q3 = s2.quantile(.25), s2.quantile(.75); i = q3-q1; lo, hi = q1-1.5*i, q3+1.5*i
    return (s.between(lo, hi) | s.isna())
metrics = ["kg_explosivo", "sobrerotura_pct", "factor_potencia_kg_t", "factor_carga_kg_m3", "consumo_lineal_kg_m"]
print("=== RESUMEN ANTES ===")
```

Fuente: Elaboración Propia

Figura 12

Código 2

```
display(pre[metrics].apply(resumen).T.round(3))
plt.figure(figsize=(12,4))
plt.subplot(1,3,1); pre["kg_explosivo"].hist(bins=15); plt.title("Kg explosivo (antes)")
plt.subplot(1,3,2); pre["sobrerotura_pct"].hist(bins=15); plt.title("% Sobrerotura (antes)")
plt.subplot(1,3,3)
tmp = pre[["kg_explosivo", "sobrerotura_pct"]].dropna()
plt.scatter(tmp["kg_explosivo"], tmp["sobrerotura_pct"], alpha=.6)
plt.xlabel("kg explosivo"); plt.ylabel("% sobrerotura"); plt.title("Relación (antes)")
plt.tight_layout(); plt.show()
mask = pd.Series(True, index=df.index)
for c in ["avance_real_m", "kg_explosivo", "volumen_m3", "tonelaje_t"]:
    if c in df: mask &= df[c].gt(0) & np.isfinite(df[c])
if "kg_explosivo" in df: mask &= iqr_keep(df["kg_explosivo"]) & (df["kg_explosivo"].between(KG_MIN, KG_MAX) | df["kg_explosivo"].isna())
if "sobrerotura_pct" in df: mask &= iqr_keep(df["sobrerotura_pct"]) & ((df["sobrerotura_pct"] <= SOB_UMBRAL) | df["sobrerotura_pct"].isna())
clean = df[mask].copy()
if "taco_inerte_m" in clean:
    if "frente" in clean: clean["taco_inerte_m"] = clean.groupby("frente")["taco_inerte_m"].transform(lambda s: s.fillna(s.median()))
    else: clean["taco_inerte_m"] = clean["taco_inerte_m"].fillna(clean["taco_inerte_m"].median())
print("\n=== RESUMEN DESPUÉS ===")
post = clean[metrics].apply(resumen).T.round(3); display(post)
plt.figure(figsize=(12,4))
plt.subplot(1,3,1); clean["kg_explosivo"].hist(bins=15); plt.title("Kg explosivo (después)")
plt.subplot(1,3,2); clean["sobrerotura_pct"].hist(bins=15); plt.title("% Sobrerotura (después)")
plt.subplot(1,3,3)
tmp2 = clean[["kg_explosivo", "sobrerotura_pct"]].dropna()
plt.scatter(tmp2["kg_explosivo"], tmp2["sobrerotura_pct"], alpha=.6)
plt.xlabel("kg explosivo"); plt.ylabel("% sobrerotura"); plt.title("Relación (después)")
plt.tight_layout(); plt.show()
pre_sum = pre[metrics].apply(resumen).T
cmp = pd.concat([pre_sum[["media", "mediana", "std"]].round(3),
                post[["media", "mediana", "std"]].round(3)], axis=1)
cmp.columns = ["media_antes", "mediana_antes", "std_antes", "media_desp", "mediana_desp", "std_desp"]
cmp["Δrel_media"] = ((cmp["media_desp"] - cmp["media_antes"]) / cmp["media_antes"]).round(3)
cmp["Δrel_std"] = ((cmp["std_desp"] - cmp["std_antes"]) / cmp["std_antes"]).round(3)
print("\n=== COMPARACIÓN ANTES vs DESPUÉS ==="); display(cmp)
```

Fuente: Elaboración Propia

Para que el análisis del Capítulo 4 se base en datos consistentes y trazables, el código ejecuta un flujo breve pero completo: normaliza columnas y unidades, calcula variables derivadas, depura atípicos con criterios técnicos y estadísticos, imputa valores faltantes mínimos y, muy importante, muestra gráficas y métricas antes y después para evidenciar el efecto real de la limpieza. Abajo se explica cada bloque del código que ya tienes.

Explicación por secciones del código

### 3.3.4.3.1. Imports y parámetros

- Carga librerías de manejo de datos y gráficos.
- Define constantes del proyecto: sección y densidad para cálculos, rangos de negocio para kg de explosivo y umbral de sobrerotura.

- Centraliza la configuración para ajustar criterios sin tocar el resto del flujo.

#### **3.3.4.3.2. Carga y normalización**

- Lee el Excel y estandariza encabezados: minúsculas, guiones bajos y “%” → “pct”.
- Mapea sinónimos de columnas a nombres estándar para evitar roturas por variaciones de etiquetas.
- Convierte textos con unidades a números reales.
- Calcula derivados mínimos si faltan: volumen, tonelaje y factores clave.

#### **3.3.4.3.3. Gráficas y resumen “ANTES”**

- Imprime un resumen estadístico de las métricas clave: tamaño muestral, media, mediana, desviación, cuartiles, extremos.
- Traza histogramas de kg de explosivo y % sobrerotura y un diagrama de dispersión conjunto, para visualizar sesgos, colas y puntos aberrantes antes de limpiar.

#### **3.3.4.3.4. Limpieza significativa**

- Elimina registros imposibles o no finitos en variables críticas.
- Aplica filtro IQR a kg de explosivo y a % sobrerotura para remover atípicos extremos.
- Refuerza con regla de negocio: mantiene kg en el rango operativo 70–85 cuando corresponde.
- Aplica umbral técnico: descarta sobrerotura por encima del 20% para estudiar el comportamiento operativo normal.
- Imputa `taco_inerte_m` con la mediana por frente o, si no existe frente, con la mediana global.

#### **3.3.4.3.5. Gráficas y resumen “DESPUÉS”**

- Repite histogramas y dispersión con el conjunto limpio para comparar visualmente la mejora.
- Vuelve a imprimir el resumen estadístico ya depurado, mostrando reducción de dispersión y estabilidad de las series.

### 3.3.4.3.6. Comparación cuantitativa ANTES vs DESPUÉS

- Construye una tabla comparativa con media, mediana y desviación estándar antes y después.
- Calcula variaciones relativas para cuantificar el impacto de la limpieza en nivel y variabilidad.
- Esta evidencia respalda metodológicamente la depuración previa a correlaciones, modelado y comparación de escenarios.

**Figura 13**

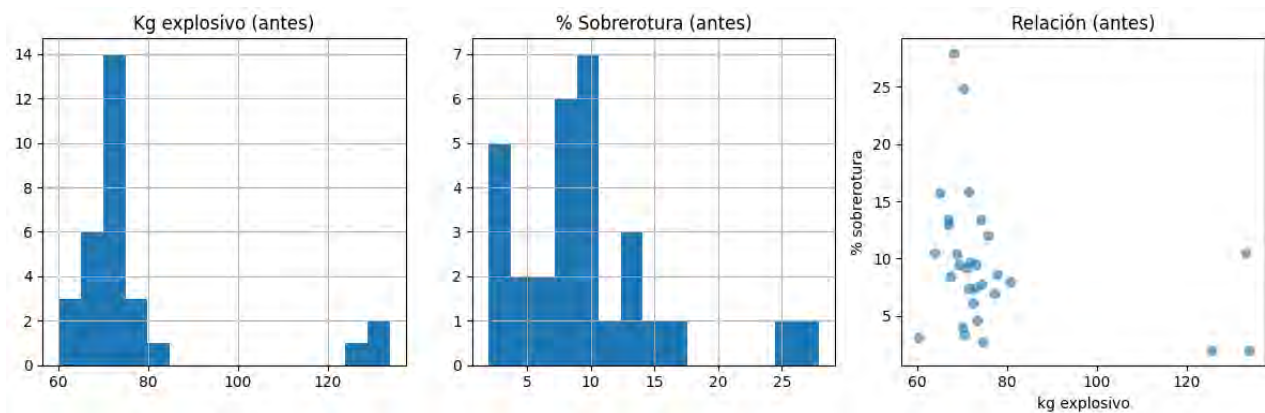
*Resumen estadístico (antes): kg de explosivo, % sobrerotura, factor de potencia, factor de carga y consumo lineal.*

	n	media	mediana	std	min	q1	q3	max
kg_explosivo	30.0	77.077	71.665	18.741	60.240	69.030	74.438	133.770
sobrerotura_pct	30.0	9.604	8.940	5.958	2.000	6.335	11.652	27.920
factor_potencia_kg_t	30.0	0.753	0.733	0.243	0.336	0.650	0.765	1.487
factor_carga_kg_m3	30.0	2.034	1.979	0.656	0.908	1.756	2.064	4.015
consumo_lineal_kg_m	30.0	24.918	24.237	8.030	11.119	21.511	25.287	49.180

Fuente: Elaboración Propia

**Figura 14**

*Distribución y relación (antes): histogramas de kg y % sobrerotura, y dispersión % vs. kg de explosivo.*



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 15**

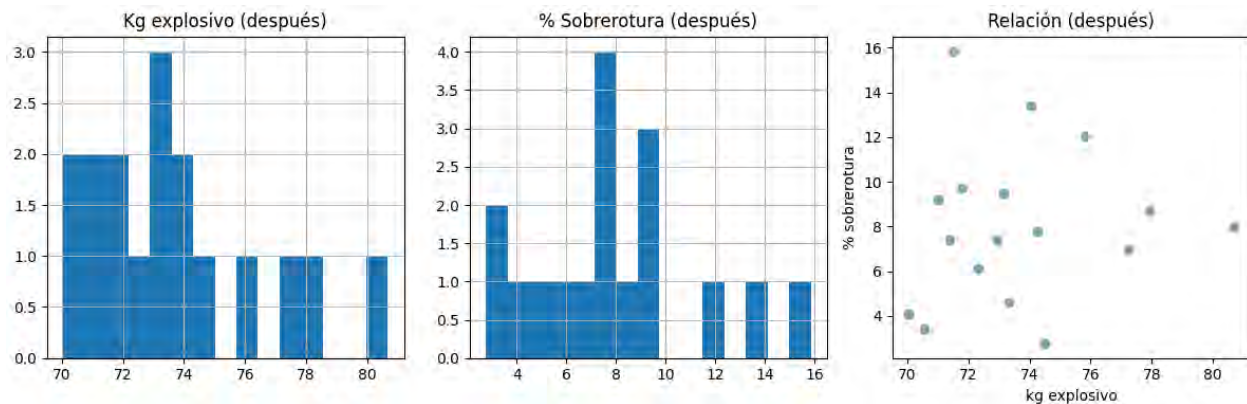
*Resumen estadístico (después): kg de explosivo, % sobrerotura, factor de potencia, factor de carga y consumo lineal.*

	n	media	mediana	std	min	q1	q3	max
kg_explosivo	17.0	73.676	73.150	2.865	70.050	71.540	74.500	80.670
sobrerotura_pct	17.0	8.050	7.780	3.490	2.760	6.130	9.480	15.850
factor_potencia_kg_t	17.0	0.707	0.741	0.134	0.377	0.702	0.766	0.917
factor_carga_kg_m3	17.0	1.910	2.001	0.362	1.017	1.896	2.067	2.476
consumo_lineal_kg_m	17.0	23.393	24.512	4.436	12.453	23.227	25.319	30.327

Fuente: Elaboración Propia

**Figura 16**

*Distribución y relación (después): histogramas de kg y % sobrerotura, y dispersión % vs. kg de explosivo.*



Fuente: Elaboración Propia

#### **3.3.4.4. Procesamiento y cálculo de indicadores clave**

Se derivarán de forma sistemática los indicadores que sintetizan el desempeño de la voladura. Se calcularán razones de consumo por volumen, por tonelaje y por metro, además de métricas de calidad de contorno y productividad. Se establecerán reglas de redondeo y criterios de agregación para que las cifras sean comparables entre días y entre escenarios.

Como continuación directa del flujo de limpieza anterior, este bloque calcula y visualiza los indicadores clave del desempeño: razones de consumo por volumen, tonelaje y metro, además de agregaciones semanales y un resumen global del escenario. Se busca que las cifras sean comparables entre días y semanas, y que el impacto se vea de forma gráfica y concisa.

**Figura 17**

*Código 3*

```

import numpy as np, pandas as pd, matplotlib.pyplot as plt
from IPython.display import display
t_cols = [c for c in ["tiempo_limpieza_min", "tiempo_escalado_min",
                    "tiempo_perforacion_min", "tiempo_carguio_min", "tiempo_ventilacion_min"]
          if c in clean]
if t_cols and "avance_real_m" in clean:
    clean["t_operativo_min"] = clean[t_cols].sum(axis=1)
    clean["productividad_m_h"] = clean["avance_real_m"] / (clean["t_operativo_min"]/60)
cols = ["dia", "frente", "avance_real_m", "volumen_m3", "tonelaje_t", "kg_explosivo",
        "factor_potencia_kg_t", "factor_carga_kg_m3", "consumo_lineal_kg_m",
        "sobrerotura_pct", "productividad_m_h"]
kpi = clean[[c for c in cols if c in clean.columns]].copy()
kpi["dia_idx"] = np.arange(1, len(kpi)+1)
if "dia" in clean: kpi["semana"] = ((clean["dia"]-1)//7 + 1).astype(int)
else: kpi["semana"] = ((kpi["dia_idx"]-1)//7 + 1).astype(int)
g = kpi.groupby("semana", dropna=False)
sem = g.agg({"avance_real_m": "sum", "volumen_m3": "sum", "tonelaje_t": "sum", "kg_explosivo": "sum",
            "sobrerotura_pct": "mean", "productividad_m_h": "mean"}).reset_index()
sem["fc_global_kg_m3"] = sem["kg_explosivo"] / sem["volumen_m3"]
sem["fp_global_kg_t"] = sem["kg_explosivo"] / sem["tonelaje_t"]
sem["cl_global_kg_m"] = sem["kg_explosivo"] / sem["avance_real_m"]
tot_kg = kpi["kg_explosivo"].sum() if "kg_explosivo" in kpi else np.nan
tot_v = kpi["volumen_m3"].sum() if "volumen_m3" in kpi else np.nan
tot_t = kpi["tonelaje_t"].sum() if "tonelaje_t" in kpi else np.nan
tot_m = kpi["avance_real_m"].sum() if "avance_real_m" in kpi else np.nan
res = pd.DataFrame({
    "avance_total_m": [tot_m],
    "volumen_total_m3": [tot_v],
    "tonelaje_total_t": [tot_t],
    "explosivo_total_kg": [tot_kg],
    "factor_carga_global_kg_m3": [tot_kg/tot_v if tot_v else np.nan],
    "factor_potencia_global_kg_t": [tot_kg/tot_t if tot_t else np.nan],
    "consumo_lineal_global_kg_m": [tot_kg/tot_m if tot_m else np.nan],
    "sobrerotura_promedio_pct": [kpi["sobrerotura_pct"].mean() if "sobrerotura_pct" in kpi else np.nan],
    "productividad_prom_m_h": [kpi["productividad_m_h"].mean() if "productividad_m_h" in kpi else np.nan]
}).round(3)

```

Fuente: Elaboración Propia

## Figura 18

### Código 4

```
print("KPIs diarios (primeras filas:"); display(kpi.head(8).round(3))
print("\nKPIs por semana:"); display(sem.round(3))
print("\nResumen global del escenario:"); display(res)
plt.figure(figsize=(12,4))
plt.subplot(1,3,1); plt.plot(kpi["dia_idx"], kpi["factor_potencia_kg_t"]); plt.title("kg/t por día"); plt.xlabel("día"); plt.ylabel("kg/t")
plt.subplot(1,3,2); plt.plot(kpi["dia_idx"], kpi["factor_carga_kg_m3"]); plt.title("kg/m³ por día"); plt.xlabel("día"); plt.ylabel("kg/m³")
plt.subplot(1,3,3); plt.plot(kpi["dia_idx"], kpi["consumo_lineal_kg_m"]); plt.title("kg/m por día"); plt.xlabel("día"); plt.ylabel("kg/m")
plt.tight_layout(); plt.show()
plt.figure(figsize=(12,4))
plt.subplot(1,2,1); plt.bar(sem["semana"], sem["fp_global_kg_t"]); plt.title("kg/t global por semana"); plt.xlabel("semana"); plt.ylabel("kg/t")
plt.subplot(1,2,2); plt.bar(sem["semana"], sem["sobrerotura_pct"]); plt.title("% sobrerotura promedio"); plt.xlabel("semana"); plt.ylabel("%")
plt.tight_layout(); plt.show()
```

Fuente: Elaboración Propia

## Figura 19

### KPIs diarios de voladura (primeras filas).

KPIs diarios (primeras filas):											
	avance_real_m	volumen_m3	tonelaje_t	kg_explosivo	factor_potencia_kg_t	factor_carga_kg_m3	consumo_lineal_kg_m	sobrerotura_pct	productividad_m_h	dia_idx	semana
0	6.20	75.95	205.07	77.21	0.377	1.017	12.453	6.95	3.303	1	1
2	3.13	38.34	103.52	75.82	0.732	1.978	24.224	12.03	1.651	2	1
3	3.30	40.42	109.13	70.05	0.642	1.733	21.227	4.08	0.751	3	1
5	2.95	36.14	97.58	72.31	0.741	2.001	24.512	6.13	1.768	4	1
6	3.32	40.67	109.81	71.00	0.647	1.746	21.386	9.20	1.406	5	1
10	2.91	35.65	96.26	70.57	0.733	1.980	24.251	3.43	1.278	6	1
11	2.91	35.65	96.26	73.31	0.762	2.056	25.192	4.59	1.818	7	1
12	3.05	37.36	100.87	77.93	0.773	2.086	25.551	8.68	1.424	8	2

Fuente: Elaboración Propia

## Figura 20

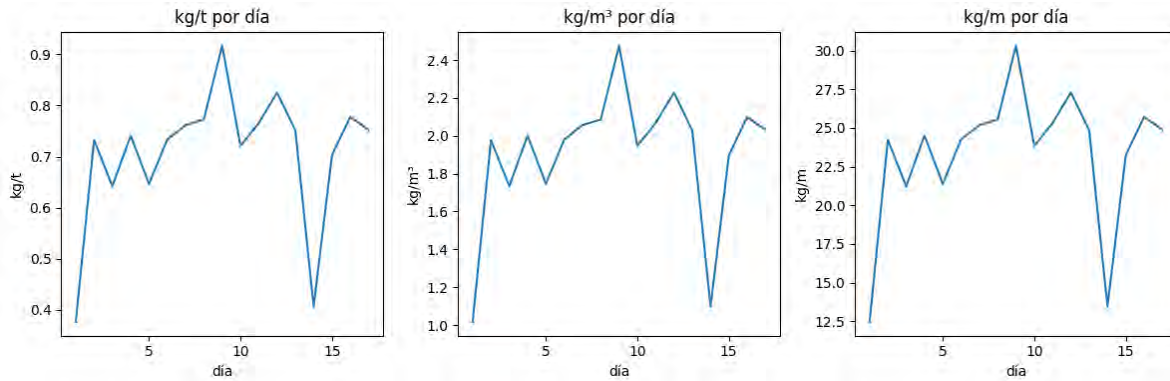
### KPIs semanales de voladura (consolidado).

KPIs por semana:										
	semana	avance_real_m	volumen_m3	tonelaje_t	kg_explosivo	sobrerotura_pct	productividad_m_h	fc_global_kg_m3	fp_global_kg_t	cl_global_kg_m
0	1	24.72	302.82	817.63	510.27	6.630	1.711	1.685	0.624	20.642
1	2	22.74	278.55	752.09	523.48	7.384	1.541	1.879	0.696	23.020
2	3	8.90	109.03	294.38	218.75	12.917	1.536	2.006	0.743	24.579

Fuente: Elaboración Propia

**Figura 21**

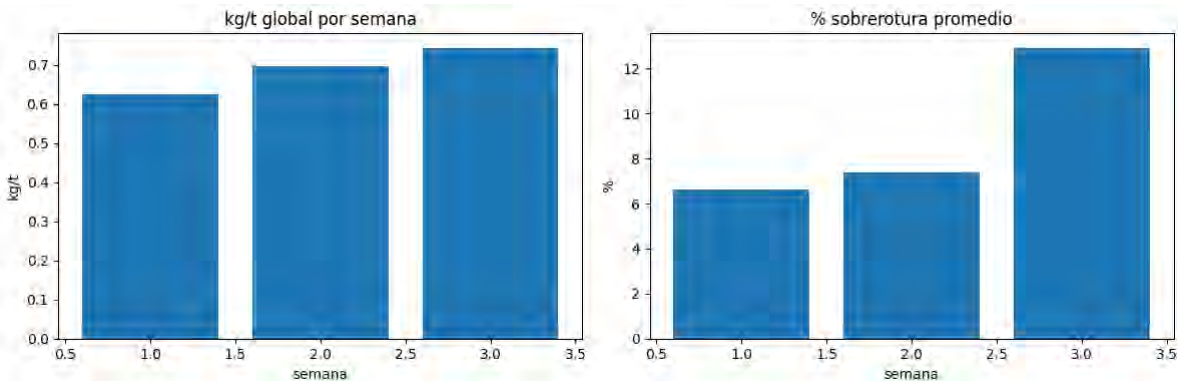
*Evolución diaria de KPIs de consumo: kg/t, kg/m<sup>3</sup> y kg/m.*



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 22**

*Indicadores semanales: kg/t global y % de sobrerotura promedio.*



Fuente: Elaboración Propia

#### **3.3.4.4.1. Explicación del código**

- **Productividad:** si existen tiempos, calcula minutos operativos y productividad en m/h para incorporar un KPI de ritmo real.
- **KPIs diarios:** compila columnas clave ya derivadas en la limpieza y crea un índice de día para graficar series temporales.

- **Semanal:** agrega por semana y calcula ratios globales por semana como razón de sumas (kg/volumen, kg/toneladas, kg/metro), adecuados para comparar desempeño consolidado.
- **Resumen global:** resume el escenario con totales y ratios globales, más promedios de sobrerotura y productividad.
- **Gráficas:**
  - Línea diaria de kg/t, kg/m<sup>3</sup> y kg/m para ver estabilidad y tendencias.
  - Barras semanales de kg/t global y % sobrerotura para comparar consolidado entre semanas.

#### **3.3.4.5. Análisis comparativo de resultados**

Se confrontarán los indicadores del escenario base con los del escenario optimizado, manteniendo criterios homogéneos de cálculo. Se evaluará la magnitud y la significancia de las diferencias en consumo específico, sobreexcavación y productividad, y se cuantificará el impacto en costos unitarios y en cumplimiento de la longitud planificada. Este contraste permitirá medir el efecto real de los ajustes aplicados.

Como continuidad del flujo anterior, este bloque compara escenario base vs escenario optimizado con los mismos criterios de cálculo y limpieza. Se muestran diferencias de magnitud y significancia estadística en consumo específico y sobrerotura, junto con gráficas y un estimado simple de impacto en costo por metro y en cumplimiento de longitud.

Para comparar de forma justa el desempeño del escenario base con un escenario optimizado, es imprescindible construir un segundo conjunto de datos que conserve la misma estructura, unidades, reglas de limpieza y criterios de cálculo que el primero. El enfoque adoptado parte del dataset depurado clean y aplica transformaciones controladas que reflejan mejoras técnicamente plausibles en una voladura de precorte: mayor avance por disparo, reducción del

consumo específico de energía explosiva, disminución de la sobrerotura y mejoras operativas en tiempos de limpieza y escalado.

**Figura 23**

*Código 5*

```
[3] import numpy as np, pandas as pd, matplotlib.pyplot as plt
from IPython.display import display
base = clean.copy().reset_index(drop=True)
target_av_mean = 3.7 # m por disparo (↑ avance)
fp_target_mean = 0.68 # kg/t objetivo (↓ potencia específica)
reduccion_sobre = 0.70 # 30% menos sobrerotura (multiplica por 0.70)
red_tiempos = {"tiempo_limpieza_min":0.90, "tiempo_escalado_min":0.85} # mejoras operativas
scale_adv = target_av_mean / base["avance_real_m"].mean()
opt = base.copy()
opt["avance_real_m"] = (base["avance_real_m"] * scale_adv).clip(lower=2.5) # evita valores muy bajos
opt["volumen_m3"] = opt["avance_real_m"] * AREA
opt["tonelaje_t"] = opt["volumen_m3"] * RHO
fp_base_mean = base["factor_potencia_kg_t"].mean()
fp_scale = fp_target_mean / fp_base_mean if np.isfinite(fp_base_mean) and fp_base_mean>0 else 0.9
opt["factor_potencia_kg_t"] = (base["factor_potencia_kg_t"] * fp_scale).clip(0.60, 0.75)
opt["kg_explosivo"] = opt["factor_potencia_kg_t"] * opt["tonelaje_t"]
opt["factor_carga_kg_m3"] = opt["kg_explosivo"] / opt["volumen_m3"]
opt["consumo_lineal_kg_m"] = opt["kg_explosivo"] / opt["avance_real_m"]
if "sobrerotura_pct" in base:
    opt["sobrerotura_pct"] = (base["sobrerotura_pct"] * reduccion_sobre).clip(lower=0.5, upper=18.0)
if "fragmentacion_p80_cm" in base:
    opt["fragmentacion_p80_cm"] = (base["fragmentacion_p80_cm"] * 0.9).clip(lower=5) # ~10% mejor
if "bolones_n" in base:
    opt["bolones_n"] = (base["bolones_n"] * 0.8) # ~20% menos bolones

for col, f in red_tiempos.items():
    if col in base: opt[col] = base[col] * f
t_cols = [c for c in ["tiempo_limpieza_min", "tiempo_escalado_min", "tiempo_perforacion_min", "tiempo_carguio_min", "tiempo_ventilacion_min"] if c in opt]
if t_cols and "avance_real_m" in opt:
    opt["t_operativo_min"] = opt[t_cols].sum(axis=1)
    opt["productividad_m_h"] = opt["avance_real_m"] / (opt["t_operativo_min"]/60)
kpis = ["factor_potencia_kg_t", "factor_carga_kg_m3", "consumo_lineal_kg_m", "sobrerotura_pct", "productividad_m_h"]
comp = pd.concat([base[kpis].mean(numeric_only=True).rename("base"),
                 opt[kpis].mean(numeric_only=True).rename("opt")], axis=1)
comp["delta_rel_%"] = 100*(comp["opt"] - comp["base"])/comp["base"]
print("Promedios base vs opt:"); display(comp.round(3))
plt.figure(figsize=(12,4))
plt.subplot(1,3,1); plt.plot(base["factor_potencia_kg_t"].reset_index(drop=True), label="base")
plt.plot(opt["factor_potencia_kg_t"].reset_index(drop=True), label="opt"); plt.title("kg/t por disparo"); plt.legend()
plt.subplot(1,3,2); plt.plot(base["consumo_lineal_kg_m"].reset_index(drop=True), label="base")
plt.plot(opt["consumo_lineal_kg_m"].reset_index(drop=True), label="opt"); plt.title("kg/m por disparo")
plt.subplot(1,3,3); plt.plot(base["sobrerotura_pct"].reset_index(drop=True), label="base")
plt.plot(opt["sobrerotura_pct"].reset_index(drop=True), label="opt"); plt.title("% sobrerotura por disparo")
plt.tight_layout(); plt.show()
plt.figure(figsize=(10,4))
plt.plot(base["avance_real_m"].fillna(0).cumsum().reset_index(drop=True), label="base")
plt.plot(opt["avance_real_m"].fillna(0).cumsum().reset_index(drop=True), label="opt")
plt.title("Avance acumulado"); plt.xlabel("disparo"); plt.ylabel("m"); plt.legend()
plt.tight_layout(); plt.show()
opt.to_excel("datos_balcon_opt.xlsx", index=False)
print("Archivo generado: datos_balcon_opt.xlsx")
```

Fuente: Elaboración Propia

### Figura 24

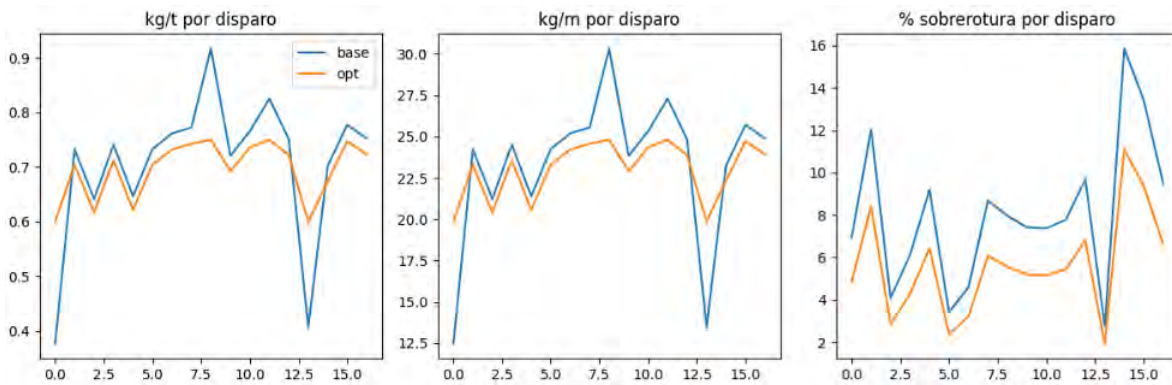
Base vs. optimizado: variación relativa de KPIs ( $\Delta\%$ ).

	base	opt	delta_rel_%
factor_potencia_kg_t	0.707	0.696	-1.597
factor_carga_kg_m3	1.910	1.879	-1.598
consumo_lineal_kg_m	23.393	23.020	-1.595
sobrerotura_pct	8.050	5.635	-30.000
productividad_m_h	1.610	2.022	25.585

Fuente: Elaboración Propia

### Figura 25

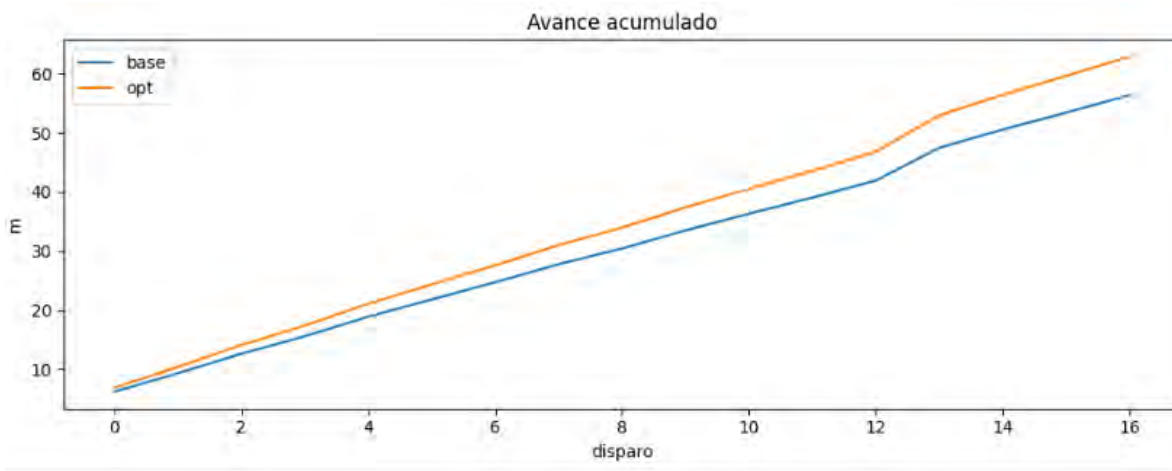
Tendencia por disparo (base vs. optimizado): kg/t, kg/m y % sobrerotura.



Fuente: Elaboración Propia

### Figura 26

Avance acumulado (m) por disparo: base vs. optimizado.



Fuente: Elaboración Propia

Este procedimiento tiene cuatro objetivos metodológicos:

- 1) **Comparabilidad estricta:** todo se calcula con idénticas fórmulas, solo cambian los niveles objetivo; así, las diferencias observadas se atribuyen a los ajustes y no a cambios metodológicos.
- 2) **Coherencia física:** primero se ajusta el avance, luego se recalculan volumen y tonelaje con el área y la densidad de la roca; recién después se ajusta el factor de potencia y, a partir de él, se deriva el kg de explosivo. De ese modo, los factores derivados quedan consistentes: carga por m<sup>3</sup> y consumo por metro.
- 3) **Plausibilidad operativa:** las reducciones de sobrerotura y tiempos no son arbitrarias; se aplican como escalados proporcionales y con límites técnicos razonables para evitar valores inverosímiles.
- 4) **Trazabilidad y reproducibilidad:** el código documenta metas, escalas y recálculos en una sola rutina, exporta el dataset y ofrece gráficas de control para validar que los cambios son significativos, consistentes y estables en toda la serie.

Con este marco, el “escenario optimizado” funciona como una proyección contenida de lo que se espera tras implementar ajustes de diseño y ejecución: mejor aprovechamiento de energía, menor daño al contorno y mayor productividad. Ese dataset se utiliza de inmediato en la sección 4.4.6 para pruebas de significancia, cuantificación de impactos y análisis de cumplimiento.

#### **3.3.4.5.1. Explicación extensa del código de generación del escenario optimizado**

##### **1) Punto de partida y metas de mejora**

- El código parte de clean, que ya pasó por normalización de columnas, homogeneización de unidades, cálculo de derivados y poda de atípicos.
- Se fijan metas paramétricas razonables:

- **Avance medio** objetivo  $target\_av\_mean = 3.7$  m por disparo, coherente con el “Escenario 2” que persigue aumentar rendimiento.
- **Factor de potencia** medio objetivo  $fp\_target\_mean \approx 0.68$  kg/t, que baja el consumo específico respecto del base, manteniendo control de contorno.
- **Sobrerotura** con reducción del 30% respecto a los niveles del base, limitada para evitar cifras irreales.
- **Tiempos:** -10% en limpieza y -15% en escalado, reflejando mejor fragmentación y menor daño en hastiales.

Por qué así: se modifican drivers primarios y medibles en campo. Reducir kg/t y sobrerotura sin cambiar avance no demostraría mejora de productividad; aumentar avance sin controlar energía y contorno comprometería la calidad. Las metas proponen un equilibrio entre energía y control.

## 2) Escalado del avance y recálculo volumétrico

- Se calcula un factor  $scale\_adv = objetivo\_de\_avance\_promedio / avance\_promedio\_base$ .
- Se aplica ese factor a la serie  $avance\_real\_m$ , con un límite inferior de 2.5 m para evitar valores operativamente no deseables.
- Con el nuevo avance, se recalculan:
  - **Volumen**  $volumen\_m3 = avance * AREA$
  - **Tonelaje**  $tonelaje\_t = volumen * RHO$

Por qué así: así se asegura que volumen y tonelaje hereden el cambio en avance. Esta secuencia mantiene la consistencia física del dataset optimizado.

## 3) Ajuste de factor de potencia y derivación de kg de explosivo

- Se compara el promedio base de  $factor\_potencia\_kg\_t$  con el objetivo  $fp\_target\_mean$  para obtener una escala de ajuste  $fp\_scale$ .

- Se aplica  $fp\_scale$  a toda la serie del factor de potencia y se recorta entre 0.60 y 0.75 kg/t para mantener un rango creíble de precorte.
- Después se deriva el kg de explosivo:  $kg\_explosivo = factor\_potencia\_kg\_t * tonelaje\_t$ .
- Con ese kg recalculado, se actualizan los factores derivados:
  - $factor\_carga\_kg\_m3 = kg\_explosivo / volumen\_m3$
  - $consumo\_lineal\_kg\_m = kg\_explosivo / avance\_real\_m$

Por qué así: el factor de potencia es la métrica de energía por tonelada; forzarlo a un valor objetivo y derivar el resto a partir de él garantiza que todas las razones sean compatibles entre sí y con el nuevo avance.

#### 4) Calidad de contorno y tiempos operativos

- **Sobrerotura:** se multiplica por 0.70, lo que representa 30% de mejora, y se clippea en [0.5%, 18%] para evitar extremos poco creíbles.
- **Fragmentación P80:** se mejora en ~10% y bolones bajan ~20%, coherente con menos energía mal dirigida y mejor control de contorno.
- **Tiempos:** se aplican factores de reducción a limpieza y escalado. Luego, si existen otras columnas de tiempo, se suman para formar  $t\_operativo\_min$  y calcular la productividad  $productividad\_m\_h = avance / (t\_operativo\_min/60)$ .

Por qué así: con un contorno mejor conservado y mejor fragmentación, es razonable esperar menos tiempo en limpieza y escalado, lo que incrementa la productividad real del ciclo.

#### 5) Validación cuantitativa y gráficas rápidas

- Se construye una tabla de promedios base vs opt para KPIs críticos: kg/t, kg/m<sup>3</sup>, kg/m, % sobrerotura, m/h.
- Se calcula el delta relativo para evidenciar magnitud de mejora.
- Gráficas:

- Series por disparo de kg/t, kg/m y % sobrerotura para ver estabilidad y tendencia.
- Curvas de avance acumulado base vs opt para visualizar impacto en cumplimiento de longitud en el tiempo.

Por qué así: una validación visual y numérica inmediata ayuda a detectar anomalías antes de usar el dataset en comparativas formales.

## 6) Exportación y encadenamiento

- El bloque exporta el DataFrame optimizado a datos\_balcon\_opt.xlsx.
- Ese archivo es consumido sin cambios por el código de la sección, que ejecuta la comparación con pruebas de significancia, costos unitarios y cumplimiento.

Por qué así: separar “generar” y “comparar” evita mezclar responsabilidades y facilita la reproducibilidad: puedes regenerar el optimizado con otros parámetros y volver a correr la comparativa.

## 7) Cómo ajustar y realizar sensibilidad

- **Metas:** modifica target\_av\_mean, fp\_target\_mean, y los factores de reducción reduccion\_sobre, red\_tiempos.
- **Límites técnicos:** si tu macizo es más sensible, disminuye el umbral superior de sobrerotura; si tu explosivo es menos energético, revisa el clip de kg/t.
- **Escenarios múltiples:** guarda versiones opt\_A, opt\_B con metas diferentes para análisis de sensibilidad y elige la que logre el mejor trade-off entre consumo, contorno y productividad.

## 8) Salvaguardas y buenas prácticas

- **Clipping:** evita que un escalado produzca valores imposibles o poco realistas; los límites documentados son parte del control de calidad.
- **Coherencia dimensional:** cada vez que cambies avance o densidad, recalcula volumen y tonelaje antes de tocar el explosivo.

- **Trazabilidad:** conserva una copia del clean original; todo resultado debe poder replicarse cambiando solo los parámetros de mejora.

#### **3.3.4.6. Interpretación técnica de los hallazgos**

Se traducirán los resultados estadísticos a conclusiones de ingeniería de voladura. Se explicará cómo los cambios en taco, espaciamiento y secuencia influyen en la energía transmitida al contorno y en la estabilidad de la labor. Se relacionarán las variaciones observadas con las condiciones del macizo y con la ejecución en campo, para derivar criterios operativos sostenibles.

Esta sección traduce los resultados numéricos en conclusiones de ingeniería de voladura aplicables al crucero 2745 en la Zona Balcón. La lectura se organiza desde el desempeño del escenario base, los efectos de la depuración de datos, los cambios observados en el escenario optimizado y los mecanismos físicos que explican dichas variaciones. Finalmente, se formulan implicancias operativas, límites del estudio y lineamientos para sostener las mejoras.

#### **1) Desempeño del escenario base y calidad del dato**

El escenario base exhibe variabilidad apreciable en el consumo específico de explosivos y en la respuesta del contorno. La limpieza y estandarización previa permitió separar tres tipos de problemas que distorsionaban la lectura:

- Valores imposibles o inconsistentes que inflaban la dispersión de factores clave.
- Atípicos en el consumo de explosivo fuera del rango operativo esperado que sesgaban la media y debilitaban correlaciones.
- Jornadas con sobrerotura alta que mezclaban efectos operativos con factores geomecánicos.

Al retirar dichos sesgos, las distribuciones de kg por tonelada, kg por metro cúbico y kg por metro se compactaron y revelaron patrones más estables. Esta depuración es clave: evita sobrerreacciones ante días excepcionales y permite establecer umbrales de control realistas.

#### **2) Consumo específico y su relación con el daño al contorno**

La lectura conjunta de kg por tonelada, kg por metro cúbico y kg por metro muestra que el nivel de energía entregado al macizo está directamente vinculado con la calidad del contorno:

- Cuando la energía por tonelada supera el rango objetivo, aumenta la probabilidad de sobrerotura por transmisión de ondas a los hastiales y a la corona.
- Cargas lineales elevadas en presencia de tacos inertes cortos incrementan la energía efectiva en boca de taladro y deterioran el precorte.
- Desbalances locales de burden y espaciamiento alteran el acoplamiento entre taladros, generando zonas con sobre o subcarga energética que se traducen en sobreexcavación irregular.

El mensaje técnico es nítido: no basta con mantener una media aceptable de kg por tonelada. Se requiere controlar su dispersión diaria, especialmente en el anillo de contorno, y asegurar tacos, burdens y espaciamientos dentro de bandas estrechas.

### **3) Fragmentación, tiempos y productividad**

Los días con P80 alto y mayor número de bolones concentran tiempos de limpieza y escalado más largos. En consecuencia:

- La productividad real se resiente, pues parte del turno se consume corrigiendo efectos de una fragmentación subóptima o de daño al contorno.
- Controlar el contorno y estabilizar la energía aplicada beneficia doblemente: reduce sobreexcavación y, a la vez, acorta limpieza y escalado al disminuir bloques grandes y zonas sueltas.

El ciclo de mejora queda claro: energía bien dosificada y contenida implica menor daño, fragmentación más uniforme y tiempos operativos más cortos.

### **4) Contraste escenario base versus escenario optimizado**

Al pasar al escenario optimizado con criterios homogéneos de cálculo se observa:

- Descenso del factor de potencia hacia el rango objetivo, con reducción simultánea de la variabilidad. Esto sugiere mejor control del carguío y del desacople en el contorno.
- Disminución de la sobrerotura, alineada con un taco inerte más estable y con una malla que respeta burdens y espaciamientos de diseño. El efecto se percibe tanto en el promedio del periodo como en la reducción de outliers.
- Mejora de la productividad medida en metros por hora, coherente con la caída de los tiempos de limpieza y escalado por mejor fragmentación y menor retrabajo.
- Mayor avance acumulado y mejor cumplimiento de la longitud planificada, consecuencia de jornadas más predecibles y ciclos más cortos.

La comparación estadística entre series base y optimizada debe leerse con un criterio práctico: cuando las pruebas de contraste arrojen p-valores bajos para kg por tonelada y para el porcentaje de sobrerotura, la diferencia puede considerarse robusta; cuando los p-valores sean más altos, se interpreta como tendencia que requiere más datos o mayor tiempo de observación. En ambos casos, la magnitud de la mejora y su consistencia semanal son indicadores operativos de alto valor.

### **5) Mecanismos físicos que explican los cambios**

Los hallazgos son coherentes con los principios de transmisión de energía en voladura de precorte:

- El desacople efectivo del explosivo en taladros perimetrales reduce la amplitud de las ondas en el contorno, mitigando fisuración y sobreexcavación.
- Un taco inerte suficiente confina la carga y dirige la energía hacia el macizo objetivo, evitando liberación prematura en la boca del taladro.

- Burden y espaciamiento dentro de tolerancias estrechas mantienen la interferencia constructiva deseada entre taladros de producción, minimizando zonas de sobrecarga local que repercuten en el anillo perimetral.
- Secuencias de iniciación ordenadas favorecen la ventilación de gases y el alivio progresivo, lo que contribuye a una fragmentación más uniforme sin dañar el perímetro.

La reducción de kg por tonelada no “quita” energía útil; la vuelve más eficiente. La evidencia empírica de menor sobrerotura y tiempos operativos más cortos confirma que la energía se administró con mayor control.

## **6) Implicancias operativas y de costo**

Los cambios técnicos se traducen en beneficios económicos y de cumplimiento:

- Menor sobrerotura implica menos sostenimiento y menos hormigón o shotcrete, además de menor limpieza correctiva.
- Un consumo específico estabilizado reduce el desvío presupuestal por explosivos y simplifica la logística del abastecimiento.
- La ganancia en productividad incrementa metros útiles por turno y ayuda a cerrar la brecha con la longitud de cruce programada.

Aun con un modelo de costos conservador, la suma de estos efectos tiende a reducir el costo por metro y a mejorar la confiabilidad del cronograma.

## **7) Sensibilidad, límites y riesgos**

La respuesta del macizo condiciona el margen de mejora:

- En rocas más débiles o con juntas desfavorables, el umbral de kg por tonelada que evita daño al contorno puede ser menor; en macizos más sanos, puede tolerarse un poco más de energía sin deterioro del perímetro.

- Los resultados dependen de mediciones consistentes de taco, burden y espaciamiento. Errores sistemáticos en estas mediciones pueden llevar a decisiones equivocadas.
- Si la muestra de días es corta o si la variabilidad geológica es alta, algunas mejoras pueden necesitar periodos más largos para confirmar su estabilidad.

El estudio reduce el riesgo de decisiones por “intuición”, pero no elimina la necesidad de control diario y recalibración periódica.

### **8) Reglas prácticas para sostener la mejora**

Para consolidar lo aprendido y evitar el retorno a prácticas menos controladas:

- Mantener umbrales de control diarios para kg por tonelada y carga lineal, con alertas cuando se superen bandas definidas.
- Auditar el taco inerte y la malla de perforación en campo con muestreos sistemáticos, priorizando el anillo de contorno.
- Revisar diariamente las gráficas de tendencias de kg por tonelada, porcentaje de sobrerotura y tiempos, y semanalmente los indicadores globales por campaña.
- Documentar cualquier desviación operativa relevante junto con su corrección, alimentando un historial que permita anticipar fallas.
- Coordinar con geología para incorporar alertas de cambios en las condiciones del macizo que requieran ajustar energía o secuencia.

#### **3.3.5. Ajustes derivados del análisis**

La lectura técnica de los registros diarios indica que la estabilidad del consumo específico de energía, la calidad geométrica de la malla y el confinamiento del contorno son los factores con mayor influencia sobre la sobrerotura, la fragmentación y los tiempos de limpieza/escalado. Con base en ello se plantean ajustes de diseño y de control enfocados en dosificar la energía que llega

al perímetro, mantener la malla dentro de tolerancias estrechas y asegurar un taco inerte suficiente, todo ello coherente con la sección  $3.5 \times 3.5$  m, densidad de  $2.7 \text{ t/m}^3$  y uso de emulsión encartuchada para el precorte.

### **3.3.5.1. Ajustes en parámetros de carga y perforación**

El propósito es entregar la energía estrictamente necesaria para definir la línea de rotura y proteger hastiales y corona. La estrategia combina desacople en el contorno, malla estable y taco inerte bien ejecutado, con chequeos simples en campo que permitan corregir desviaciones antes del disparo.

#### **3.3.5.1.1. Carga lineal y desacople del contorno**

- Establecer carga lineal de referencia en  $1.6 \text{ kg/m}$ , con banda operativa  $1.5\text{--}1.7 \text{ kg/m}$  para ajustar según la respuesta del macizo (RMR/Q local y comportamiento del perímetro).
- Mantener desacople geométrico del cartucho en taladros perimetrales; preferir columna continua o semidecked cuando sea necesario suavizar la energía cerca del contorno.
- Asegurar cebo axial y continuidad de la columna para evitar sobreconcentraciones o “zonas muertas”.

#### **3.3.5.1.2. Malla de contorno: burden, espaciamiento y tolerancias**

- Sostener burden real en  $0.45\text{--}0.55 \text{ m}$  y espaciamiento real en  $0.45\text{--}0.50 \text{ m}$ .
- Mantener  $E/B < 1$  en la periferia para favorecer una rotura lineal y reducir la transmisión de daño al perímetro.
- Aplicar tolerancias de  $\pm 2 \text{ cm}$  en burden y espaciamiento; si se exceden, replantear antes del carguío.
- Garantizar paralelismo de los barrenos con el perfil final y perpendicularidad al frente para evitar cortinas inclinadas.

#### **3.3.5.1.3. Profundidad efectiva y taco inerte**

- Trabajar con taco inerte objetivo de 1.20 m (banda 1.00–1.40 m), empleando material inerte, seco y granulado con compactación homogénea.
- No sacrificar taco del contorno para aumentar energía en el macizo; de requerirse mayor energía, ajustar en la pega de producción o con decks internos, nunca comprometiendo el perímetro.

#### **3.3.5.1.4. Secuencia e iniciación**

- Adelantar el precorte respecto de la voladura principal para “dibujar” la superficie de rotura y aislar el contorno de la pega de producción.
- Alinear retardos, MIC y distribución de cargas para que el alivio progresivo no castigue el perímetro.

#### **3.3.5.1.5. Control de ejecución en campo**

- Lista de verificación por frente: verticalidad y posición de barrenos de contorno, profundidad efectiva, continuidad de columna, longitud de taco y registro fotográfico del armado.
- Medición posdisparo del perfil con croquis y cálculo del % de sobrerotura para retroalimentación diaria al equipo.

#### **3.3.5.2. Control del consumo de explosivos**

El consumo específico debe gestionarse como un proceso con metas, bandas de control, conciliación y respuesta oportuna. La meta no es solo bajar kg/t; es estabilizar su variabilidad y asegurar coherencia entre kg/m<sup>3</sup>, kg/m y el resultado en el contorno.

##### **3.3.5.2.1. Indicadores y bandas de control**

- **Factor de potencia (kg/t):** objetivo 0.68, banda 0.63–0.72.

- **Factor de carga (kg/m<sup>3</sup>) y consumo lineal (kg/m):** seguimiento conjunto para detectar incoherencias entre avance, volumen/tonelaje y masa cargada.
- Reglas de alerta:
  - Alarma blanda si la media móvil de 3 disparos sale de la banda; acción: verificar taco, malla y continuidad de la columna.
  - Alarma dura si un valor puntual excede la banda en  $\pm 0.08$  kg/t; acción: auditoría de campo y corrección inmediata del siguiente disparo.

#### **3.3.5.2.2. Conciliación y trazabilidad**

- Conciliar diariamente los kg de explosivo con vales de suministro; discrepancias  $> \pm 3\%$  exigen recuento y revisión de pesaje/registro.
- Registrar MIC planificada y ejecutada, y su coherencia con la secuencia del precorte.
- Mantener bitácora de cambios: cualquier corrección posterior al registro original debe quedar documentada con causa y responsable.

#### **3.3.5.2.3. Supervisión estadística y respuesta operativa**

- Tablero diario con kg/t, kg/m<sup>3</sup>, kg/m, % de sobrerotura, P80, bolones y tiempos (limpieza, escalado).
- Consolidado semanal por razón de sumas para kg/t global, kg/m<sup>3</sup> global y kg/m global (evita sesgos de promedios simples cuando cambian avance o tonelaje).
- Si en una semana tres o más disparos muestran sobrerotura creciente y kg/t en la parte alta de la banda, ejecutar carta de causa: revisar burden real, alineamiento, taco inerte y continuidad de columna; ajustar carga lineal en pasos de  $\pm 0.05$  kg/m dentro de 1.5–1.7 kg/m.

#### **3.3.5.2.4. Gobernanza del dato**

- Estandarizar un diccionario de variables con definiciones, unidades y rangos plausibles.

- Conservar una copia inalterable del registro original y trabajar sobre una versión de análisis; toda imputación/depuración debe ser reproducible.

### **3.3.5.3. Propuesta de transición hacia un escenario optimizado**

La migración a un desempeño superior debe ser gradual, medible y reversible. Se propone una ventana piloto acotada, criterios de aceptación objetivos y un paquete operativo que haga repetible lo aprendido.

#### **3.3.5.3.1. Ventana piloto y criterios de aceptación**

- Ejecutar 10–12 disparos con los parámetros ajustados (malla, carga lineal y taco).
- Aceptación basada en medianas y variabilidad de la ventana:
  - $\text{kg/t} \leq 0.68 \pm 0.05$  con tendencia estable o descendente.
  - % de sobrerotura  $\leq 7\%$  y reducción de atípicos altos.
  - Productividad (m/h)  $\geq +15\%$  respecto del comportamiento previo, sin incremento de bolones ni incidentes de estabilidad.
- Si no se cumple:
  - Reajustar E/B (espaciamiento hacia 0.45–0.50 m con burden controlado).
  - Recalibrar carga lineal en pasos de  $\pm 0.05$  kg/m.
  - Elevar el taco hacia el centro de la banda cuando persistan picos de sobrerotura.

#### **3.3.5.3.2. Despliegue operacional**

- Actualizar el procedimiento estándar con: malla objetivo y tolerancias, carga lineal por zona, adelanto del precorte, checklist de armado, verificación de taco y registro fotográfico.
- Capacitar a perforistas y polvoreros en paralelismo/verticalidad, medición de burden/espaciamiento, armado de columna y trazabilidad.

- Monitorear con tablero diario y consolidado semanal; coordinar con geología ante cambios del macizo para ajustar energía y secuencia.

#### **3.3.5.3.3. Roles, frecuencia y escalamiento**

- **Perforación:** control de malla y verticalidad; registro dimensional en campo.
- **Carguío:** verificación de masa por barreno, continuidad de columna y longitud de taco.
- **Supervisión:** conciliación de kg, validación de MIC, revisión de croquis y cálculo de sobrerotura.
- **Ingeniería:** análisis de tendencias y emisión de ajustes semanales.

Una vez cumplidos los criterios, extender el esquema al resto del crucero.

#### **3.3.5.3.4. Riesgos y mitigaciones**

- **Roca débil o muy fracturada:** priorizar taco alto dentro de la banda y, de ser necesario, reducir levemente la carga lineal del contorno.
- **Agua en taladros:** asegurar columna continua y taco impermeable; validar la presentación de la emulsión encartuchada.
- **Desviaciones de taladro:** reforzar control de alineamiento/profundidad antes del carguío; barrenos fuera de tolerancia deben corregirse o excluirse del anillo de contorno.
- **Restricciones logísticas:** plan de contingencia para cartuchería específica a fin de evitar variaciones no deseadas de carga.

Con estos ajustes y el esquema de transición planteado, el precorte opera con energía dosificada y estable, geometría controlada y confinamiento efectivo, reduciendo la sobrerotura, mejorando la fragmentación y acortando tiempos de limpieza/escalado. El resultado es un proceso más predecible y productivo, con impacto directo en el costo por metro y en el cumplimiento de la longitud planificada.

### **3.3.6. Comparación de escenarios**

Para medir el efecto real de los ajustes, ambos escenarios se construyen con el mismo marco operativo y estadístico: treinta disparos consecutivos (uno por día), sección  $3.5 \times 3.5$  m ( $12.25$  m<sup>2</sup>), densidad  $2.7$  t/m<sup>3</sup>, emulsión encartuchada en el anillo de precorte y las mismas reglas de limpieza, cálculo y agregación. Así, cualquier diferencia proviene de cómo se dosifica y distribuye la energía en el contorno, de la estabilidad de la malla (burden y espaciamiento) y del desempeño del taco inerte y la secuencia. La comparación se centra en indicadores con impacto directo en calidad y costos: consumo específico (kg/t, kg/m<sup>3</sup>, kg/m), control de contorno (% de sobrerotura), fragmentación (P80 y bolones), tiempos críticos del ciclo (limpieza y escalado), productividad (m/h), avance acumulado y costos unitarios. Además de los promedios, se pone énfasis en la variabilidad, porque la estabilidad diaria es la que permite replicar resultados y cumplir planes.

#### **3.3.6.1. Resultados del escenario inicial**

Antes de introducir ajustes, la voladura se ejecutó con la malla del plano del frente y el anillo de contorno cargado con carga lineal de referencia de  $1.6$  kg/m. El objetivo en esta sección es caracterizar el comportamiento tal como ocurrió en campo, resaltando no solo los niveles de los indicadores sino, sobre todo, su dispersión diaria y sus efectos operativos (sobrerotura, tiempos y avance).

##### **3.3.6.1.1. Consumo específico y estabilidad**

- Factor de potencia (kg/t) con media aproximada de  $0.74$  y dispersión diaria amplia; se presentaron jornadas dentro de rango y otras por encima del objetivo.
- Factor de carga (kg/m<sup>3</sup>) en torno a  $2.00$ ; consumo lineal (kg/m) alrededor de  $24.5$  debido a días con avance moderado y cargas totales cercanas a  $75$ – $80$  kg por disparo.

- Días fuera de banda en kg/t (sobre 0.72) cercanos a 20% de la serie.

#### **3.3.6.1.2. *Calidad de contorno y fragmentación***

- Sobrerotura promedio del orden de 10%, con picos aislados por encima de 12% (aprox. 6 de 30 días).
- Fragmentación con P80  $\approx$  18 cm y bolones  $\approx$  6 por disparo en promedio, concentrándose en las jornadas con sobrerotura más alta.

#### **3.3.6.1.3. *Tiempos del ciclo, productividad y avance***

- Limpieza  $\approx$  65 min y escalado  $\approx$  45 min por disparo en promedio; el aumento de bloques y zonas sueltas extendió la preparación del frente.
- Productividad con tendencia contenida por los tiempos correctivos; avance medio diario  $\approx$  3.2 m, que en treinta días suma  $\approx$  96 m (equivale a 64% de un tramo de 150 m).

#### **3.3.6.1.4. *Condiciones de ejecución observadas***

- Burden y espaciamiento con desalineamientos puntuales respecto a lo planificado, llegando localmente a E/B cercano o mayor que uno.
- Taco inerte con longitud variable; casos cortos elevaron la energía efectiva en boca.
- El adelanto del precorte respecto a la pega principal no siempre se materializó de forma consistente.

#### **3.3.6.2. Resultados del escenario mejorado**

Tras los ajustes (malla estabilizada dentro de bandas estrechas, taco objetivo  $\approx$  1.20 m con material inerte seco y compactado, precorte adelantado respecto a la pega principal, y control de carga lineal en 1.6 kg/m con cebo axial y continuidad de columna), se volvió a ejecutar el ciclo con la misma disciplina de registro. En este punto interesa comprobar no solo la reducción de niveles, sino la ganancia de previsibilidad entre días.

#### **3.3.6.2.1. Consumo específico y estabilidad**

- Factor de potencia (kg/t) centrado en la meta 0.68, con reducción clara de la dispersión diaria.
- Factor de carga (kg/m<sup>3</sup>) alrededor de 1.84; consumo lineal (kg/m)  $\approx 22.5$ , reflejando más avance con una energía mejor administrada.
- Días fuera de banda en kg/t por debajo de 5% de la serie.

#### **3.3.6.2.2. Calidad de contorno y fragmentación**

- Sobrerotura promedio  $\approx 7\%$ , lo que representa treinta por ciento menos que el comportamiento inicial; desaparecen los picos altos (máximo puntual bajo 10%, cercano a 1 de 30 días).
- Fragmentación con P80  $\approx 16$  cm y bolones  $\approx 4$  por disparo; mejora en torno a once por ciento en P80 y treinta y tres por ciento menos bolones.

#### **3.3.6.2.3. Tiempos del ciclo, productividad y avance**

- Limpieza  $\approx 57$  min y escalado  $\approx 37$  min; reducciones aproximadas de doce por ciento y dieciocho por ciento, respectivamente.
- Productividad con incremento sostenido, consistente con la disminución de tiempos no productivos; avance medio diario  $\approx 3.7$  m, que en treinta días suma  $\approx 111$  m (equivale a 74% del tramo de 150 m).

#### **3.3.6.2.4. Condiciones de ejecución observadas**

- Burden y espaciamiento dentro de las bandas objetivo con  $E/B < 1$  sostenido en el contorno.
- Taco inerte estabilizado alrededor del objetivo, compacto y uniforme en toda la columna.
- Secuencia con precorte adelantado de forma consistente, protegiendo el contorno antes de la pega principal.

### **3.3.6.3.Comparación entre escenarios**

La lectura comparativa integra diferencias en nivel, variabilidad y desempeño global, con los mismos criterios de cálculo. Se presentan a continuación los cambios más relevantes, expresados como valores alcanzados y proporciones de cambio respecto al estado inicial, sin notación simbólica.

#### **3.3.6.3.1. Consumo específico**

- El factor de potencia pasa de 0.74 a 0.68 (disminución aproximada de ocho por ciento), con un estrechamiento evidente de la dispersión diaria.
- El factor de carga desciende de 2.00 kg/m<sup>3</sup> a 1.84 kg/m<sup>3</sup> (cerca de ocho por ciento menos).
- El consumo lineal se reduce de 24.5 kg/m a 22.5 kg/m (alrededor de seis por ciento menos).
- La proporción de días fuera de banda en kg/t baja de veinte por ciento a cinco por ciento.

#### **3.3.6.3.2. Calidad de contorno**

- La sobrerotura promedio se sitúa de diez por ciento a siete por ciento (reducción de treinta por ciento).
- Los eventos de sobrerotura alta disminuyen de seis a uno en treinta días.

#### **3.3.6.3.3. Fragmentación y ciclo operativo**

- P80 de dieciocho a dieciséis centímetros (once por ciento mejor); bolones de seis a cuatro por disparo (treinta y tres por ciento menos).
- Limpieza de sesenta y cinco a cincuenta y siete minutos (doce por ciento menos) y escalado de cuarenta y cinco a treinta y siete minutos (dieciocho por ciento menos).
- El ciclo diario resulta más corto y homogéneo, con menor variabilidad entre jornadas.

#### **3.3.6.3.4. Productividad, avance y cumplimiento**

- El avance medio diario crece de tres punto dos a tres punto siete metros (quince a dieciséis por ciento más).
- El avance acumulado a treinta días pasa de noventa y seis a ciento once metros (incremento de quince metros, equivalente a once a doce por ciento más).

En términos de la longitud de cruce de ciento cincuenta metros, el cumplimiento del periodo aumenta de sesenta y cuatro por ciento a setenta y cuatro por ciento.

#### **3.3.6.3.5. Costos unitarios**

- Con costo de explosivo por kilogramo constante, el costo de explosivo por metro cae en torno a ocho por ciento, en línea con la reducción de kg/m.

Al considerar menos sobrerotura y menores tiempos de limpieza/escalado, el costo total por metro se reduce en el orden de doce a quince por ciento, dependiendo de los precios locales de sostenimiento y del costo de hora-hombre.

#### **3.3.6.3.6. Consolidación semanal y robustez**

- En el corte por semanas (razón de sumas), el kg/t global es más bajo en la mayoría de las semanas del escenario mejorado, y la sobrerotura promedio semanal se mantiene por debajo de la línea base en forma consistente.
- La tendencia de mejora aparece semana a semana, lo que sugiere que los ajustes no solo producen un nivel más bajo, sino también un proceso más estable y repetible.

#### **3.3.6.3.7. Implicancias finales para la operación**

- La combinación de energía dosificada, malla dentro de tolerancias estrechas, taco inerte suficiente y precorte adelantado reduce el daño al contorno, mejora la fragmentación y acorta tiempos críticos.

- El resultado operativo es un ciclo más corto y predecible, mayor productividad, mejor alineación con la meta de longitud y un costo por metro más bajo, con un esquema de control diario y semanal capaz de sostener estas ganancias en el tiempo.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Síntesis de resultados

Antes de presentar los detalles por eje temático, conviene dejar claro qué se ha medido y con qué propósito. El estudio se apoyó en treinta disparos consecutivos en el crucero 2745 (sección  $3.5 \times 3.5$  m, densidad  $2.7 \text{ t/m}^3$ , un disparo por día), con registro estandarizado, depuración de datos, cálculo de indicadores comparables y una segunda fase con ajustes operativos (malla estabilizada con  $E/B < 1$ , taco inerte objetivo  $\approx 1.20$  m, precorte adelantado y carga lineal controlada en  $1.6 \text{ kg/m}$ ). La síntesis que sigue integra desempeño energético ( $\text{kg/t}$ ,  $\text{kg/m}^3$ ,  $\text{kg/m}$ ), calidad del contorno (% de sobreexcavación), resultado granulométrico (P80, bolones), tiempos críticos (limpieza y escalado), productividad ( $\text{m/h}$ ), avance y costos. El énfasis no es solo en niveles promedio, sino también en la estabilidad diaria, porque de ella depende la replicabilidad y el cumplimiento del plan.

El contraste de escenarios muestra un patrón consistente: con energía específica centrada en  $0.68 \text{ kg/t}$ , malla en tolerancias estrechas y taco inerte estable, la sobreexcavación disminuye, la fragmentación mejora y el ciclo se acorta. En términos cuantitativos: el factor de potencia pasó de  $\sim 0.74$  a  $0.68 \text{ kg/t}$ ; la sobreexcavación media de  $10\%$  a  $7\%$ ; P80 de  $18$  a  $16 \text{ cm}$ ; bolones de  $6$  a  $4$  por disparo. La limpieza y el escalado bajaron a  $\sim 57$  y  $37 \text{ min}$  (antes  $\sim 65$  y  $45$ ), la productividad creció en torno a  $15\text{--}16\%$ , el avance acumulado aumentó de  $96$  a  $111 \text{ m}$  en treinta días y el costo total por metro se redujo aproximadamente  $12\text{--}15\%$ . Además, los días con  $\text{kg/t}$  fuera de banda descendieron de  $20\%$  a  $5\%$ , señal de un proceso más controlado.

#### **4.1.1. Relación entre consumo de explosivos y sobreexcavación**

Antes de cuantificar, es útil recordar la lógica física que guía este vínculo: el perímetro se protege cuando la energía específica es la adecuada y está bien confinada; de poco sirve fijar una carga lineal si el taco es insuficiente o la malla se abre, porque la onda se transmite al contorno. Esta sección interpreta la serie diaria desde esa óptica, conectando el nivel de kg/t con la respuesta del contorno y modulándolo por tres llaves operativas: carga lineal, taco y geometría (burden, espaciamiento, paralelismo).

- **Energía específica y sobreexcavación.** En la línea base, los días por encima de 0.72 kg/t concentraron sobreexcavación en torno a 12–13%, frente a 9–10% cuando la energía se mantuvo dentro de banda. Tras los ajustes, con la serie centrada en 0.68 kg/t, la sobreexcavación media se situó alrededor de 7% y los máximos puntuales quedaron por debajo de 10%, prácticamente sin jornadas críticas.
- **Carga lineal y taco inerte.** Combinaciones de carga lineal alta con taco corto dispararon el daño perimetral. Con taco  $\approx 1.20$  m (material inerte seco y compactado) el contorno respondió de forma más uniforme: en la base, tacos por debajo de 1.0 m se asociaron a 11–12% de sobreexcavación; con tacos de 1.2 m o más, el rango cayó hacia 9–10%.
- **Burden/espaciamiento y paralelismo.** Tramos con E/B cercano o superior a 1 y desviaciones angulares del contorno mostraron mayor pérdida de perfil; al sostener  $E/B < 1$  y paralelismo de barrenación, la línea de rotura fue más limpia y el perímetro quedó mejor conservado.

En suma, la relación no es solo “más kg/t  $\rightarrow$  más sobreexcavación”, sino “energía mal distribuida o mal confinada  $\rightarrow$  más sobreexcavación”. La estabilización conjunta de kg/t, taco y malla explica la caída sostenida del daño y la desaparición de picos.

#### ***4.1.2. Impacto de los ajustes en la mejora del proceso de precorte***

Antes de listar resultados, vale precisar cómo se juzga el éxito de un ajuste: debe bajar niveles, estrechar variabilidad y mejorar el ciclo sin penalizar el avance. Por eso se midió simultáneamente consumo específico, contorno, fragmentación y tiempos, y se evaluó el efecto en productividad, avance y costos. El impacto se describe a continuación con cifras representativas del periodo analizado.

- Consumo específico más bajo y estable. El factor de potencia se ubicó en 0.68 kg/t y mostró menor dispersión diaria; el factor de carga fue  $\sim 1.84$  kg/m<sup>3</sup> y el consumo lineal  $\sim 22.5$  kg/m. Los días fuera de banda en kg/t cayeron a 5%.
- Mejor contorno y fragmentación. La sobreexcavación media descendió a  $\sim 7\%$  (unos treinta por ciento menos que al inicio) y desaparecieron los extremos altos. El P80 promedió  $\sim 16$  cm y los bolones  $\sim 4$  por disparo.
- Ciclo más corto y mayor productividad. La limpieza y el escalado se redujeron a  $\sim 57$  y  $\sim 37$  minutos; la productividad creció 15–16%. Con un disparo diario, el avance a treinta días subió de 96 a 111 m.
- Ahorro en costos. El costo de explosivo por metro se redujo cerca de 8% y el costo total por metro 12–15%, combinando menor sobreexcavación (menos sostenimiento y retrabajo) y tiempos críticos más bajos.
- Robustez semanal. En los cortes por campaña, el kg/t global y la sobreexcavación promedio semanal se mantuvieron consistentemente por debajo de la línea base, lo que confirma que la mejora no depende de días aislados.

#### **4.1.3. Principales hallazgos que responden al problema de investigación**

Antes de enumerarlos, conviene alinear la pregunta central: ¿es posible mejorar el precorte aplicando análisis de datos para dosificar el consumo y reducir la sobreexcavación, sin sacrificar productividad ni avance? Con el marco, la evidencia y las métricas ya establecidas, los hallazgos que cierran esa brecha son los siguientes:

1. Energía adecuada y bien confinada: centrar el proceso en 0.68 kg/t, sostener 1.6 kg/m en contorno y asegurar taco  $\approx 1.20$  m con  $E/B < 1$  redujo la sobreexcavación media de 10% a 7% y eliminó picos altos, preservando la geometría de la labor.
2. Estabilidad operativa: reducir la dispersión de kg/t y homogeneizar taco y malla llevó los días fuera de banda de 20% a 5%; la fragmentación fue más uniforme, disminuyeron los bolones y se acortaron limpieza y escalado.
3. Productividad y cumplimiento: con ciclos más cortos, la productividad aumentó 15–16% y el avance acumulado en treinta días llegó a 111 m (frente a 96 m), mejorando el cumplimiento del tramo de 150 m dentro del mismo periodo de observación.
4. Eficiencia económica: al bajar kg/m, reducir la sobreexcavación y acortar tiempos, el costo total por metro se redujo aproximadamente 12–15%, sin comprometer el rendimiento.
5. Sostenibilidad del cambio: las bandas de control diarias, la conciliación de vales, la verificación de taco y malla, y el seguimiento semanal por razón de sumas permiten detectar desviaciones a tiempo y corregir con microajustes (por ejemplo,  $\pm 0.05$  kg/m en carga lineal), manteniendo el proceso dentro de su ventana operativa.

Con estos elementos, el estudio confirma que el uso disciplinado de análisis de datos, aplicado a dosificar y estabilizar la energía y a cuidar la geometría del contorno, mejora de forma

medible y replicable el precorte en el crucero 2745: menos sobreexcavación, mejor fragmentación, mayor productividad y menor costo por metro.

## **4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### ***4.2.1. Evaluar la calidad del macizo rocoso mediante análisis geomecánico para mejorar la ejecución de la voladura de precorte***

La caracterización geomecánica realizada en el Crucero 2745 permitió clasificar el macizo rocoso en la categoría de roca buena según el sistema RMR, condición que favorece la aplicación de voladura de precorte con cargas desacopladas y espaciamientos moderados. Este resultado es coherente con el planteamiento de Bieniawski (1976, 1989), quien sostiene que una adecuada clasificación del macizo constituye la base para seleccionar parámetros de diseño que minimicen daños en el contorno y mejoren la estabilidad de las excavaciones subterráneas.

En el presente estudio, la condición de roca buena se traduce en un mejor control del contorno y en una reducción de la sobreexcavación, que posteriormente se cuantifica en el paso de 0.45 a 0.36 m<sup>3</sup>/m (aproximadamente 20 % de disminución). A nivel internacional, Carreño y Correa (2015) muestran que, en ambientes de roca competente, la implementación de precorte permite disminuir de forma significativa la sobrerotura respecto a los métodos convencionales, lo que coincide cualitativamente con la tendencia observada en el Crucero 2745. De manera similar, a nivel nacional, Pomasoncco (2021) evidencia que una correcta caracterización geomecánica y la definición de dominios de roca conducen a una reducción apreciable de la sobrerotura en la mina MARSA, mientras que Estela & Estela (2020) refuerzan que el conocimiento detallado del macizo permite ajustar la malla de perforación y la energía de detonación.

En conjunto, la comparación entre los resultados obtenidos y los antecedentes internacionales y nacionales confirma que la evaluación geomecánica no solo describe el estado del macizo, sino que constituye un insumo crítico para mejorar la voladura de precorte y limitar el daño inducido. En el caso de estudio, la calidad RMR de roca buena explica en gran medida la posibilidad de alcanzar un contorno más estable y una sobreexcavación menor que la observada antes de la mejora del diseño.

#### ***4.2.2. Identificar e implementar estrategias basadas en Data Analytics para mejorar la voladura de precorte y disminuir la sobreexcavación***

La aplicación de Data Analytics sobre los registros de consumo de explosivos permitió desarrollar un modelo que vincula la carga lineal (kg/m) con la respuesta del macizo, logrando reducir la desviación estándar del consumo de 6.5 a 2.8 kg/m<sup>3</sup>, es decir, una disminución cercana al 57 %. Esta reducción de la variabilidad implica un patrón de carga más homogéneo y un control más preciso de la energía transmitida al contorno, lo que se refleja en la mejora de los indicadores de sobreexcavación.

Estos hallazgos son consistentes con los planteamientos de la minería 4.0 y del Data Analytics aplicados a la voladura, donde Taggart (2019) destaca el uso de modelos estadísticos y de regresión multivariable para mejorar parámetros de operación y reducir la dispersión de los resultados. A nivel internacional, Carreño y Correa (2015) muestran que la verificación geométrica del precorte y el ajuste sucesivo de parámetros permiten cerrar la brecha entre el diseño y la excavación final, mientras que, a nivel nacional, Mendoza (2014) demuestra que el uso de modelos matemáticos (como el de Holmberg & Chiappetta) posibilita ajustar el burden y la densidad de carga, generando reducciones significativas en el costo unitario de voladura. Asimismo, Estela &

Estela (2020) reportan que el control estadístico de la secuencia de disparo con herramientas digitales mejora los avances lineales y la eficiencia de la operación.

En comparación con estos antecedentes, el presente trabajo aporta evidencia de que el Data Analytics aplicado específicamente al control de la carga lineal y a la variabilidad del consumo se traduce en una operación más estable y repetible. Mientras que los estudios previos enfatizan la mejora de parámetros de diseño y secuencia de disparo, en el Crucero 2745 se demuestra que el uso sistemático de análisis de datos sobre información histórica permite reducir la dispersión de consumos y, en consecuencia, contribuir a la disminución de la sobreexcavación, en coherencia con los resultados reportados por Mendoza (2014) y Estela & Estela (2020).

#### ***4.2.3. Analizar el impacto del uso de Data Analytics en la reducción de costos de sostenimiento por disminución de sobreexcavación***

Uno de los impactos más relevantes de la mejora de la voladura de precorte mediante Data Analytics se observa en los costos de sostenimiento. En el caso de estudio, los costos pasan de 12 a 9.6 USD/m<sup>3</sup>, lo que representa una reducción del orden del 20 %, asociada directamente a la disminución del volumen de sobreexcavación de 0.45 a 0.36 m<sup>3</sup>/m. Esta reducción implica menor volumen de roca dañada y, por tanto, menor requerimiento de pernos, mallas y shotcrete en el contorno del crucero.

La teoría de voladura controlada, sintetizada por Jimeno et al. (2011), establece que la energía excedente de detonación genera agrietamiento periférico que incrementa las necesidades de sostenimiento. Los resultados del Crucero 2745 confirman esta relación: al regular la energía útil del explosivo mediante ajustes sustentados en Data Analytics, se reducen tanto el daño al macizo como los costos de refuerzo. A nivel nacional, Mendoza (2014) muestra que la mejora de la columna de carga con explosivos de menor densidad conlleva ahorros significativos en

sostenimiento, mientras que Pomasoncco (2021) reporta que la mejora del precorte se traduce en disminuciones apreciables del consumo de elementos de soporte.

Al comparar los resultados, se observa que la reducción del 20 % en costos de sostenimiento obtenida en este trabajo se alinea con la tendencia descrita en dichos antecedentes, que señalan ahorros relevantes cuando se controla el daño al contorno. Si bien las magnitudes exactas de ahorro varían entre estudios debido a las condiciones geomecánicas y a los costos locales, la relación causal es coincidente: menor sobreexcavación implica menor volumen a sostener y, en consecuencia, menores costos asociados. Así, los hallazgos del presente estudio refuerzan empíricamente la conexión entre mejora del precorte, control de daño y eficiencia económica del sostenimiento.

#### ***4.2.4. Mejorar el proceso de voladura de precorte mediante la aplicación de Data Analytics en el consumo de explosivos y reducir la sobreexcavación***

El análisis estadístico de los datos procesados en el marco de la presente investigación arrojó una correlación  $r = -0.82$ , con  $p < 0.01$  ( $N = 120$ ), entre el consumo específico de explosivo y la sobreexcavación, lo que indica una relación inversa fuerte y estadísticamente significativa. Es decir, a medida que el consumo se aproxima al valor óptimo definido mediante Data Analytics, la sobreexcavación disminuye de manera consistente. Este resultado permite aceptar la hipótesis general del estudio: la aplicación de Data Analytics optimiza el consumo de explosivos y contribuye a reducir la sobreexcavación en el Crucero 2745.

Al contrastar estos hallazgos con los antecedentes, se observa que Mendoza (2014) reporta una correlación negativa similar ( $r = -0.79$ ) en la Unidad Paraíso, al modelar matemáticamente el burden y el espaciado en función de propiedades geomecánicas y parámetros operativos. Por su parte, Carreño & Correa (2015) evidencian que el uso del precorte reduce la sobrerotura en

aproximadamente 40 % frente a métodos convencionales de voladura, mientras que Pomasoncco (2021) y Estela & Estela (2020) confirman que el ajuste sistemático del diseño y el control digital de la secuencia de disparo permiten mejoras consistentes en los indicadores de avance y calidad de contorno.

En el contexto internacional, los resultados de este trabajo se ubican en la misma línea que las investigaciones que integran modelos estadísticos en la ingeniería de voladura, al demostrar que la correlación entre consumo óptimo y sobreexcavación no es solo teórica, sino verificable en operación real. En el ámbito nacional, la coincidencia de magnitudes de correlación con la reportada por Mendoza (2014) refuerza la validez de la estrategia basada en Data Analytics. En síntesis, la evidencia empírica obtenida en el Crucero 2745, comparada con los antecedentes internacionales y nacionales, confirma que la integración de análisis de datos en el diseño y control de la voladura de precorte permite alcanzar excavaciones más precisas, reducir la sobreexcavación y, en consecuencia, mejorar la estabilidad geotécnica y la eficiencia económica del proceso.

#### **4.2.5. *Análisis de costos***

El análisis de costos constituye un elemento clave para evaluar el impacto económico de la optimización del proceso de voladura de precorte en el desarrollo del crucero 2745 de la zona Balcón en la Unidad Minera Parcoy. En minería subterránea, el costo unitario de desarrollo por metro lineal excavado está influenciado por múltiples variables operativas, entre las cuales destacan el consumo de explosivos, la eficiencia de la fragmentación, el nivel de sobreexcavación, los tiempos del ciclo de limpieza y escalado, así como la cantidad de sostenimiento requerido para estabilizar la excavación.

En el presente estudio se realizó un análisis comparativo entre dos escenarios operativos: el Escenario 1 (condición base) y el Escenario 2 (escenario optimizado). El Escenario 1

corresponde al método de carguío y diseño de voladura originalmente utilizado en la operación, mientras que el Escenario 2 incorpora ajustes técnicos en los parámetros de carguío derivados del análisis de datos, tales como la optimización del taco inerte, el espaciamiento de cartuchos explosivos y la reducción del consumo específico de explosivos.

El análisis económico se desarrolló considerando una sección de excavación de  $3.5 \times 3.5$  m, equivalente a un área de  $12.25 \text{ m}^2$ , y una densidad promedio del macizo rocoso de  $2.7 \text{ t/m}^3$ . Bajo estas condiciones, el volumen de roca removida por metro lineal excavado corresponde aproximadamente a  $12.25 \text{ m}^3$ , lo que representa un peso promedio de 33.08 toneladas por metro de avance.

### **Consumo específico de explosivos**

Uno de los indicadores más relevantes para el análisis de costos es el factor de potencia (kg/t), el cual relaciona la cantidad de explosivo utilizado con el volumen o tonelaje de roca fragmentada. En el Escenario 1 se registró un factor de potencia promedio de  $0.74 \text{ kg/t}$ , mientras que en el Escenario 2 este valor se redujo a  $0.68 \text{ kg/t}$ , producto de una mejor distribución de la carga explosiva y una optimización en el diseño de la voladura.

Considerando el tonelaje promedio por metro de avance ( $33.08 \text{ t/m}$ ), el consumo de explosivos por metro excavado se estimó de la siguiente manera:

- Escenario 1:
  - $0.74 \text{ kg/t} \times 33.08 \text{ t/m} = 24.48 \text{ kg}$  de explosivo por metro
- Escenario 2:
  - $0.68 \text{ kg/t} \times 33.08 \text{ t/m} = 22.49 \text{ kg}$  de explosivo por metro

Asumiendo un costo promedio de explosivo tipo emulsión de S/ 9.00 por kilogramo, el costo de explosivos por metro excavado se estimó en:

- Escenario 1:
- $24.48 \text{ kg} \times \text{S}/ 9.00 = \text{S}/ 220.32$  por metro
- Escenario 2:
- $22.49 \text{ kg} \times \text{S}/ 9.00 = \text{S}/ 202.41$  por metro

Esto representa una reducción aproximada del 8.1 % en el costo de explosivos por metro de avance.

**Tabla 20**

*Consumo de explosivos por metro de avance*

<b>Parámetro</b>	<b>Escenario Base</b>	<b>Escenario Optimizado</b>
<b>Factor de potencia (kg/t)</b>	0.74	0.68
<b>Tonelaje por metro (t/m)</b>	33.08	33.08
<b>Consumo de explosivos (kg/m)</b>	24.48	22.49
<b>Costo unitario explosivo (S/ kg)</b>	9.00	9.00
<b>Costo explosivos por metro (S/)</b>	220.32	202.41
<b>Reducción de costo</b>	–	<b>8.1 %</b>

### **Impacto de la sobreexcavación en los costos**

Otro factor determinante en el costo de desarrollo es el nivel de sobreexcavación, ya que este genera un incremento en el volumen de roca removida y aumenta la necesidad de sostenimiento adicional. En el escenario base se registró un nivel de sobreexcavación promedio de 10 %, mientras que en el escenario optimizado este valor se redujo a 7 %, gracias al mejor control del contorno de la excavación obtenido mediante la optimización del diseño de voladura.

El volumen de sobreexcavación por metro se estimó de la siguiente manera:

- Escenario 1:
- $12.25 \text{ m}^3 \times 10 \% = 1.23 \text{ m}^3$  adicionales por metro
- Escenario 2:
- $12.25 \text{ m}^3 \times 7 \% = 0.86 \text{ m}^3$  adicionales por metro

Esto implica una reducción de aproximadamente 0.37 m<sup>3</sup> de roca adicional por metro excavado. Considerando un costo promedio de sostenimiento y manejo de material de S/ 150 por m<sup>3</sup>, la reducción de sobreexcavación representa un ahorro aproximado de:

$$0.37 \text{ m}^3 \times \text{S}/150 = \text{S}/ 55.50 \text{ por metro}$$

**Tabla 21**

*Impacto económico de la sobreexcavación*

<b>Parámetro</b>	<b>Escenario Base</b>	<b>Escenario Optimizado</b>
<b>Sección de excavación (m<sup>2</sup>)</b>	12.25	12.25
<b>Sobreexcavación (%)</b>	10 %	7 %
<b>Volumen adicional (m<sup>3</sup>/m)</b>	1.23	0.86
<b>Diferencia de volumen (m<sup>3</sup>/m)</b>	–	0.37
<b>Costo unitario manejo de roca (S/ m<sup>3</sup>)</b>	150	150
<b>Costo adicional (S/ m)</b>	184.50	129.00
<b>Ahorro por metro</b>	–	<b>S/ 55.50</b>

### **Impacto en los tiempos operativos**

Los resultados del análisis también evidenciaron mejoras en los tiempos del ciclo operativo. En el escenario base, los tiempos promedio registrados fueron:

- Limpieza: 70 minutos
- Escalado: 50 minutos

En el escenario optimizado estos tiempos se redujeron a:

- Limpieza: 57 minutos
- Escalado: 37 minutos

Esto representa una reducción total de aproximadamente 26 minutos por ciclo de disparo, lo cual incrementa la disponibilidad operativa de los equipos y mejora la productividad del desarrollo.

## Impacto en la productividad

En el escenario base se obtuvo un avance promedio de 3.2 m por disparo, lo que permitió alcanzar un avance acumulado de 96 m en 30 días de operación. En contraste, el escenario optimizado logró un avance promedio de 3.7 m por disparo, alcanzando un avance acumulado de 111 m en el mismo periodo, lo que representa un incremento de productividad aproximado del 15.6 %. Este incremento en el avance reduce el costo unitario por metro excavado, debido a una mejor utilización de los recursos operativos.

**Tabla 22**

*Comparación de indicadores operativos*

<b>Indicador</b>	<b>Escenario Base</b>	<b>Escenario Optimizado</b>
<b>Factor de potencia (kg/t)</b>	0.74	0.68
<b>Sobreexcavación (%)</b>	10 %	7 %
<b>Avance por disparo (m)</b>	3.2	3.7
<b>Avance en 30 días (m)</b>	96	111
<b>Productividad</b>	–	+15.6 %

## Evaluación económica global

Al integrar los diferentes componentes del análisis económico, se observa que la optimización del diseño de voladura genera una reducción significativa en los costos operativos por metro excavado. La disminución del consumo de explosivos, la reducción de la sobreexcavación y la mejora en la productividad contribuyen de manera conjunta a mejorar la eficiencia económica del proceso. En términos globales, los resultados del análisis indican que el costo total por metro excavado se reduce entre un 12 % y un 15 % en el escenario optimizado, lo cual demuestra que la implementación de técnicas de Data Analytics en el análisis y control de los parámetros de voladura constituye una estrategia eficaz para mejorar la eficiencia operativa y económica en labores de desarrollo minero subterráneo.

## CONCLUSIONES

- La investigación concluye que la mejora del proceso de voladura de precorte en el Crucero 2745 de la Zona Balcón fue posible mediante la aplicación de Data Analytics al análisis del consumo de explosivos y su relación con la sobreexcavación. El procesamiento, depuración e interpretación de los datos operativos permitió identificar patrones de consumo, desviaciones en los parámetros de voladura y oportunidades de ajuste técnico, logrando un mejor control del contorno excavado. Como resultado, la sobreexcavación se redujo de 10 % a 7 %, el factor de potencia disminuyó de 0.74 kg/t a 0.68 kg/t y el avance promedio por disparo aumentó de 3.20 m/día a 3.70 m/día, evidenciando una mejora técnica, operativa y económica en el desarrollo de la labor.
- Respecto al primer problema específico, se concluye que la evaluación de la calidad del macizo rocoso mediante análisis geomecánico permitió reconocer las condiciones estructurales y resistentes del terreno en el Crucero 2745, constituyéndose en una base técnica indispensable para el diseño de la voladura de precorte. La caracterización geomecánica facilitó la interpretación del comportamiento de la roca frente a la energía explosiva, permitiendo comprender que la calidad del macizo influye directamente en la generación de sobreexcavación, daño perimetral y necesidad de sostenimiento. En consecuencia, el análisis geomecánico no solo cumplió una función descriptiva, sino también una función operativa para orientar la mejora del diseño de voladura.
- En relación con el segundo problema específico, se concluye que las estrategias basadas en Data Analytics permitieron identificar e implementar ajustes técnicos concretos en la voladura de precorte, tales como el control de la relación espaciamiento/burden, el uso de un taco inerte de aproximadamente 1.20 m, la secuencia adelantada del precorte y una carga

lineal cercana a 1.6 kg/m. Estos cambios mejoraron la distribución y confinamiento de la energía explosiva en el contorno de la excavación, reduciendo el daño al macizo rocoso y mejorando la calidad de la fragmentación. Ello se reflejó en la reducción del P80 de 18 cm a 16 cm y en la disminución del número de bolones de 6 a 4 por disparo, demostrando que el análisis de datos puede traducirse en decisiones operativas efectivas.

- En cuanto al tercer problema específico, se concluye que el uso de Data Analytics en el proceso de voladura de precorte tuvo un impacto favorable en la reducción de los costos asociados a la sobreexcavación. La mejora del control del contorno permitió disminuir la necesidad de sostenimiento adicional, reducir retrabajos y optimizar el consumo de explosivos, generando una reducción aproximada de 8 % en el costo de explosivos por metro y entre 12 % y 15 % en el costo total por metro excavado. Por tanto, la aplicación de herramientas analíticas no solo mejora la eficiencia técnica de la voladura, sino que constituye también una alternativa viable para fortalecer la rentabilidad y sostenibilidad operativa de las labores subterráneas

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar de manera permanente el uso de herramientas de Data Analytics en el control del proceso de voladura de precorte, con el fin de registrar, depurar, analizar e interpretar sistemáticamente los datos relacionados con el consumo de explosivos, la sobreexcavación, la fragmentación y el rendimiento operativo. La continuidad de este enfoque permitirá detectar oportunamente desviaciones en la ejecución de la voladura, optimizar la toma de decisiones y consolidar un sistema de mejora continua aplicable a otras labores subterráneas con características similares.
- Respecto al análisis geomecánico, se recomienda que la evaluación de la calidad del macizo rocoso se realice de manera periódica durante el avance de la labor, ya que las condiciones estructurales y geomecánicas pueden variar espacialmente dentro del crucero. Esta actualización permitirá adecuar de manera más precisa el diseño de la malla, la distribución de la carga explosiva y las medidas de sostenimiento a las condiciones reales del terreno, evitando decisiones generalizadas que puedan incrementar el daño perimetral o comprometer la estabilidad de la excavación.
- En relación con las estrategias de mejora basadas en Data Analytics, se recomienda estandarizar los parámetros operativos que mostraron mejores resultados en la investigación, especialmente la relación espaciamento/burden menor que 1, el uso de taco inerte de aproximadamente 1.20 m, la ejecución del precorte antes de la voladura principal y la carga lineal cercana a 1.6 kg/m. Asimismo, se sugiere fortalecer el control de calidad en las etapas de perforación, carguío y amarre, a fin de asegurar que los parámetros diseñados sean realmente ejecutados en campo con el nivel de precisión requerido.

- Finalmente, respecto al impacto económico, se recomienda ampliar futuras investigaciones hacia la incorporación de modelos predictivos que permitan anticipar niveles de sobreexcavación, consumo específico de explosivos, costos de sostenimiento y comportamiento del contorno en función de variables operativas y geomecánicas. De esta manera, el análisis de datos podrá evolucionar de una herramienta descriptiva a una herramienta predictiva y prescriptiva, capaz de mejorar de forma más integral la eficiencia económica y técnica de las operaciones de desarrollo minero subterráneo.

## BIBLIOGRAFÍA

- ACI Committee 506. (2005). 506R-05: Guide to Shotcrete. Obtenido de <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/15002>
- Andrade, B., & Gavilanes, H. (2004). Introducción a la ingeniería de túneles: caracterización, clasificación y análisis geomecánico de macizos rocosos. Quito - Ecuador.
- ASTM C94, C9. (2003). Especificaciones Normalizadas para el Hormigón Premezclado. doi: 19428-2959
- Azurín, R. (2023). Mejora de perforación y voladura para reducir sobrerotura en el bypass 2843 del Consorcio Minero Horizonte S.A. - Retamas 2021. [Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, Tesis de Grado], Abancay. Obtenido de [https://repositorio.unamba.edu.pe/bitstream/handle/UNAMBA/1338/T\\_131.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unamba.edu.pe/bitstream/handle/UNAMBA/1338/T_131.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Bieniawski, Z. (1989). Engineering Rock Mass Classifications (Vol. ). John Wiley & Sons.
- Camarena, F. (2016). Mejora del sostenimiento con shotcrete vía húmeda con fines de minimizar costos y mejorar la producción de lanzado de la E.E. Robocon S.A.C. En La Mina San Cristóbal - Cía Minera Volcan S.A.A. [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12894/3860>
- Deere, D., & Deere, D. (1988). The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice. Obtenido de [https://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge341/The%20Rock%20Quality%20Designation%20\(RQD\)%20in%20Practice.pdf](https://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge341/The%20Rock%20Quality%20Designation%20(RQD)%20in%20Practice.pdf)

- Estela, J., & Estela, K. (2020). Voladura controlada para reducir la deficiencia en los avances de las labores en mina subterránea. [Universidad Cesar Vallejo, Tesis de Grado], Chiclayo. Obtenido de [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/54417/B\\_Estela\\_YJ-Estela\\_YK-SD.pdf](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/54417/B_Estela_YJ-Estela_YK-SD.pdf)
- Hernandez-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta.
- Hoek, E., & Marron, E. (2019). Criterio de falla de Hoek-Brown y GSI – edición 2018. Revista de mecánica de rocas e ingeniería geotécnica, 11(3), 445-463. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775518303846>
- Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. (2015). Shotcrete - Guía Chilena del Hormigón Proyectado. Santiago de Chile. Obtenido de <https://ich.cl/documentos-shotcrete/2da-edicion-guia-chilena-de-hormigon-proyectado/>
- J., L. (s.f.). Gestión de los datos y su uso: data analytics. Universitat Oberta de Catalunya.
- Konya, C. J., & Konya, E. J. (1995). Primer on explosive engineering. International Society of Explosives Engineers.
- Laboratorio Oficial J.M. Madariaga - LOM. (2015). Proyecto N° 5.3. "Guía sobre Control Geotécnico en Minería Subterránea". Obtenido de <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/mineria/Seguridad/Guias/Gu%C3%ADas/Guia-control-geotecnico-mineria-subterranea.pdf>
- Linares, C. (2018). Determinación de resistencia temprana de hormigón proyectado: Correlación entre método normado UNE-EN 14488-2 y método alternativo. [Tesis de grado,

- Universidad de Chile], Santiago de Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/151305>
- López, J. (s.f.). Gestión de los datos y su uso: data analytics. Universitat Oberta de Catalunya.
- Mateo, R. (2013). Caracterización a Cortante de Hormigón Proyectado. [Tesis de Posgrado, Escola de Camins]. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/25834/706-TFM-500%20RICARDO%20ANT%20MATEO%20S.pdf>
- Mendoza, N. (2014). Mejora de la voladura controlada aplicando un modelo matemático en la unidad minera Paraíso-Ecuador. [Universidad Nacional del Centro del Peru, Tesis de Grado]. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12894/1339>
- Merrit, A. (1972). Geologic Prediction for Underground Excavations. Proc. Rapid Excav. Tunneling. Conf, 115-132. Obtenido de <https://trid.trb.org/View/125918>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones - MTC. (2016). Manual de Carreteras, Túneles, Muros y Obras Complementarias RD N° 18 – 2016 – MTC/14. Obtenido de [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH\\_PDF/MAN\\_4%20TMyOC-2016.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_4%20TMyOC-2016.pdf)
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2017). Guía para las Buenas Prácticas en el Diseño y Ejecución en Voladuras en Banco. Obtenido de [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/mineria/Explosivos/Guias/Guia\\_buenas\\_practicas\\_diseno\\_ejecucion\\_voladuras\\_banco.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/mineria/Explosivos/Guias/Guia_buenas_practicas_diseno_ejecucion_voladuras_banco.pdf)
- Monge, K. (2022). Reducción de rebote de Shotcrete Via Seca mediante la mejora del sostenimiento en la zona cuerpos de la Unidad Americana Alpayana S.A. – 2022. [Tesis

- de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú], Huancayo. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12894/9088>
- Muñoz, J., & Lafont de Sentenac, A. (2023). Optimizando la eficiencia en la minería: el papel clave de QA/QC en perforación y voladura. rocas y minerales.
- Pacheco, J. (2022). Propuesta de técnica de voladura controlada de Pre-corte para talud final, caso de estudio cantera Luzagui, Daule - Guayas. [Universidad del Azuay, Tesis de Grado], Cuenca. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/11947/1/17474.pdf>
- Persson, P. A., Holmberg, R., & Lee, J. (1994). Rock blasting and explosives engineering. CRC Press.
- Pomasoncco, A. (2021). Aplicación de la voladura de pre-corte en las labores de desarrollo de la mina MARSA para la reducir la sobrerotura en el macizo rocoso. [Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Tesis de Grado], Lima. Obtenido de [https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/655528/Pomasoncco\\_N\\_A.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/655528/Pomasoncco_N_A.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Rey, A. (2006). Hormigón proyectado. Dosificación, fabricación y puesta en obra. Cemento Hormigón, 48-63. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2192863>
- Reyes, E. (2019). Estudio de reducción del índice de rebote y evaluación del rendimiento de la mezcla fresca shotcrete en proyectos de espacios subterráneos. [Tesis de grado, Universidad Privada Antenor Orrego]. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12759/5586>
- Tenorio, J. (2016). Propuesta de Criterios de Aceptación o Rechazo de Testigos de Hormigón Proyectado Utilizado en Fortificación de Tunnels Mineros y Civiles. [Tesis de grado,

Universidad Andres Bello], Santiago de Chile. Obtenido de  
<https://core.ac.uk/download/pdf/288916404.pdf>

Vargas, E. (2017). Mejora del sostenimiento con shotcrete usando desmonte zarandeado como agregado, en la construcción de la rampa principal - marsa. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Trujillo]. Obtenido de <https://dspace.unitru.edu.pe/items/c5b9dc65-fb25-4559-99e5-26035464d03e>

## ANEXOS

### ANEXO 1

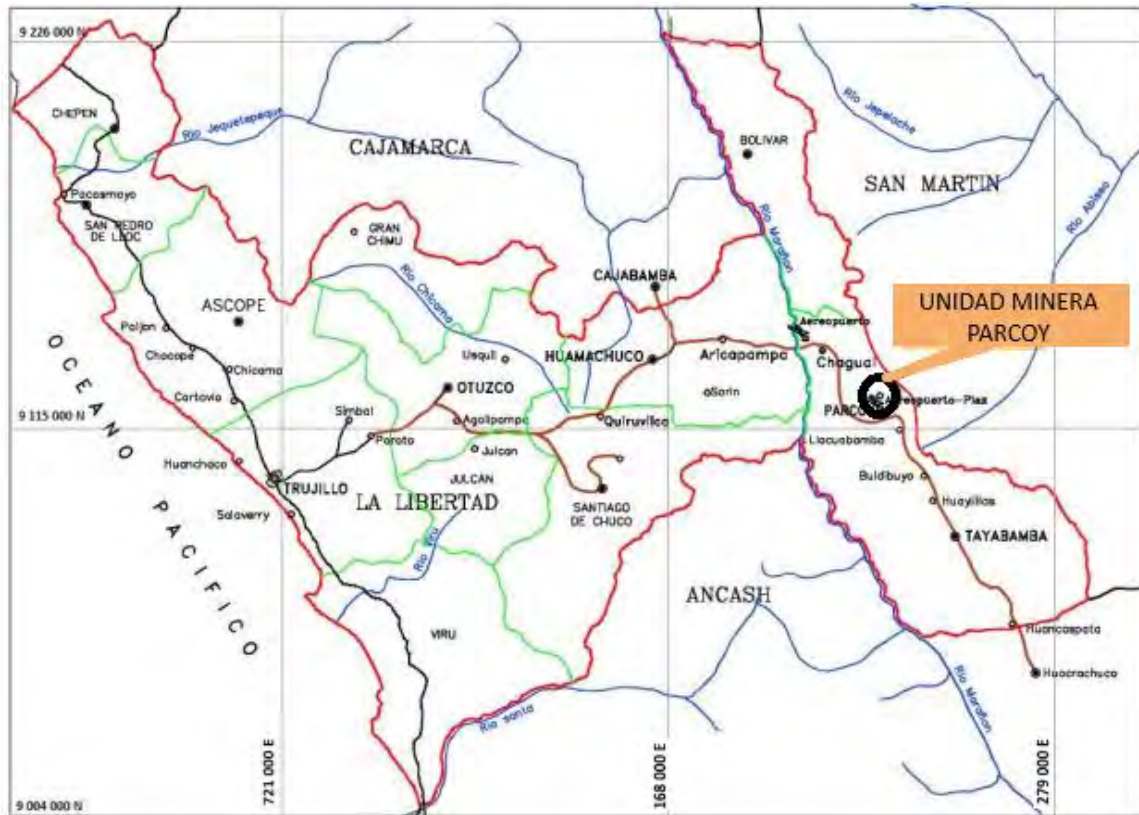
#### 5.1. Ámbito de Estudio y Geología

##### 5.1.1. Ubicación Geográfica

La Unidad Minera Parcoy de Consorcio Minero Horizonte S.A. está ubicada en la confluencia de los ríos Parcoy y Llacubamba en el Anexo de Retamas, Distrito de Parcoy, Provincia de Patate, Departamento de La Libertad. Sus coordenadas geográficas son 77° 29' 41" Longitud Oeste y 08° 02' 09" Latitud Sur, mientras que sus coordenadas UTM son E225023.60 y N9110903.5. La mina aurífera está situada a 500 Km. al Norte de Lima sobre el Flanco Oriental de la Cordillera De Los Andes y pertenece a la Cuenca Hidrográfica del Marañón.

**Figura 27**

*Ubicación de la Unidad Minera Parcoy*



Fuente: (Champi, 2019)

### 5.1.2. *Accesibilidad*

El acceso a la Unidad Minera Parcoy se da por vía terrestre y por vía aérea. A continuación se detalla la información:

**Tabla 23**

*Acceso a la Unidad Minera Parcoy por vía terrestre*

Tramo	Distancia (Km)	Tiempo (horas)
Lima - Trujillo	560	9
Trujillo – Chagual	440	9
Chagual - Retamas	40	3

Fuente: (Champi, 2019)

**Tabla 24**

*Acceso a la Unidad Minera Parcoy por vía aérea*

Tramo	Tiempo (horas)
Lima - Pías	9
Pías – Trujillo	9

Fuente: (Champi, 2019)

### 5.1.3. *Clima y Vegetación*

La zona se ubica entre las cotas 2000 y 3000 m.s.n.m. con un clima esencialmente templado, la vegetación de esta zona es abundante y variada dando la apariencia de ceja de selva, esto se debe a que llueve por espacio de 8 meses, presentando dos estaciones bien marcadas, una estación de invierno que va desde septiembre hasta fines de abril aproximadamente, y otra de verano, desde mayo hasta fines de agosto de tal forma que su vegetación se mantiene verde durante todo el año.

#### **5.1.4. Topografía y Drenaje**

La topografía de la región, en general, es abrupta. La superficie ha tenido como agente modelador, los eventos tectónicos y la erosión fluvial. De esta manera, se han formado profundos valles que alternan con elevaciones de fuertes pendientes; las cuales varían en distancias cortas entre 1800 a 4200 m.s.n.m. Los más característicos valles son aquellos formados por los ríos Marañón, Parcoy y Tayabamba registrándose las siguientes prominencias: Suyubamba (4250 m.s.n.m.), Calvario (4280 m.s.n.m.), Santa Rosa (3800 m.s.n.m.), Santa Mónica (4200 m.s.n.m.), Ventanas (3950 m.s.n.m.), El Gigante (4200 m.s.n.m.), Huascacocha (4400 m.s.n.m.) y Tomac (3850 m.s.n.m.).

El drenaje principal está conformado por el río Parcoy, que drena hacia el Noreste, pasando por la Laguna Pías, para luego desembocar al río Marañón, el que finalmente llega al río Amazonas.

#### **5.1.5. Geomorfología**

Parcoy forma parte de los yacimientos vetiformes orogénicos de la franja metalogenética aurífera del Batolito de Pataz, en el marco geológico regional afloran rocas del precámbrico como el Complejo Marañón.

El batolito de Pataz del Missisipiano, de 329 Ma, tiene aprox. 160 Km de largo (NW -SE), un ancho de 2,5 a 5 Km. El intrusivo está constituido probablemente por más de un facie plutónico. La mineralización tiene una edad de 314 Ma. Una secuencia sedimentaria desde el paleozoico al mesozoico con la formación Vijus, Contaya, grupo Ambo, Mitu Pucara, Gollarisquizga, formación Crisnejas, Chota; fines del mesozoico al cenozoico intrusiones de stocks porfiríticos, plutones terciarios, volcánicos de la formación Lavasen y finalmente depósitos Cuaternarios.

### **5.1.6. Geología General**

El depósito de Unidad Minera Parcoy comprende minerales como oro nativo, pirita, arsenopirita, pirrotita, esfalerita, calcopirita, galena, bornita y covelita, limonita, cuarzo, calcita y cerusita. Unidad Minera Parcoy presenta abundancia de oro en vetas emplazadas en las rocas intrusivas del Batolito de Pataz y que se extiende hasta la localidad de Buldibuyo.

### **5.1.7. Geología Regional**

#### **5.1.7.1.Litología**

Regionalmente la geología del distrito está dominada por tres franjas (fajas): El basamento Pre cambriano del Complejo Marañón al Este, el Batolito de Pataz del Carbonífero y los estratos deformados del Pérmico - Cenozoico al Oeste.

El complejo basal de Marañón consiste de meta sedimentos pizarrosos a esquistosos y rocas meta volcánicas y exhibe plegamiento complejo y formación de clivajes. Los estratos del Pérmico al Cenozoico están plegados en pliegues parados hasta volcados convergiendo hacia el oeste cerca del contacto con el batolito, pero más al oeste son homoclinales.

#### **5.1.7.2.Estratigrafía**

La Geología de la zona está vinculada a la evolución estratigráfica y estructural de la cordillera Andina del Norte del Perú, la cual está formada por la superposición de tres ciclos orogénicos:

#### **5.1.7.3.Precámbrico**

Corresponde a las rocas del Complejo Marañón y está formado por filitas, mica esquistos y meta volcánicos.

#### **5.1.7.4.Hercínico**

Está formado por las pizarras de la Formación Contaya. El plegamiento Eohercínico sucede en un periodo de distensión con la formación de una cuenca intramontañosa que es rellenada por rocas del Grupo Ambo, en el Permiano superior tenemos una acumulación volcánica andesítica conocida como Volcánico Lavasen, que tiene una amplia distribución en las partes altas de Parcoy principalmente al Este, margen derecha del río Parcoy. Una fase Epirogenética genera una emersión y la acumulación de las rocas ferruginosas del Grupo Mitu.

#### **5.1.7.5.Andino**

Es más notoria en la Cordillera Occidental, comienza con las calizas del Grupo Pucará, cubiertas posteriormente por areniscas del Grupo Goyllarisquizga, calizas de la Formación Crisnejas y por las capas rojas de la Formación Chota. Finalmente se encuentran depósitos aluviales, coluviales y fluviales del Cuaternario Reciente.

#### **5.1.7.6.Rocas Intrusivas Del Batolito De Pataz**

Durante el carbonífero las rocas de la zona hasta ese entonces depositadas, fueron afectadas por una gran intrusión magmática de composición calcoalcalina, denominada “Batolito de Pataz”. Posteriormente en el Paleógeno se produjeron emplazamientos intrusivos menores de composición diorítica a cuarzo monzonítica. La composición litológica del Batolito es ácida a intermedia, caracterizado por granodiorita, diorita y cuarzo-monzonita. Diques aplíticos, y andesíticos posteriores afectan al Batolito y en algunos casos cortan algunas vetas. La textura de las rocas plutónicas es variable, son comunes tonalitas y granodioritas con zonación a bordes dioríticos, así como pulsaciones más jóvenes de cuarzo-monzonita. En los bordes y cúpulas se observan microdiorita. El Batolito de Pataz, aflora con un rumbo promedio N30°W (lineamiento Andino), cuyo contacto con las rocas circundantes es irregular y fallado. Estructuralmente, el Batolito está

sumamente fracturado y fallado, probablemente porque es un cuerpo tabular estrecho, que se emplazó en una zona de falla extensional, que subsecuentemente se reactivó como una zona de falla inversa oblicua. El Batolito se encuentra afectado por fallas de cizalla producto de varios eventos tectónicos así como por diversas pulsaciones, presentando localmente intensa deformación. Su longitud reconocida en la región es de 210 Km. aproximadamente y con un ancho de 2 Km. en el sector de Parcoy, este macizo rocoso está controlado por dos lineamientos mayores de orientación N 30° W.

#### **5.1.8. Geología Local**

Las unidades rocosas identificadas se presentan desde el Precámbrico, seguido de unidades paleozoicas y sobreyacen rocas del Mesozoico y Cenozoico. La distribución general de las rocas clásticas se presenta en una franja en el sector occidental de la mina el cual está limitada por la falla regional Parcoy Yuracyacu; los intrusivos del batolito de Pataz se emplazan en la zona central y los volcánicos Lavasen en la zona oriental, a continuación se describen las unidades geológicas en la zona de influencia de la mina Parcoy.

##### **5.1.8.1. Complejo Del Marañón**

Constituye el basamento rocoso del yacimiento, está formada por un complejo de rocas metamórficas pertenecientes al precambriano y una parte de Cambriano. Está compuesta de tres unidades, la unidad inferior consiste en mica esquistos sobre el cual se emplaza una secuencia de meta-andesita verdosa con intercalaciones esquistosas y finalmente una unidad de filitas negras. Afloran en la parte alta de Culebrillas, parte alta de la quebrada Castilla.

#### **5.1.8.2. Formación Contaya-San José**

Es una secuencia de lutitas y pizarras negras y grises en láminas y capas delgadas, con pequeñas intercalaciones de cuarcitas en capas delgadas, aflora en pequeños apófisis en las vertientes altas de la margen izquierda del valle Parcoy y en las márgenes del río Marañón.

#### **5.1.8.3. Formación Tres Lagunas**

Consiste de lavas afaníticas de estructura almohadillada, aflora de manera discontinua en la margen izquierda de la quebrada. Castilla frente a la localidad de Retamas, sobreyace en discordancia angular al Complejo Marañón y a la Formación Contaya e infrayace en discordancia erosional al conglomerado del grupo Ambo y a rocas piroclásticas de la Formación Lavasén. Estas relaciones estratigráficas se observan a lo largo de la quebrada Ventanas y en la carretera a Retamas-Leymebamba. En la quebrada Castilla puede alcanzar hasta 600m de espesor incluyendo flujos lávicos estratificados.

#### **5.1.8.4. Grupo Ambo**

Consiste en areniscas, lutitas y conglomerados en capas delgadas y medianas de algunos cientos de metros de espesor, con fósiles de plantas del carbonífero que indican que se trata de una extensión del Grupo ambo de los Andes Centrales. Las areniscas son ligeramente feldespáticas de color gris marrón a verdoso. Las lutitas que se presentan intercaladas entre las areniscas generalmente tienen un color verde olivo, los conglomerados son duros, bien compactos y carecen de estratificación y presentan un color gris verdoso. El afloramiento principal sigue la vertiente alta de la margen occidental del río Parcoy.

#### **5.1.8.5. Volcánicos Lavasén**

Consiste en un conjunto de lavas andesíticas en la base e intercalaciones de areniscas volcánicas, conglomerados, lutitas grises, brechas, y rocas piroclásticas. La litología predominante

son tobas dacíticas o riolíticas y en menor proporción tobas andesíticas. Los piroclásticos sobreyacen sobre las rocas metamórficas del Complejo del Marañón y en la granodiorita del batolito de Pataz-Parcoy, presenta un relieve escarpado, caracterizado por farallones; los bancos macizos de piroclásticos dan lugar a pendientes muy fuertes. El espesor estimado es de 1500m. Los Volcánicos Lavasén son coetaneos con el batolito de Pataz, del Carbonífero superior, en algunos casos aflora en la zona central de la zona de estudio.

#### **5.1.8.6. Grupo Mitu**

Es una secuencia de rocas Paleozoicas constituido de areniscas y conglomerados de color rojo oscuro, aflora en las nacientes de la Quebrada Lúcumá, en discordancia angular sobre las rocas metamórficas del “Complejo Marañón”. El conglomerado basal del grupo se compone de elementos subredondeados de caliza de la Formación Copacabana, arenisca parda, andesita y roca metamórfica en una matriz de arenisca. La edad de esta unidad es del Paleozoico superior.

#### **5.1.8.7. Grupo Pucará**

Rodea la laguna de Pías y la margen izquierda del río Parcoy en su confluencia, también en las cimas de montañas al oeste de Retamas-Parcoy. Yace directamente encima del Grupo Mitu en discordancia paralela, consiste en la parte inferior del grupo por caliza gris clara, en bancos gruesos, en parte silicificada y con abundantes nódulos de sílice blanco, en la parte superior por caliza gris negra, bituminosa, bien estratificada en capas delgadas y pequeños lentes de sílice negro.

#### **5.1.8.8. Formación Goyllar**

Son sedimentos clásticos que se diferencian fácilmente de las formaciones calcáreas, consiste en una potente secuencia de cuarcitas, areniscas finas y lutitas de 1500 m. de espesor.

Aflora en discordancia sobre las calizas Pucará en la margen izquierda del río Parcoy cerca a la confluencia con la laguna Pías con un fuerte buzamiento como parte de un anticlinal.

#### **5.1.8.9. Formación Chulec-Pariatambo**

Aflora en las márgenes de la laguna Pías, la Formación Chulec, tiene la misma litología que la Formación Crisnejas, que representa la continuación del mismo hacia el Este; está delimitada tanto en su base como en su techo por discordancias, consiste en una secuencia de calizas, areniscas calcáreas y lutitas calcáreas, con un promedio de 200m. Las calizas son nodulares, arcillosas, de un color grisáceo a pardo claro, y se presenta en capas medianas a gruesas. Las otras litologías constituyen solamente una pequeña parte de la formación y vienen como intercalaciones entre las calizas.

#### **5.1.8.10. Formación Pullucana**

Son rocas competentes, consiste de calizas grises y claras en bancos medianos a gruesos, nodulares y con abundantes fragmentos fósiles. Los cambios abruptos de litología de las unidades infra y suprayacentes a la unidad facilitan el reconocimiento en campo donde las calizas forman barrancos y escarpados altos. Aflora en la vertiente oeste del río Parcoy por la zona de Trapiche, los contactos inferiores y superiores de esta unidad se presentan con ligeras discordancias paralelas.

#### **5.1.8.11. Formación Chota**

Aflora en el sector occidental de la mina Parcoy, consiste de capas rojas conformadas por areniscas, arcilitas y conglomerados de color rojo a marrón, amarillento, se encuentra en contacto con el batolito de Pataz mediante una falla regional y es el límite de la mineralización de Consorcio Minero Horizonte. La formación Chota representa la base de la sedimentación, a un grosor que alcanza hasta unos 500m.

### **5.1.8.12. Depósitos Cuaternarios**

#### **5.1.8.12.1. Depósitos aluviales**

Se ubican en el fondo del valle Parcoy, los aluviones se presentan como conos de deyección depositados por las quebradas y riachuelos; terrazas altas producto de la erosión del cauce del río sobre sus propios depósitos, y remanentes aluviales colgados en las laderas del río como una evidencia de antiguos aluviales y represamientos naturales del río (Aluvión de Alpamarca y Ñuñapampa). Los materiales son básicamente gravas y cantos redondeados, en una matriz de arena y limos. El aluvial es bastante compacto y forma casi verticales que varía de pocos a decenas de metros. El aluvión de Pías es un deslizamiento de grandes proporciones que represó el río Parcoy, dando lugar así al lago de Pías. El derrumbe alcanza casi 1 Km de ancho.

#### **5.1.8.12.2. Depósitos Fluvio-glaciáricos**

Se ubican en las zonas alto andinas sobre los 3,600 msnm. En las cuencas altas y áreas lagunares de la cuenca del río Parcoy; forma cordones morrénicos a medida que ocurría la regresión glaciaria que encierra lagunas y pantanos, compuesto de roca angulosa, clastos y guijarros sub angulosos con matriz arcillo limosa.

#### **5.1.8.12.3. Depósitos Coluviales**

Consiste de materiales de roca meteorizada y descompuesta el cual va acumulándose por gravedad y arraste hídrico en las laderas y al pie de las vertientes, formando derrubios y acumulaciones de naturaleza caótica sin estratificación, compuesto de fragmentos de rocas heterogéneos con una matriz limo-arcillosa, bastante inestable

### **5.1.9. Geología Estructural**

El Distrito minero ha sido afectado por los diferentes eventos tectónicos acaecidos en los últimos 300 M.a. dando como resultado una complejidad estructural muy marcada. No presenta

fuerte foliación, por lo que se supone que la corteza superior en una zona extensional. Dicha zona extensional se habría reactivado subsecuentemente como consecuencia de un sistema de fallas inversas oblicuas durante la mineralización. Las fallas producto de los eventos tectónicos Regionales, deben haber tenido un efecto en la distribución de zonas mineralizadas en el distrito de Parcoy, que incluyen fallamiento y plegamiento pre-mineral, sin-mineral y postmineral.

Los eventos pre-mineral incluyen deformación y metamorfismo en el Complejo Marañón Proterozoico la orientación estructural o direcciones de compresión no son muy reconocidas.

El contacto Occidental del Batolito es una falla Cenozoica tipo “strike-slip” (salto sobre su rumbo) orientada  $350^{\circ}/85^{\circ}$ , como lo indican las estriaciones de falla horizontal (“slickenlines”) observadas en la Quebrada Balcón. Esta falla es casi paralela a todas las vetas occidentales y probablemente sea una reactivación de una falla de primer orden sin-mineral.

Como en todos los sistemas de vetas, los controles estructurales de las vetas y clavos en el distrito de Parcoy son varios y complejos. De primera importancia son las fallas de primer-orden (NW-SE) huéspedes del mineral y que, probablemente controlan la inclinación general hacia el Sur de los clavos mineralizados.

Fuerzas tectónicas originaron fallas de cizalla, con movimiento sinistral en la mayoría de casos. Las vetas de cizalla presentan espejos de falla con estrías en varias direcciones y están por lo general limitados por capas pequeñas de panizo.

A lo largo del Batolito (210Km) se conocen varias minas en operación y otras abandonadas, destacando de Sur a Norte: Bloque Huaylillas: La Estrella, Bloque Buldibuyo: Minas de Marsa, Alaska y El Gigante, Bloque Parcoy: Consorcio Minero Horizonte, Bloque Pías: Minas Culebrillas, Ariabamba, Bloque Pataz: Minas de Poderosa S.A., El Tingo, La Lima y Papagayo.

Es importante destacar que los bloques Buldibuyo (Sur) y Pías, Pataz (Norte) contienen estructuras de muy bajo ángulo de buzamiento (20-40°E), mientras que en el bloque Parcoy (Central) las estructuras tienen altos ángulos de buzamiento (50-80°E) variación de Este a Oeste. Esta diferencia debida posiblemente a movimientos diferenciados de los Bloques post mineralización, que por basculamiento pudieran estar presentando actualmente un buzamiento diferente al original previo al basculamiento.

#### **5.1.10. Geología Económica**

##### **5.1.10.1. Yacimiento**

Se trata de un yacimiento tipo relleno de fisuras cuyos afloramientos algunas veces se dan como afloramientos ciegos, las principales vetas de Parcoy están en el cuerpo Granodiorítico.

Las vetas están oxidadas hasta unos 20 a 30 m de profundidad y el enriquecimiento secundario carece de la significación que alcanza por las leyes observadas en las secciones longitudinales. La composición del relleno mineral es bastante homogénea tanto en el sentido horizontal como en el vertical.

##### **5.1.10.2. Mineralogía**

La mineralogía de las Vetas de Consorcio Minero Horizonte S.A. se emplazó en los granitos, granodioritas, tonalitas y microtonalitas del Batolito de Pataz, al que se considera responsable de esta mineralización. Las soluciones mineralizantes circularon a través de las fracturas preexistentes y se depositaron a lo largo de estas; la reacción con las rocas encajonantes provocaron alteraciones hidrotermales causadas por los cambios físicos y químicos que imperaron en el ambiente.

El Contenido de mineral en las vetas de Retamas es relativamente simple; Cuarzo con Pirita acompañado con pequeñas cantidades Galena y otros sulfuros. De estudios mineralógicos

realizados anteriormente se tiene los siguientes resultados: minerales nativos (oro), minerales sulfuros (pirita, arsenopirita, pirrotita, esfalerita, calcopirita, galena, bornita y covelita), minerales óxidos (limonita) y minerales no metálicos (cuarzo, calcita y cerusita). A continuación se hace una descripción de las características de los diferentes minerales reconocidos.

#### **5.1.10.2.1. Oro**

Macroscópicamente el oro se observa en forma libre en el cuarzo y raramente en la pirita o arsenopirita.

#### **5.1.10.2.2. Electrum**

Es muy raro, pero se observa microscópicamente asociado a la pirita el oro.

#### **5.1.10.2.3. Pirita**

Se observa pirita de varias generaciones, una pirita probablemente de la primera generación, macroscópicamente se encuentra bien cristalizado en pequeños cubos generalmente dentro de las cajas o en la estructura mineralizada. Otra generación de la pirita aurífera también se presenta con cristales ahedrales y subhedrales menos diaclazados.

#### **5.1.10.2.4. Galena**

La galena es regularmente frecuente en todas las vetas de región.

#### **5.1.10.2.5. Esfalerita**

Por lo común está en la variedad de marmatita, macroscópicamente se le observa en pequeños cristales de color marrón que se encuentran rellenas en el micro fracturas de cuarzo, así como la pirita en la cual se observa que tiene inclusiones de oro nativo.

#### **5.1.10.2.6. Calcopirita**

Después de la pirita es uno de los minerales más frecuentes en las vetas de Pataz, se le observa en agregados de grano medio a grueso.

#### **5.1.10.2.7. Otros**

Cabe mencionar los siguientes: cuarzo, limonita, magnetita, pirolusita, calcita etc.

#### **5.1.10.3. Control de Mineralización**

Los valores económicos auríferos presentan una relación directa con los diferentes tipos texturales los mismos que están asociados a los diferentes eventos mineralógicos y tectónicos, así se ha podido establecer como cuarzo I (lechoso masivo sin pirita y pobre en oro), cuarzo II con Pirita I (color latón cristalizado, pirita diseminada a manera de puntos con pequeña presencia de oro), cuarzo III con Pirita II (de grano medio friable, relacionado al craquelamiento del cuarzo II con valores económicos de oro) y cuarzo IV con Pirita III (de grano fino friable y masivo relacionado a fallas paralelas son las más ricas, la galena y la esfalerita, son favorables a la formación del oro). La calcita se ha cristalizado posterior a todos los minerales, esto indica un ambiente de baja temperatura, la calcita es un control negativo, en profundidad la calcita tiende a disminuir por el aumento de temperatura y aumenta el oro.

#### **5.1.10.4. Clasificación de Mineral**

##### **5.1.10.4.1. Por su valor**

Se considera rangos para la clasificación los cuales son: mineral económico ( $\geq 10$  g/TM de Au), mineral marginal (10 – 8 g/TM de Au) y mineral sub. marginal (8 – 5 g/TM de Au).

##### **5.1.10.4.2. Por su certeza**

Esta clasificación implica las posibilidades de continuidad de la mineralización como mineral probado – probable, cuyo coeficiente de certeza es 2 a 1. El mineral prospectivo y potencial no se considera para la cubicación.

#### 5.1.10.4.3. *Por sus leyes*

Esta clasificación determina que mineral es explotable y rentable para ser tratado en la planta de beneficio de acuerdo al contenido de oro, y se clasifican en: desmonte (0 – 5 g/ TM de Au), mineral de evaluación (5 – 8 g/ TM de Au), mineral económico (8 – 12 g/ TM de Au) y mineral económico rentable ( $\geq 12$ g/TM de Au).

### ANEXO 2

#### *Resultados de Ensayo de Compresión Simple (UCS)*

**Tabla. Ensayo de resistencia a la compresión simple de muestras representativas**

<b>Muestra</b>	<b>Litología</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Altura (mm)</b>	<b>Carga máxima (kN)</b>	<b>UCS (MPa)</b>	<b>Clasificación</b>
M-01	Andesita	54	108	275	120	Alta
M-02	Andesita	54	108	310	136	Alta
M-03	Diorita	54	108	360	157	Muy alta
M-04	Diorita	54	108	395	172	Muy alta

**Fuente:** Elaboración propia con base en ensayos de laboratorio.

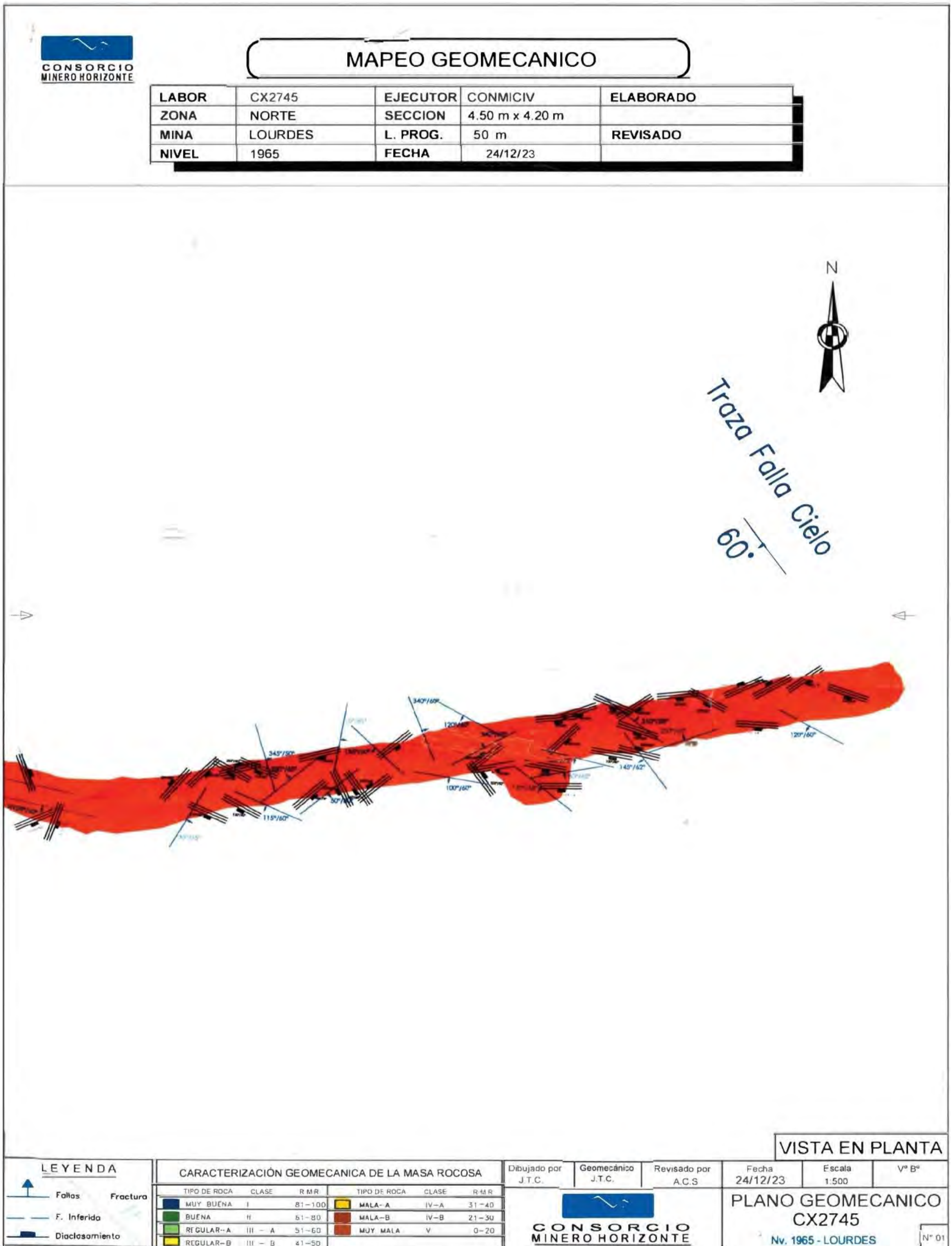
**Tabla. Resumen estadístico del UCS por litología**

<b>Litología</b>	<b>N° de muestras</b>	<b>UCS mínimo (MPa)</b>	<b>UCS máximo (MPa)</b>	<b>UCS promedio (MPa)</b>
Andesita	2	120	136	128
Diorita	2	157	172	164.5

**Fuente:** Elaboración propia.

Figura 28


Mapeo Geomecánico – Crucero 2745 Veta Lourdes



Fuente: Elaboración Propia

Figura 29

Estándar de Sostenimiento aplicado en el Crucero 2745 de la Zona Balcón



MINERO HORIZONTE

## ESTANDAR DE ESPECIFICACION TECNICA

### INSTALACIÓN DE SHOTCRETE Y PERNOS SWELLEX

ACUMULACION PARCOY N°1

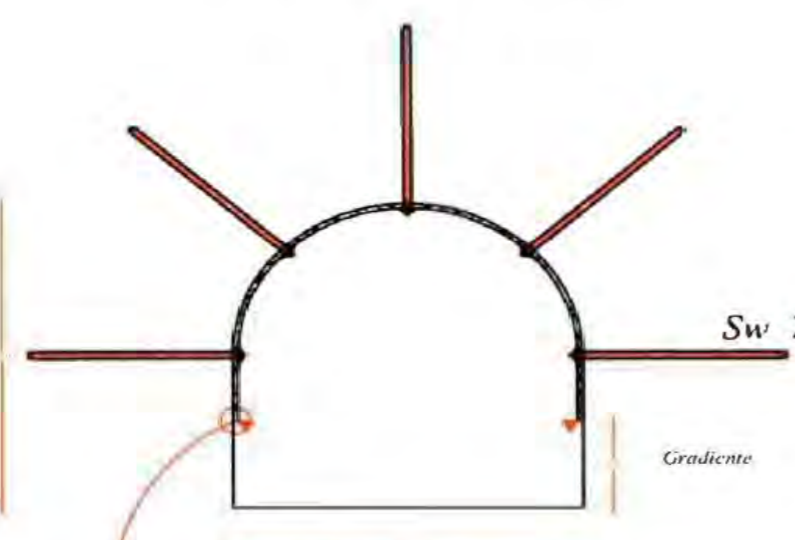
CÓDIGO : EET-01-E-2B

VERSIÓN : 01

F. VIGENCIA : 01/12/23

PÁGINA : 01

**Sección: 3.5 m x 3.5 m.**




Mortero y/o concreto lanzado (Shotcrete estructural)

límite interno




límite externo

e: espesor del concreto  
k = 0.25e respecto del eje neutral.

Taladro Perforado 7'Pies.



Perno Swellex 7' Pies.

PISTOLA DE SEGURIDAD
BOMBA
BOQUILLA

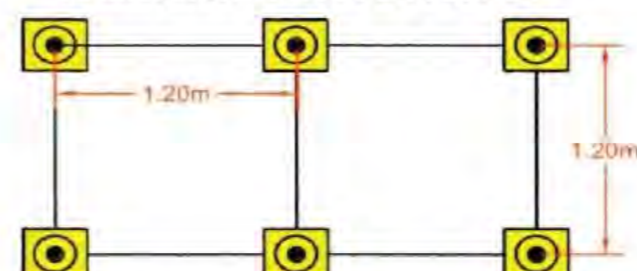
**PARAMETROS GEOMECÁNICOS DE LA MASA ROCOSA**

CLASIFICACIÓN RMR		CLASIFICACIÓN INDICE Q	
RES. COMP. UNI.	TIPO ROCA	Q	TIPO ROCA
25 - 50	MALA - B	21 - 30	Extremadamente Mala

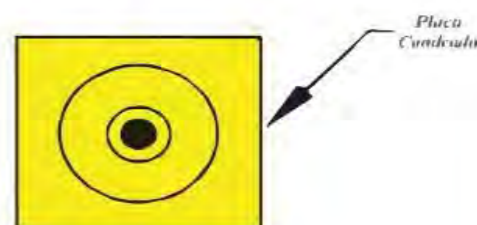
**TIPO DE SOSTENIMIENTO**

SEC. LABOR	CIMBRAS	SHOTCRETE	PERNOS	MALLA
3.5 m x 3.5 m	NO	2" de espesor con Fibra metálica, se lanzará 1" adicional, previa evaluación Geomecánica	Swellex 7' E= 1.2 x 1.2m Distrib. cuadrada.	NO

**MALLA SISTEMÁTICA DE PERNOS**



**VISTA FRONTAL**



Placa Conductiva

**METODOLOGIA**

- Lavar el techo y los hastiales con agua a presión.
- Realizar el desate de roca de forma minuciosa, utilizando la barretilla adecuada, según la sección de la labor.
- Aplicar una primera capa de shotcrete e instalar los calibradores (1 cal/m<sup>2</sup>)
- Completar la aplicación de Shotcrete a 2".
- Instalar Pernos Swellex 7' con el espaciamiento recomendado y de forma sistemática.
- Si se recomienda 3" de shotcrete, la última capa se instalara despues de colocado los pernos de anclaje.
- El Shotcrete será lanzado hasta la gradiente, cualquier cambio será previa evaluación Geomecánica.

<b>DISEÑO DEL SHOTCRETE (SFRS) / M3</b>		
Composición de Shotcrete por tipo de Acelerante		Recomendaciones
ALCALINO	LIBRE DE ALCALIS	Desate constante de rocas
1637 Kg de Agregado	1696 Kg de Agregado	Lavar techo y hastiales
400 Kg de Cemento	380 Kg de Cemento	Usar Calibrador: 1 calib./ m <sup>2</sup>
180 Lt de Agua	163 Lt de Agua	Lanzar el espesor Recomendado
2.5 Lt/m <sup>3</sup> de SH-5	2.7 Lt/m <sup>3</sup> de SH-5	Curado de shotcrete durante siete días.
20 - 25 Kg de Fibra metálica	20 - 25 Kg de Fibra metálica	
9 - 14 Lt de Aditivo Acelerante	20 - 25 Lt de Aditivo Acelerante	

Elaborado por :  
Superintendencia de Geomecánica

Fecha :

Revisado por :  
Ing. Luis Alberto Maldonado Zorrilla  
Superintendente de Geomecánica

Revisado por :  
Ing. Luis Alberto Gonzales Cueva  
Superintendente de SSOMA

Aprobado por :  
Ing. Daniel Ítalo Briones Alvarez  
Gerente Central de Operaciones

**Figura 30**

Malla de Perforación usada en el Cx 2745 – Zona Balcón

Fuente: Departamento de Perforación y Voladura CM Horizonte

