Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

Optimización del uso de explosivos en la voladura de rocas para incrementar la eficiencia y reducir costos de extracción

Tesis presentada por:

Mamani Quispe, Deyvis Anthony

ORCID: 0009-0009-8075-7153

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Montesinos Solorzano, Cesar Gerardo

ORCID: 0009-0001-8007-7862

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 27 de Agosto del 2026

Dictamen: 018534-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 018534, presentado por:

2016702261 - MAMANI QUISPE DEYVIS ANTHONY

Titulado:

OPTIMIZACIÓN DEL USO DE EXPLOSIVOS EN LA VOLADURA DE ROCAS PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA Y REDUCIR COSTOS DE EXTRACCIÓN

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR



29635304 - MORALES VALDIVIA JAVIER ANTONIO
DICTAMINADOR



46969384 - TICONA CORRALES SERGIO
DICTAMINADOR



OPTIMIZACIÓN DEL USO DE EXPLOSIVOS EN LA VOLADURA DE ROCAS PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA Y REDUCIR COSTOS DE EXTRACCIÓN

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%	18%	2%	10%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	7%
2	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	7%
3	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	repositorio.unjbg.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	Submitted to Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurimac Trabajo del estudiante	1%
6	Submitted to Universidad Nacional de Ingenieria Trabajo del estudiante	1%
7	repositorio.undac.edu.pe Fuente de Internet	1%
8	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC Trabajo del estudiante	<1%
9	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1%
10	tesis.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1%
11	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
12	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	<1%
13	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
14	WALSH PERU S.A. INGENIEROS Y CIENTIFICOS CONSULTORES. "EIA del Proyecto de Explotación de Cantera GNL-2, Cañete - Perú-IGA0000128", R.D. N° 291-2006-MEM/AAE, 2021	<1%

Dedicatoria

Dedico este logro a mis padres, Martín y Carmen, quienes han sido parte fundamental de mi camino personal y profesional. Su esfuerzo, sus enseñanzas y la confianza que depositaron en mí me dieron la fortaleza necesaria para continuar, incluso cuando las dificultades parecían superar mis posibilidades.

A mi hermana Milagros, por acompañarme en las distintas etapas de mi formación y por brindarme su apoyo en los momentos en que más lo necesité.

Este trabajo representa años de dedicación, sacrificios y aprendizajes. Por ello, quiero compartir esta satisfacción con mi familia, cuyo cariño y respaldo han sido esenciales para alcanzar una de las metas más importantes de mi vida.

Agradecimientos

En primer lugar, expreso mi gratitud a Dios por acompañarme a lo largo de este camino, darme la fortaleza para afrontar las dificultades y permitirme alcanzar una meta importante en mi formación profesional.

Agradezco a mis padres y familiares por su comprensión, sus palabras de aliento y el respaldo que me brindaron durante mis años de estudio. Su confianza fue una motivación constante para seguir adelante y culminar esta etapa de mi vida.

Mi reconocimiento a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Católica de Santa María, quienes compartieron sus experiencias y conocimientos, contribuyendo a mi preparación académica y al desarrollo de las capacidades necesarias para ejercer responsablemente mi profesión.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de distintas maneras, me acompañaron durante este proceso. Cada consejo, experiencia y muestra de apoyo contribuyó a que pudiera concretar este trabajo de investigación.

Resumen

La investigación tuvo como objetivo optimizar el uso de explosivos en la voladura de rocas para incrementar la eficiencia operativa y reducir los costos de extracción en una pequeña unidad minera, específicamente en el Crucero XC 584 del nivel 7, durante el año 2025. El estudio fue de tipo aplicado, con enfoque cuantitativo y nivel explicativo, mediante un diseño preexperimental de comparación entre dos periodos operativos. Se analizaron 184 voladuras, de las cuales 92 correspondieron a julio, agosto y septiembre, cuando se empleaba Emulnor 3000, y 92 a octubre, noviembre y diciembre, periodo en el que se implementó una combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000. Las labores presentaron una sección de 2.10 m × 2.40 m y condiciones geomecánicas de RMR 55, correspondiente a roca tipo III. Para el rediseño de la voladura se utilizaron el modelo de Holmberg-Persson y el software JKSimBlast, mientras que la fragmentación se evaluó mediante el modelo Kuz-Ram y el software Split Desktop. Los resultados evidenciaron que el avance promedio por disparo aumentó de 1.30 m a 1.61 m, equivalente a una mejora aproximada del 24 %. Asimismo, el tamaño de fragmentación P80 disminuyó de 7.78 a 6.15 pulgadas, mientras que el tiempo de limpieza se redujo de 1.42 a 1.05. El factor de carga pasó de 3.971 a 4.160 kg/m³ y el costo unitario de extracción disminuyó de 116.79 a 92.08 USD/t, representando una reducción del 21.16 %. Se concluyó que la optimización de la distribución y selección de explosivos estuvo asociada con una mejor fragmentación, mayor avance por disparo y menores costos de extracción, demostrando su utilidad técnica y económica en las labores de desarrollo de pequeña minería subterránea.

Palabras clave: Optimización de explosivos, eficiencia operativa, costos de extracción.

Abstract

The objective of this research was to optimize the use of explosives in rock blasting to increase operational efficiency and reduce extraction costs in a small-scale underground mining operation, specifically at Crosscut XC 584, Level 7, during 2025. The study was applied in nature, with a quantitative approach and an explanatory scope, using a pre-experimental design based on the comparison of two operating periods. A total of 184 blasting operations were analyzed, including 92 blasts conducted between July and September, when Emulnor 3000 was used, and 92 blasts carried out between October and December, following the implementation of a combination of ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000, and Emulnor 3000. The underground workings had a cross-section of 2.10 m × 2.40 m and rock mass conditions characterized by an RMR value of 55, corresponding to rock class III. The Holmberg-Persson model and JKSimBlast software were used to redesign the blasting process, while rock fragmentation was evaluated using the Kuz-Ram model and Split Desktop software. The results showed that the average advance per blast increased from 1.30 m to 1.61 m, representing an improvement of approximately 24%. Additionally, the P80 fragmentation size decreased from 7.78 to 6.15 inches, while the mucking time indicator was reduced from 1.42 to 1.05. The powder factor increased from 3.971 to 4.160 kg/m³, whereas the unit extraction cost decreased from 116.79 to 92.08 USD/t, equivalent to a reduction of 21.16%. It was concluded that optimizing explosive selection and charge distribution was associated with improved rock fragmentation, greater advance per blast, and lower extraction costs, demonstrating the technical and economic benefits of this approach in small-scale underground mining development.

Keywords: Explosives optimization, operational efficiency, extraction costs.

Índice general

Dedicatoria

Agradecimientos

Resumen

Abstract

Introducción 1

Capítulo I: Planteamiento de la investigación 3

1.1 Planteamiento del problema 3

1.2 Objetivos 5

1.2.1 Objetivo general 5

1.2.2 Objetivos específicos 5

1.3 Preguntas de investigación 5

1.3.1 Pregunta general 5

1.3.2 Preguntas específicas 5

1.4 Línea de investigación 6

1.5 Palabras clave 6

1.6 Solución propuesta 6

1.6.1 Justificación e importancia 6

Capítulo II: Fundamentos teóricos 9

2.1 Estado del arte 9

2.1.1 Antecedentes locales....9
2.1.2 Antecedentes nacionales....11
2.1.3 Antecedentes internacionales....13
2.1.4 Análisis crítico y brecha de conocimiento....15
2.2 Bases teóricas de la investigación....17
2.2.1 Macizo rocoso....17
2.2.2 Perforación en minería subterránea....17
2.2.3 Voladura de rocas....18
2.2.4 Explosivos industriales....19
2.2.5 Modelos de predicción de fragmentación. (Kuz-Ram)....19
2.2.6 Modelo de Holmberg-Persson....20
2.2.7 Análisis de fragmentación con Split Desktop....21
2.3 Definiciones....22
2.3.1 Macizo rocoso....22
2.3.2 RMR (Rock Mass Rating)....22
2.3.3 Perforación....22
2.3.4 Voladura de rocas....22
2.3.5 Explosivo....23
2.3.6 ANFO....23
2.3.7 Emulsiones explosivas....23

2.3.8 Factor de carga 23
2.3.9 Fragmentación 24
2.3.10 P80 24
2.3.11 Modelo Kuz-Ram 24
2.3.12 Modelo de Holmberg-Persson 24
2.3.13 Avance por disparo 25
2.3.14 Costos unitarios de extracción 25
2.3.15 Split Desktop 25
2.4 Hipótesis de investigación 25
2.4.1 Hipótesis general 25
2.4.2 Hipótesis específicas 26
2.5 Variables 26
2.5.1 Variable independiente 26
2.5.2 Variable dependiente 28
2.5.3 Operacionalización de variables 29
Capítulo III: Marco metodológico 31
3.1 Alcances y limitaciones 31
3.1.1 Alcances 31
3.1.2 Limitaciones 31
3.2 Tipo y nivel de investigación 32

3.2.1 Tipo de investigación 32

3.2.2 Nivel de investigación 32

3.3 Población y muestra 33

3.3.1 Población 33

3.3.2 Muestra 33

3.3.3 Control de variables externas 34

3.4 Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos 36

3.4.1 Método de la investigación 36

3.4.2 Técnicas de recolección de datos 37

3.4.3 Instrumentos de recolección de datos 37

3.5 Plan de análisis de los datos 39

3.5.1 Técnicas de análisis de datos 39

3.6 Procedimiento de la investigación 40

Capitulo IV: Resultados y análisis 42

4.1 Resultados 42

4.2 Aplicación del modelo de Holmberg y Persson 46

4.3 Aplicación del modelo Kuz-Ram. (Segundo periodo con mejora) 48

4.4 Distribución de la carga explosiva por tipo de taladro 52

4.5 Simulación JKSimblast segundo periodo 55

4.6 Aplicación del split desktop 58

4.7 Resultados por objetivos 65

4.7.1 Resultados respecto al objetivo general 65

4.7.2 Resultados del objetivo específico 1 65

4.7.3 Resultados del objetivo específico 2 66

4.7.4 Resultados del objetivo específico 3 67

4.8 Resultados generales 96

4.9 Análisis 98

4.10 Contrastación de hipótesis 101

4.10.1 Contrastación de la hipótesis general 101

4.10.2 Contrastación de las hipótesis específicas 102

4.11 Discusión de resultados 104

Conclusiones 112

Recomendaciones 114

Referencias Bibliográficas 117

Índice de tablas

Tabla 1 Operacionalización de variables 29

Tabla 2 Nomenclaturas 43

Tabla 3 Parámetros primer periodo 45

Tabla 4 Parámetros de perforación, voladura y geomecánica 50

Tabla 5 Aplicación del split desktop 60

Tabla 6 Parámetros tercer trimestre 63

Tabla 7 Parámetros julio 2025 68

Tabla 8 Parámetros de agosto 2025 70

Tabla 9 Parámetros de septiembre 2025 73

Tabla 10 Parámetros de octubre del 2025 76

Tabla 11 Parámetros de noviembre del 2025 79

Tabla 12 Parámetros de diciembre del 2025 82

Tabla 13 Comparación de resultados entre el primer y segundo periodo 97

Índice de figuras

Figura 1. Malla antes de la mejora 44

Figura 2. Distribución de la carga explosiva en los taladros de la malla optimizada 54

Figura 3. Prima de taladros después de la mejora 55

Figura 4. Carguío de taladros después de la mejora 55

Figura 5. Taco en taladros después de la mejora 56

Figura 6. Amarre de taladros después de la mejora 56

Figura 7. Detonación de taladros después de la mejora 57

Figura 8. Curvas de energía después de la mejora 57

Figura 9. Campo de energía después de la mejora 58

Figura 10. Pila después de la voladura segundo periodo 61

Figura 11. Malla después de la mejora 62

Figura 12. Tiempo de limpieza mensual 85

Figura 13. Tiempo de limpieza por periodo 86

Figura 14. Avance por disparo mensual 87

Figura 15. Avance por disparo por periodo 88

Figura 16. Fragmentación mensual 89

Figura 17. Fragmentación por periodo 90

Figura 18. Factor de carga mensual 91

Figura 19. Factor de carga mensual 92

Figura 20. Costo de extracción mensual 94

Figura 21. Costo de extracción por periodo.....95

Introducción

La perforación y voladura constituye una de las operaciones más importantes de la minería subterránea, debido a su influencia sobre la fragmentación del macizo rocoso, el avance de las labores y los costos de extracción. En pequeñas unidades mineras, el uso inadecuado de explosivos puede generar fragmentos de gran tamaño, mayores tiempos de limpieza y un aprovechamiento limitado de los recursos disponibles. Por ello, la selección y distribución de las cargas explosivas representa una alternativa para mejorar el rendimiento operativo y económico de la explotación minera (Jimeno et al., 1995; Hustrulid & Bullock, 2001).

La investigación se desarrolló en el Crucero XC 584 del nivel 7, durante el año 2025, en una labor subterránea de sección 2.10 m × 2.40 m, con condiciones geomecánicas de RMR 55, correspondiente a roca tipo III. La perforación se realizó mediante equipos Jack Leg, brocas de 38 mm y barras de 6 pies. Durante julio, agosto y septiembre se utilizó Emulnor 3000, mientras que entre octubre y diciembre se implementó una combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000, buscando mejorar la fragmentación, incrementar el avance por disparo y controlar la energía aplicada cerca de las cajas de la excavación.

El objetivo fue optimizar el uso de explosivos para incrementar la eficiencia operativa y reducir los costos de extracción. La investigación fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, nivel explicativo y diseño preexperimental. Se evaluaron 184 voladuras, distribuidas en dos periodos de 92 disparos cada uno. Para el diseño y análisis se emplearon el modelo de Holmberg-Persson, el software JKSimBlast y el modelo Kuz-Ram, mientras que la fragmentación obtenida se determinó mediante Split Desktop, considerando el P80 como indicador granulométrico (Persson et al., 1994; Cunningham, 1983).

Los resultados evidenciaron que el avance promedio aumentó de 1.30 a 1.61 m por disparo, mientras que el P80 disminuyó de 7.78 a 6.15 pulgadas. Asimismo, el tiempo de limpieza se redujo de 1.42 a 1.05 y el factor de carga pasó de 3.971 a 4.160 kg/m³. En términos económicos, el costo unitario de extracción disminuyó de 116.79 a 92.08 USD/t, equivalente a una reducción del 21.16 %. Estos resultados mostraron que la distribución diferenciada de explosivos estuvo asociada con un mejor aprovechamiento de la energía, mayor rendimiento de avance y menores costos operativos.

El estudio permitió evaluar una alternativa de optimización aplicable a la pequeña minería subterránea, integrando criterios técnicos de diseño de voladura con herramientas de simulación y medición de fragmentación. Su aporte consistió en relacionar la selección de explosivos con los resultados operativos y económicos obtenidos en condiciones reales de trabajo. La investigación se estructuró en el planteamiento del problema, marco teórico, metodología, resultados, discusión, conclusiones y recomendaciones, siguiendo una secuencia orientada a sustentar los hallazgos y su aplicación en operaciones mineras de características similares.

Capítulo I: Planteamiento de la investigación

1.1 Planteamiento del problema

La perforación y voladura representa una actividad determinante en el desarrollo de las operaciones mineras subterráneas, debido a que sus resultados influyen en la fragmentación del macizo rocoso, el avance de las labores y los costos de extracción. En la pequeña minería, las limitaciones económicas y tecnológicas dificultan la incorporación de mejoras en los procesos productivos, por lo que resulta necesario aprovechar adecuadamente los explosivos disponibles. Una distribución poco eficiente de la energía puede ocasionar fragmentación irregular, mayores tiempos de limpieza y pérdidas de productividad, afectando el rendimiento del ciclo de minado (Jimeno et al., 1995; Hustrulid & Bullock, 2001).

En el contexto peruano, las pequeñas operaciones mineras subterráneas enfrentan dificultades relacionadas con la selección de explosivos y el diseño de las mallas de perforación. El empleo de cargas sin una diferenciación suficiente según la función de los taladros puede limitar el aprovechamiento de la energía y generar resultados inferiores a los esperados. Esta situación adquiere mayor importancia en labores de desarrollo de secciones reducidas, donde el avance depende del funcionamiento del arranque, la distribución de las cargas y las condiciones geomecánicas del macizo rocoso (Persson et al., 1994; Jimeno et al., 1995).

En el Crucero XC 584 del nivel 7, durante el periodo comprendido entre julio y septiembre de 2025, se empleó Emulnor 3000 como explosivo principal. La labor presentó una sección de 2.10 m × 2.40 m, perforación mediante Jack Leg, brocas de 38 mm y barras de 6 pies, bajo condiciones geomecánicas de RMR 55, correspondientes a roca tipo III. Los registros operativos mostraron un avance promedio de 1.30 m por disparo, una fragmentación P80 de 7.78 pulgadas y un tiempo de limpieza de 1.42. Asimismo, el factor de carga alcanzó 3.971 kg/m³ y el costo unitario

de extracción fue de 116.79 USD/t. Estos indicadores evidenciaron oportunidades de mejora en el aprovechamiento de la energía explosiva y en el rendimiento del proceso.

La problemática identificada estuvo relacionada con la utilización de un solo tipo de explosivo, sin una diferenciación suficiente de sus características energéticas según las necesidades de cada zona del frente. Esta condición pudo contribuir a una fragmentación menos favorable, un menor avance por disparo y mayores requerimientos de tiempo para retirar el material volado. Además, la aplicación de cargas similares en zonas próximas a las cajas podía incrementar el riesgo de daño al contorno de la excavación, haciendo necesario evaluar una distribución más adecuada de la energía explosiva (Persson et al., 1994; Jimeno et al., 1995).

Frente a esta situación, se planteará la optimización del uso de explosivos mediante la combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000, considerando las características del macizo rocoso y la función de los taladros. Para sustentar técnicamente la propuesta, se emplearán el modelo de Holmberg-Persson y el software JKSimBlast en el análisis del diseño de voladura. Asimismo, se utilizará Kuz-Ram para estimar la fragmentación y Split Desktop para evaluar el tamaño P80 del material obtenido. Esta metodología permitirá comparar los resultados del primer periodo, comprendido entre julio y septiembre, con los correspondientes a octubre, noviembre y diciembre de 2025 (Persson et al., 1994; Cunningham, 1983).

En consecuencia, la investigación buscará determinar en qué medida la optimización del uso de explosivos permitirá mejorar la eficiencia operativa y reducir los costos de extracción en el Crucero XC 584 del nivel 7. La evaluación considerará la fragmentación, el avance por disparo, el tiempo de limpieza, el factor de carga y el costo unitario, con la finalidad de establecer una alternativa de mejora técnicamente sustentada y aplicable a pequeñas operaciones mineras subterráneas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Optimizar el uso de explosivos en la voladura de rocas para incrementar la eficiencia operativa y reducir los costos de extracción en el Crucero XC 584 del nivel 7 durante el año 2025.

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar la influencia de la combinación de explosivos ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000 en la fragmentación del macizo rocoso mediante el análisis del P80 utilizando Split Desktop.
- Determinar el efecto del rediseño de la carga explosiva en el avance por disparo en labores de sección 2.10 m × 2.40 m.
- Analizar la variación de los costos unitarios de extracción en función de la optimización del uso de explosivos entre el periodo sin mejora y el periodo con mejora.

1.3 Preguntas de investigación

1.3.1 Pregunta general

- ¿De qué manera la optimización del uso de explosivos en la voladura de rocas influirá en el incremento de la eficiencia y la reducción de los costos de extracción en el Crucero XC 584 del nivel 7 durante el año 2025?

1.3.2 Preguntas específicas

- ¿Cómo influirá la combinación de explosivos ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000 en la fragmentación del macizo rocoso medida mediante el P80?

- ¿En qué medida la optimización de la carga explosiva mejorará el avance por disparo en labores de sección 2.10 m × 2.40 m?
- ¿Cómo impactará la optimización del uso de explosivos en la reducción de los costos unitarios de extracción en la operación minera?

1.4 Línea de investigación

La presente investigación se encuentra comprendida en la línea de Optimización de Procesos Mineros, orientada al mejoramiento de la eficiencia y productividad de las operaciones de minería subterránea. El estudio se enfoca en optimizar el uso de explosivos mediante una distribución diferenciada de las cargas en los taladros de perforación, considerando las características del macizo rocoso y las condiciones operativas de la labor. Con ello, se busca mejorar la fragmentación del material, incrementar el avance por disparo y reducir los costos unitarios de extracción, contribuyendo al aprovechamiento eficiente de los recursos en la pequeña minería.

1.5 Palabras clave

Optimización de voladura, Fragmentación. (P80), Costos de extracción.

1.6 Solución propuesta

1.6.1 Justificación e importancia

La presente investigación se justifica por la necesidad de mejorar el rendimiento de las operaciones de perforación y voladura en la pequeña minería subterránea, donde el aprovechamiento de la energía explosiva influye en el avance de las labores, la fragmentación del material y los costos de extracción. Jimeno et al. (1995) señalan que los resultados de una voladura dependen de la interacción entre las propiedades del macizo rocoso, las características de los explosivos y los parámetros de diseño. En ese contexto, el

estudio buscará optimizar el proceso de voladura en el Crucero XC 584 del nivel 7, mediante una distribución diferenciada de las cargas explosivas.

Desde el punto de vista técnico, la investigación permitirá evaluar la combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000, considerando las necesidades energéticas de los diferentes taladros. Para ello, se emplearán el modelo de Holmberg-Persson y el software JKSimBlast en el análisis del diseño de voladura, mientras que Kuz-Ram y Split Desktop permitirán evaluar la fragmentación. Según Cunningham (1983), la distribución granulométrica del material volado puede estimarse mediante relaciones que consideran las características de la roca, el explosivo y el diseño aplicado. Por tanto, estas herramientas contribuirán a sustentar técnicamente las mejoras propuestas.

En el ámbito operativo, el estudio resulta importante porque una fragmentación adecuada facilita las actividades posteriores a la voladura y favorece el cumplimiento de los ciclos de trabajo. Hustrulid y Bullock (2001) explican que la eficiencia de las operaciones mineras depende de la coordinación entre sus diferentes procesos productivos. En consecuencia, la optimización buscará incrementar el avance por disparo, disminuir los tiempos de limpieza y mejorar la continuidad de las labores, evitando que una fragmentación desfavorable genere demoras adicionales.

La justificación económica se fundamenta en la necesidad de reducir los costos unitarios de extracción mediante un aprovechamiento más eficiente de los recursos. Jimeno et al. (1995) sostienen que la evaluación económica de una voladura debe considerar no solamente el consumo de explosivos, sino también su influencia sobre las operaciones posteriores. En ese sentido, la investigación analizará la relación entre el factor de carga, el

avance obtenido, la fragmentación y el costo por tonelada, con la finalidad de determinar si la alternativa propuesta representa una mejora económica para la unidad minera.

Desde la perspectiva de seguridad, la investigación adquiere relevancia por la necesidad de controlar la energía explosiva en las zonas próximas al contorno de la excavación. Persson et al. (1994) describen la importancia de adecuar las cargas y los parámetros de voladura para limitar los efectos no deseados sobre la roca circundante. Por ello, se buscará utilizar explosivos de diferentes características energéticas según la función de cada taladro, especialmente en las zonas cercanas a las cajas, contribuyendo a reducir el daño innecesario al macizo rocoso y a mantener condiciones favorables para las operaciones subterráneas.

Finalmente, la importancia de la investigación radica en su contribución a la línea de Optimización de Procesos Mineros, al integrar criterios de diseño de voladura, herramientas de simulación y evaluación de indicadores operativos y económicos. Los resultados permitirán disponer de información técnica para mejorar la selección y distribución de explosivos en labores de desarrollo subterráneo. Asimismo, podrán constituir una referencia para investigaciones posteriores orientadas al incremento de la productividad, el control de la fragmentación y la reducción de costos en pequeñas unidades mineras.

Capítulo II: Fundamentos teóricos

2.1 Estado del arte

El estado del arte permitió identificar que las investigaciones relacionadas con perforación y voladura subterránea se concentraron principalmente en el rediseño de mallas, la distribución de cargas explosivas, el control de la sobreexcavación, la aplicación de sistemas de iniciación y la predicción de la fragmentación. No obstante, se observó que varios estudios evaluaron estos elementos por separado, mientras que la presente investigación integró la selección de explosivos, la distribución diferenciada de la carga, el diseño mediante JKSimBlast y Holmberg-Persson, la estimación granulométrica con Kuz-Ram y la comprobación del P80 mediante Split Desktop. Esta integración permitió analizar conjuntamente la fragmentación, el avance por disparo, el tiempo de limpieza, el factor de carga y el costo unitario de extracción.

2.1.1 Antecedentes locales

- Según Huamán (2024), en la investigación titulada" Optimización del proceso de perforación y voladura subterránea para la Sociedad Minera Oro Sol Uno", citada en la tesis como un estudio desarrollado en Huaraz, tuvo como propósito mejorar el desempeño de las labores de desarrollo mediante ajustes en los parámetros de perforación y voladura. El trabajo empleó un enfoque cuantitativo y comparó los resultados de los disparos ejecutados. Según la revisión consignada en la tesis, se identificaron mejoras en la fragmentación y una disminución del consumo de explosivos, lo que favoreció el rendimiento operativo y la reducción de costos. Su aporte a la presente investigación consistió en establecer una relación entre la optimización del diseño de voladura y la eficiencia del ciclo de minado. Sin

embargo, el estudio del Crucero XC 584 incorporó una evaluación diferenciada de ANFO y emulsiones explosivas de distintas características energéticas.

- Según Acero (2021), en la tesis “Propuesta de una malla de perforación y voladura para labores de avance, citada en el documento como una investigación vinculada con Huaraz, abordó la necesidad de mejorar el rendimiento de las excavaciones subterráneas mediante una distribución adecuada de los taladros”. El estudio presentó un enfoque cuantitativo y alcance descriptivo, considerando labores de desarrollo como unidades de análisis. De acuerdo con la revisión incluida en la tesis, el diseño propuesto favoreció la fragmentación, el control de la excavación y el desempeño operativo. Se destacó que la geometría de perforación constituye un elemento importante para aprovechar la energía explosiva. Este antecedente aportó criterios para evaluar la malla de perforación del Crucero XC 584, aunque la presente investigación profundizó en la selección y distribución de diferentes explosivos según la función de los taladros.
- Según Huerta (2023), en la investigación titulada “Implementación del método de explotación corte y relleno ascendente en Minera Magistral”, citada como un trabajo desarrollado en Huaraz, evaluó el comportamiento operativo de un método de explotación subterránea y su relación con las condiciones del macizo rocoso. La investigación utilizó un enfoque cuantitativo y un diseño descriptivo-comparativo, considerando los niveles de explotación como unidades de análisis. Según la información recogida en la tesis, los resultados mostraron mejoras en la productividad y en el control de las operaciones, destacando la importancia de optimizar los procesos para alcanzar un desempeño económico favorable. Su

contribución fue indirecta, puesto que permitió comprender la relación entre las operaciones unitarias y el rendimiento global de la explotación, mientras que la presente investigación se concentró específicamente en el uso de explosivos y sus efectos sobre la fragmentación, el avance y los costos de extracción.

En conjunto, los antecedentes locales revisados permitieron reconocer la importancia del diseño de perforación, la selección de parámetros operativos y la evaluación económica en el mejoramiento de las labores subterráneas. No obstante, los estudios descritos abordaron principalmente el rediseño de mallas o la optimización general de los procesos mineros. En ese contexto, la presente investigación se diferenció por evaluar conjuntamente la combinación de explosivos, la fragmentación P80, el avance por disparo, el tiempo de limpieza, el factor de carga y el costo unitario de extracción, mediante la comparación de dos periodos operativos en el Crucero XC 584 del nivel 7.

2.1.2 Antecedentes nacionales

- Según Onton (2023), en la investigación titulada “Evaluación de voladura para reducir la sobreexcavación en la rampa 2705 en la Unidad Minera Parcoy”, presentada en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, tuvo como objetivo evaluar los parámetros de voladura para disminuir la sobreexcavación en labores subterráneas. El estudio empleó un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, mediante la comparación de los resultados obtenidos en las voladuras ejecutadas. Según la revisión incluida en la tesis, las modificaciones realizadas permitieron mejorar el control del perfil de excavación y reducir los costos asociados al proceso. Se concluyó que la adecuación de los parámetros de voladura favoreció el aprovechamiento de la energía explosiva y el rendimiento operativo. Este

antecedente aportó criterios para controlar las cargas en las zonas próximas a las cajas del Crucero XC 584, aunque la presente investigación incorporó también el análisis de la fragmentación P80, el avance por disparo y el costo unitario de extracción.

- Según Roa (2022), en la tesis "Implementación de voladura centralizada en mina subterránea", desarrollada en la Pontificia Universidad Católica del Perú, evaluó la incorporación de un sistema de voladura centralizada mediante detonadores electrónicos, con la finalidad de mejorar el control de la iniciación y las condiciones de seguridad durante las operaciones. La investigación presentó un enfoque cuantitativo y de tipo aplicado, considerando las voladuras subterráneas como unidades de análisis. De acuerdo con el documento revisado, los resultados evidenciaron mejoras en la confiabilidad del sistema de iniciación, la eficiencia operativa y el control de los riesgos. Se concluyó que la incorporación de tecnologías de iniciación contribuyó a mejorar el desempeño de la voladura. Su aporte a la presente investigación consistió en destacar la importancia del control de la energía explosiva; sin embargo, el estudio del Crucero XC 584 se orientó a la selección y distribución de explosivos convencionales, utilizando equipos de perforación Jack Leg.
- Según Barzola (2025), en la investigación "denominada Implementación de voladura controlada y su impacto en la fragmentación en la Unidad Minera Caravelí", analizó la influencia de los parámetros de voladura sobre el tamaño del material fragmentado y el rendimiento de las operaciones mineras. Según la información consignada en la tesis, se empleó un enfoque cuantitativo, con diseño

no experimental y evaluación comparativa de las voladuras realizadas en campo. Los resultados mostraron una fragmentación más uniforme y una disminución de los costos operativos, concluyéndose que el control de los parámetros de voladura contribuyó al mejoramiento de la eficiencia del proceso. Este antecedente se relacionó directamente con la presente investigación por considerar la fragmentación y los costos como indicadores de desempeño. No obstante, el estudio desarrollado en el Crucero XC 584 amplió la evaluación al incorporar el avance por disparo, el tiempo de limpieza y el factor de carga.

En conjunto, los antecedentes nacionales revisados permitieron identificar que el mejoramiento de las voladuras subterráneas puede abordarse mediante el control de la sobreexcavación, la incorporación de sistemas de iniciación y la adecuación de los parámetros de fragmentación. Sin embargo, los trabajos descritos se concentraron en aspectos específicos del proceso. Frente a ello, la presente investigación integró la selección diferenciada de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000 con herramientas de análisis como JKSimBlast, Holmberg-Persson, Kuz-Ram y Split Desktop, evaluando sus efectos sobre la eficiencia operativa y los costos de extracción mediante la comparación de dos periodos de trabajo.

2.1.3 Antecedentes internacionales

- Según González (2022), en la investigación titulada “Optimización de voladura subterránea para mejorar la fragmentación en mina chilena”, citada como un estudio de la Universidad de Chile, analizó la modificación de los parámetros de voladura en frentes de avance subterráneo. Según la revisión incluida en la tesis, se empleó un enfoque cuantitativo y un diseño experimental, considerando diferentes

frentes de trabajo como unidades de análisis. Los resultados reportados indicaron una disminución del tamaño de los fragmentos y un mejor desempeño productivo. El estudio concluyó que la distribución de las cargas explosivas constituye un factor importante para mejorar el aprovechamiento de la energía durante la rotura del macizo rocoso. Su aporte a la presente investigación se relacionó con la evaluación de la fragmentación como indicador de eficiencia, aunque el trabajo desarrollado en el Crucero XC 584 incorporó también el avance por disparo, el tiempo de limpieza y los costos unitarios de extracción.

- Según Rodríguez (2021), en la tesis denominada "Evaluación del uso de explosivos en minería subterránea", citada como una investigación de la Universidad Politécnica de Madrid, examinó la relación entre las características energéticas de los explosivos y su comportamiento durante las operaciones subterráneas. De acuerdo con la información consignada en la tesis original, el estudio utilizó una metodología cuantitativa y un diseño descriptivo, considerando distintas operaciones mineras como unidades de análisis. Los resultados descritos señalaron que la selección del explosivo, de acuerdo con las condiciones del macizo rocoso, favoreció la fragmentación y el control de los costos operativos. Se concluyó que las propiedades de los productos explosivos debían guardar correspondencia con las características de la roca. Este antecedente aportó fundamentos para evaluar la combinación de ANFO y emulsiones de diferentes características energéticas en el Crucero XC 584.
- Según Martínez (2023), en el trabajo titulado "Aplicación de modelos de fragmentación en voladura subterránea", citado como una investigación de la

Universidad de Oviedo, estudió el uso de modelos matemáticos para estimar la distribución granulométrica del material obtenido después de la voladura. Según la revisión presentada en la tesis, la investigación adoptó un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, y consideró voladuras controladas como unidades de análisis. Los resultados descritos mostraron correspondencia entre las estimaciones teóricas y las mediciones realizadas en campo, destacando la utilidad del modelo Kuz-Ram para evaluar la fragmentación. Se concluyó que las herramientas predictivas podían contribuir al análisis y mejoramiento de los diseños de voladura. Su aporte a la presente investigación consistió en respaldar la evaluación del P80 mediante modelos matemáticos, complementada con el procesamiento de imágenes mediante Split Desktop.

En conjunto, los antecedentes internacionales descritos abordaron tres aspectos relevantes para la optimización de voladuras subterráneas: la distribución de las cargas explosivas, la selección de productos según las características del macizo rocoso y la predicción de la fragmentación. Estas investigaciones proporcionaron criterios para el análisis técnico del proceso. Sin embargo, la presente investigación se orientó a integrar dichos aspectos en una labor de pequeña minería subterránea, con una sección de 2.10 m × 2.40 m, perforación mediante Jack Leg y condiciones geomecánicas de RMR 55. Asimismo, se diferenció por relacionar los resultados de fragmentación con el avance por disparo, el tiempo de limpieza, el factor de carga y los costos unitarios de extracción.

2.1.4 Análisis crítico y brecha de conocimiento

La revisión de los antecedentes locales, nacionales e internacionales permitió identificar que las investigaciones sobre perforación y voladura subterránea se orientaron

principalmente al rediseño de mallas, la selección de explosivos, el control de la sobreexcavación y la evaluación de la fragmentación. Los estudios coincidieron en destacar que las características del macizo rocoso, la distribución de las cargas y los parámetros de perforación influyen en el rendimiento de las labores mineras. Sin embargo, la mayoría abordó estos aspectos de manera independiente, sin relacionar integralmente sus efectos sobre el avance por disparo, el tiempo de limpieza y los costos unitarios de extracción.

Asimismo, se observó que algunas investigaciones priorizaron la incorporación de sistemas electrónicos de iniciación o equipos mecanizados, cuyas condiciones de aplicación difieren de las pequeñas operaciones subterráneas que utilizan perforadoras Jack Leg y explosivos convencionales. Esta diferencia evidenció la necesidad de evaluar alternativas de optimización adaptadas a labores de sección reducida, donde las restricciones operativas y económicas requieren un aprovechamiento eficiente de los recursos disponibles.

La principal brecha de conocimiento identificada estuvo relacionada con la limitada evaluación conjunta de diferentes tipos de explosivos dentro de una misma distribución de carga, considerando sus efectos sobre la fragmentación, el avance y los costos de extracción. También se reconoció la necesidad de complementar los modelos de diseño y predicción con mediciones obtenidas en campo, de manera que los resultados no dependieran únicamente de estimaciones teóricas.

En respuesta a esta brecha, la presente investigación evaluó la optimización del uso de explosivos en el Crucero XC 584 del nivel 7, mediante la combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000. Se compararon 92 voladuras correspondientes al periodo sin mejora con otras 92 ejecutadas después de la implementación, considerando condiciones operativas y geomecánicas similares. Además, se integraron herramientas como

JKSimBlast, Holmberg-Persson, Kuz-Ram y Split Desktop para relacionar el diseño de voladura con la fragmentación P80, el avance por disparo, el tiempo de limpieza, el factor de carga y el costo unitario de extracción. De esta manera, el estudio aportó evidencia operativa sobre una alternativa de optimización aplicable a la pequeña minería subterránea.

2.2 Bases teóricas de la investigación

2.2.1 Macizo rocoso

El macizo rocoso está constituido por un conjunto de bloques de roca separados por discontinuidades naturales, cuyas características influyen en su comportamiento frente a las excavaciones y la aplicación de energía explosiva. Su resistencia, grado de fracturamiento, orientación de las discontinuidades y condiciones geológicas determinan la respuesta del material durante la perforación y voladura. Bieniawski (1989) estableció que la clasificación geomecánica permite evaluar la calidad del macizo rocoso mediante parámetros relacionados con su resistencia y estructura.

En la investigación, las condiciones geomecánicas del Crucero XC 584 correspondieron a un RMR de 55, clasificado como roca de calidad regular, clase III. Esta condición constituyó un criterio técnico para evaluar la distribución de las cargas explosivas, considerando la necesidad de obtener una fragmentación adecuada sin ocasionar daños innecesarios en las cajas de la excavación (Bieniawski, 1989; Hoek & Brown, 1997).

2.2.2 Perforación en minería subterránea

La perforación constituye una operación fundamental del proceso de arranque de rocas, debido a que permite generar los taladros destinados a alojar las cargas explosivas. Su eficiencia depende de factores como el diámetro, la longitud, la orientación, el paralelismo y la distribución de los taladros dentro de la sección de trabajo. Jimeno et al. (1995) señalaron

que la precisión de la perforación influye en el aprovechamiento de la energía explosiva y en los resultados obtenidos durante la voladura.

En labores subterráneas de sección reducida, el diseño de la malla debe considerar la ubicación de los taladros de arranque, ayudas, hastiales, corona y piso. En el Crucero XC 584 se empleó una perforadora Jack Leg, con brocas de 38 mm y barras de 6 pies, en una sección de 2.10 m × 2.40 m. Estas condiciones fueron consideradas para evaluar el comportamiento de las voladuras y establecer una comparación entre los periodos de estudio (Jimeno et al., 1995).

2.2.3 Voladura de rocas

La voladura de rocas es un proceso de fragmentación que utiliza la energía liberada por la detonación de explosivos para producir esfuerzos y fracturas en el macizo rocoso. Su resultado depende de la relación entre las características del explosivo, la geometría de los taladros, las condiciones de confinamiento y las propiedades de la roca. Persson et al. (1994) explicaron que el diseño de una voladura debe buscar una distribución adecuada de la energía para conseguir la rotura del material y limitar los efectos no deseados sobre la excavación.

En minería subterránea, la voladura debe generar un espacio libre inicial que facilite la rotura progresiva del frente. Asimismo, requiere controlar las cargas ubicadas cerca del contorno para evitar una sobreexcavación excesiva. En la presente investigación, la optimización se fundamentó en la utilización diferenciada de explosivos según la función de los taladros, buscando mejorar la fragmentación, incrementar el avance y reducir los costos de extracción. (Persson et al., 1994)

2.2.4 Explosivos industriales

Los explosivos industriales son sustancias o mezclas capaces de liberar energía rápidamente mediante una reacción química de detonación. Entre sus principales características se encuentran la densidad, la velocidad de detonación, la presión de detonación, la resistencia al agua y la energía disponible para fragmentar la roca. Jimeno et al. (1995) explicaron que la selección del explosivo debe considerar tanto las condiciones del macizo rocoso como las características de la operación minera.

El ANFO es un agente explosivo compuesto principalmente por nitrato de amonio y combustible, utilizado en condiciones compatibles con sus propiedades técnicas. Por otra parte, las emulsiones explosivas presentan características que permiten su aplicación en diferentes condiciones operativas. En el Crucero XC 584 se evaluó la combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000, considerando las necesidades de fragmentación y el control de la energía en las zonas cercanas a las cajas.

La distribución diferenciada de estos productos permitió analizar una alternativa frente al empleo de un solo tipo de explosivo. Su evaluación consideró los resultados de fragmentación, avance por disparo, factor de carga y costo unitario, sin asumir que un mayor consumo de explosivo necesariamente representa una mayor eficiencia operativa. (Konya & Walter, 1990)

2.2.5 Modelos de predicción de fragmentación. (Kuz-Ram)

El modelo Kuz-Ram constituye una herramienta de estimación de la fragmentación producida por una voladura. Su planteamiento relaciona las propiedades de la roca, las características del explosivo y los parámetros del diseño para determinar una distribución

granulométrica esperada. Cunningham (1983) desarrolló este modelo a partir de relaciones empíricas que permiten evaluar el tamaño del material fragmentado.

Uno de los indicadores utilizados para analizar los resultados es el P80, definido como el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 80 % del material evaluado. Este parámetro permite comparar el comportamiento de distintas condiciones de voladura y reconocer cambios en la fragmentación.

En la investigación, el modelo Kuz-Ram se empleó para sustentar la evaluación granulométrica de las voladuras realizadas en el Crucero XC 584. Sus estimaciones se complementaron con el análisis de imágenes mediante Split Desktop, permitiendo relacionar el tamaño de los fragmentos con el rendimiento operativo y los costos de extracción (Cunningham, 1983; Kuznetsov, 1973)

2.2.6 Modelo de Holmberg-Persson

El modelo de Holmberg-Persson proporciona criterios técnicos para el diseño de voladuras en excavaciones subterráneas. Su aplicación considera las características geométricas de la labor, las propiedades de la roca y los parámetros de perforación y carga explosiva. Holmberg y Persson (1979) desarrollaron fundamentos orientados al diseño de disparos en túneles, destacando la importancia de distribuir adecuadamente los taladros para conseguir un avance eficiente.

En las labores de desarrollo, la geometría del arranque y la distribución de los taladros influyen en la generación del espacio libre y en la rotura progresiva del frente. Por ello, el diseño debe guardar correspondencia con las condiciones reales de perforación y las características del macizo rocoso.

En la presente investigación, este modelo permitió sustentar técnicamente la evaluación de la malla de perforación utilizada en el Crucero XC 584. Su aplicación se complementó con JKSimBlast para analizar el diseño de voladura y establecer criterios de comparación entre los periodos sin mejora y con implementación. (Holmberg & Persson, 1979)

2.2.7 Análisis de fragmentación con Split Desktop

Split Desktop es una herramienta informática utilizada para estimar la distribución granulométrica del material fragmentado mediante el procesamiento de imágenes digitales. Su aplicación permite identificar los contornos de las partículas visibles y obtener una distribución de tamaños a partir de las fotografías analizadas. Este procedimiento constituye una alternativa para evaluar los resultados de fragmentación en operaciones mineras.

La confiabilidad del análisis depende de la calidad de las imágenes, la escala utilizada, la iluminación y la identificación de los fragmentos. Por ello, los resultados deben interpretarse considerando las limitaciones propias del procesamiento digital y las condiciones de captura.

En el Crucero XC 584, Split Desktop se utilizó para evaluar el P80 del material obtenido después de las voladuras. Los resultados permitieron comparar la fragmentación correspondiente al periodo sin mejora con la obtenida después de la optimización del uso de explosivos, proporcionando información para analizar su relación con el tiempo de limpieza, el avance por disparo y los costos unitarios de extracción. (Ouchterlony, 2005)

2.3 Definiciones

2.3.1 Macizo rocoso

El macizo rocoso comprende la roca intacta y el conjunto de discontinuidades que condicionan su comportamiento mecánico. Su resistencia y deformabilidad dependen de las propiedades del material, el fracturamiento y las condiciones estructurales presentes. Estas características influyen en la estabilidad de las excavaciones y en la respuesta de la roca frente a las voladuras (Hoek & Brown, 1997).

2.3.2 RMR (Rock Mass Rating)

El RMR es un sistema de clasificación geomecánica que permite determinar la calidad del macizo rocoso mediante la evaluación de la resistencia a compresión, el índice RQD, el espaciamiento y estado de las discontinuidades, la presencia de agua y la orientación de las estructuras geológicas. Su aplicación facilita la caracterización de las condiciones de excavación (Bieniawski, 1989).

2.3.3 Perforación

La perforación es una operación minera destinada a ejecutar taladros en el macizo rocoso mediante equipos y herramientas especializados. En los trabajos de desarrollo subterráneo, estos taladros permiten alojar los explosivos y establecer las condiciones geométricas necesarias para la voladura (Jimeno et al., 1995).

2.3.4 Voladura de rocas

La voladura de rocas consiste en utilizar la energía generada por la detonación de explosivos para producir la fractura y el desplazamiento del material rocoso. Sus resultados dependen de las características del explosivo, las propiedades del macizo rocoso y la distribución de las cargas dentro de los taladros (Persson et al., 1994).

2.3.5 Explosivo

Un explosivo es una sustancia o mezcla capaz de experimentar una reacción química rápida que libera energía y genera gases a elevada presión. En las operaciones mineras se utiliza para fragmentar el macizo rocoso, considerando sus propiedades físicas y energéticas y las condiciones de aplicación (Jimeno et al., 1995).

2.3.6 ANFO

El ANFO es un agente explosivo compuesto principalmente por nitrato de amonio y combustible. Se caracteriza por su aplicación en operaciones de voladura donde las condiciones de los taladros permiten aprovechar sus propiedades energéticas. Su utilización requiere considerar especialmente la presencia de agua y las características de confinamiento (Jimeno et al., 1995).

2.3.7 Emulsiones explosivas

Las emulsiones explosivas son formulaciones constituidas por una fase oxidante dispersa en una fase continua combustible. Presentan propiedades relacionadas con la densidad, la sensibilidad, la resistencia al agua y la energía de detonación, las cuales permiten seleccionar productos adecuados para diferentes condiciones de voladura (Persson et al., 1994).

2.3.8 Factor de carga

El factor de carga expresa la relación entre la masa de explosivo utilizada y la cantidad de roca fragmentada. Este indicador permite evaluar el consumo específico de explosivos y comparar diferentes condiciones de voladura. Puede expresarse en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o kilogramos por tonelada (kg/t), según la unidad de análisis (Jimeno et al., 1995).

2.3.9 Fragmentación

La fragmentación es el proceso mediante el cual el macizo rocoso se divide en partículas de distintos tamaños como consecuencia de la aplicación de energía explosiva. Su distribución granulométrica constituye un indicador del resultado de la voladura y tiene influencia sobre las operaciones posteriores del ciclo de minado (Cunningham, 1983).

2.3.10 P80

El P80 representa el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 80 % del material evaluado, según la distribución granulométrica considerada. Se utiliza para caracterizar el tamaño de fragmentación y comparar los resultados obtenidos mediante diferentes diseños de voladura (Cunningham, 1983).

2.3.11 Modelo Kuz-Ram

El modelo Kuz-Ram es una metodología empírica de predicción granulométrica que relaciona las características de la roca, las propiedades del explosivo y los parámetros de voladura. Permite estimar la distribución de tamaños del material fragmentado y constituye una herramienta de apoyo para evaluar los diseños de voladura (Cunningham, 1983).

2.3.12 Modelo de Holmberg-Persson

El modelo de Holmberg-Persson comprende criterios técnicos para el diseño de voladuras en excavaciones subterráneas, considerando la geometría de la labor, las condiciones de perforación y la distribución de cargas explosivas. Su aplicación permite analizar parámetros relacionados con la eficiencia del disparo y el control del contorno de excavación (Holmberg & Persson, 1979).

2.3.13 Avance por disparo

El avance por disparo corresponde a la longitud efectiva de excavación conseguida después de una voladura en una labor de desarrollo. Generalmente se expresa en metros por disparo y permite evaluar el aprovechamiento de la longitud perforada y el rendimiento de la operación (Jimeno et al., 1995).

2.3.14 Costos unitarios de extracción

Los costos unitarios de extracción representan los recursos económicos empleados para obtener una unidad de producción minera. Su evaluación considera los costos asociados a las operaciones que intervienen en la extracción y permite comparar alternativas técnicas mediante indicadores monetarios por tonelada producida (Hustrulid & Bullock, 2001).

2.3.15 Split Desktop

Split Desktop es un programa de análisis granulométrico basado en el procesamiento digital de imágenes del material fragmentado. Permite estimar distribuciones de tamaño y obtener indicadores como el P80 mediante la identificación y medición de fragmentos visibles en fotografías. Su aplicación requiere procedimientos de calibración y control de la calidad de las imágenes (Split Engineering, s. f.).

2.4 Hipótesis de investigación

2.4.1 Hipótesis general

- La optimización del uso de explosivos mediante la combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000 permitirá incrementar la eficiencia operativa y reducir los costos de extracción en el Crucero XC 584 del nivel 7 durante el año 2025.

2.4.2 Hipótesis específicas

- La combinación de explosivos permitirá mejorar significativamente la fragmentación del macizo rocoso, reduciendo el tamaño P80 en comparación con el periodo sin mejora.
- El rediseño de la carga explosiva permitirá incrementar el avance por disparo en labores de sección 2.10 m × 2.40 m.
- La optimización del uso de explosivos permitirá reducir los costos unitarios de extracción en comparación con el periodo julio a septiembre de 2025.

2.5 Variables

2.5.1 Variable independiente

La optimización del uso de explosivos comprende la aplicación de criterios técnicos destinados a mejorar el aprovechamiento de la energía durante la voladura de rocas. Este proceso considera la elección de los productos explosivos, su distribución en los taladros y la cantidad de energía requerida para fragmentar el macizo rocoso. En las excavaciones subterráneas, una asignación apropiada de las cargas contribuye a obtener una fragmentación más uniforme y a mejorar el avance de la labor. En el Crucero XC 584 del nivel 7, la intervención consistió en combinar ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000, tomando en cuenta las características geomecánicas de la roca, con un RMR de 55, correspondiente a la clase III según la clasificación operativa utilizada. Para sustentar el diseño y la distribución de las cargas se emplearon los criterios del modelo Holmberg-Persson (Persson et al., 1994).

Componentes de la variable independiente

X1: Tipo de explosivo

Este componente hace referencia a los productos seleccionados para ejecutar la voladura, cuyas propiedades físicas y energéticas determinan su comportamiento durante la detonación. Entre los aspectos considerados se encuentran la densidad, la velocidad de detonación, la potencia y la capacidad de transmitir energía al macizo rocoso. La elección de estos materiales debe responder a las condiciones de la excavación y a los resultados de fragmentación que se pretende alcanzar. En la investigación, se evaluó el cambio de un esquema basado únicamente en Emulnor 3000 hacia una combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000, con la finalidad de aprovechar las características de cada producto dentro del proceso de voladura (Jimeno et al., 1995).

X2: Distribución de carga explosiva

La distribución de la carga explosiva se refiere a la forma en que se asignan las cantidades y los tipos de explosivos a los diferentes taladros que conforman la malla de perforación. Esta asignación responde a la función que cumple cada grupo de taladros, incluidos los de arranque, ayudas, hastiales, corona y piso. Su importancia radica en lograr que la energía se concentre en las zonas donde se requiere una mayor acción de rotura, mientras que en los sectores próximos al contorno se busca limitar los efectos no deseados sobre la roca circundante. De esta manera, una distribución diferenciada permite orientar el aprovechamiento de la energía y favorecer el control de la excavación (Persson et al., 1994).

X3: Energía específica de la voladura

La energía específica de la voladura expresa la energía suministrada por los explosivos en relación con la cantidad de roca que se pretende fragmentar. Este componente permite analizar la intensidad energética del proceso y su correspondencia con las características del macizo rocoso. Su evaluación se relaciona con el consumo de explosivos,

aunque debe distinguirse del factor de carga, debido a que este último representa una relación de masa por volumen o tonelaje y no una medida directa de energía. En la investigación, el análisis de este componente permitió examinar el aprovechamiento de las cargas empleadas y su relación con la fragmentación y el avance obtenido en el Crucero XC 584 (Cunningham, 1983; Hustrulid & Bullock, 2001).

2.5.2 Variable dependiente

La eficiencia operativa y los costos de extracción constituyen indicadores fundamentales para determinar el rendimiento técnico y económico de las actividades mineras. Su evaluación comprende aspectos como el tamaño de los fragmentos obtenidos después de la voladura, la longitud de avance alcanzada por disparo y los recursos económicos necesarios para extraer una tonelada de material. Una fragmentación apropiada, evaluada mediante el indicador granulométrico P80, puede facilitar las labores de limpieza y carguío, disminuir la presencia de fragmentos sobredimensionados y reducir la necesidad de ejecutar voladuras secundarias. Asimismo, el mejor aprovechamiento de la energía explosiva puede contribuir a incrementar la productividad y controlar los gastos asociados al ciclo de minado. Por consiguiente, el análisis conjunto de estos indicadores permite establecer la relación entre los resultados de la voladura, el desempeño de las operaciones posteriores y los costos unitarios de extracción (Cunningham, 1983; Ouchterlony, 2005).

VD1: Eficiencia.

VD2: Costos de extracción

2.5.3 Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Indicador	Medición	Unidad
VI: Optimización del uso de explosivos	Proceso técnico mediante el cual se seleccionan, distribuyen y dosifican los explosivos para mejorar el aprovechamiento de la energía de detonación y el rendimiento de la voladura. (Persson et al., 1994; Jimeno et al., 1995)	Tipo de explosivo	Registro de la combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000 utilizada en cada disparo	Tipo de explosivo
		Distribución de la carga explosiva	Ubicación y cantidad de explosivo en taladros de arranque, ayudas, cuadrantes, hastiales, corona y arrastres	kg/taladro
		Energía específica	Cantidad total de explosivo aplicada por volumen de roca volada	kg/m³
VD1: Eficiencia operativa	Nivel de desempeño del proceso de perforación y voladura, expresado por la calidad de fragmentación, el avance logrado y el tiempo empleado en la limpieza del material volado. (Hustrulid & Bullock, 2001)	Tiempo de limpieza	Tiempo empleado en retirar el material generado por cada disparo	h/disparo
		Avance por disparo	Longitud efectiva de excavación alcanzada después de cada voladura	m/disparo
		Fragmentación	Tamaño P80 determinado mediante análisis digital con Split Desktop	pulgadas
VD2: Costos de extracción	Gastos directos asociados a la perforación, voladura, limpieza y extracción del material, expresados por unidad de producción. (Hustrulid & Bullock, 2001)	Costo unitario de extracción	Costo total del proceso dividido entre las toneladas extraídas	USD/t
Variable externa: Condición geomecánica	Características de calidad, resistencia y discontinuidades del macizo rocoso que influyen en la propagación de la energía y	Clasificación RMR	Evaluación geomecánica del frente antes de la perforación	Valor RMR

	en la fragmentación obtenida. (Bieniawski, 1989)	Tipo de roca	Clasificación del macizo de acuerdo con el rango RMR registrado	Clase geomecánica
Variable externa: Humedad y presencia de agua	Condición ambiental del taladro o frente que puede afectar la estabilidad, sensibilidad y rendimiento de determinados explosivos, especialmente del ANFO. (Persson et al., 1994)	Presencia de agua	Inspección visual de taladros secos, húmedos o con agua	Categórica
		Nivel de humedad	Registro de la condición de humedad del frente antes del carguío	% o categoría
Variable externa: Variaciones operativas	Cambios producidos en equipos, geometría de perforación, secuencia de trabajo o condiciones de ejecución que pueden modificar el resultado de la voladura. (Jimeno et al., 1995)	Equipo de perforación	Verificación del uso de Jack Leg en ambos periodos	Tipo de equipo
		Diámetro de broca	Medición o verificación del diámetro empleado	mm
		Longitud de perforación	Registro de la profundidad efectiva de los taladros	m
		Sección de la labor	Medición del ancho y alto del frente	m × m
		Frecuencia de voladura	Número de disparos ejecutados por jornada	disparos/día
Variable externa: Factores humanos	Condiciones vinculadas con la experiencia, capacitación y cumplimiento del diseño por parte del personal encargado de la perforación, carguío y voladura. (Hustrulid & Bullock, 2001)	Experiencia del personal	Años de experiencia del perforista y personal de voladura	años
		Capacitación	Registro de capacitaciones recibidas sobre perforación, explosivos y seguridad	horas o número
		Cumplimiento del diseño	Comparación entre la malla diseñada y la malla ejecutada en campo	%
		Desviación de taladros	Diferencia entre la posición o inclinación diseñada y la ejecutada	cm o grados

Nota. Elaboración propia.

Capítulo III: Marco metodológico

3.1 Alcances y limitaciones

3.1.1 Alcances

La investigación se centró en evaluar la optimización del uso de explosivos durante las operaciones de voladura desarrolladas en el Crucero XC 584 del nivel 7. El análisis comprendió una labor subterránea de 2.10 m × 2.40 m de sección, donde se utilizó una perforadora Jack Leg, brocas de 38 mm de diámetro y barras de 6 pies de longitud. Para determinar el comportamiento de las voladuras, se consideraron indicadores técnicos y económicos, entre ellos la fragmentación del material, evaluada mediante Split Desktop, el avance obtenido por disparo y los costos unitarios de extracción. Asimismo, el estudio comprendió la comparación de dos etapas operativas del año 2025: la primera, correspondiente a julio, agosto y septiembre, en la que se trabajó bajo las condiciones iniciales; y la segunda, desarrollada entre octubre y diciembre, durante la cual se implementó una distribución combinada de explosivos. Esta evaluación permitió analizar los cambios en el rendimiento de las voladuras y establecer su relación con la eficiencia del proceso de extracción (Jimeno et al., 1995).

3.1.2 Limitaciones

El desarrollo de la investigación estuvo condicionado por las características geomecánicas del Crucero XC 584 del nivel 7, donde el macizo rocoso presentó un RMR de 55 %, identificado operativamente como roca tipo III. Estas condiciones influyeron en el comportamiento de la energía liberada durante la detonación y en los resultados de fragmentación. Asimismo, la evaluación estuvo sujeta a las variaciones propias de las operaciones mineras, particularmente en lo relacionado con la precisión de los taladros, la

presencia de humedad y las condiciones de ejecución de cada disparo. Otra restricción estuvo asociada con la información disponible en los registros operativos y con las limitaciones del procesamiento digital de imágenes mediante Split Desktop, cuya precisión dependió de la calidad de las fotografías y de la identificación de los fragmentos. Por consiguiente, los resultados obtenidos correspondieron a las condiciones específicas de la labor estudiada y su aplicación en otras excavaciones requeriría considerar las diferencias geomecánicas y operativas existentes (Bieniawski, 1989; Ouchterlony, 2005).

3.2 Tipo y nivel de investigación

3.2.1 Tipo de investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque aplicado, puesto que estuvo orientada a atender una problemática identificada en las operaciones de perforación y voladura del Crucero XC 584 del nivel 7. Para ello, se evaluó una alternativa de optimización basada en la selección y distribución diferenciada de explosivos, con la finalidad de mejorar el aprovechamiento de la energía durante la fragmentación del macizo rocoso. Esta intervención permitió analizar cambios en el rendimiento operativo y en los costos asociados al proceso de extracción. Según Hernández-Sampieri et al. (2014), la investigación aplicada utiliza conocimientos científicos para abordar situaciones concretas y contribuir a la solución de problemas prácticos.

3.2.2 Nivel de investigación

El estudio correspondió al nivel explicativo, debido a que buscó analizar cómo la optimización del uso de explosivos influyó en los resultados técnicos y económicos de la voladura subterránea. La evaluación consideró las variaciones en la fragmentación del material, el avance alcanzado por disparo y los costos unitarios de extracción, mediante la

comparación de las condiciones operativas anteriores y posteriores a la implementación. De acuerdo con Hernández-Sampieri et al. (2014), las investigaciones explicativas se orientan a comprender las causas de los fenómenos y las condiciones bajo las cuales se producen. En este contexto, el análisis permitió examinar la relación entre la modificación de las cargas explosivas y el desempeño del proceso de extracción.

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

La población de estudio comprendió la totalidad de las voladuras realizadas en las labores de desarrollo del Crucero XC 584, ubicado en el nivel 7, durante el año 2025. Para su delimitación se consideró una frecuencia operativa de un disparo diario, por lo que cada voladura constituyó una unidad de análisis dentro del proceso de perforación y voladura. Según Tamayo y Tamayo (2003), la población comprende el conjunto de elementos que comparten características relacionadas con el fenómeno investigado y sobre los cuales se pretende obtener información. (Tamayo & Tamayo, 2003)

3.3.2 Muestra

La muestra estuvo integrada por 184 voladuras ejecutadas en el Crucero XC 584 del nivel 7, distribuidas en dos etapas de evaluación. La primera comprendió 92 disparos realizados entre julio y septiembre de 2025, correspondientes a las condiciones operativas previas a la optimización. La segunda incluyó 92 disparos efectuados de octubre a diciembre del mismo año, periodo en el que se implementó la combinación de explosivos. Se empleó un muestreo no probabilístico por conveniencia, debido a que las unidades de análisis se seleccionaron considerando la disponibilidad de información registrada durante las operaciones mineras. Hernández-Sampieri et al. (2014) señalaron que este procedimiento

permite seleccionar unidades de estudio según criterios de accesibilidad y las condiciones propias de la investigación (Hernández-Sampieri et al., 2014)

3.3.3 Control de variables externas

Durante la ejecución del estudio se consideraron diversos factores externos que podían intervenir en el comportamiento de las voladuras realizadas en el Crucero XC 584 del nivel 7. Su control tuvo como propósito reducir la influencia de condiciones ajenas a la intervención y facilitar la comparación de los resultados correspondientes a la fragmentación (P80), el avance por disparo, el tiempo de limpieza y los costos unitarios de extracción. La identificación de estos factores permitió evaluar con mayor consistencia los cambios asociados a la selección y distribución de explosivos, considerando que el rendimiento de una voladura también depende de las características del entorno y de las condiciones de operación (Hustrulid & Bullock, 2001).

En relación con las propiedades geomecánicas, se procuró mantener condiciones comparables entre las etapas analizadas, considerando un RMR promedio de 55, identificado operativamente como roca tipo III. Esta característica permitió establecer una referencia común para examinar los resultados obtenidos durante julio, agosto y septiembre, correspondientes al periodo sin mejora, y octubre, noviembre y diciembre, correspondientes a la implementación. La consideración de la calidad del macizo rocoso fue importante debido a que su resistencia y estructura condicionan la propagación de las fracturas y el aprovechamiento de la energía explosiva (Bieniawski, 1989).

Respecto a la perforación, se conservaron las principales características técnicas de la operación, entre ellas el empleo de una perforadora Jack Leg, brocas de 38 mm de diámetro, barras de 6 pies de longitud y una sección de excavación de 2.10 m × 2.40 m. La

continuidad de estos parámetros permitió establecer condiciones de trabajo semejantes entre ambos periodos, de modo que la evaluación se concentrara en las modificaciones introducidas en los tipos de explosivos y su distribución dentro de los taladros. La geometría de perforación constituye un elemento relevante para el comportamiento de la voladura, debido a su influencia sobre la distribución de energía en el macizo rocoso (Jimeno et al., 1995).

En cuanto a las actividades operativas, se consideró una frecuencia de un disparo diario y la aplicación de procedimientos similares para las labores de perforación, limpieza y extracción del material fragmentado. Estas condiciones fueron tomadas como referencia para disminuir las diferencias relacionadas con la organización del trabajo y los equipos utilizados. Su consideración resultó necesaria porque las variaciones en la ejecución de las actividades pueden afectar los tiempos del ciclo de minado, la productividad y los costos operativos, independientemente de las características de la carga explosiva (Hustrulid & Bullock, 2001).

También se contemplaron las condiciones ambientales propias de la excavación subterránea, principalmente la humedad, la presencia de agua y la ventilación. Estos factores fueron relevantes para interpretar el comportamiento de los explosivos y las condiciones bajo las cuales se desarrollaron las operaciones. En particular, la presencia de agua puede afectar el desempeño de determinados agentes explosivos, por lo que su consideración contribuyó a reconocer posibles diferencias entre las voladuras evaluadas. De acuerdo con Persson et al. (1994), las condiciones del entorno y las propiedades de los explosivos deben considerarse conjuntamente al analizar los resultados de una detonación.

Finalmente, la consideración de las variables externas contribuyó a fortalecer la comparación técnica entre los dos periodos de estudio y a disminuir la influencia de factores distintos de la intervención evaluada. Bajo estas condiciones, se analizaron los cambios registrados después de implementar la combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000, junto con la modificación de la distribución de las cargas explosivas. Este procedimiento permitió examinar la relación entre la optimización propuesta y los indicadores de fragmentación, avance, limpieza y costos de extracción, sin atribuir automáticamente todas las variaciones observadas a una única causa (Persson et al., 1994; Cunningham, 1983).

3.4 Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Método de la investigación

La investigación se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo, puesto que se utilizaron registros numéricos para evaluar el comportamiento de los principales indicadores del proceso de perforación y voladura. Entre las variables analizadas se consideraron el tamaño de fragmentación (P80), el avance por disparo, el tiempo de limpieza, el factor de carga y los costos unitarios de extracción. Asimismo, se aplicó el método comparativo para identificar las diferencias entre las condiciones operativas iniciales y los resultados obtenidos después de implementar la optimización del uso de explosivos en el Crucero XC 584 del nivel 7. Este procedimiento permitió examinar las variaciones de los indicadores técnicos y económicos durante ambos periodos de evaluación, siguiendo los principios del análisis cuantitativo descritos por Hernández-Sampieri et al. (2014).

3.4.2 Técnicas de recolección de datos

Para obtener la información necesaria se emplearon la observación directa y el análisis documental. Mediante la observación en campo se identificaron y registraron las características operativas de las actividades de perforación y voladura, considerando las condiciones de ejecución de los disparos y el comportamiento del material fragmentado. Por su parte, el análisis documental permitió revisar y organizar los datos contenidos en los reportes de producción y registros operativos, principalmente aquellos relacionados con el consumo de explosivos, el avance alcanzado, la fragmentación y los costos de extracción. La aplicación conjunta de ambas técnicas facilitó la recopilación sistemática de información correspondiente a los periodos sin mejora y con implementación, proporcionando una base para el análisis comparativo de los resultados (Tamayo y Tamayo, 2003).

3.4.3 Instrumentos de recolección de datos

Para el desarrollo de la investigación se emplearon instrumentos de registro y herramientas informáticas que permitieron recopilar, organizar y analizar la información técnica y económica de las voladuras realizadas en el Crucero XC 584 del nivel 7. Los instrumentos utilizados fueron los siguientes:

- Ficha de registro de voladura: Se utilizó para documentar las características técnicas de cada disparo, considerando el número y la longitud de los taladros, los productos explosivos empleados (ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000), las cantidades utilizadas, su distribución dentro de la malla y el factor de carga correspondiente.
- Formato de control de consumo de explosivos: Permitió sistematizar la información sobre las cantidades de explosivos utilizadas en cada voladura y relacionarlas con

el volumen de roca fragmentada. A partir de estos registros se determinó el consumo específico, expresado mediante el indicador kg/m³.

- Registro de avance por disparo: Se empleó para consignar la longitud efectiva de excavación alcanzada después de cada voladura. La información obtenida permitió comparar el rendimiento de los disparos ejecutados durante los periodos sin mejora y con implementación.
- Formato de costos de extracción: Facilitó la recopilación de información económica correspondiente a las actividades de perforación, voladura, carguío y transporte del material. Estos datos se utilizaron para determinar y comparar los costos unitarios de extracción, expresados en dólares estadounidenses por tonelada (USD/t).
- Software Split Desktop: Se utilizó como herramienta de análisis granulométrico para procesar fotografías del material fragmentado después de las voladuras. Mediante este procedimiento se estimó la distribución de tamaños y se obtuvo el indicador P80, empleado para evaluar los cambios en la fragmentación.
- Software JKSimBlast: Se empleó como herramienta de apoyo para el diseño y la simulación de las mallas de perforación y voladura. Su aplicación permitió representar la distribución de las cargas explosivas y analizar las condiciones del diseño considerando las características geomecánicas de la labor.
- Ficha de observación de campo: Se utilizó para documentar las condiciones identificadas durante las actividades de perforación y voladura, principalmente la calidad de ejecución de los taladros, las posibles desviaciones, la presencia de agua y el comportamiento del macizo rocoso. Esta información contribuyó a interpretar

los resultados y reconocer factores operativos que podían influir en el desempeño de los disparos.

La aplicación de estos instrumentos permitió reunir información correspondiente a las 184 voladuras evaluadas, distribuidas en 92 disparos del periodo sin mejora y 92 del periodo con implementación. Los registros constituyeron la base para comparar los indicadores de fragmentación, avance por disparo, consumo de explosivos y costos unitarios de extracción, de acuerdo con los objetivos establecidos en la investigación.

3.5 Plan de análisis de los datos

3.5.1 Técnicas de análisis de datos

El procesamiento de la información se desarrolló mediante herramientas de estadística descriptiva, empleando medidas de tendencia central, principalmente promedios, así como variaciones porcentuales y comparaciones de los resultados obtenidos en los dos periodos de evaluación. Se examinaron los indicadores correspondientes al tamaño de fragmentación (P80), avance por disparo, tiempo de limpieza, factor de carga y costos unitarios de extracción. Los datos recopilados permitieron identificar las diferencias entre las condiciones iniciales de voladura y aquellas registradas después de implementar la combinación de explosivos. Asimismo, el análisis granulométrico proporcionó información para evaluar el comportamiento de la fragmentación y su relación con el rendimiento operativo. De acuerdo con Cunningham (1983), la estimación de la distribución de tamaños constituye un elemento importante para analizar los resultados de una voladura. A partir de la comparación de los indicadores técnicos y económicos, se evaluó la influencia de la optimización del uso de explosivos sobre el desempeño del proceso de extracción.

3.6 Procedimiento de la investigación

El procedimiento metodológico se organizó en cinco etapas consecutivas, orientadas al diagnóstico de las condiciones iniciales, el diseño de la propuesta de optimización, su implementación y la evaluación de los resultados obtenidos en el Crucero XC 584 del nivel 7.

Primera etapa: Diagnóstico de las condiciones iniciales

Se recopiló y organizó la información operativa correspondiente a julio, agosto y septiembre de 2025, periodo en el que se utilizó Emulnor 3000 como explosivo principal. Se revisaron los registros de las 92 voladuras ejecutadas durante esta etapa, considerando el tamaño de fragmentación (P80), el avance alcanzado por disparo, el tiempo de limpieza, el factor de carga y los costos unitarios de extracción. Esta información permitió establecer los valores de referencia para la comparación posterior.

Segunda etapa: Diseño de la propuesta de optimización

Se desarrolló la evaluación técnica del diseño de perforación y voladura mediante JKSimBlast, complementando el análisis con los criterios del modelo Holmberg-Persson para la distribución de las cargas explosivas. Asimismo, se utilizó el modelo Kuz-Ram para estimar el comportamiento granulométrico esperado. Durante esta etapa se consideraron las características geomecánicas del macizo rocoso y las condiciones de perforación existentes, con la finalidad de establecer una propuesta de distribución diferenciada de explosivos.

Tercera etapa: Implementación de la combinación de explosivos

Se aplicó la propuesta de optimización durante octubre, noviembre y diciembre de 2025, utilizando una combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000. La intervención se desarrolló considerando la función de los taladros dentro de la malla y las condiciones operativas de la labor. Durante este periodo se registró la información correspondiente

a 92 voladuras, manteniendo como referencia los principales parámetros de perforación empleados en la etapa inicial.

Cuarta etapa: Evaluación de la fragmentación obtenida

Se efectuó el análisis granulométrico del material fragmentado mediante el procesamiento digital de imágenes con Split Desktop. A partir de este procedimiento se determinó el indicador P80 correspondiente a las voladuras evaluadas, lo que permitió examinar las diferencias en el tamaño de los fragmentos entre ambos periodos. Los resultados obtenidos se utilizaron para complementar la evaluación técnica de la propuesta implementada.

Quinta etapa: Procesamiento y comparación de resultados

Se organizaron y analizaron los registros de las 184 voladuras consideradas en la investigación, distribuidas en 92 disparos sin mejora y 92 con implementación. Mediante el cálculo de promedios y variaciones porcentuales se compararon los indicadores de fragmentación, avance por disparo, tiempo de limpieza, factor de carga y costos unitarios de extracción. Finalmente, se interpretaron las diferencias identificadas para determinar el comportamiento técnico y económico del proceso después de la optimización del uso de explosivos.

Capitulo IV: Resultados y análisis

4.1 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de la evaluación realizada en el Crucero XC 584 del nivel 7, a partir de los registros de perforación y voladura correspondientes al año 2025. El estudio comprendió dos etapas operativas. La primera abarcó julio, agosto y septiembre, periodo durante el cual se empleó Emulnor 3000 como único explosivo. La segunda se desarrolló entre octubre y diciembre, cuando se introdujo una distribución combinada de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000, con el propósito de mejorar el aprovechamiento de la energía explosiva y el rendimiento de las labores de avance.

Para examinar los cambios producidos se consideraron cinco indicadores: tiempo de limpieza (t), avance por disparo (M), tamaño de fragmentación (P80), factor de carga (kg/m³) y costo unitario de extracción (USD/t). La información recopilada se organizó mediante promedios mensuales y se comparó entre ambos periodos utilizando estadística descriptiva. Este procedimiento permitió reconocer las variaciones en el comportamiento de las voladuras y establecer diferencias en el desempeño técnico y económico de la operación.

Al comparar los resultados, se identificó que el tiempo destinado a la limpieza disminuyó un 25.81 %, mientras que el avance por disparo aumentó un 24 %. De igual manera, el P80 presentó una reducción del 20.95 %, lo que indicó la obtención de fragmentos de menor tamaño durante la etapa de implementación. Por otra parte, el factor de carga registró un incremento del 4.74 %, reflejando una variación en el consumo específico de explosivos. A pesar de este aumento, el costo unitario de extracción se redujo un 21.16 %, evidenciando un resultado económico favorable durante el segundo periodo.

Los cambios registrados mostraron un mejor desempeño del proceso de perforación y voladura después de introducir la combinación de explosivos. En particular, la disminución del tamaño de los fragmentos y del tiempo de limpieza, junto con el mayor avance alcanzado, permitió identificar mejoras en el rendimiento de la labor. Estos resultados constituyeron la base para evaluar el cumplimiento de los objetivos y desarrollar posteriormente la contrastación de las hipótesis de investigación.

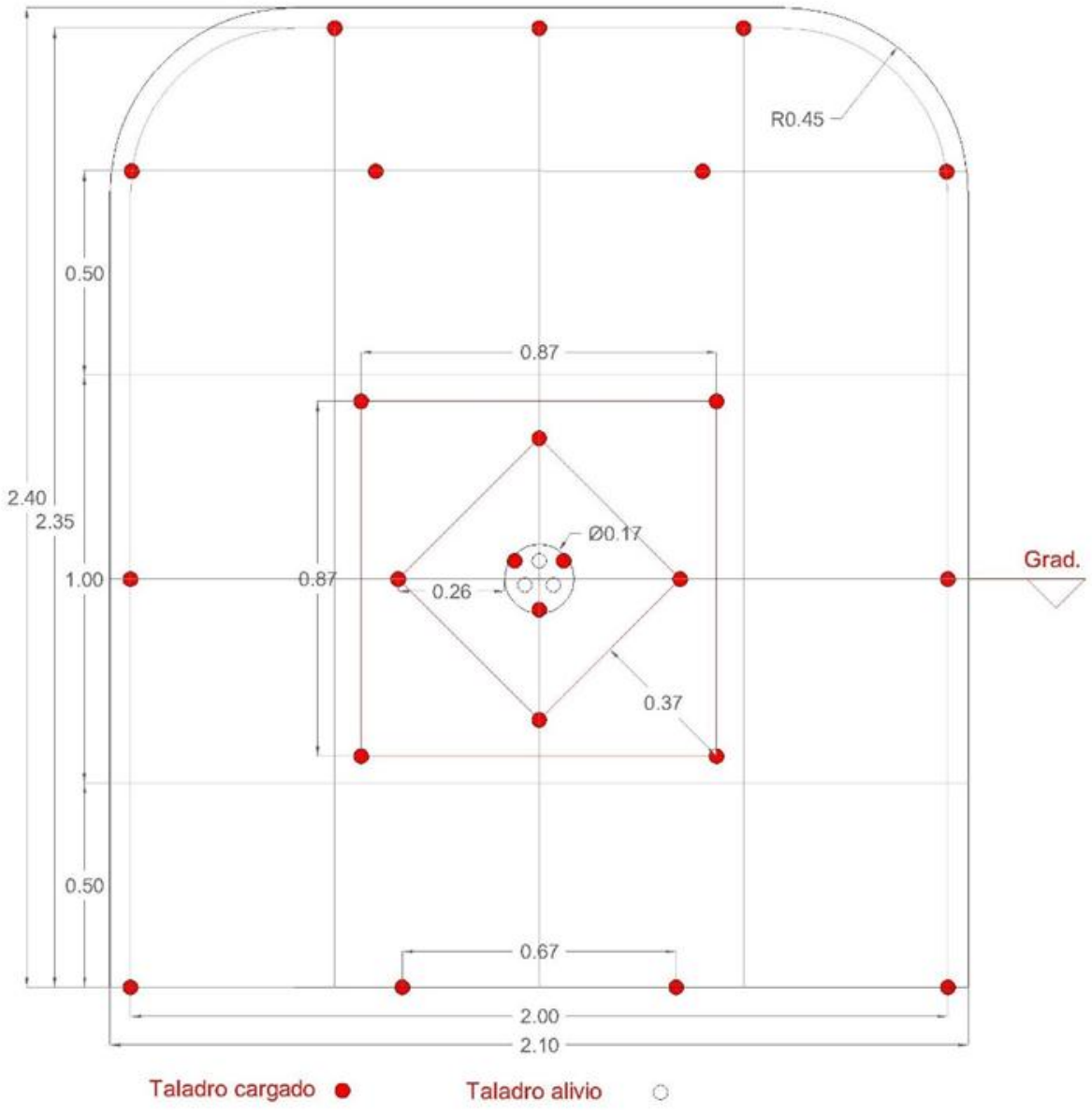
Tabla 2

Nomenclaturas

Indicador	**Descripción**
t	Tiempo de limpieza pala
M	Avance por disparo
P80	Fragmentación
KG/M3	Factor de carga
USD/T	Costo de extracción

Figura 1.

Malla antes de la mejora



Nota. Elaboración propia.

Tabla 3

Parámetros primer periodo

Mes	t	M	P80	KG/M3	USD/T
julio	1.41	1.30	7.82	3.970	116.299
agosto	1.42	1.30	7.78	3.965	116.736
septiembre	1.42	1.31	7.75	3.979	117.344
Total	**1.42**	**1.30**	**7.78**	**3.971**	**116.79**

Nota. Resultados de los indicadores tiempo de limpieza, avance, fragmentación, factor de carga y costo de unitarios de extracción del primer periodo sin la mejora del 2025.

Durante el primer periodo de evaluación, comprendido entre julio y septiembre de 2025, los indicadores operativos presentaron diferencias mínimas entre los meses analizados. El tiempo promedio destinado a la limpieza fue de 1.42 horas, sin cambios apreciables durante esta etapa. Aunque este comportamiento mostró cierta regularidad en la operación, también permitió identificar dificultades relacionadas con el tamaño del material fragmentado, que pudieron influir en el rendimiento de las actividades de limpieza y carguío.

El avance obtenido por disparo alcanzó un promedio de 1.30 m, registrándose un ligero incremento durante septiembre, cuando se llegó a 1.31 m. Estos valores reflejaron un aprovechamiento limitado de la longitud perforada y pusieron de manifiesto la necesidad de revisar las condiciones de voladura. Entre los aspectos considerados se encontró la fragmentación del macizo rocoso, debido a su relación con el comportamiento del material después de cada disparo.

En cuanto a la distribución granulométrica, el P80 registró un valor medio de 7.78 pulgadas. Este resultado indicó que el 80 % del material evaluado presentaba tamaños inferiores a dicha dimensión, lo que permitió caracterizar la fragmentación obtenida bajo las condiciones iniciales. La presencia de fragmentos relativamente grandes pudo dificultar las operaciones posteriores y contribuir al tiempo requerido para retirar el material de la labor.

Por su parte, el factor de carga presentó un promedio de 3.971 kg/m³, con pequeñas variaciones durante los tres meses. Este indicador permitió establecer la cantidad de explosivo consumida por unidad de volumen de roca fragmentada. Sin embargo, la estabilidad de su valor no necesariamente representó un aprovechamiento eficiente de la energía, puesto que el resultado de una voladura también depende de la ubicación de las cargas y de las características del explosivo utilizado. Durante esta etapa, el empleo exclusivo de Emulnor 3000 constituyó una condición relevante para el posterior análisis comparativo.

Desde el punto de vista económico, el costo unitario de extracción alcanzó un promedio de 116.79 USD/t. Este valor sirvió como referencia para evaluar los cambios registrados después de la implementación de la propuesta de optimización. Los resultados operativos sugirieron que las condiciones de fragmentación, el avance alcanzado y el tiempo de limpieza podían estar relacionados con el comportamiento de los costos; no obstante, su contribución específica requería analizarse junto con los demás componentes del proceso de extracción.

En términos generales, el primer periodo permitió establecer una línea base caracterizada por un avance promedio de 1.30 m por disparo, un P80 de 7.78 pulgadas y un costo de extracción de 116.79 USD/t. Estos indicadores evidenciaron oportunidades de mejora en el desempeño de la voladura y proporcionaron los valores de referencia necesarios para evaluar los resultados de la combinación de explosivos implementada durante el segundo periodo.

4.2 Aplicación del modelo de Holmberg y Persson

Para el diseño mejorado de la malla de perforación optimizada en el segundo periodo, se aplicó el modelo de Holmberg y Persson, el cual permitió definir la geometría de la voladura en función de la sección de la labor. (2.10 m × 2.40 m), las características del macizo rocoso. (RMR 55 % tipo III) y el diámetro de perforación de 38 mm.

El modelo establece que el burden. (B) y el espaciamiento. (E) dependen directamente del diámetro del taladro y de las condiciones del macizo rocoso, aplicándose la siguiente relación:

$$B = k \cdot D$$

$$E = 1.25 \cdot B$$

Donde:

B = burden. (m)

E = espaciamiento. (m)

D = diámetro del taladro. (m)

k = factor del macizo rocoso. (0.8 – 1.2 para roca media)

Considerando un diámetro de 38 mm. (0.038 m) y un macizo tipo III, se aplicó un factor k = 0.9:

$$B = 0.9 \times 0.038 = 0.0342 \approx 0.35 \text{ m}$$

$$E = 1.25 \times 0.35 = 0.44 \approx 0.45\text{m}$$

Asimismo, la longitud de carga. (Lc) se determinó en función de la longitud del taladro. (1.80 m correspondiente a barra de 6 pies), considerando:

$$Lc = 0.7 \cdot L$$

$$Lc = 0.7 \times 1.80 = 1.26 \text{ m}$$

La carga específica se optimizó mediante la combinación de explosivos, distribuyendo emulsiones en el arranque y ANFO en zonas de alivio y contorno, logrando una mejor liberación de energía. El factor de carga obtenido en el segundo periodo fue de 4.16 kg/m³, superior al periodo inicial. (3.97 kg/m³), lo cual permitió una mayor eficiencia en la fragmentación sin generar sobreexcavación significativa.

El diseño optimizado evidenció una mejor distribución de taladros en la malla, reduciendo zonas de confinamiento excesivo y mejorando la interacción de ondas de choque, lo que permitió incrementar el avance por disparo de 1.30 m a 1.61 m.

4.3 Aplicación del modelo Kuz-Ram. (Segundo periodo con mejora)

Para la estimación de la fragmentación del macizo rocoso en el segundo periodo, se aplicó el modelo Kuz-Ram, el cual permite determinar el tamaño medio de fragmentación. (Xm) y posteriormente el tamaño P80.

La ecuación general del modelo Kuznetsov es:

$$X_m = A \cdot \left(\frac{V}{Q}\right)^{0.8} \cdot Q^{0.167}$$

Donde:

Xm = tamaño medio de fragmento. (cm)

A = factor de roca. (0.8 para roca media)

V = volumen de roca por taladro. (m^3)

Q = carga de explosivo por taladro. (kg)

El volumen de roca se determinó como:

$V = B \cdot E \cdot H$

$V = 0.35 \times 0.45 \times 1.61 = 0.253\ m^3$

Considerando una carga promedio por taladro de 1.06 kg:

$$X_m = 0.8 \cdot \left(\frac{0.253}{1.06}\right)^{0.8} \cdot (1.06)^{0.167}$$

$X_m \approx 0.8 \cdot 0.31 \cdot 1.01 \approx 0.25\ m$

Posteriormente, el tamaño P80 se estimó mediante la relación empírica:

$P80 = 0.8 \cdot X_m$

$P80 = 0.8 \times 25 = 20\ cm$

$P80 \approx 7.87$ pulgadas

Sin embargo, los resultados obtenidos mediante el software Split Desktop evidenciaron un P80 promedio de 6.15 pulgadas correspondiente al segundo periodo, lo cual indica una mejora significativa respecto al periodo inicial. (7.78 pulgadas), validando la eficiencia del diseño optimizado de voladura.

La aplicación conjunta del modelo de Holmberg y Persson permitió optimizar la geometría de la malla de perforación, mientras que el modelo Kuz-Ram permitió estimar la fragmentación esperada. La mejora en el factor de carga y la adecuada combinación de explosivos generaron una mayor eficiencia en la liberación de energía, lo que se reflejó en:

- Reducción del P80 en 20.95 %
- Incremento del avance en 24 %
- Reducción del tiempo de limpieza en 25.81 %
- Disminución del costo unitario en 21.16 %

Los resultados obtenidos evidenciaron que la optimización del uso de explosivos permitió mejorar el desempeño técnico y económico del proceso de voladura en minería subterránea.

Tabla 4

Parámetros de perforación, voladura y geomecánica

Parámetro	Unidad	Primer Periodo. (Sin mejora)	Segundo Periodo. (Con mejora)	Variación
RMR	%	55. (Tipo III)	55. (Tipo III)	0%
Tipo de roca	-	Roca media. (III)	Roca media. (III)	Sin cambio
Equipo de perforación	-	Jack Leg	Jack Leg	Sin cambio
Diámetro de taladro	mm	38	38	0%
Longitud de taladro	m	1.8	1.8	0%
Burden. (B)	m	0.4	0.35	-13%
Espaciamiento. (E)	m	0.5	0.45	-10%
Número de taladros	und	24	26	8.3%
Tipo de explosivo	-	Emulnor 3000	ANFO + Emulnor 500, 1000, 3000	Optimizado
Distribución de carga	-	Uniforme	Diferenciada. (arranque, ayudas, contorno)	Mejorada
Carga por taladro	kg	0.9	1.06	18%
Factor de carga	kg/m³	3.97	4.16	5%
Tipo de iniciación	-	Convencional	Convencional optimizado	Mejor control
Fragmentación. (P80)	pulg	7.78	6.15	-21%
Avance por disparo. (M)	m	1.3	1.61	24%
Tiempo de limpieza. (t)	horas	1.42	1.05	-26%
Costo de extracción	USD/t	116.79	92.08	-21%

Nota. Elaboración propia

La comparación de los parámetros técnicos correspondientes a los dos periodos de evaluación mostró que las características geomecánicas del macizo rocoso permanecieron similares, con un RMR de 55, correspondiente a la clase III. Esta condición proporcionó una referencia común para analizar el comportamiento de las voladuras antes y después de la implementación, reduciendo la influencia de posibles diferencias en la calidad de la roca sobre los resultados obtenidos.

En cuanto a la perforación, el diámetro de los taladros y la longitud perforada conservaron sus valores iniciales. No obstante, se introdujeron modificaciones en la geometría de la malla, principalmente en el burden, que disminuyó de 0.40 m a 0.35 m, y en el espaciamiento, que pasó de 0.50 m a 0.45 m. Estos ajustes redujeron las distancias entre los taladros y modificaron las condiciones de distribución de la energía explosiva, favoreciendo una acción de rotura más controlada en el frente de avance.

Otra modificación relevante fue el aumento del 41.7 % en el número de taladros. Este cambio representó una mayor densidad de perforación dentro de la sección de trabajo y permitió distribuir las cargas en un mayor número de puntos. En consecuencia, la nueva configuración de la malla presentó condiciones más favorables para la fragmentación del macizo rocoso, aunque su contribución específica debe interpretarse conjuntamente con los cambios introducidos en los explosivos utilizados.

Respecto al sistema de carga, durante el primer periodo se empleó exclusivamente Emulnor 3000, mientras que en la etapa de implementación se incorporó una combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000. Esta modificación permitió diferenciar los productos explosivos según las necesidades de los taladros de arranque, ayudas y contorno. De esta manera, la propuesta no se limitó a modificar la cantidad de explosivo, sino que también consideró su selección y ubicación dentro de la malla.

El factor de carga aumentó un 4.74 % respecto al periodo inicial, reflejando un mayor consumo específico de explosivos por volumen de roca fragmentada. Paralelamente, el P80 disminuyó de 7.78 a 6.15 pulgadas, equivalente a una reducción del 20.95 %. Esta variación evidenció la obtención de fragmentos de menor tamaño durante el segundo periodo. Los resultados

fueron compatibles con un mejor desempeño del diseño implementado, considerando tanto los ajustes geométricos como la nueva distribución de cargas.

En el ámbito operativo, el avance promedio por disparo pasó de 1.30 m a 1.61 m, lo que representó un incremento aproximado del 24 %. Asimismo, el tiempo de limpieza presentó una disminución reportada del 25.81 %. Ambos resultados mostraron un comportamiento favorable del ciclo de minado durante la etapa de implementación, al obtenerse una mayor longitud de excavación por disparo y reducirse el tiempo destinado al retiro del material fragmentado.

Finalmente, el costo unitario de extracción descendió de 116.79 a 92.08 USD/t, con una reducción aproximada del 21.16 %. Este resultado indicó que, durante el segundo periodo, la operación presentó un menor costo por tonelada extraída, pese al incremento del factor de carga y del número de taladros. En conjunto, los indicadores técnicos y económicos mostraron mejoras después de aplicar el diseño optimizado de perforación y voladura, proporcionando evidencia para evaluar el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

4.4 Distribución de la carga explosiva por tipo de taladro

La distribución de los explosivos se estableció considerando la función de los taladros dentro de la malla de perforación y las características del macizo rocoso. En la zona de arranque y en los dos primeros cuadrantes se utilizó ANFO como carga principal, acompañado de Emulnor 3000 de 1 × 8 pulgadas como cebo. Esta configuración respondió a las mayores exigencias de rotura de la parte central del frente, donde resultaba necesario formar una abertura inicial que facilitara la fragmentación progresiva de la roca.

En los taladros de ayuda se mantuvo el empleo de ANFO y Emulnor 3000, con el propósito de aprovechar el espacio libre producido durante el arranque y continuar la fragmentación hacia

los sectores restantes de la excavación. A medida que los taladros se aproximaban al perímetro, se incorporaron Emulnor 1000 y Emulnor 500, seleccionados para establecer una distribución energética distinta de la utilizada en la zona central. De este modo, el diseño contempló diferencias en las características de las cargas según su ubicación y función dentro del frente.

Para los taladros correspondientes a hastiales y corona se consideró el uso de Emulnor 1000 y Emulnor 500, con el objetivo de limitar los efectos de la detonación sobre las cajas y el contorno final de la labor. La propuesta incluyó criterios de control de carga, desacoplamiento y espaciamiento, orientados a disminuir las alteraciones de la roca circundante y conservar la geometría de la sección de 2.10 m × 2.40 m. Este planteamiento guardó relación con los fundamentos de la voladura controlada, que destacan la importancia de regular la energía aplicada en los taladros perimetrales para reducir el daño alrededor de la excavación (Jimeno et al., 1995; Persson et al., 1994).

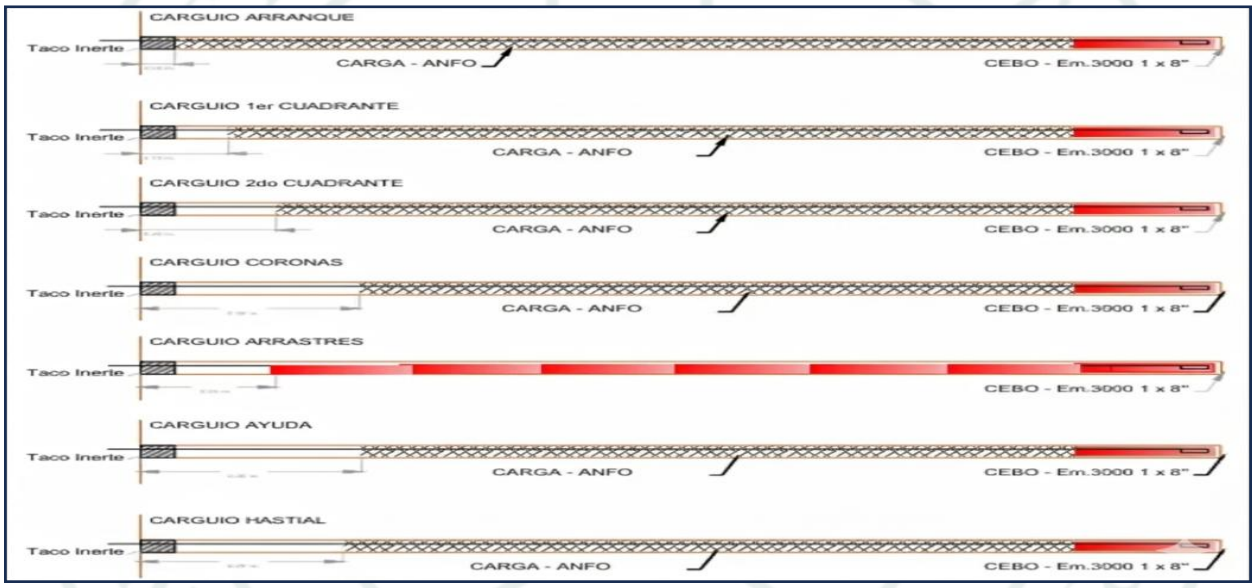
En la parte inferior del frente, correspondiente a los taladros de arrastre, se adoptó una distribución de explosivos orientada a facilitar la rotura del material ubicado en el piso de la labor. El Emulnor 3000 se empleó como cebo, mientras que la carga principal se distribuyó conforme al diseño establecido para esta zona. Asimismo, se contempló el uso de taco inerte en los taladros, como parte de las condiciones de confinamiento consideradas durante la ejecución de las voladuras.

En términos generales, el rediseño incorporó una combinación de ANFO, Emulnor 3000, Emulnor 1000 y Emulnor 500, diferenciando su utilización según los requerimientos de las

distintas zonas del frente. La propuesta buscó favorecer la fragmentación y el avance de la excavación, al mismo tiempo que procuró controlar los efectos de la voladura sobre las cajas y el perímetro de la labor. Esta distribución constituyó uno de los cambios técnicos evaluados durante el periodo de implementación y permitió relacionar la configuración de las cargas con los indicadores operativos registrados en la investigación.

Figura 2.

Distribución de la carga explosiva en los taladros de la malla optimizada

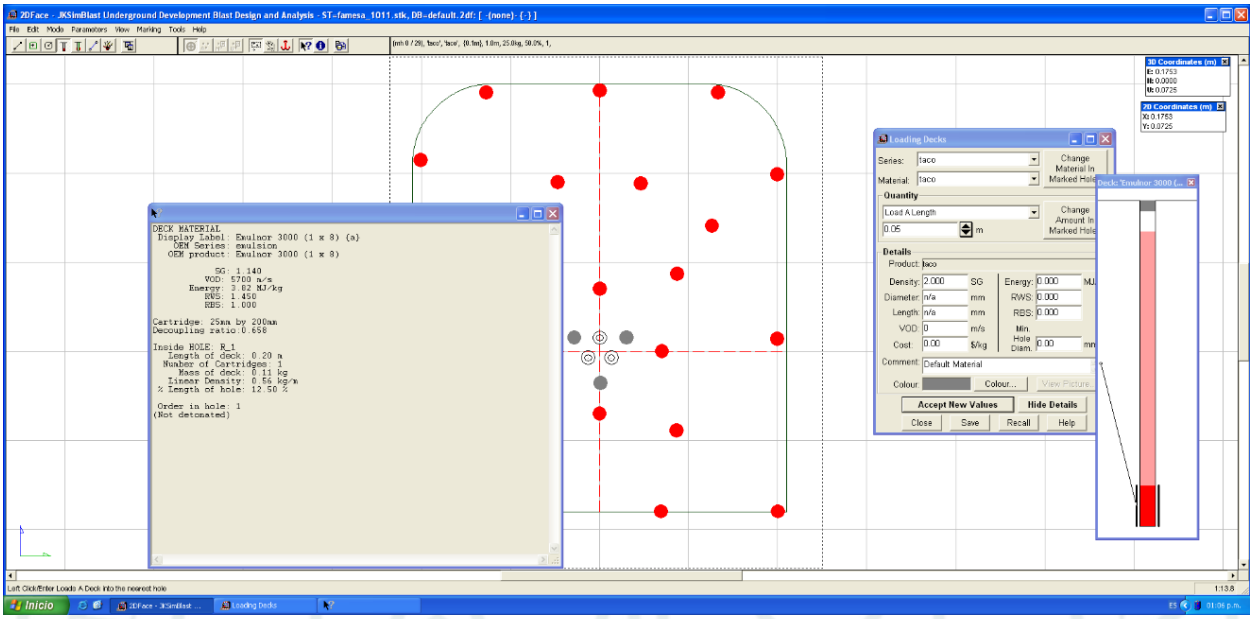


Nota. La figura muestra la distribución de ANFO y Emulnor 3000 de 1 × 8 pulgadas en los taladros de arranque, cuadrantes, corona, arrastres, ayudas y hastiales. Asimismo, se observa el uso de taco inerte y las variaciones en la longitud y continuidad de la carga de acuerdo con la función de cada taladro. Elaboración propia con base en el diseño de voladura del Crucero XC 584 del nivel 7, 2025.

4.5 Simulación JKSimblast segundo periodo

Figura 3.

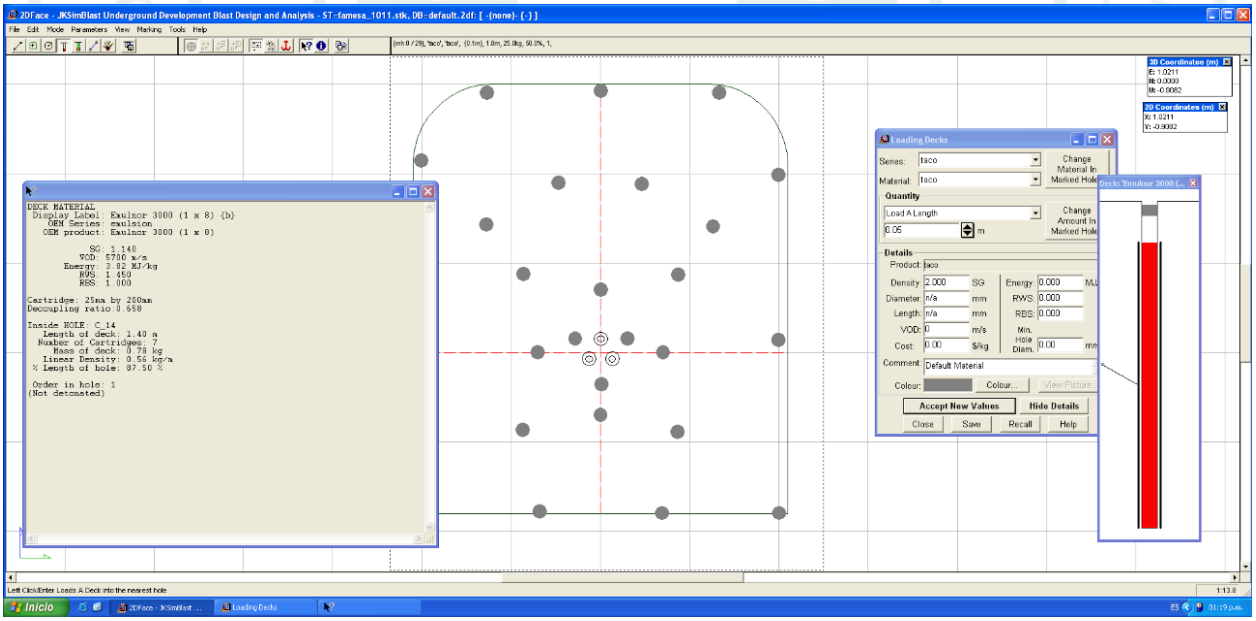
Prima de taladros después de la mejora



Nota. Elaboración propia.

Figura 4.

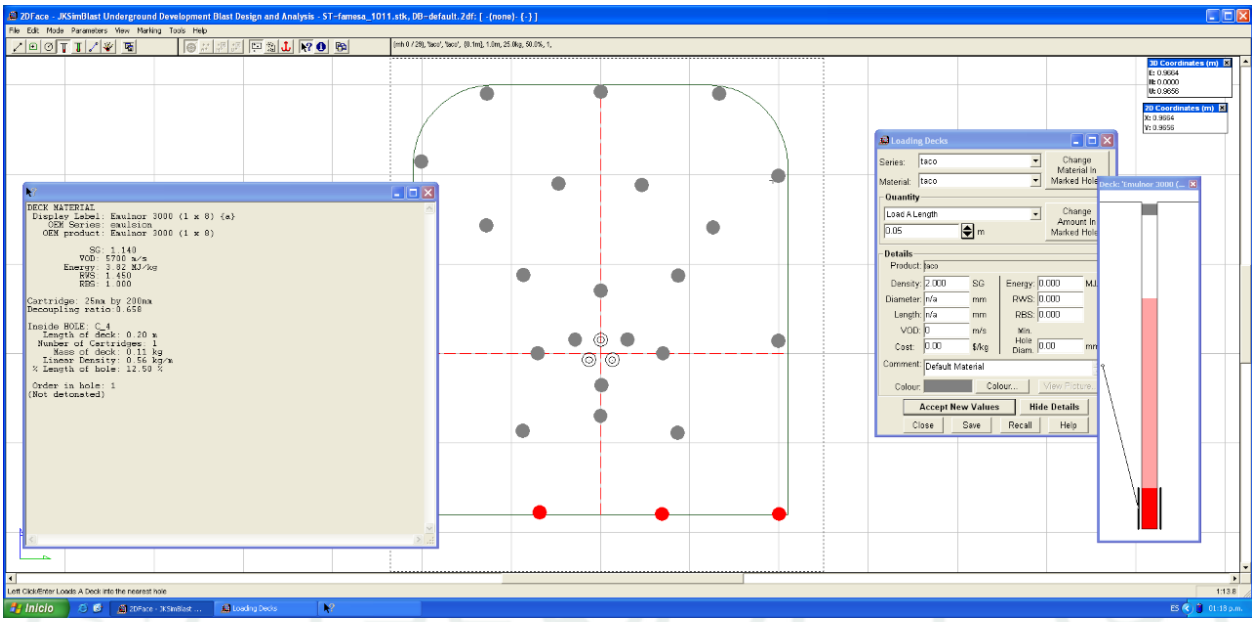
Carguío de taladros después de la mejora



Nota. Elaboración propia.

Figura 5.

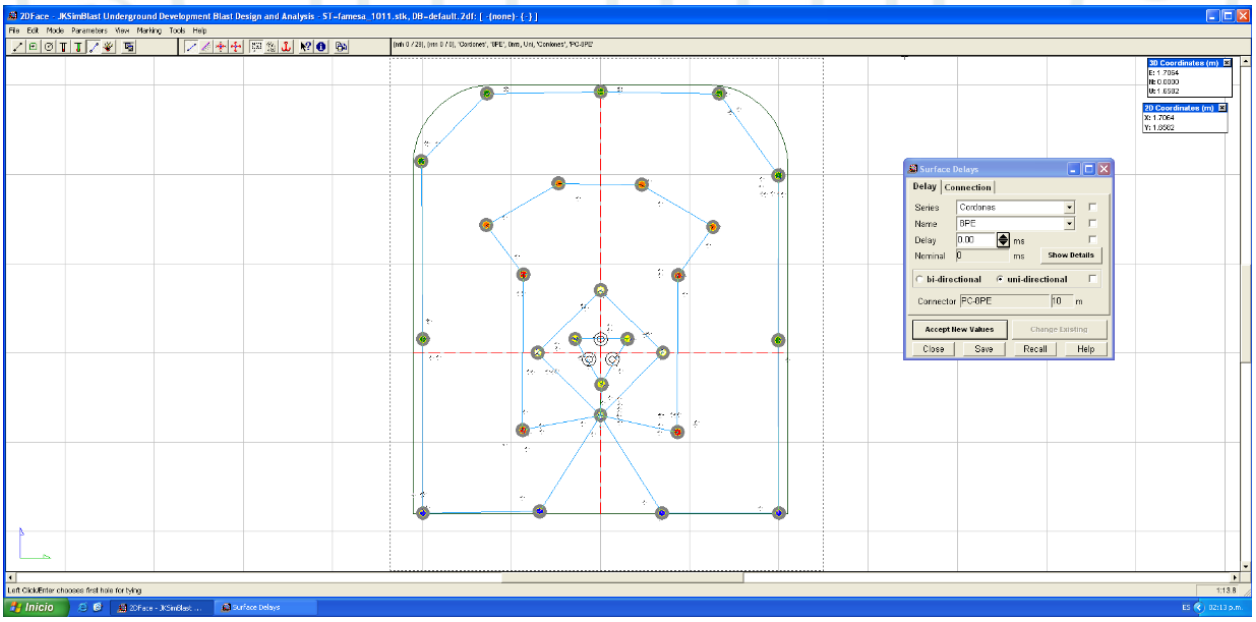
Taco en taladros después de la mejora



Nota. Elaboración propia.

Figura 6.

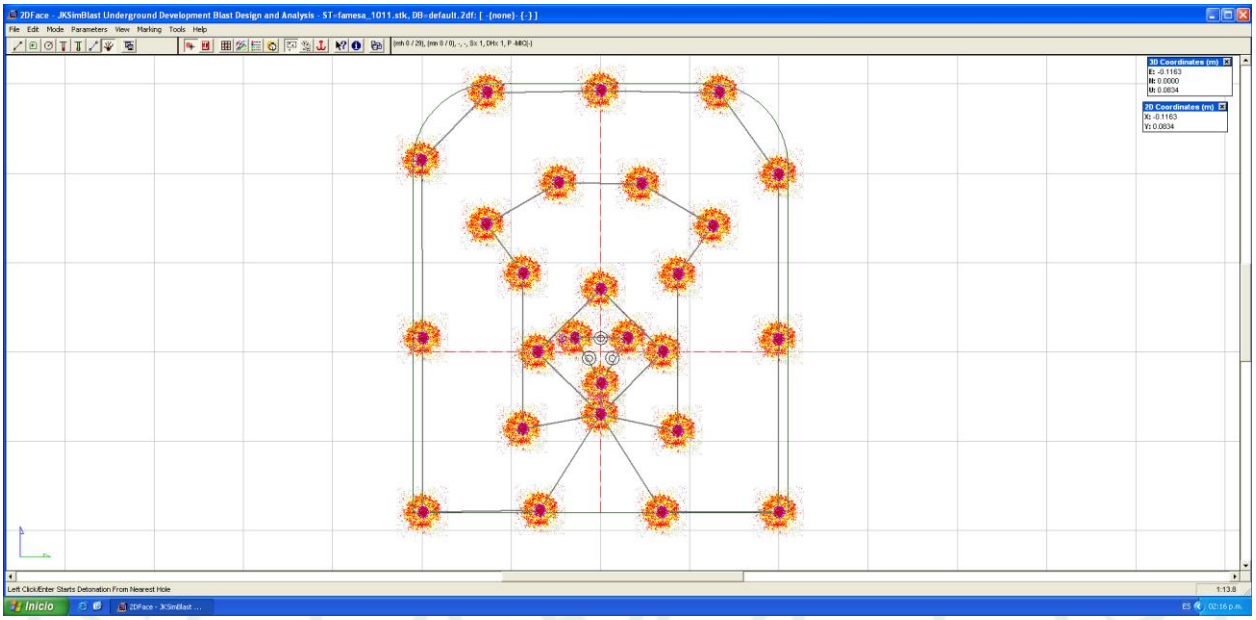
Amarre de taladros después de la mejora



Nota. Elaboración propia.

Figura 7.

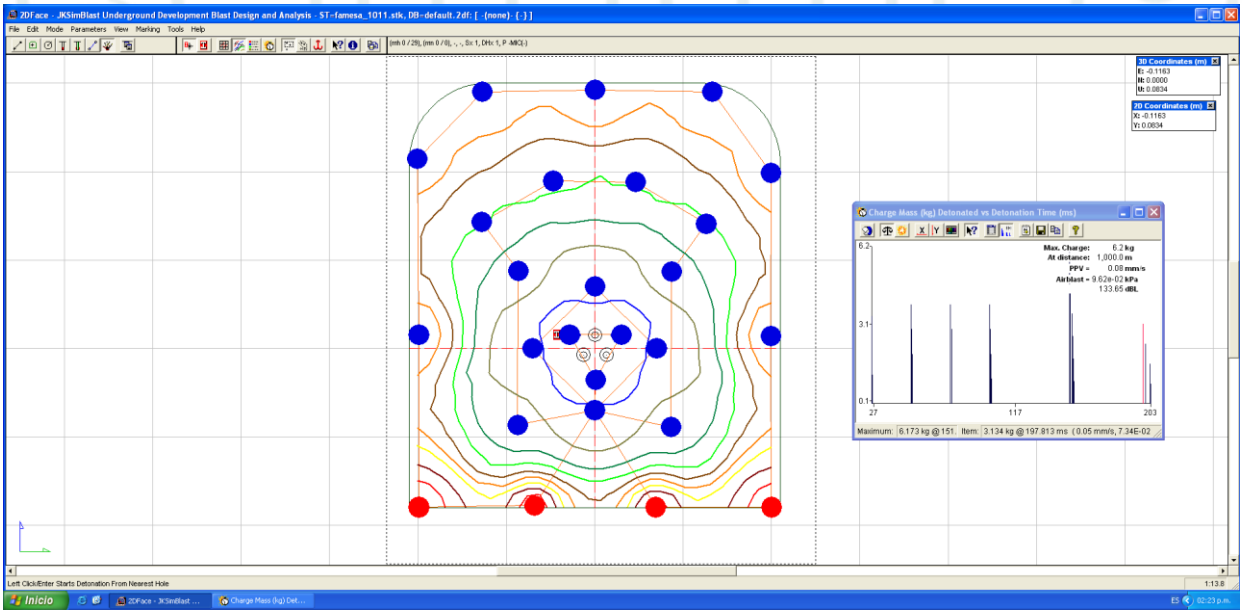
Detonación de taladros después de la mejora



Nota. Elaboración propia.

Figura 8.

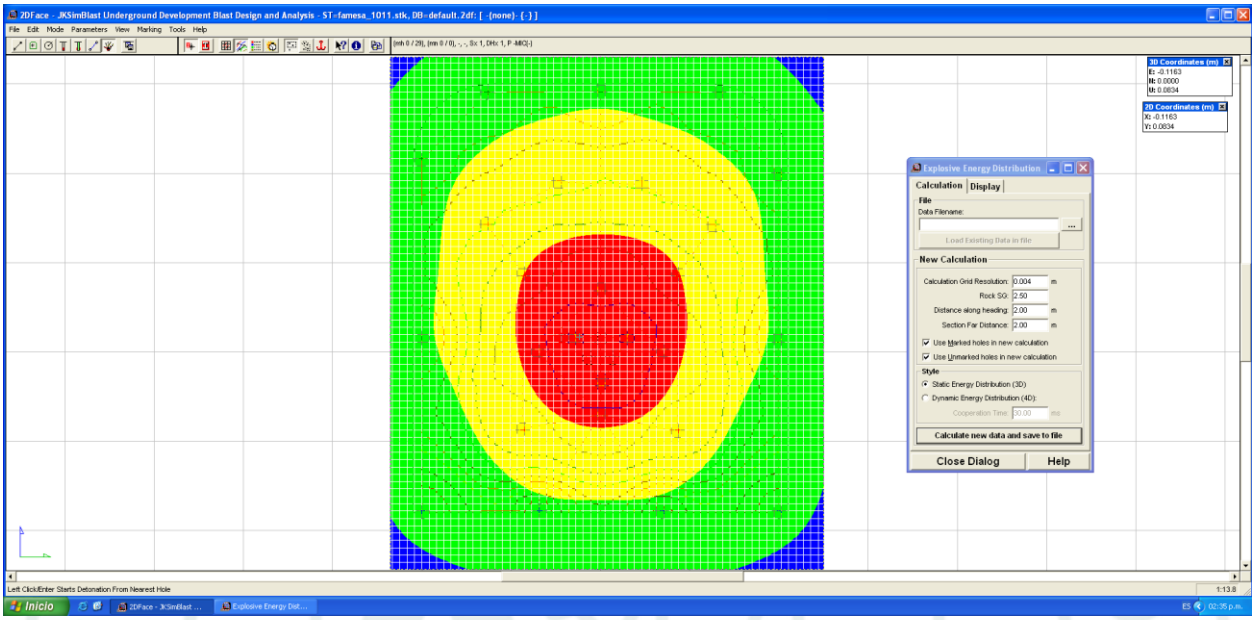
Curvas de energía después de la mejora



Nota. Elaboración propia.

Figura 9.

Campo de energía después de la mejora



Nota. Elaboración propia.

4.6 Aplicación del split desktop

La evaluación granulométrica del material obtenido después de las voladuras se efectuó mediante el software Split Desktop, herramienta que permitió estimar el tamaño de los fragmentos a partir del análisis de fotografías digitales tomadas en campo. Este procedimiento se aplicó durante los dos periodos de investigación, con el propósito de identificar las diferencias en la fragmentación del macizo rocoso antes y después de implementar la propuesta de optimización de explosivos.

Para desarrollar el análisis, se tomaron fotografías del material desprendido después de las voladuras, procurando mantener condiciones apropiadas de iluminación, nitidez y referencia dimensional. Las imágenes recopiladas se incorporaron posteriormente a Split Desktop, donde se seleccionaron las áreas de interés y se realizó la calibración utilizando una escala conocida. A continuación, mediante las herramientas de segmentación del programa, se identificaron los

contornos de los fragmentos presentes en cada imagen, obteniéndose la información necesaria para estimar su distribución por tamaños.

Una vez procesadas las fotografías, el programa permitió elaborar curvas granulométricas acumuladas y determinar el valor de P80. Este indicador representa el tamaño por debajo del cual se encuentra el 80 % del material, según la distribución granulométrica estimada. Su utilización facilitó la comparación de los resultados de fragmentación alcanzados con las distintas configuraciones de carga explosiva empleadas en la investigación.

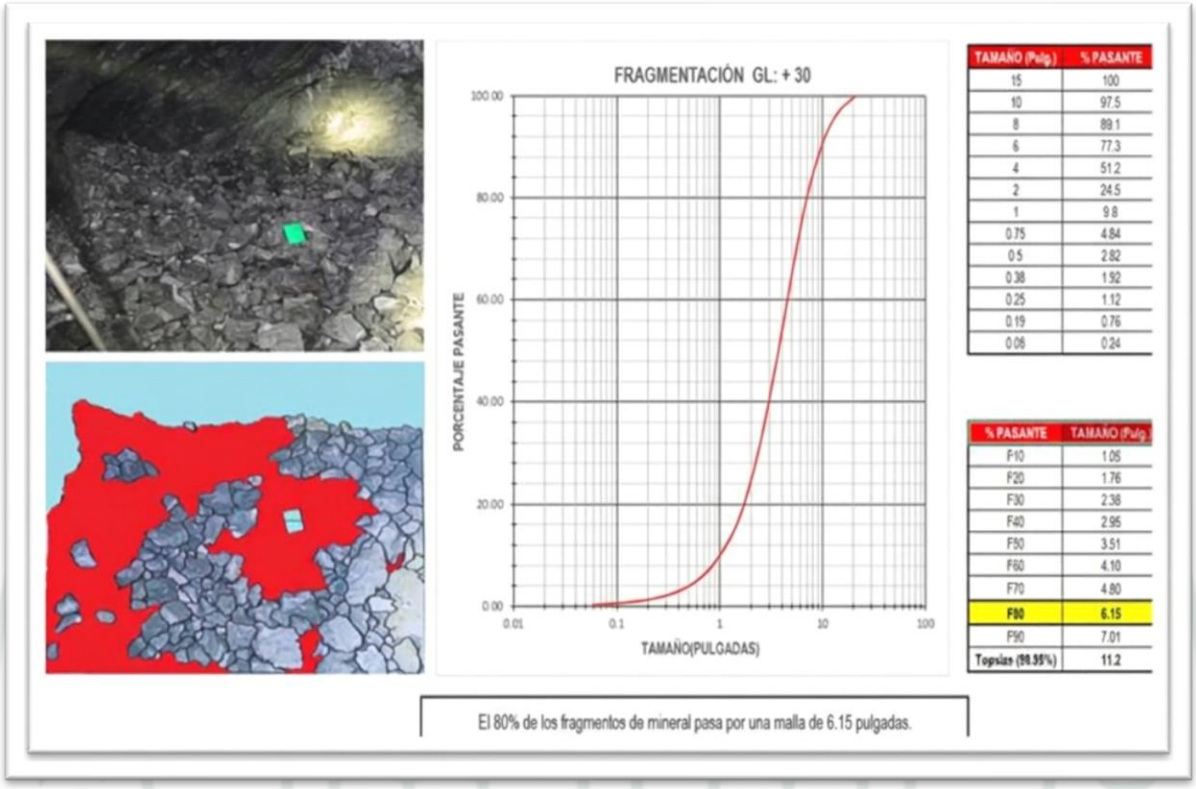
Durante el periodo comprendido entre julio y septiembre de 2025, el P80 alcanzó un promedio de 7.78 pulgadas, valor que caracterizó las condiciones de fragmentación obtenidas con el diseño inicial de voladura. Posteriormente, entre octubre y diciembre del mismo año, el promedio descendió a 6.15 pulgadas, después de introducir la combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000, junto con los ajustes efectuados en la malla de perforación. La diferencia entre ambos periodos fue de 1.63 pulgadas, equivalente a una reducción aproximada del 21 %.

Los resultados mostraron que, durante la etapa de implementación, se obtuvo una fragmentación de menor tamaño respecto a la condición inicial. Esta variación constituyó un resultado favorable para la evaluación técnica del diseño aplicado y permitió relacionar el comportamiento granulométrico con los demás indicadores operativos, particularmente el tiempo de limpieza y el avance por disparo.

En ese sentido, Split Desktop proporcionó información cuantitativa para comparar la fragmentación registrada en ambos periodos. Su aplicación contribuyó al análisis de los resultados de voladura y permitió disponer de un indicador técnico para evaluar el desempeño de la propuesta de optimización en el Crucero XC 584 del nivel 7.

Tabla 5

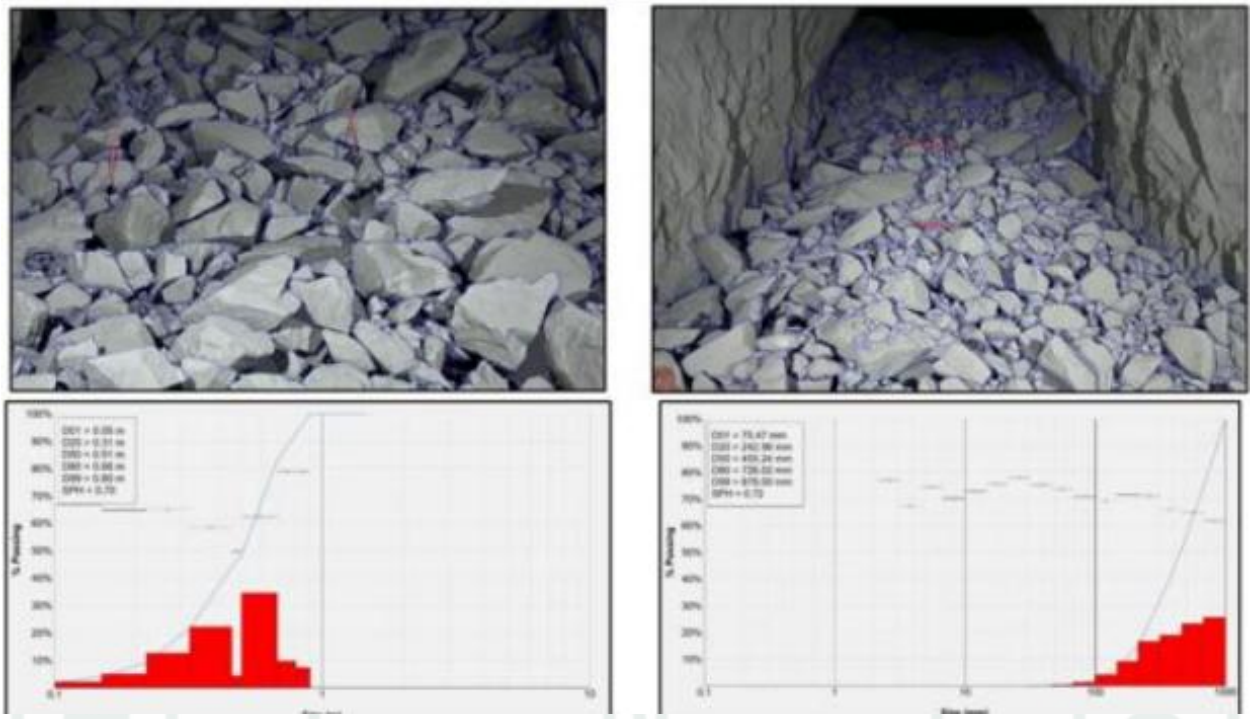
Aplicación del split desktop



Nota. Elaboración propia.

Figura 10.

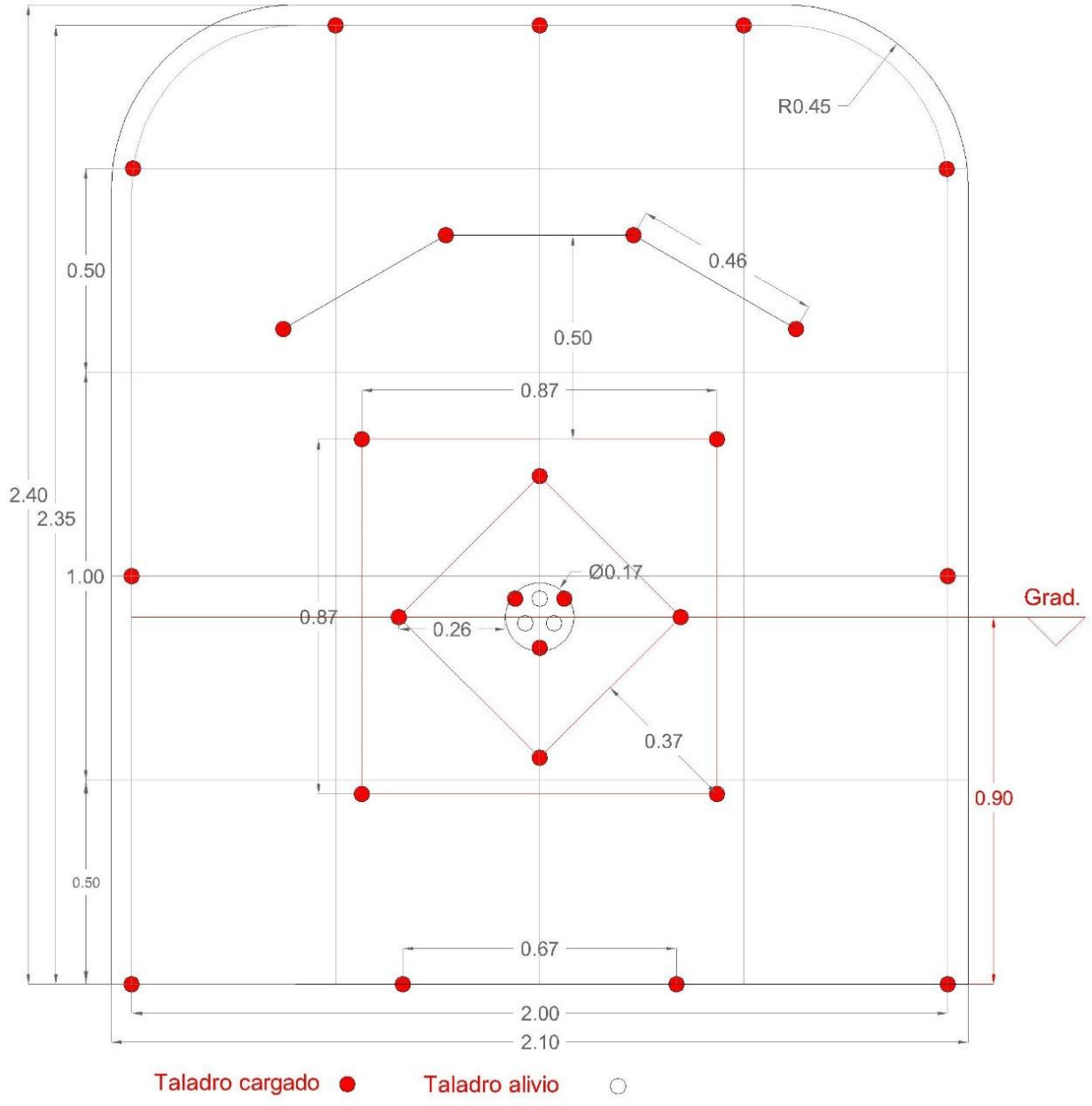
Pila después de la voladura segundo periodo



Nota. Muckpile correspondiente al tercer trimestre con optimización.

Figura 11.

Malla después de la mejora



Nota. Elaboración propia.

Tabla 6

Parámetros tercer trimestre

Mes	t	M	P80	KG/M3	USD/T
octubre	1.04	1.61	6.16	4.154	92.109
noviembre	1.05	1.61	6.15	4.170	92.022
diciembre	1.06	1.61	6.13	4.155	92.092
Total	**1.05**	**1.61**	**6.15**	**4.160**	**92.07**

Nota. Resultados de los indicadores de tiempo de limpieza, avance por disparo, fragmentación, factor de carga y costo de extracción de los meses del segundo periodo con la mejora del 2025.

Durante el segundo periodo de evaluación, comprendido entre octubre y diciembre de 2025, los indicadores operativos mostraron un comportamiento favorable respecto a las condiciones registradas antes de la implementación de la propuesta de optimización. Los resultados mensuales presentaron variaciones reducidas, lo que permitió identificar una mayor regularidad en el desempeño de las voladuras. En esta etapa, el tiempo promedio de limpieza fue de 1.05 horas, valor inferior al obtenido durante el periodo inicial. Esta disminución estuvo acompañada de una fragmentación de menor tamaño, condición que pudo favorecer el retiro del material desprendido y el desarrollo de las actividades posteriores a cada disparo.

En relación con el avance de la labor, se registró un promedio de 1.61 m por disparo, manteniéndose este valor durante los tres meses evaluados. El resultado representó una mejora frente a los 1.30 m alcanzados en la etapa anterior y evidenció un mayor rendimiento de las voladuras ejecutadas. Este comportamiento coincidió con los cambios introducidos en la geometría de la malla y en la distribución de los explosivos, mediante los cuales se buscó aprovechar mejor las condiciones de rotura del macizo rocoso.

El análisis granulométrico permitió determinar un P80 promedio de 6.15 pulgadas. Al compararlo con las 7.78 pulgadas registradas durante el primer periodo, se identificó una disminución de 1.63 pulgadas en el tamaño característico de los fragmentos. Esta diferencia mostró que el material obtenido durante la etapa de implementación presentó una granulometría más fina, lo que constituyó un resultado favorable para las operaciones de limpieza y carguío. Sin embargo, la uniformidad de la fragmentación y la reducción de posibles reprocesos requerirían indicadores adicionales para ser confirmadas.

Por otra parte, el factor de carga alcanzó un promedio de 4.160 kg/m³, superando ligeramente el valor de 3.971 kg/m³ correspondiente a la etapa inicial. Este incremento reflejó un mayor consumo específico de explosivos por volumen de roca fragmentada. Su evaluación se realizó considerando los resultados alcanzados en el avance y la fragmentación, debido a que el aumento de la carga explosiva debía analizarse junto con el rendimiento obtenido y los costos asociados a la operación.

En el componente económico, el costo unitario de extracción registró un promedio de 92.07 USD/t, inferior al valor de 116.79 USD/t obtenido durante el primer periodo. Esta diferencia mostró una reducción del costo por tonelada extraída durante la etapa de implementación. El comportamiento económico coincidió con el incremento del avance por disparo, la disminución del tiempo de limpieza y la obtención de fragmentos de menor tamaño, factores que pudieron contribuir a un mejor aprovechamiento de los recursos empleados en el ciclo de minado.

En conjunto, los resultados correspondientes al segundo periodo evidenciaron un desempeño técnico y económico más favorable después de incorporar la combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000, junto con los ajustes realizados en el diseño de perforación. Las mejoras observadas en el avance, la fragmentación, el tiempo de limpieza y el

costo unitario proporcionaron elementos para evaluar el cumplimiento de los objetivos de la investigación y contrastar los resultados con las condiciones iniciales del Crucero XC 584 del nivel 7.

4.7 Resultados por objetivos

4.7.1 Resultados respecto al objetivo general

La comparación de los indicadores operativos correspondientes a los dos periodos de evaluación permitió identificar cambios favorables en el proceso de perforación y voladura del Crucero XC 584, nivel 7, durante el año 2025. Después de implementar la propuesta de optimización, el tiempo promedio de limpieza pasó de 1.42 a 1.05 horas, lo que representó una disminución reportada del 25.81 %. De igual manera, el avance por disparo aumentó de 1.30 a 1.61 m, equivalente a una mejora aproximada del 24 %.

En relación con la fragmentación del material, el P80 descendió de 7.78 a 6.15 pulgadas, registrándose una reducción aproximada del 20.95 %. Este comportamiento estuvo acompañado de una disminución del costo unitario de extracción, que pasó de 116.79 a 92.07 USD/t, con una variación cercana al 21.16 %. En conjunto, los resultados mostraron que el periodo de implementación presentó mejores condiciones de rendimiento operativo y menores costos por tonelada extraída. Estas diferencias permitieron establecer una relación favorable entre los cambios introducidos en el diseño de perforación y voladura y el desempeño técnico y económico de la labor minera.

4.7.2 Resultados del objetivo específico 1

La evaluación de la fragmentación permitió identificar una disminución del tamaño característico del material volado durante el periodo en el que se empleó la combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000. A partir del procesamiento de

imágenes mediante Split Desktop, se obtuvo un P80 promedio de 7.78 pulgadas para la etapa inicial y de 6.15 pulgadas después de la implementación, lo que representó una reducción aproximada del 20.95 %.

La diferencia registrada indicó que, bajo las nuevas condiciones de perforación y voladura, se obtuvieron fragmentos de menor tamaño. Este resultado coincidió con la distribución diferenciada de explosivos aplicada en los taladros de arranque, ayudas y contorno, así como con los ajustes realizados en la geometría de la malla. Por consiguiente, la evaluación granulométrica mostró un comportamiento favorable de la fragmentación durante el segundo periodo, constituyendo un resultado relevante para el cumplimiento del primer objetivo específico.

4.7.3 Resultados del objetivo específico 2

El análisis del avance por disparo mostró una mejora en el rendimiento de las voladuras ejecutadas en la labor de sección 2.10 m × 2.40 m. Durante el primer periodo se alcanzó un avance promedio de 1.30 m, mientras que en la etapa posterior a la implementación se obtuvo un valor de 1.61 m. La diferencia de 0.31 m por disparo representó un incremento aproximado del 24 % respecto a la condición inicial.

Este comportamiento se registró después de modificar la distribución de las cargas explosivas y determinados parámetros de la malla de perforación, entre ellos el burden y el espaciamiento. Asimismo, la disminución del tamaño de fragmentación coincidió con el mayor avance obtenido durante el segundo periodo. Los resultados permitieron establecer que la configuración implementada estuvo asociada con un mejor aprovechamiento del proceso de voladura, reflejado en una mayor longitud de excavación por disparo.

4.7.4 Resultados del objetivo específico 3

La comparación económica de los periodos evaluados mostró una reducción del costo unitario de extracción después de aplicar la propuesta de optimización. Durante julio, agosto y septiembre de 2025 se registró un costo promedio de 116.79 USD/t, mientras que entre octubre y diciembre este indicador descendió a 92.07 USD/t. La diferencia fue de 24.72 USD/t, equivalente a una disminución aproximada del 21.16 % respecto al valor inicial.

Esta variación económica se presentó junto con una mejora de los principales indicadores operativos. En particular, el mayor avance por disparo, la reducción del tiempo de limpieza y la obtención de fragmentos de menor tamaño constituyeron condiciones favorables para el desempeño del ciclo de minado. Aunque el factor de carga aumentó durante la etapa de implementación, el costo promedio por tonelada extraída fue inferior al registrado inicialmente. Por tanto, los resultados mostraron un comportamiento económico favorable durante el segundo periodo y proporcionaron evidencia para evaluar el cumplimiento del tercer objetivo específico.

Tabla 7

Parámetros julio 2025

Periodo	Mes	Fecha	Proyecto	t	M	P80	KG/M3	USD/T
Primer periodo	julio	1/07/2025	Proy XC 584-001	1.49	1.32	7.77	4.021	115.24
Primer periodo	julio	2/07/2025	Proy XC 584-002	1.45	1.27	7.89	3.951	114.65
Primer periodo	julio	3/07/2025	Proy XC 584-003	1.38	1.30	8.00	4.030	117.05
Primer periodo	julio	4/07/2025	Proy XC 584-004	1.38	1.27	7.87	3.963	116.77
Primer periodo	julio	5/07/2025	Proy XC 584-005	1.46	1.30	7.84	4.003	117.33
Primer periodo	julio	6/07/2025	Proy XC 584-006	1.36	1.27	7.69	3.953	116.00
Primer periodo	julio	7/07/2025	Proy XC 584-007	1.49	1.29	7.82	3.932	118.28
Primer periodo	julio	8/07/2025	Proy XC 584-008	1.47	1.30	7.65	3.990	114.60
Primer periodo	julio	9/07/2025	Proy XC 584-009	1.38	1.31	8.00	4.004	116.51
Primer periodo	julio	10/07/2025	Proy XC 584-010	1.39	1.32	7.79	3.922	114.06
Primer periodo	julio	11/07/2025	Proy XC 584-011	1.41	1.29	7.78	3.970	116.88
Primer periodo	julio	12/07/2025	Proy XC 584-012	1.48	1.32	7.71	3.994	114.51
Primer periodo	julio	13/07/2025	Proy XC 584-013	1.36	1.31	7.91	3.977	116.15
Primer periodo	julio	14/07/2025	Proy XC 584-014	1.40	1.31	7.60	3.993	115.26
Primer periodo	julio	15/07/2025	Proy XC 584-015	1.37	1.27	7.90	4.023	114.36
Primer periodo	julio	16/07/2025	Proy XC 584-016	1.36	1.29	7.93	3.969	118.06
Primer periodo	julio	17/07/2025	Proy XC 584-017	1.44	1.32	7.74	3.987	116.59
Primer periodo	julio	18/07/2025	Proy XC 584-018	1.46	1.27	7.81	3.916	115.07
Primer periodo	julio	19/07/2025	Proy XC 584-019	1.43	1.31	7.72	3.986	117.22
Primer periodo	julio	20/07/2025	Proy XC 584-020	1.44	1.31	7.79	3.927	117.12
Primer periodo	julio	21/07/2025	Proy XC 584-021	1.40	1.29	7.75	3.955	118.58
Primer periodo	julio	22/07/2025	Proy XC 584-022	1.43	1.28	7.75	4.010	115.57
Primer periodo	julio	23/07/2025	Proy XC 584-023	1.46	1.32	7.90	3.972	117.36
Primer periodo	julio	24/07/2025	Proy XC 584-024	1.45	1.30	7.99	3.915	119.11
Primer periodo	julio	25/07/2025	Proy XC 584-025	1.39	1.32	7.94	3.934	114.50
Primer periodo	julio	26/07/2025	Proy XC 584-026	1.38	1.29	7.87	3.957	116.89
Primer periodo	julio	27/07/2025	Proy XC 584-027	1.37	1.28	7.78	3.925	115.18
Primer periodo	julio	28/07/2025	Proy XC 584-028	1.36	1.32	7.94	3.947	119.82
Primer periodo	julio	29/07/2025	Proy XC 584-029	1.42	1.33	7.74	3.953	114.97
Primer periodo	julio	30/07/2025	Proy XC 584-030	1.36	1.31	7.70	4.002	115.52
Primer periodo	julio	31/07/2025	Proy XC 584-031	1.40	1.29	7.84	3.985	116.07
			Promedio	**1.41**	**1.30**	**7.82**	**3.970**	**116.30**

Nota. Parámetros de tiempo de limpieza, avance, fragmentación, factor de carga y costo de extracción del mes de julio del 2025.

Durante julio de 2025, los registros de perforación y voladura del Crucero XC 584, nivel 7, mostraron variaciones relativamente pequeñas entre los disparos evaluados. El tiempo destinado a la limpieza fluctuó entre 1.36 y 1.49 horas, alcanzando un promedio de 1.41 horas. Aunque los valores reflejaron cierta regularidad en el desarrollo de esta actividad, también permitieron reconocer oportunidades de mejora en el retiro del material fragmentado. Por su parte, el avance por disparo se situó entre 1.27 y 1.33 m, con una media de 1.30 m, resultado que sirvió como referencia para evaluar posteriormente el rendimiento de las voladuras.

Respecto a la fragmentación, el indicador P80 presentó valores comprendidos entre 7.60 y 8.00 pulgadas, con un promedio mensual de 7.82 pulgadas. Estos resultados caracterizaron el tamaño del material obtenido bajo las condiciones iniciales de operación. La presencia de fragmentos de estas dimensiones pudo influir en el desarrollo de las actividades de limpieza y carguío, debido a las exigencias que representa la manipulación del material desprendido dentro de una labor subterránea.

En relación con el consumo de explosivos, el factor de carga varió entre 3.915 y 4.030 kg/m³, registrándose un promedio de 3.970 kg/m³. La limitada dispersión de estos valores mostró que la cantidad de explosivo utilizada por unidad de volumen de roca se mantuvo relativamente estable durante el mes. Sin embargo, este comportamiento no permitió establecer, por sí solo, si la energía aplicada se aprovechó de manera eficiente, debido a que el resultado de la voladura también estuvo condicionado por la geometría de la malla y la distribución de las cargas.

Desde la perspectiva económica, el costo unitario de extracción fluctuó entre 114.06 y 119.82 USD/t, con un promedio de 116.30 USD/t. Este indicador permitió establecer el comportamiento de los costos durante el primer mes de evaluación y constituyó una referencia

para las comparaciones posteriores. Asimismo, su análisis conjunto con el avance, la fragmentación y el tiempo de limpieza permitió identificar aspectos operativos que requerían atención.

En términos generales, los resultados de julio describieron las condiciones de trabajo existentes antes de introducir la propuesta de optimización. Durante este mes se empleó Emulnor 3000 como único tipo de explosivo, obteniéndose un avance promedio de 1.30 m por disparo, un P80 de 7.82 pulgadas y un costo unitario de 116.30 USD/t. Estos valores permitieron caracterizar el desempeño inicial de la labor y proporcionaron información para evaluar las modificaciones implementadas durante el segundo periodo de investigación.

Tabla 8

Parámetros de agosto 2025

Periodo	Mes	Fecha	Proyecto	t	M	P80	KG/M3	USD/T
Primer periodo	agosto	1/08/2025	Proy XC 584-032	1.38	1.28	7.98	4.004	115.01
Primer periodo	agosto	2/08/2025	Proy XC 584-033	1.38	1.32	7.96	3.956	117.51
Primer periodo	agosto	3/08/2025	Proy XC 584-034	1.40	1.30	7.72	3.945	115.69
Primer periodo	agosto	4/08/2025	Proy XC 584-035	1.46	1.27	7.70	3.986	117.69
Primer periodo	agosto	5/08/2025	Proy XC 584-036	1.40	1.29	7.81	3.953	116.16
Primer periodo	agosto	6/08/2025	Proy XC 584-037	1.49	1.30	7.61	3.962	117.35
Primer periodo	agosto	7/08/2025	Proy XC 584-038	1.38	1.31	7.98	4.026	115.66
Primer periodo	agosto	8/08/2025	Proy XC 584-039	1.37	1.30	7.94	4.026	118.20
Primer periodo	agosto	9/08/2025	Proy XC 584-040	1.48	1.30	7.63	4.030	119.08
Primer periodo	agosto	10/08/2025	Proy XC 584-041	1.42	1.30	7.81	3.966	115.23
Primer periodo	agosto	11/08/2025	Proy XC 584-042	1.43	1.29	7.69	3.917	116.81
Primer periodo	agosto	12/08/2025	Proy XC 584-043	1.42	1.28	7.95	3.933	114.48
Primer periodo	agosto	13/08/2025	Proy XC 584-044	1.45	1.30	7.94	4.010	119.30
Primer periodo	agosto	14/08/2025	Proy XC 584-045	1.47	1.30	7.78	4.008	114.36
Primer periodo	agosto	15/08/2025	Proy XC 584-046	1.37	1.27	7.83	3.929	117.01
Primer periodo	agosto	16/08/2025	Proy XC 584-047	1.50	1.32	7.77	3.955	118.72
Primer periodo	agosto	17/08/2025	Proy XC 584-048	1.48	1.29	7.82	3.956	117.27
Primer periodo	agosto	18/08/2025	Proy XC 584-049	1.41	1.27	7.94	3.923	115.88
Primer periodo	agosto	19/08/2025	Proy XC 584-050	1.38	1.31	7.60	3.946	118.36
Primer periodo	agosto	20/08/2025	Proy XC 584-051	1.41	1.32	7.90	3.992	115.10
Primer periodo	agosto	21/08/2025	Proy XC 584-052	1.35	1.31	7.67	3.969	114.22
Primer periodo	agosto	22/08/2025	Proy XC 584-053	1.37	1.27	7.63	3.980	119.20
Primer periodo	agosto	23/08/2025	Proy XC 584-054	1.38	1.27	7.60	3.988	117.55
Primer periodo	agosto	24/08/2025	Proy XC 584-055	1.35	1.33	7.70	3.928	117.96
Primer periodo	agosto	25/08/2025	Proy XC 584-056	1.43	1.33	7.60	3.946	119.98

Primer periodo	agosto	26/08/2025	Proy XC 584-057	1.45	1.33	7.79	3.917	119.33
Primer periodo	agosto	27/08/2025	Proy XC 584-058	1.50	1.31	7.62	3.951	114.88
Primer periodo	agosto	28/08/2025	Proy XC 584-059	1.40	1.30	7.62	3.945	115.09
Primer periodo	agosto	29/08/2025	Proy XC 584-060	1.40	1.32	7.88	3.920	116.84
Primer periodo	agosto	30/08/2025	Proy XC 584-061	1.43	1.27	7.95	3.929	114.45
Primer periodo	agosto	31/08/2025	Proy XC 584-062	1.36	1.27	7.89	4.026	114.45
			Promedio	**1.42**	**1.30**	**7.78**	**3.965**	**116.74**

Nota. Parámetros de tiempo de limpieza, avance, fragmentación, factor de carga y costo de extracción del mes de agosto del 2025.

Durante agosto de 2025, los indicadores registrados en las operaciones de perforación y voladura del Crucero XC 584, nivel 7, presentaron variaciones reducidas entre los disparos analizados. El tiempo empleado en la limpieza fluctuó entre 1.35 y 1.50 horas, alcanzando un promedio mensual de 1.42 horas. Este comportamiento mostró cierta regularidad en las actividades de retiro del material volado, aunque el tamaño de los fragmentos pudo representar una dificultad para el desarrollo de estas labores. Por su parte, el avance por disparo se mantuvo entre 1.27 y 1.33 m, con una media de 1.30 m, valor equivalente al registrado en julio, lo que evidenció la ausencia de cambios apreciables en el rendimiento de avance durante ambos meses.

En cuanto a las características granulométricas del material, el P80 presentó valores comprendidos entre 7.60 y 7.98 pulgadas, obteniéndose un promedio de 7.78 pulgadas. Esta información permitió identificar el tamaño característico de los fragmentos generados durante las voladuras ejecutadas bajo las condiciones iniciales de operación. Al compararlo con el promedio de julio, que fue de 7.82 pulgadas, se observó una diferencia de apenas 0.04 pulgadas, lo que reflejó un comportamiento similar de la fragmentación en los dos meses evaluados.

Respecto al factor de carga, se registraron valores desde 3.917 hasta 4.030 kg/m³, con un promedio de 3.965 kg/m³. La proximidad entre los resultados obtenidos indicó que el consumo específico de explosivos presentó pequeñas variaciones durante agosto. Sin embargo, la estabilidad de este indicador no necesariamente representó un aprovechamiento adecuado de la energía, puesto

que la fragmentación también dependió de las características del macizo rocoso, la configuración de la malla y la ubicación de las cargas explosivas.

En el aspecto económico, el costo unitario de extracción osciló entre 114.22 y 119.98 USD/t, alcanzando un promedio de 116.74 USD/t. Este valor fue ligeramente superior al registrado en julio, cuando se obtuvo un promedio de 116.30 USD/t. La diferencia mostró que los costos por tonelada extraída permanecieron en niveles similares, sin evidenciarse una reducción sostenida durante el periodo evaluado. Asimismo, el comportamiento de este indicador se examinó conjuntamente con los resultados de avance, fragmentación y tiempo de limpieza, debido a su relación con el rendimiento general del ciclo de minado.

En conjunto, los resultados correspondientes a agosto permitieron establecer que las condiciones operativas conservaron características semejantes a las observadas durante julio. El empleo exclusivo de Emulnor 3000, junto con el diseño inicial de perforación, estuvo acompañado de un avance promedio de 1.30 m por disparo, un P80 de 7.78 pulgadas y un costo unitario de 116.74 USD/t. Estos valores contribuyeron a consolidar la información de referencia del periodo sin mejora y sirvieron como base para comparar el desempeño de las voladuras después de implementar la propuesta de optimización.

Tabla 9

Parámetros de septiembre 2025

Periodo	Mes	Fecha	Proyecto	t	M	P80	KG/M3	USD/T
Primer periodo	septiembre	1/09/2025	Proy XC 584-063	1.42	1.33	7.84	4.014	115.54
Primer periodo	septiembre	2/09/2025	Proy XC 584-064	1.43	1.29	7.94	3.930	117.78
Primer periodo	septiembre	3/09/2025	Proy XC 584-065	1.40	1.29	7.63	4.004	118.40
Primer periodo	septiembre	4/09/2025	Proy XC 584-066	1.38	1.32	7.95	3.949	115.03
Primer periodo	septiembre	5/09/2025	Proy XC 584-067	1.38	1.28	8.00	4.026	117.33
Primer periodo	septiembre	6/09/2025	Proy XC 584-068	1.48	1.28	7.63	3.959	117.24
Primer periodo	septiembre	7/09/2025	Proy XC 584-069	1.40	1.28	7.69	3.997	115.96
Primer periodo	septiembre	8/09/2025	Proy XC 584-070	1.49	1.28	7.89	3.951	114.69
Primer periodo	septiembre	9/09/2025	Proy XC 584-071	1.48	1.28	7.67	4.009	116.11
Primer periodo	septiembre	10/09/2025	Proy XC 584-072	1.44	1.28	7.88	3.965	118.09
Primer periodo	septiembre	11/09/2025	Proy XC 584-073	1.37	1.30	7.62	3.943	119.85
Primer periodo	septiembre	12/09/2025	Proy XC 584-074	1.38	1.29	7.63	3.966	116.55
Primer periodo	septiembre	13/09/2025	Proy XC 584-075	1.39	1.28	7.60	3.968	118.85
Primer periodo	septiembre	14/09/2025	Proy XC 584-076	1.39	1.30	7.77	3.966	118.26
Primer periodo	septiembre	15/09/2025	Proy XC 584-077	1.36	1.30	7.97	3.916	115.83
Primer periodo	septiembre	16/09/2025	Proy XC 584-078	1.49	1.29	7.94	3.989	118.76
Primer periodo	septiembre	17/09/2025	Proy XC 584-079	1.35	1.31	7.94	3.949	115.17
Primer periodo	septiembre	18/09/2025	Proy XC 584-080	1.43	1.29	7.98	3.943	119.53
Primer periodo	septiembre	19/09/2025	Proy XC 584-081	1.49	1.27	7.63	3.927	116.51
Primer periodo	septiembre	20/09/2025	Proy XC 584-082	1.44	1.31	7.78	3.928	118.20
Primer periodo	septiembre	21/09/2025	Proy XC 584-083	1.46	1.27	7.83	4.004	119.17
Primer periodo	septiembre	22/09/2025	Proy XC 584-084	1.35	1.31	7.95	4.029	118.94
Primer periodo	septiembre	23/09/2025	Proy XC 584-085	1.47	1.30	7.94	3.971	116.89
Primer periodo	septiembre	24/09/2025	Proy XC 584-086	1.46	1.29	7.93	3.976	117.46
Primer periodo	septiembre	25/09/2025	Proy XC 584-087	1.39	1.33	7.72	4.023	114.92
Primer periodo	septiembre	26/09/2025	Proy XC 584-088	1.45	1.32	7.96	3.959	118.18
Primer periodo	septiembre	27/09/2025	Proy XC 584-089	1.49	1.33	7.76	3.949	116.11
Primer periodo	septiembre	28/09/2025	Proy XC 584-090	1.40	1.32	7.66	3.995	118.60
Primer periodo	septiembre	29/09/2025	Proy XC 584-091	1.46	1.28	7.65	3.959	118.60
Primer periodo	septiembre	30/09/2025	Proy XC 584-092	1.40	1.59	6.02	4.210	117.78
			Promedio	**1.42**	**1.32**	**7.75**	**3.979**	**117.34**

Nota. Parámetros de tiempo de limpieza, avance, fragmentación, factor de carga y costo de extracción del mes de septiembre del 2025.

Durante septiembre de 2025, las actividades de perforación y voladura desarrolladas en el Crucero XC 584 del nivel 7 mantuvieron un comportamiento semejante al observado durante julio y agosto. Los registros del tiempo de limpieza fluctuaron entre 1.35 y 1.49 horas, alcanzando un promedio mensual de 1.42 horas. Estos valores mostraron cierta regularidad en las operaciones de retiro del material fragmentado, aunque también permitieron identificar oportunidades para mejorar el rendimiento de esta actividad. En cuanto al avance por disparo, se obtuvieron resultados comprendidos entre 1.27 y 1.33 m, con una media reportada de 1.32 m, ligeramente superior a los promedios de los meses anteriores.

El análisis granulométrico mostró que el P80 presentó valores entre 7.60 y 8.00 pulgadas, registrándose un promedio de 7.75 pulgadas. Este resultado permitió caracterizar el tamaño del material producido durante las voladuras ejecutadas bajo las condiciones iniciales de operación. Al compararlo con los valores promedio de julio y agosto, de 7.82 y 7.78 pulgadas, respectivamente, se identificó una reducción gradual de este indicador. Sin embargo, las diferencias fueron pequeñas y no representaron un cambio sustancial en el comportamiento general de la fragmentación.

especto al consumo específico de explosivos, el factor de carga varió entre 3.916 y 4.029 kg/m³, con un promedio de 3.979 kg/m³. La proximidad entre los valores registrados indicó que la cantidad de explosivo empleada por unidad de volumen de roca presentó fluctuaciones moderadas. No obstante, la estabilidad de este indicador no permitió determinar por sí sola la eficiencia de la distribución energética, debido a que los resultados de la voladura también dependieron de las condiciones del macizo rocoso y de las características del diseño de perforación.

En el componente económico, el costo unitario de extracción se situó entre 114.92 y 119.85 USD/t, alcanzando un promedio mensual de 117.34 USD/t. Este valor fue superior a los promedios

registrados en julio y agosto, de 116.30 y 116.74 USD/t, respectivamente. La comparación mostró un incremento gradual del costo por tonelada extraída durante el primer periodo de evaluación, pese a que los indicadores de avance y fragmentación presentaron variaciones relativamente pequeñas.

Asimismo, se reportó un resultado puntual en el que el P80 alcanzó 6.02 pulgadas y el avance por disparo llegó a 1.59 m. Estos valores fueron más favorables que los promedios mensuales; sin embargo, correspondieron a un registro particular y no describieron el comportamiento predominante de las voladuras efectuadas durante septiembre. Por ello, su interpretación requirió diferenciarlo de los resultados generales del mes.

En conjunto, los registros de septiembre permitieron completar la caracterización del periodo inicial, durante el cual se utilizó Emulnor 3000 como único tipo de explosivo. Los resultados mostraron que el avance, la fragmentación y el tiempo de limpieza conservaron valores próximos a los registrados en los meses anteriores, mientras que el costo unitario presentó un ligero incremento. Esta información contribuyó a establecer las condiciones de referencia para evaluar posteriormente los cambios asociados con la optimización del diseño de perforación y voladura.

Tabla 10

Parámetros de octubre del 2025

Periodo	Mes	Fecha	Proyecto	t	M	P80	KG/M3	USD/T
Segundo periodo	octubre	1/10/2025	Proy XC 584-093	1.06	1.60	6.07	4.186	92.04
Segundo periodo	octubre	2/10/2025	Proy XC 584-094	1.07	1.60	6.29	4.106	91.87
Segundo periodo	octubre	3/10/2025	Proy XC 584-095	1.03	1.59	6.22	4.110	94.29
Segundo periodo	octubre	4/10/2025	Proy XC 584-096	1.01	1.62	6.07	4.201	91.58
Segundo periodo	octubre	5/10/2025	Proy XC 584-097	1.02	1.65	6.27	4.100	92.69
Segundo periodo	octubre	6/10/2025	Proy XC 584-098	1.00	1.61	6.20	4.182	90.13
Segundo periodo	octubre	7/10/2025	Proy XC 584-099	1.04	1.64	6.19	4.174	90.46
Segundo periodo	octubre	8/10/2025	Proy XC 584-100	1.03	1.58	6.25	4.135	94.01
Segundo periodo	octubre	9/10/2025	Proy XC 584-101	1.00	1.65	6.15	4.212	91.78
Segundo periodo	octubre	10/10/2025	Proy XC 584-102	1.00	1.59	6.24	4.147	94.42
Segundo periodo	octubre	11/10/2025	Proy XC 584-103	1.10	1.61	6.08	4.105	90.36
Segundo periodo	octubre	12/10/2025	Proy XC 584-104	1.10	1.61	6.06	4.160	92.37
Segundo periodo	octubre	13/10/2025	Proy XC 584-105	1.04	1.63	6.08	4.165	93.60
Segundo periodo	octubre	14/10/2025	Proy XC 584-106	1.07	1.64	6.16	4.145	92.25
Segundo periodo	octubre	15/10/2025	Proy XC 584-107	1.04	1.58	6.13	4.165	91.58
Segundo periodo	octubre	16/10/2025	Proy XC 584-108	1.07	1.60	6.13	4.107	90.59
Segundo periodo	octubre	17/10/2025	Proy XC 584-109	1.08	1.63	6.20	4.188	94.12
Segundo periodo	octubre	18/10/2025	Proy XC 584-110	1.05	1.64	6.27	4.163	92.97
Segundo periodo	octubre	19/10/2025	Proy XC 584-111	1.10	1.59	6.05	4.198	90.24
Segundo periodo	octubre	20/10/2025	Proy XC 584-112	1.00	1.60	6.19	4.111	91.72
Segundo periodo	octubre	21/10/2025	Proy XC 584-113	1.01	1.62	6.17	4.210	92.83
Segundo periodo	octubre	22/10/2025	Proy XC 584-114	1.02	1.65	6.06	4.164	92.67
Segundo periodo	octubre	23/10/2025	Proy XC 584-115	1.10	1.65	6.16	4.104	90.85
Segundo periodo	octubre	24/10/2025	Proy XC 584-116	1.06	1.61	6.13	4.119	90.32
Segundo periodo	octubre	25/10/2025	Proy XC 584-117	1.00	1.65	6.09	4.113	90.46
Segundo periodo	octubre	26/10/2025	Proy XC 584-118	1.00	1.62	6.17	4.155	92.21
Segundo periodo	octubre	27/10/2025	Proy XC 584-119	1.03	1.60	6.03	4.118	93.99
Segundo periodo	octubre	28/10/2025	Proy XC 584-120	1.04	1.60	6.04	4.213	93.06
Segundo periodo	octubre	29/10/2025	Proy XC 584-121	1.07	1.58	6.28	4.220	92.72
Segundo periodo	octubre	30/10/2025	Proy XC 584-122	1.07	1.60	6.29	4.189	91.99
Segundo periodo	octubre	31/10/2025	Proy XC 584-123	1.04	1.58	6.18	4.109	91.22
			Promedio	**1.04**	**1.59**	**6.16**	**4.154**	**92.11**

Nota. Parámetros de tiempo de limpieza, avance, fragmentación, factor de carga y costo de extracción del mes de octubre del 2025.

Durante octubre de 2025, primer mes de implementación de la propuesta de optimización, los indicadores de perforación y voladura del Crucero XC 584, nivel 7, mostraron un comportamiento favorable respecto a los resultados obtenidos entre julio y septiembre. El tiempo destinado a la limpieza fluctuó entre 1.00 y 1.10 horas, alcanzando un promedio de 1.04 horas. Esta disminución reflejó una menor duración de las actividades de retiro del material fragmentado y constituyó uno de los principales cambios operativos registrados después de modificar el diseño de voladura.

En cuanto al avance por disparo, se obtuvieron valores comprendidos entre 1.58 y 1.65 m, con una media mensual de 1.59 m. Este resultado superó el promedio de 1.30 m registrado durante el periodo inicial y evidenció un mayor rendimiento en el avance de la excavación. El comportamiento observado coincidió con los ajustes realizados en la geometría de la malla de perforación y con la incorporación de una distribución diferenciada de explosivos, orientada a mejorar las condiciones de rotura del macizo rocoso.

Respecto a la fragmentación, el P80 presentó valores entre 6.03 y 6.29 pulgadas, obteniéndose un promedio de 6.16 pulgadas. Al compararlo con el promedio de 7.78 pulgadas correspondiente al primer periodo, se identificó una disminución del tamaño característico de los fragmentos. Esta diferencia mostró que, durante octubre, el material volado presentó una granulometría más fina, condición que pudo favorecer el desarrollo de las operaciones posteriores a la voladura, particularmente la limpieza y el carguío.

Por otra parte, el factor de carga registró valores desde 4.100 hasta 4.220 kg/m³, con un promedio de 4.154 kg/m³. Este resultado fue superior al observado durante la etapa inicial, lo que indicó un mayor consumo específico de explosivos por volumen de roca fragmentada. Su evaluación se realizó conjuntamente con los indicadores de avance y fragmentación, debido a que

el incremento de la carga explosiva debía relacionarse con los resultados operativos alcanzados y no considerarse, de manera aislada, como una mejora en la eficiencia del proceso.

En el aspecto económico, el costo unitario de extracción osciló entre 90.13 y 94.42 USD/t, alcanzando un promedio mensual de 92.11 USD/t. Este valor fue inferior al promedio de 116.79 USD/t registrado durante el primer periodo de evaluación. La diferencia evidenció una reducción del costo por tonelada extraída, comportamiento que coincidió con el mayor avance por disparo, la disminución del tiempo de limpieza y la obtención de fragmentos de menor tamaño.

En términos generales, octubre marcó el inicio de una etapa con mejores resultados técnicos y económicos respecto a las condiciones anteriores. La combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000, junto con las modificaciones introducidas en la malla de perforación, estuvo acompañada de un avance promedio de 1.59 m por disparo, un P80 de 6.16 pulgadas y un costo unitario de 92.11 USD/t. Estos resultados constituyeron la primera referencia mensual del periodo con implementación y permitieron evaluar el comportamiento de la propuesta de optimización durante los meses siguientes.

Tabla 11

Parámetros de noviembre del 2025

Periodo	Mes	Fecha	Proyecto	t	M	P80	KG/M3	USD/T
Segundo periodo	noviembre	1/11/2025	Proy XC 584-124	1.05	1.61	6.00	4.134	92.70
Segundo periodo	noviembre	2/11/2025	Proy XC 584-125	1.01	1.58	6.06	4.222	91.37
Segundo periodo	noviembre	3/11/2025	Proy XC 584-126	1.07	1.59	6.07	4.138	92.42
Segundo periodo	noviembre	4/11/2025	Proy XC 584-127	1.03	1.64	6.19	4.141	94.29
Segundo periodo	noviembre	5/11/2025	Proy XC 584-128	1.08	1.62	6.03	4.179	94.15
Segundo periodo	noviembre	6/11/2025	Proy XC 584-129	1.07	1.59	6.21	4.181	91.99
Segundo periodo	noviembre	7/11/2025	Proy XC 584-130	1.09	1.62	6.13	4.150	94.04
Segundo periodo	noviembre	8/11/2025	Proy XC 584-131	1.05	1.60	6.23	4.172	91.54
Segundo periodo	noviembre	9/11/2025	Proy XC 584-132	1.00	1.63	6.19	4.157	92.27
Segundo periodo	noviembre	10/11/2025	Proy XC 584-133	1.08	1.59	6.22	4.182	91.88
Segundo periodo	noviembre	11/11/2025	Proy XC 584-134	1.04	1.58	6.16	4.133	90.91
Segundo periodo	noviembre	12/11/2025	Proy XC 584-135	1.07	1.61	6.01	4.102	91.43
Segundo periodo	noviembre	13/11/2025	Proy XC 584-136	1.04	1.59	6.27	4.185	90.39
Segundo periodo	noviembre	14/11/2025	Proy XC 584-137	1.04	1.59	6.19	4.171	91.03
Segundo periodo	noviembre	15/11/2025	Proy XC 584-138	1.01	1.65	6.14	4.220	94.30
Segundo periodo	noviembre	16/11/2025	Proy XC 584-139	1.08	1.62	6.29	4.202	91.61
Segundo periodo	noviembre	17/11/2025	Proy XC 584-140	1.07	1.61	6.28	4.221	91.22
Segundo periodo	noviembre	18/11/2025	Proy XC 584-141	1.00	1.65	6.26	4.150	92.49
Segundo periodo	noviembre	19/11/2025	Proy XC 584-142	1.10	1.64	6.29	4.178	93.96
Segundo periodo	noviembre	20/11/2025	Proy XC 584-143	1.09	1.63	6.18	4.155	92.96
Segundo periodo	noviembre	21/11/2025	Proy XC 584-144	1.00	1.59	6.16	4.130	90.09
Segundo periodo	noviembre	22/11/2025	Proy XC 584-145	1.02	1.64	6.05	4.209	92.46
Segundo periodo	noviembre	23/11/2025	Proy XC 584-146	1.06	1.59	6.17	4.184	92.51
Segundo periodo	noviembre	24/11/2025	Proy XC 584-147	1.06	1.58	6.14	4.222	91.40
Segundo periodo	noviembre	25/11/2025	Proy XC 584-148	1.10	1.64	6.08	4.107	90.82
Segundo periodo	noviembre	26/11/2025	Proy XC 584-149	1.04	1.62	6.16	4.197	91.66
Segundo periodo	noviembre	27/11/2025	Proy XC 584-150	1.00	1.65	6.12	4.193	91.19
Segundo periodo	noviembre	28/11/2025	Proy XC 584-151	1.08	1.62	6.09	4.204	91.15
Segundo periodo	noviembre	29/11/2025	Proy XC 584-152	1.04	1.59	6.07	4.145	91.32
Segundo periodo	noviembre	30/11/2025	Proy XC 584-153	1.07	1.62	6.01	4.135	91.12
			Promedio	**1.05**	**1.61**	**6.15**	**4.170**	**92.02**

Nota. Parámetros de tiempo de limpieza, avance, fragmentación, factor de carga y costo de extracción del mes de noviembre del 2025.

Durante noviembre de 2025, las operaciones de perforación y voladura desarrolladas en el Crucero XC 584 del nivel 7 mantuvieron resultados favorables, similares a los registrados en octubre, después de la implementación de la propuesta de optimización. El tiempo empleado en la limpieza del material fragmentado fluctuó entre 1.00 y 1.10 horas, alcanzando un promedio mensual de 1.05 horas. Estos valores mostraron una variación reducida entre los disparos evaluados y reflejaron una menor duración de las actividades de limpieza respecto a las condiciones iniciales de operación.

En cuanto al avance por disparo, se obtuvieron valores comprendidos entre 1.58 y 1.65 m, con un promedio de 1.61 m. Este resultado fue ligeramente superior al registrado en octubre, cuando se alcanzó una media de 1.59 m. La diferencia permitió identificar una evolución favorable del rendimiento de avance durante el segundo mes de implementación. Asimismo, el comportamiento observado coincidió con la aplicación del diseño modificado de perforación y la distribución diferenciada de las cargas explosivas, orientadas a mejorar el aprovechamiento de cada disparo.

Respecto a la fragmentación del macizo rocoso, el indicador P80 presentó valores entre 6.00 y 6.29 pulgadas, con un promedio de 6.15 pulgadas. Al compararlo con las 6.16 pulgadas obtenidas durante octubre, se observó una ligera disminución del tamaño característico del material fragmentado. La proximidad entre ambos promedios mostró que las condiciones de fragmentación se mantuvieron similares durante los dos primeros meses del periodo con implementación, con resultados inferiores a los registrados antes de introducir las modificaciones en el diseño de voladura.

or otra parte, el factor de carga fluctuó entre 4.102 y 4.222 kg/m³, alcanzando un promedio de 4.170 kg/m³. Este valor representó un ligero incremento frente al promedio de 4.154 kg/m³

correspondiente a octubre. Los registros indicaron que el consumo específico de explosivos se mantuvo dentro de un intervalo relativamente estrecho, mientras que los indicadores de avance y fragmentación conservaron resultados favorables. Sin embargo, la evaluación de la eficiencia energética requirió considerar conjuntamente el consumo de explosivos, la distribución de las cargas y el rendimiento obtenido en cada voladura.

En el componente económico, el costo unitario de extracción presentó valores comprendidos entre 90.09 y 94.30 USD/t, con una media mensual de 92.02 USD/t. Este resultado fue ligeramente inferior al promedio de 92.11 USD/t registrado durante octubre, lo que evidenció una reducción adicional de 0.09 USD/t. Aunque la diferencia mensual fue pequeña, el costo obtenido permaneció por debajo de los valores correspondientes al periodo sin mejora, mostrando un comportamiento económico favorable durante noviembre.

En conjunto, los resultados de noviembre permitieron observar la continuidad del desempeño alcanzado después de introducir la combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000, junto con los ajustes efectuados en la geometría de la malla de perforación. El avance promedio de 1.61 m por disparo, el P80 de 6.15 pulgadas y el costo unitario de 92.02 USD/t mostraron que los indicadores técnicos y económicos conservaron resultados favorables durante el segundo mes de implementación. Esta información contribuyó a evaluar la evolución del proceso de voladura y a establecer una comparación con las condiciones registradas en el primer periodo de investigación.

Tabla 12

Parámetros de diciembre del 2025

Periodo	Mes	Fecha	Proyecto	t	M	P80	KG/M3	USD/T
Segundo periodo	diciembre	1/12/2025	Proy XC 584-154	1.06	1.59	6.01	4.160	93.82
Segundo periodo	diciembre	2/12/2025	Proy XC 584-155	1.08	1.59	6.05	4.187	91.27
Segundo periodo	diciembre	3/12/2025	Proy XC 584-156	1.03	1.62	6.21	4.201	92.54
Segundo periodo	diciembre	4/12/2025	Proy XC 584-157	1.06	1.60	6.27	4.116	93.64
Segundo periodo	diciembre	5/12/2025	Proy XC 584-158	1.06	1.62	6.05	4.119	90.76
Segundo periodo	diciembre	6/12/2025	Proy XC 584-159	1.02	1.65	6.12	4.110	92.49
Segundo periodo	diciembre	7/12/2025	Proy XC 584-160	1.03	1.59	6.22	4.104	90.02
Segundo periodo	diciembre	8/12/2025	Proy XC 584-161	1.03	1.58	6.02	4.159	92.35
Segundo periodo	diciembre	9/12/2025	Proy XC 584-162	1.10	1.61	6.15	4.141	91.95
Segundo periodo	diciembre	10/12/2025	Proy XC 584-163	1.07	1.65	6.09	4.205	90.67
Segundo periodo	diciembre	11/12/2025	Proy XC 584-164	1.05	1.61	6.21	4.122	92.07
Segundo periodo	diciembre	12/12/2025	Proy XC 584-165	1.05	1.60	6.22	4.133	91.90
Segundo periodo	diciembre	13/12/2025	Proy XC 584-166	1.10	1.62	6.04	4.104	91.47
Segundo periodo	diciembre	14/12/2025	Proy XC 584-167	1.02	1.59	6.25	4.179	94.42
Segundo periodo	diciembre	15/12/2025	Proy XC 584-168	1.10	1.59	6.19	4.171	91.70
Segundo periodo	diciembre	16/12/2025	Proy XC 584-169	1.02	1.64	6.28	4.152	92.27
Segundo periodo	diciembre	17/12/2025	Proy XC 584-170	1.08	1.59	6.02	4.178	92.23
Segundo periodo	diciembre	18/12/2025	Proy XC 584-171	1.08	1.62	6.26	4.122	92.27
Segundo periodo	diciembre	19/12/2025	Proy XC 584-172	1.10	1.60	6.00	4.220	90.44
Segundo periodo	diciembre	20/12/2025	Proy XC 584-173	1.04	1.65	6.04	4.192	92.96
Segundo periodo	diciembre	21/12/2025	Proy XC 584-174	1.07	1.62	6.20	4.208	94.48
Segundo periodo	diciembre	22/12/2025	Proy XC 584-175	1.06	1.65	6.27	4.120	92.69
Segundo periodo	diciembre	23/12/2025	Proy XC 584-176	1.09	1.65	6.04	4.196	91.49
Segundo periodo	diciembre	24/12/2025	Proy XC 584-177	1.08	1.62	6.09	4.178	92.12
Segundo periodo	diciembre	25/12/2025	Proy XC 584-178	1.08	1.61	6.29	4.168	90.79
Segundo periodo	diciembre	26/12/2025	Proy XC 584-179	1.02	1.59	6.06	4.146	91.48
Segundo periodo	diciembre	27/12/2025	Proy XC 584-180	1.00	1.58	6.23	4.146	93.99
Segundo periodo	diciembre	28/12/2025	Proy XC 584-181	1.06	1.59	6.03	4.119	91.59
Segundo periodo	diciembre	29/12/2025	Proy XC 584-182	1.05	1.65	6.11	4.142	90.83
Segundo periodo	diciembre	30/12/2025	Proy XC 584-183	1.09	1.65	6.02	4.168	92.12
Segundo periodo	diciembre	31/12/2025	Proy XC 584-184	1.10	1.62	6.01	4.150	92.04
			Promedio	**1.06**	**1.61**	**6.13**	**4.155**	**92.09**

Nota. Parámetros de tiempo de limpieza, avance, fragmentación, factor de carga y costo de extracción del mes de diciembre del 2025.

Durante diciembre de 2025, último mes del periodo de implementación, los indicadores de perforación y voladura del Crucero XC 584, nivel 7, mantuvieron un comportamiento favorable respecto a las condiciones registradas antes de la optimización. El tiempo destinado a la limpieza del material fragmentado fluctuó entre 1.00 y 1.10 horas, alcanzando un promedio mensual de 1.06 horas. Este resultado fue cercano a los obtenidos durante octubre y noviembre, lo que mostró cierta regularidad en el desarrollo de las actividades posteriores a cada disparo. Asimismo, la menor duración de la limpieza, en comparación con el periodo inicial, representó una mejora en el rendimiento operativo de la labor.

En relación con el avance por disparo, se registraron valores comprendidos entre 1.58 y 1.65 m, con un promedio de 1.61 m. Este resultado coincidió con el alcanzado durante noviembre y superó el promedio registrado antes de introducir las modificaciones en el diseño de voladura. La continuidad de estos valores permitió observar que el rendimiento de avance se mantuvo durante el último mes de evaluación, bajo las condiciones de perforación y distribución de explosivos establecidas para la etapa de implementación.

El análisis granulométrico mostró que el P80 presentó valores entre 6.00 y 6.29 pulgadas, obteniéndose un promedio de 6.13 pulgadas. Esta cifra fue ligeramente inferior a las registradas en octubre y noviembre, cuando se alcanzaron promedios de 6.16 y 6.15 pulgadas, respectivamente. La comparación permitió identificar una disminución gradual del tamaño característico de los fragmentos durante el segundo periodo. Además, los resultados de diciembre continuaron siendo inferiores a los obtenidos en la etapa inicial, lo que evidenció condiciones de fragmentación más favorables después de aplicar el diseño modificado de perforación y voladura.

Respecto al factor de carga, se obtuvieron valores desde 4.104 hasta 4.220 kg/m³, con una media de 4.155 kg/m³. Este comportamiento mostró pequeñas variaciones en el consumo

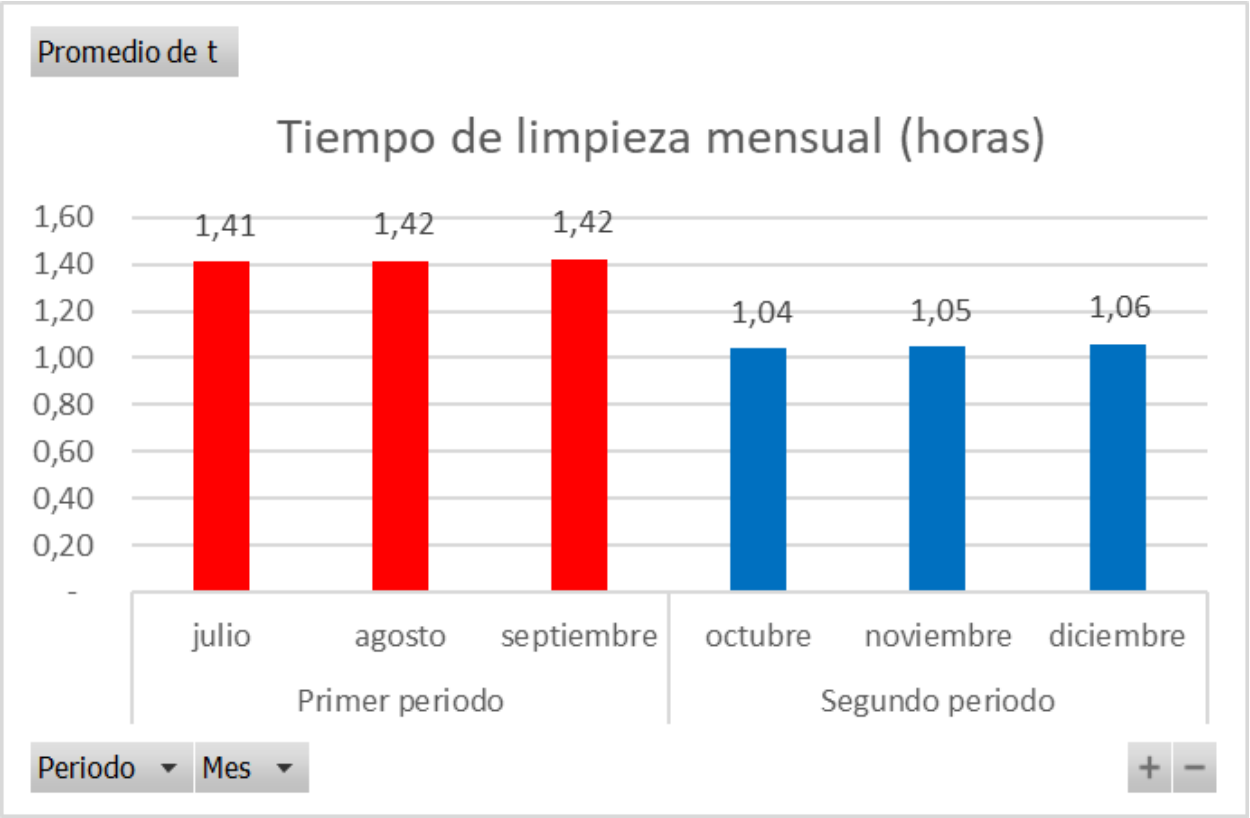
específico de explosivos entre los disparos evaluados. Al compararlo con los promedios de octubre y noviembre, se observó que la cantidad de explosivo empleada por unidad de volumen de roca permaneció en niveles semejantes. Estos registros permitieron caracterizar las condiciones de consumo durante la etapa final de implementación, aunque la eficiencia energética debía interpretarse conjuntamente con los resultados de fragmentación, avance y costos.

En el aspecto económico, el costo unitario de extracción fluctuó entre 90.02 y 94.48 USD/t, alcanzando un promedio mensual de 92.09 USD/t. Este valor fue ligeramente superior al registrado en noviembre, de 92.02 USD/t, pero permaneció próximo al promedio de octubre, de 92.11 USD/t. La reducida diferencia entre los tres meses mostró que los costos por tonelada extraída conservaron un comportamiento relativamente estable durante el periodo de implementación, manteniéndose por debajo de los valores registrados entre julio y septiembre.

En conjunto, los resultados de diciembre permitieron completar la evaluación de la propuesta de optimización aplicada en el Crucero XC 584 del nivel 7. El avance promedio de 1.61 m por disparo, el P80 de 6.13 pulgadas, el tiempo de limpieza de 1.06 horas y el costo unitario de 92.09 USD/t mostraron la continuidad de los resultados favorables alcanzados durante octubre y noviembre. De esta manera, la información correspondiente al último mes de estudio contribuyó a establecer que la combinación de explosivos y los ajustes realizados en la malla de perforación estuvieron acompañados de un mejor desempeño técnico y económico respecto al periodo inicial.

Figura 12.

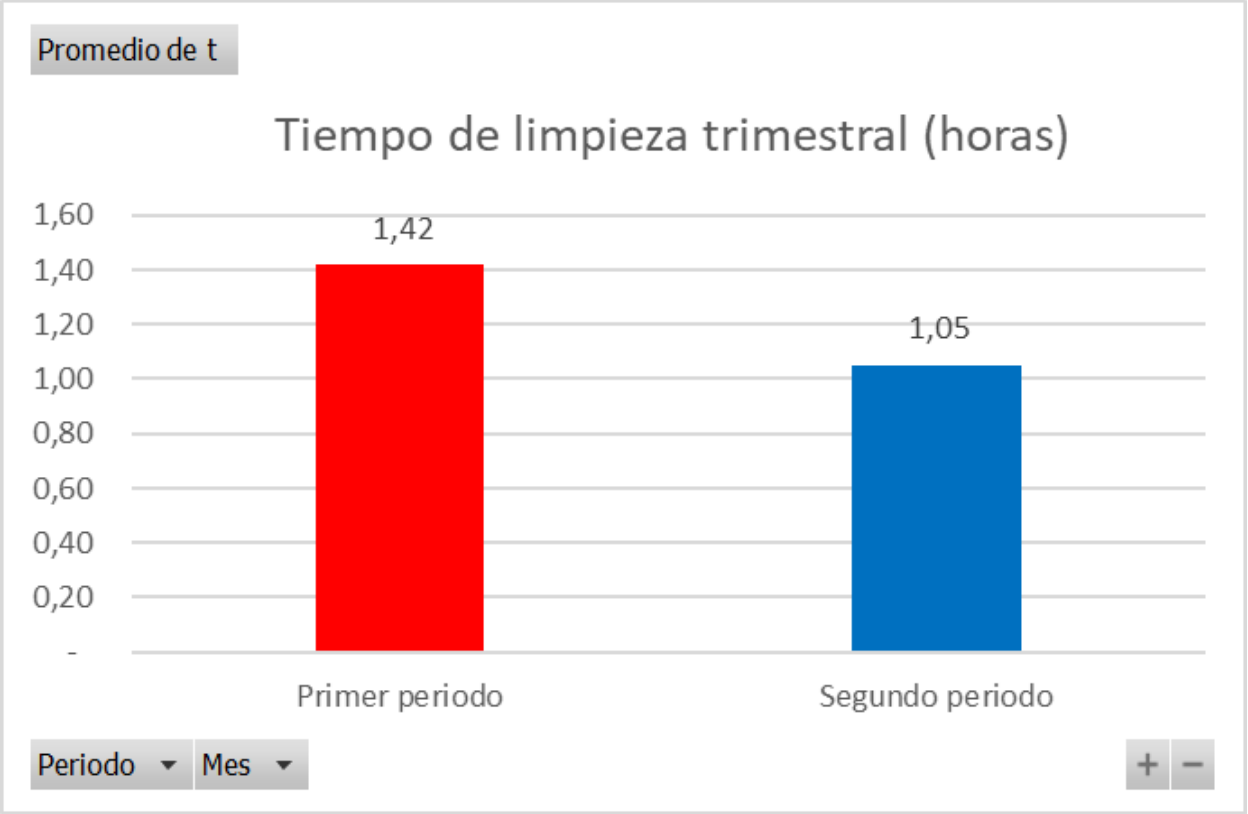
Tiempo de limpieza mensual



Nota. La comparación mensual del tiempo de limpieza mostró una disminución durante el periodo en el que se implementó la optimización del diseño de perforación y voladura. Entre julio y septiembre de 2025 se registraron promedios de 1.41, 1.42 y 1.42 horas, respectivamente, mientras que en octubre, noviembre y diciembre los valores descendieron a 1.04, 1.05 y 1.06 horas. Esta diferencia evidenció una menor duración de las labores de limpieza durante el segundo periodo, comportamiento que coincidió con la reducción del tamaño de los fragmentos obtenidos después de las voladuras. Los resultados sugirieron que las modificaciones introducidas en la malla de perforación y en la distribución de explosivos favorecieron el rendimiento de las actividades posteriores a la voladura, contribuyendo a mejorar la eficiencia del ciclo de minado.

Figura 13.

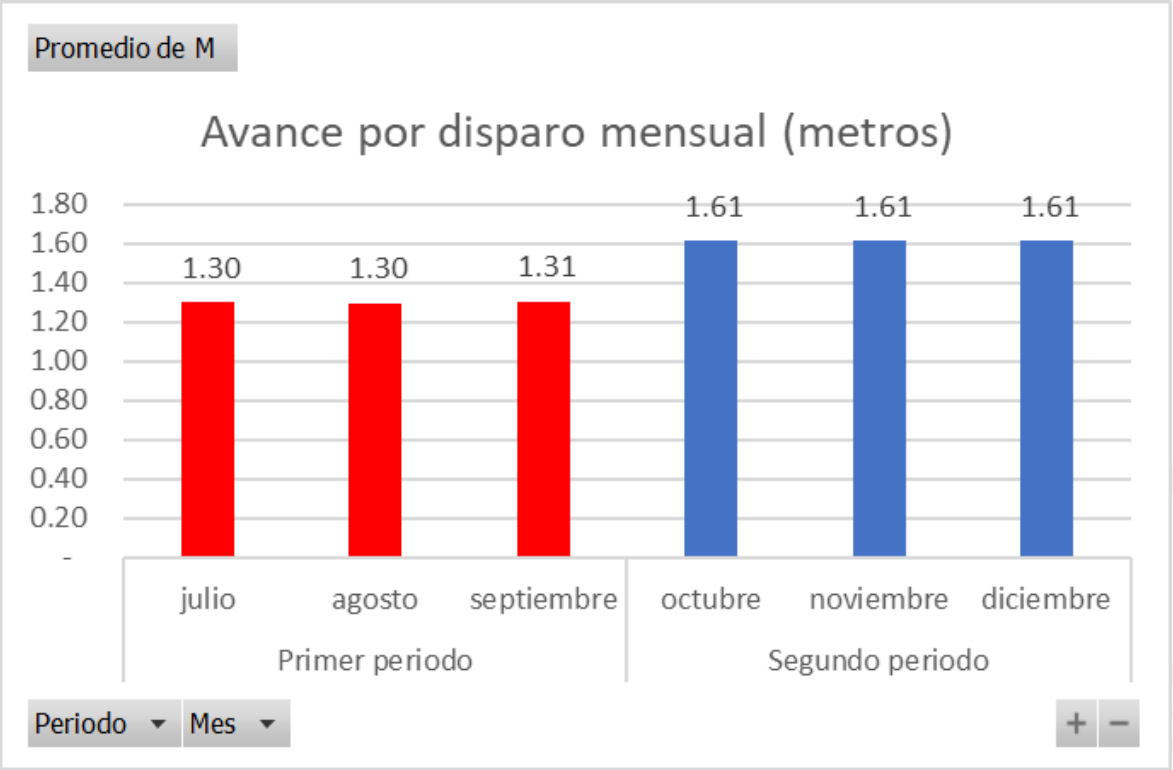
Tiempo de limpieza por periodo



Nota. La comparación del tiempo de limpieza permitió identificar una reducción en la duración de esta actividad después de implementar la propuesta de optimización de perforación y voladura en el Crucero XC 584 del nivel 7. Durante el primer periodo se registró un promedio de 1.42 horas, mientras que en la segunda etapa este valor descendió a 1.05 horas, lo que representó una disminución aproximada del 25.81 %. Este comportamiento coincidió con la obtención de fragmentos de menor tamaño, condición que pudo facilitar el retiro del material desprendido y favorecer las operaciones de carguío. Asimismo, la reducción del tiempo empleado en la limpieza constituyó un resultado favorable para el rendimiento del ciclo de minado, al disminuir la duración de una de las actividades posteriores a cada voladura. En ese sentido, los valores obtenidos mostraron una mejora operativa durante el periodo de implementación respecto a las condiciones iniciales de la investigación.

Figura 14.

Avance por disparo mensual

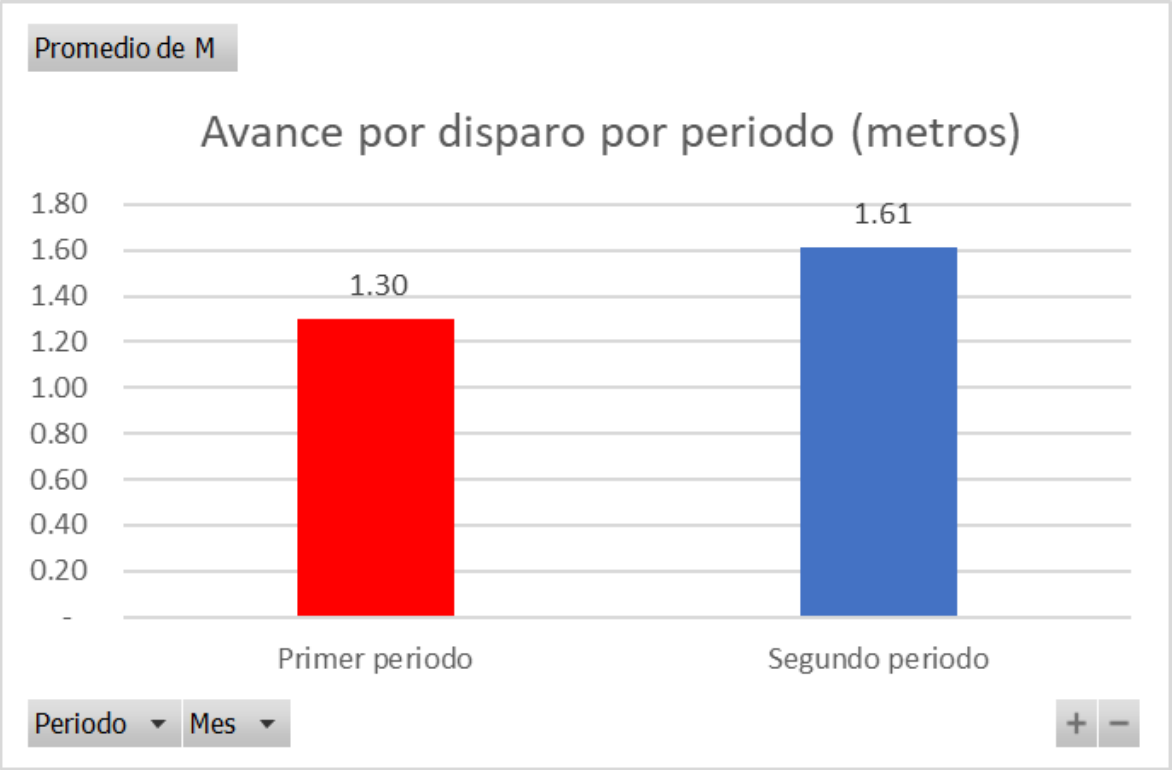


Nota. La evaluación mensual del avance por disparo mostró diferencias favorables entre las condiciones iniciales y las registradas después de implementar la propuesta de optimización en el Crucero XC 584 del nivel 7. Durante julio, agosto y septiembre de 2025 se obtuvieron avances promedio de 1.30, 1.30 y 1.31 m, respectivamente, lo que reflejó pequeñas variaciones en el rendimiento de las voladuras. Por el contrario, en octubre, noviembre y diciembre se registró un avance promedio de 1.61 m por disparo, evidenciando una mayor longitud de excavación durante el segundo periodo. Este comportamiento coincidió con las modificaciones realizadas en la geometría de la malla de perforación y con la incorporación de una distribución diferenciada de explosivos. Los resultados sugirieron un mejor aprovechamiento de las condiciones de rotura del macizo rocoso, lo que favoreció el rendimiento de avance de la labor. En conjunto, la comparación

mensual permitió identificar una mejora sostenida de este indicador durante la etapa de implementación, constituyendo un resultado favorable para la productividad del ciclo de minado.

Figura 15.

Avance por disparo por periodo

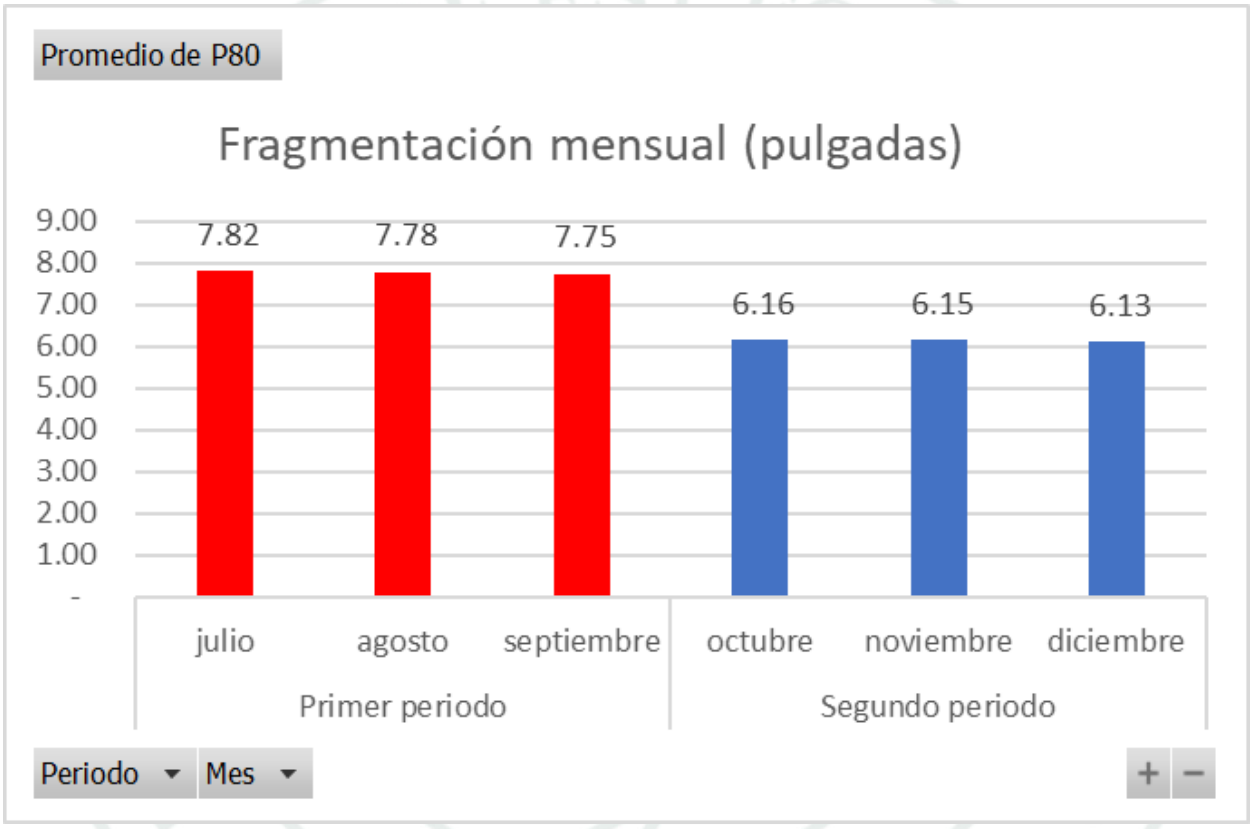


Nota. La comparación del avance por disparo permitió identificar un incremento en el rendimiento de la excavación durante el periodo de implementación de la propuesta de optimización en el Crucero XC 584 del nivel 7. En la etapa inicial se obtuvo un avance promedio de 1.30 m por disparo, mientras que, después de introducir las modificaciones en el diseño de perforación y voladura, este indicador alcanzó 1.61 m. La diferencia de 0.31 m representó un aumento aproximado del 24 % respecto a las condiciones anteriores. Este comportamiento coincidió con los ajustes realizados en la geometría de la malla y la distribución diferenciada de explosivos, los cuales estuvieron orientados a mejorar las condiciones de rotura del macizo rocoso. Asimismo, el mayor avance registrado durante el segundo periodo constituyó un resultado favorable para el

rendimiento operativo, debido a que permitió obtener una mayor longitud de excavación por cada disparo ejecutado. En consecuencia, los resultados mostraron una mejora en el desempeño de la labor, proporcionando evidencia para evaluar el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

Figura 16.

Fragmentación mensual

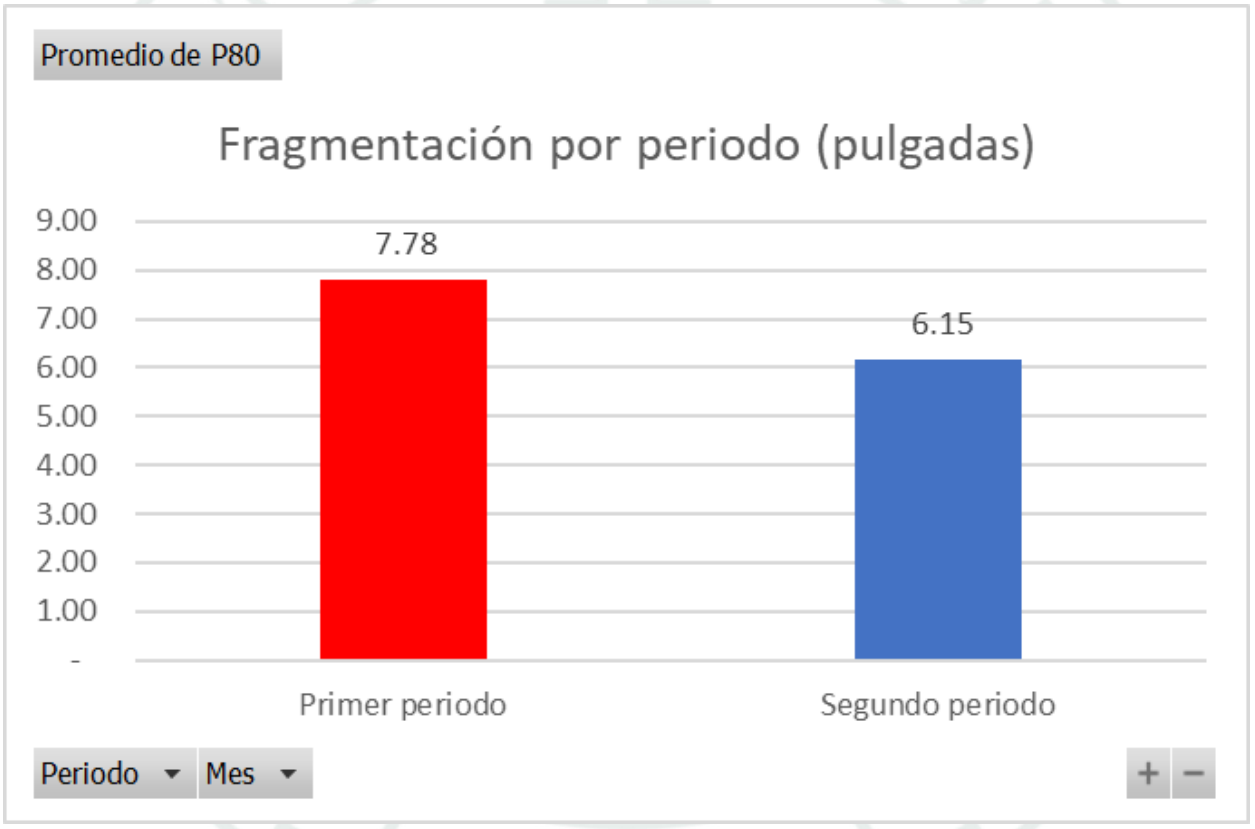


Nota. La evaluación mensual de la fragmentación permitió identificar diferencias en el tamaño del material obtenido durante los dos periodos de investigación en el Crucero XC 584 del nivel 7. Entre julio y septiembre de 2025, el P80 registró valores promedio de 7.82, 7.78 y 7.75 pulgadas, respectivamente, mostrando una ligera disminución durante la etapa inicial. Posteriormente, en octubre, noviembre y diciembre, los promedios descendieron a 6.16, 6.15 y 6.13 pulgadas, lo que evidenció la obtención de fragmentos de menor tamaño después de introducir las modificaciones en el diseño de perforación y voladura. Este comportamiento coincidió con la implementación de una distribución diferenciada de explosivos y los ajustes realizados en la geometría de la malla. La

reducción del P80 representó un resultado favorable para las condiciones de fragmentación del macizo rocoso y pudo contribuir a facilitar las actividades posteriores de limpieza y carguío. En conjunto, los registros mensuales mostraron que el segundo periodo mantuvo tamaños característicos de fragmentación inferiores a los obtenidos inicialmente, constituyendo un indicador relevante para evaluar el desempeño técnico de la propuesta de optimización.

Figura 17.

Fragmentación por periodo

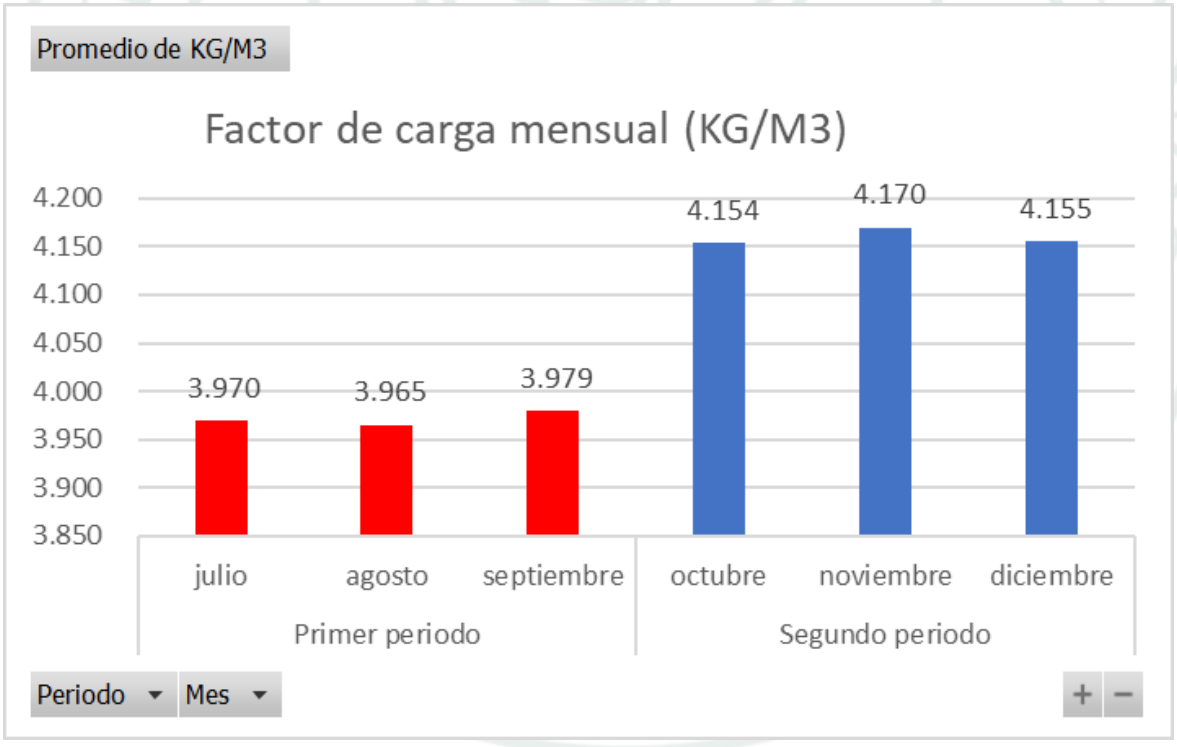


Nota. La comparación de los resultados granulométricos permitió identificar una disminución del tamaño característico del material fragmentado después de implementar la propuesta de optimización de perforación y voladura en el Crucero XC 584 del nivel 7. Durante el primer periodo se obtuvo un P80 promedio de 7.78 pulgadas, mientras que en la segunda etapa este indicador descendió a 6.15 pulgadas, registrándose una diferencia de 1.63 pulgadas, equivalente a una reducción aproximada del 20.95 %. Este comportamiento mostró que las voladuras ejecutadas

durante el periodo de implementación produjeron fragmentos de menor tamaño respecto a las condiciones iniciales. La variación observada coincidió con los cambios realizados en la distribución de las cargas explosivas y en la geometría de la malla de perforación. Asimismo, la reducción del P80 representó una condición favorable para las actividades posteriores a la voladura, debido a que una fragmentación de menor tamaño puede facilitar la manipulación y el retiro del material desprendido. En consecuencia, los resultados evidenciaron un mejor desempeño granulométrico durante el segundo periodo y proporcionaron información relevante para evaluar la eficiencia técnica del diseño implementado.

Figura 18.

Factor de carga mensual

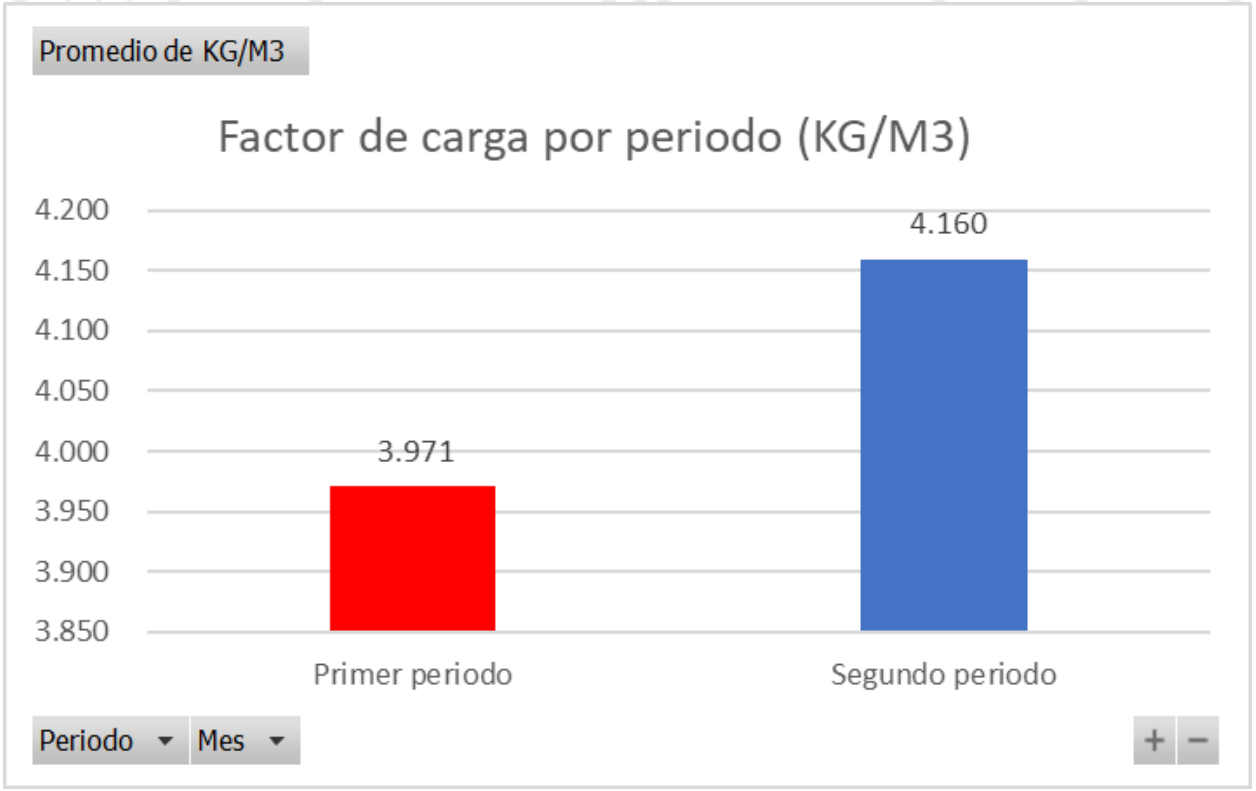


Nota. La evaluación mensual del factor de carga permitió identificar variaciones en el consumo específico de explosivos durante los dos periodos de investigación desarrollados en el Crucero XC 584 del nivel 7. Entre julio y septiembre de 2025 se registraron valores promedio de 3.970, 3.965 y 3.979 kg/m³, respectivamente, lo que mostró pequeñas diferencias en la cantidad de explosivo

empleada por unidad de volumen de roca. Durante octubre, noviembre y diciembre, los promedios aumentaron a 4.154, 4.170 y 4.155 kg/m³, evidenciando un mayor consumo específico después de introducir las modificaciones en el diseño de perforación y voladura. Este comportamiento coincidió con la incorporación de una distribución diferenciada de ANFO y emulsiones, así como con los ajustes efectuados en la geometría de la malla. Aunque el incremento del factor de carga representó una mayor cantidad de explosivo por metro cúbico de roca, también estuvo acompañado de una reducción del tamaño de fragmentación y de un mayor avance por disparo. En conjunto, los resultados mostraron que el segundo periodo presentó un consumo específico ligeramente superior, junto con indicadores operativos más favorables, lo que permitió evaluar el comportamiento de las voladuras bajo las nuevas condiciones de trabajo.

Figura 19.

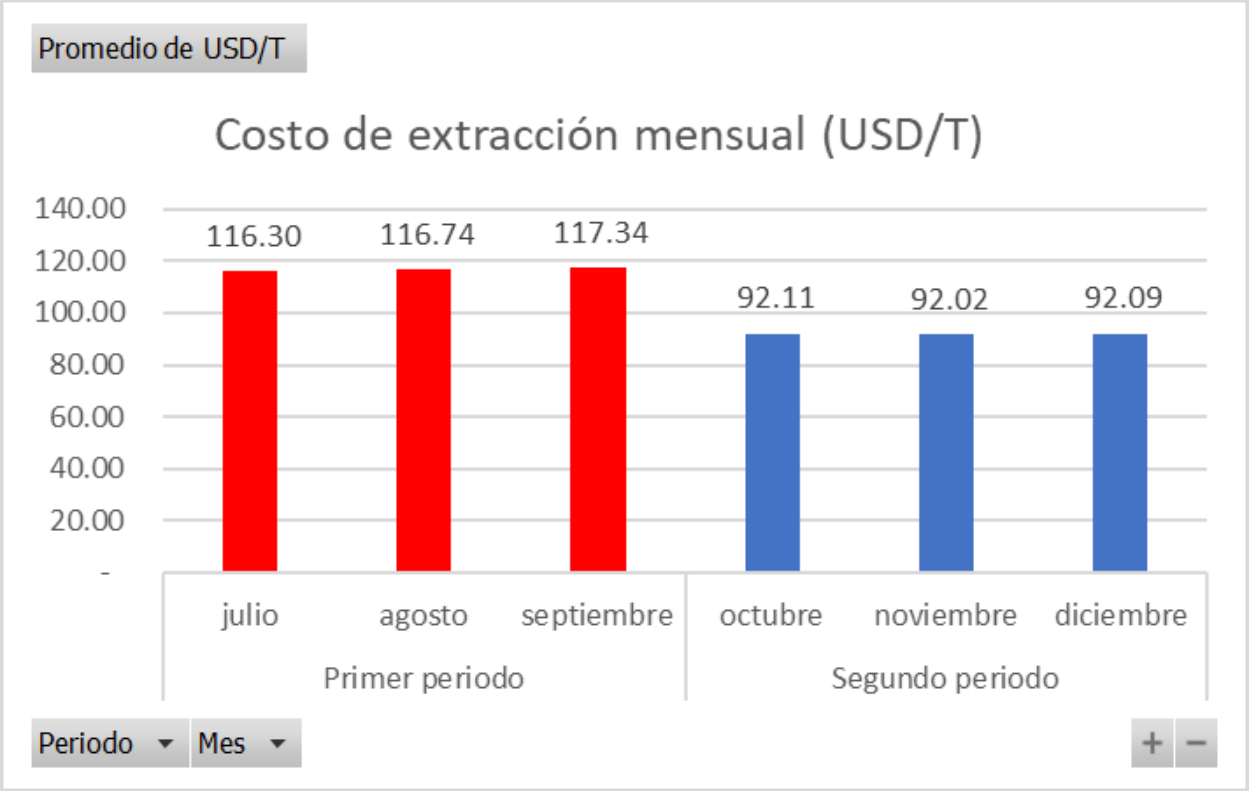
Factor de carga mensual



Nota. La comparación del factor de carga permitió identificar un aumento en el consumo específico de explosivos después de introducir las modificaciones en el diseño de perforación y voladura del Crucero XC 584, nivel 7. Durante el primer periodo se registró un promedio de 3.971 kg/m³, mientras que en la etapa de implementación este indicador alcanzó 4.160 kg/m³, lo que representó un incremento aproximado del 4.74 %. Esta variación reflejó una mayor cantidad de explosivo utilizada por unidad de volumen de roca fragmentada, en concordancia con los cambios realizados en la configuración de la malla y la distribución de las cargas. Asimismo, el aumento del factor de carga estuvo acompañado de resultados operativos favorables, principalmente una disminución del tamaño P80, un mayor avance por disparo y una reducción del tiempo destinado a la limpieza. Aunque el consumo específico de explosivos fue superior durante el segundo periodo, el costo unitario de extracción presentó una disminución respecto a las condiciones iniciales. En conjunto, estos resultados mostraron que la propuesta implementada estuvo asociada con un mejor desempeño técnico y económico de las voladuras, pese al incremento registrado en la cantidad de explosivo empleada por metro cúbico de roca.

Figura 20.

Costo de extracción mensual

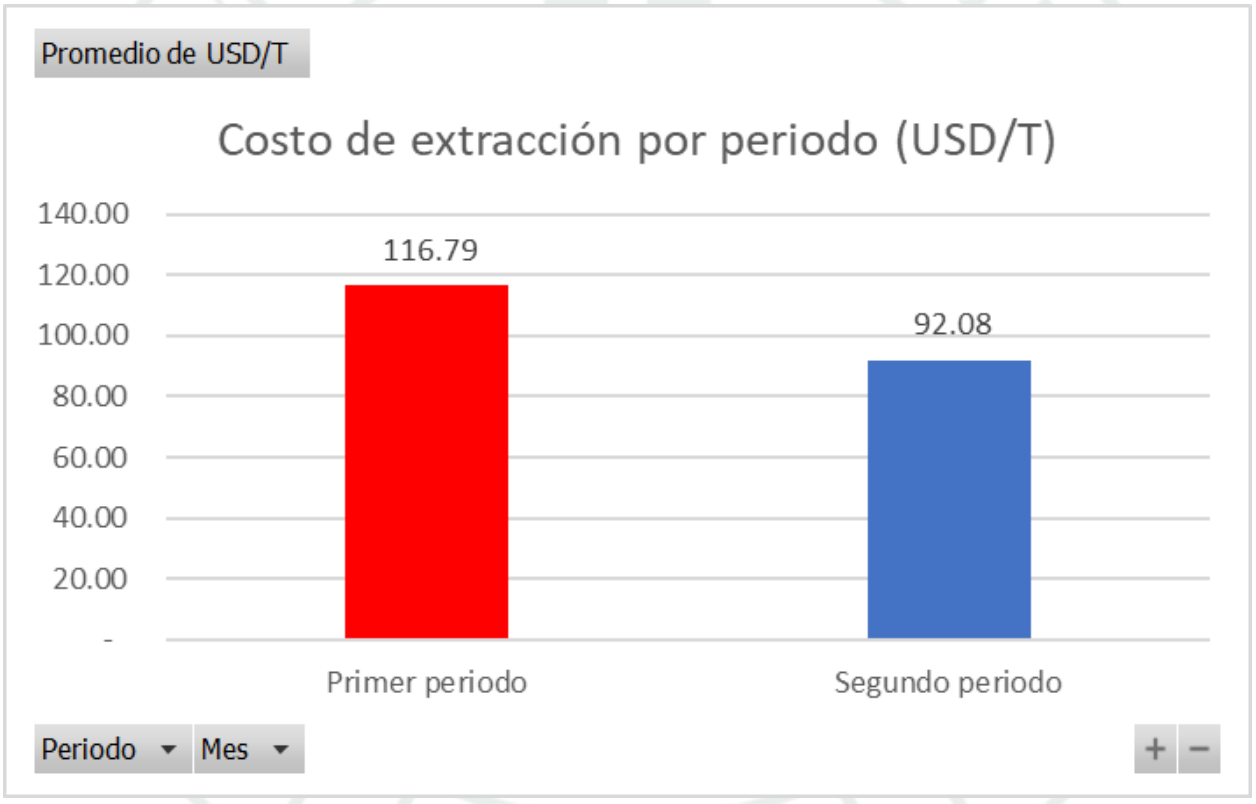


Nota. La evaluación mensual del costo unitario de extracción permitió identificar una disminución en los gastos por tonelada extraída durante el segundo periodo de investigación en el Crucero XC 584 del nivel 7. Entre julio y septiembre de 2025 se registraron costos promedio de 116.30, 116.74 y 117.34 USD/t, respectivamente, observándose un ligero incremento a lo largo de la etapa inicial. Estos valores caracterizaron las condiciones económicas del proceso de perforación y voladura antes de introducir las modificaciones propuestas. Por el contrario, durante octubre, noviembre y diciembre, los costos descendieron a 92.11, 92.02 y 92.09 USD/t, mostrando una reducción considerable respecto a los meses anteriores y pequeñas variaciones dentro del periodo de implementación. Este comportamiento coincidió con los cambios efectuados en la geometría de la malla de perforación y en la distribución de las cargas explosivas, así como con la obtención de fragmentos de menor tamaño, el incremento del avance por disparo y la disminución del tiempo

de limpieza. En conjunto, los resultados evidenciaron un desempeño económico más favorable durante el segundo periodo, debido a que la operación presentó menores costos unitarios de extracción, aun cuando se registró un incremento en el factor de carga. Esta variación constituyó un resultado relevante para evaluar la eficiencia económica de la propuesta de optimización aplicada en la labor minera.

Figura 21.

Costo de extracción por periodo



Nota. La comparación de los costos unitarios de extracción permitió identificar una disminución de los gastos operativos durante la etapa de implementación de la propuesta de optimización en el Crucero XC 584 del nivel 7. En el primer periodo se obtuvo un costo promedio de 116.79 USD/t, asociado a las condiciones iniciales de perforación y voladura, caracterizadas por fragmentos de mayor tamaño, tiempos de limpieza más prolongados y menores avances por disparo. Posteriormente, durante el segundo periodo, este indicador descendió a 92.08 USD/t, registrándose

una diferencia de 24.71 USD/t, equivalente a una reducción aproximada del 21.16 %. Este comportamiento económico coincidió con los cambios introducidos en la geometría de la malla y en la distribución de las cargas explosivas, así como con la disminución del P80, el incremento del avance por disparo y la reducción del tiempo destinado a la limpieza. Aunque el factor de carga presentó un ligero aumento, el costo por tonelada extraída fue inferior al registrado inicialmente. En conjunto, los resultados mostraron un desempeño económico más favorable durante el periodo de implementación, proporcionando evidencia de una mejora en la eficiencia del proceso de extracción bajo las condiciones evaluadas.

4.8 Resultados generales

En este subcapítulo se desarrolló el análisis comparativo de los resultados correspondientes a las operaciones de perforación y voladura realizadas en el Crucero XC 584 del nivel 7 durante el año 2025. Para ello, se consideraron dos etapas de evaluación: la primera comprendió los meses de julio, agosto y septiembre, mientras que la segunda abarcó octubre, noviembre y diciembre, periodo en el que se implementaron modificaciones en el diseño de voladura. La comparación se efectuó mediante cinco indicadores operativos y económicos: tiempo de limpieza (h), avance por disparo (m), tamaño de fragmentación (P80), factor de carga (kg/m³) y costo unitario de extracción (USD/t). Estos parámetros permitieron identificar las variaciones registradas en el rendimiento de la labor y establecer diferencias entre las condiciones iniciales y las obtenidas después de la implementación. Durante el segundo periodo se empleó una combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000, junto con ajustes en la geometría de la malla de perforación y en la distribución de las cargas explosivas. Los resultados mostraron un comportamiento favorable de la fragmentación y del avance por disparo, acompañado de menores tiempos de limpieza y costos unitarios de extracción. De esta manera, el análisis proporcionó información para evaluar

la relación entre las modificaciones introducidas y el desempeño técnico y económico del proceso de voladura.

Tabla 13

Comparación de resultados entre el primer y segundo periodo

Indicador	Unidad	Primer periodo	Segundo periodo	Variación
Tiempo de limpieza. (t)	horas	1.42	1.05	-25.81%
Avance por disparo. (M)	m	1.3	1.61	24.00%
Fragmentación. (P80)	pulg	7.78	6.15	-20.95%
Factor de carga	kg/m³	3.97	4.16	4.74%
Costo de extracción	USD/t	116.79	92.08	-21.16%

Nota. Propia.

La evaluación conjunta de los indicadores permitió identificar diferencias favorables en el desempeño de las operaciones de perforación y voladura del Crucero XC 584 del nivel 7, después de implementar la propuesta de optimización. Uno de los principales cambios se observó en el tiempo de limpieza, que presentó una disminución reportada del 25.81 % respecto al periodo inicial. Este comportamiento coincidió con la obtención de fragmentos de menor tamaño, condición que pudo facilitar el retiro del material desprendido y reducir la duración de las actividades posteriores a cada disparo.

En relación con el avance de la labor, se registró un incremento aproximado del 24 %, lo que reflejó un mayor rendimiento de excavación durante el segundo periodo. Este resultado se presentó después de modificar determinados parámetros de la malla de perforación y establecer una distribución diferenciada de las cargas explosivas. Asimismo, el tamaño característico de fragmentación, expresado mediante el P80, disminuyó aproximadamente un 20.95 %, evidenciando que el material obtenido después de las voladuras presentó dimensiones inferiores a las registradas bajo las condiciones iniciales.

Por otra parte, el factor de carga mostró un aumento cercano al 4.74 %, lo que representó un mayor consumo específico de explosivos por unidad de volumen de roca fragmentada. Esta variación formó parte de los cambios introducidos en el diseño de voladura y se evaluó conjuntamente con los resultados de avance y fragmentación. Aunque durante el segundo periodo se empleó una mayor cantidad de explosivo por metro cúbico, los indicadores operativos mostraron un comportamiento favorable respecto a la etapa anterior.

Desde el punto de vista económico, el costo unitario de extracción registró una reducción aproximada del 21.16 %. Esta disminución se presentó junto con el incremento del avance por disparo, la reducción del tiempo de limpieza y la obtención de fragmentos de menor tamaño. Los resultados mostraron que, durante la etapa de implementación, se alcanzó un menor costo por tonelada extraída, pese al incremento del factor de carga. Este comportamiento constituyó un resultado favorable para la evaluación económica del proceso de extracción.

En términos generales, la comparación entre ambos periodos mostró mejoras en los principales indicadores técnicos y económicos después de incorporar la combinación de explosivos y los ajustes realizados en la geometría de la malla de perforación. Los resultados proporcionaron evidencia de un mejor desempeño operativo durante la etapa de implementación y permitieron evaluar el cumplimiento de los objetivos establecidos en la investigación. Asimismo, constituyeron la base para desarrollar la contrastación de las hipótesis y analizar los alcances de la propuesta de optimización aplicada en la labor minera.

4.9 Análisis

El análisis comparativo del tiempo de limpieza permitió identificar una reducción en la duración de las actividades posteriores a la voladura durante el segundo periodo de evaluación. Entre julio y septiembre de 2025 se obtuvo un promedio de 1.42 horas por disparo, mientras que

entre octubre y diciembre este indicador descendió a 1.05 horas, lo que representó una disminución reportada del 25.81 %. Esta variación coincidió con la reducción del tamaño de los fragmentos obtenidos después de modificar el diseño de perforación y la distribución de las cargas explosivas. En ese sentido, las condiciones de fragmentación alcanzadas durante la etapa de implementación pudieron favorecer la manipulación y el retiro del material desprendido, contribuyendo a una menor duración del proceso de limpieza.

En cuanto al avance por disparo, los resultados mostraron un incremento del rendimiento de excavación entre las dos etapas estudiadas. Durante el primer periodo se registró un avance promedio de 1.30 m, mientras que en el segundo se alcanzaron 1.61 m, equivalentes a una mejora aproximada del 24 %. Esta diferencia se observó después de introducir ajustes en los parámetros de perforación y emplear una combinación diferenciada de explosivos. El mayor avance obtenido por disparo constituyó un resultado favorable para el desarrollo de la labor minera, debido a que permitió alcanzar una mayor longitud excavada por cada voladura ejecutada. Asimismo, este comportamiento aportó información relevante para evaluar el desempeño del diseño implementado respecto a las condiciones iniciales.

Respecto a la fragmentación del material volado, la comparación del tamaño característico P80 mostró una disminución de 7.78 pulgadas en el primer periodo a 6.15 pulgadas en el segundo, correspondiente a una reducción reportada del 20.95 %. Este resultado indicó que, durante la etapa de implementación, el 80 % del material evaluado presentó un tamaño inferior al valor característico registrado inicialmente. La obtención de fragmentos de menor dimensión representó una condición favorable para las operaciones de carguío y limpieza, especialmente por su posible contribución a una manipulación más eficiente del material desprendido. Además, la variación

granulométrica observada permitió identificar diferencias en el comportamiento de las voladuras realizadas bajo los dos diseños evaluados.

Por su parte, el factor de carga presentó un incremento moderado durante el periodo de implementación. En la etapa inicial se obtuvo un promedio aproximado de 3.97 kg/m³, mientras que en la segunda se registraron 4.16 kg/m³, lo que representó un aumento reportado del 4.74 %. Esta diferencia evidenció que se empleó una mayor cantidad de explosivo por unidad de volumen de roca fragmentada. El cambio estuvo relacionado con las modificaciones introducidas en la geometría de la malla y en la distribución de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000. Aunque el consumo específico aumentó, los resultados de fragmentación y avance mostraron un comportamiento más favorable durante el segundo periodo. Por tanto, el factor de carga se consideró conjuntamente con los demás indicadores para evaluar el rendimiento técnico de las voladuras, sin asumir que su incremento constituyó, por sí solo, una mejora en el aprovechamiento de la energía explosiva.

En el aspecto económico, el costo unitario de extracción disminuyó de 116.79 USD/t durante el primer periodo a 92.08 USD/t en el segundo, registrándose una diferencia de 24.71 USD/t, equivalente a una reducción del 21.16 %. Este resultado mostró que, después de implementar los cambios en el diseño de perforación y voladura, se obtuvo un menor costo por tonelada extraída. La disminución coincidió con el incremento del avance por disparo, la reducción del tiempo de limpieza y la obtención de fragmentos de menor tamaño. Asimismo, permitió identificar un comportamiento económico favorable pese al aumento registrado en el consumo específico de explosivos. De esta manera, la comparación de ambos periodos proporcionó evidencia de una reducción del costo unitario bajo las condiciones operativas evaluadas.

En conjunto, los resultados mostraron que el segundo periodo presentó un mejor desempeño en los indicadores técnicos y económicos considerados en la investigación. Las modificaciones realizadas en la malla de perforación y en la distribución de las cargas explosivas estuvieron acompañadas de un mayor avance por disparo, una fragmentación de menor tamaño y una reducción de los tiempos de limpieza y de los costos unitarios de extracción. Estos resultados respaldaron la evaluación favorable de la propuesta de optimización aplicada en el Crucero XC 584 del nivel 7 y proporcionaron una base cuantitativa para la contrastación de las hipótesis de investigación. No obstante, la atribución de los cambios observados a cada componente de la propuesta requirió considerar que la geometría de perforación y la configuración de las cargas se modificaron simultáneamente.

4.10 Contrastación de hipótesis

4.10.1 Contrastación de la hipótesis general

La hipótesis general estableció que la optimización del uso de explosivos, mediante la aplicación combinada de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000, permitiría mejorar la eficiencia operativa y disminuir los costos unitarios de extracción en el Crucero XC 584 del nivel 7 durante el año 2025.

Para evaluar este planteamiento, se compararon los indicadores obtenidos durante el periodo inicial, comprendido entre julio y septiembre, con los registrados después de implementar las modificaciones en el diseño de perforación y voladura, entre octubre y diciembre del mismo año. Los resultados mostraron que el tiempo promedio de limpieza descendió de 1.42 a 1.05 horas, con una reducción reportada del 25.81 %. Paralelamente, el avance por disparo aumentó de 1.30 a 1.61 m, equivalente a una mejora aproximada del 24

%. En cuanto a la fragmentación, el tamaño característico P80 disminuyó de 7.78 a 6.15 pulgadas, registrándose una reducción reportada del 20.95 %.

Desde el punto de vista económico, el costo unitario de extracción pasó de 116.79 a 92.08 USD/t, lo que representó una disminución del 21.16 %. Este comportamiento se presentó junto con los cambios favorables observados en el avance por disparo, el tamaño de fragmentación y el tiempo destinado a la limpieza del material volado.

En consecuencia, la comparación descriptiva de los resultados proporcionó evidencia favorable al planteamiento de la hipótesis general, debido a que durante el segundo periodo se registraron mejores indicadores operativos y menores costos unitarios de extracción. No obstante, la determinación de su significancia estadística requirió complementar esta evaluación con las pruebas inferenciales correspondientes.

4.10.2 Contrastación de las hipótesis específicas

Contrastación de la primera hipótesis específica

La primera hipótesis específica sostuvo que la aplicación combinada de explosivos permitiría reducir el tamaño característico de fragmentación P80 del macizo rocoso respecto a las condiciones registradas antes de la implementación.

Los resultados obtenidos mostraron que, durante el primer periodo, el P80 promedio alcanzó 7.78 pulgadas, mientras que en el segundo descendió a 6.15 pulgadas, lo que representó una disminución reportada del 20.95 %. Esta diferencia evidenció que el material fragmentado durante la etapa de implementación presentó un tamaño característico inferior al observado inicialmente. Dicho comportamiento coincidió con la incorporación de diferentes tipos de explosivos y con los ajustes realizados en los parámetros de perforación y voladura.

Por consiguiente, los resultados descriptivos respaldaron la primera hipótesis específica, al verificarse una reducción del P80 durante el segundo periodo. Sin embargo, la afirmación de una mejora estadísticamente significativa quedó condicionada a los resultados de la prueba de hipótesis correspondiente.

Contrastación de la segunda hipótesis específica

La segunda hipótesis específica planteó que el rediseño de la distribución de las cargas explosivas contribuiría al incremento del avance por disparo en la labor minera de sección 2.10 × 2.40 m.

Al comparar ambos periodos, se identificó que el avance promedio pasó de 1.30 m durante la etapa inicial a 1.61 m después de implementar las modificaciones propuestas. Esta variación representó un incremento aproximado del 24 %, equivalente a 0.31 m adicionales por disparo. El resultado reflejó un mayor rendimiento de excavación bajo las condiciones de perforación y voladura aplicadas durante el segundo periodo.

En función de estos valores, se obtuvo evidencia descriptiva favorable a la segunda hipótesis específica, puesto que el avance promedio aumentó después de la implementación. La confirmación de una diferencia estadísticamente significativa dependió del análisis inferencial de los registros de avance correspondientes a ambos periodos.

Contrastación de la tercera hipótesis específica

La tercera hipótesis específica estableció que la optimización del uso de explosivos permitiría disminuir el costo unitario de extracción respecto al periodo comprendido entre julio y septiembre de 2025.

La evaluación económica mostró que el costo promedio de extracción se redujo de 116.79 USD/t en el primer periodo a 92.08 USD/t en el segundo. Esta diferencia de 24.71

USD/t representó una disminución aproximada del 21.16 %. El resultado coincidió con las mejoras observadas en el avance por disparo, la fragmentación del material y el tiempo de limpieza, indicadores que formaron parte de la evaluación del desempeño operativo.

Por tanto, la comparación de los costos proporcionó evidencia favorable a la tercera hipótesis específica, debido a que el segundo periodo presentó un menor costo por tonelada extraída. Para establecer la significancia estadística de esta diferencia, correspondió aplicar la prueba inferencial seleccionada de acuerdo con las características de los datos.

Síntesis de la contrastación de hipótesis

En conjunto, los resultados descriptivos mostraron un comportamiento favorable de los indicadores considerados en la investigación. Durante el segundo periodo se obtuvo una fragmentación de menor tamaño, un mayor avance por disparo y una reducción del costo unitario de extracción, acompañados de una disminución del tiempo de limpieza. Estas variaciones fueron consistentes con los resultados esperados de la propuesta de optimización y respaldaron descriptivamente las hipótesis formuladas. Sin embargo, su aceptación o rechazo en términos estadísticos debió establecerse mediante las pruebas de significancia correspondientes, considerando el nivel de confianza y el criterio de decisión definidos en la metodología.

4.11 Discusión de resultados

Los resultados de la investigación permitieron analizar las variaciones registradas en el desempeño de las operaciones de perforación y voladura del Crucero XC 584 del nivel 7, después de implementar una distribución diferenciada de explosivos. La comparación de 92 voladuras realizadas entre julio y septiembre de 2025 con otras 92 ejecutadas entre octubre y diciembre mostró cambios favorables en la fragmentación, el avance por disparo, el tiempo de limpieza y el

costo unitario de extracción. Estos resultados permitieron examinar la importancia de adaptar el diseño de voladura a las características geomecánicas del macizo rocoso y a las funciones de los diferentes taladros del frente.

En cuanto a la fragmentación, el tamaño característico P80 disminuyó de 7.78 pulgadas durante el primer periodo a 6.15 pulgadas en el segundo, equivalente a una reducción reportada del 20.95 %. Este comportamiento guardó relación con lo señalado por Huamán (2024), quien identificó mejoras en la fragmentación y el rendimiento operativo después de modificar los parámetros de perforación y voladura en una explotación subterránea. Mientras que dicho antecedente abordó el rediseño del proceso de manera general, la presente investigación incorporó una combinación de ANFO y emulsiones con diferentes características, distribuidas según las funciones de los taladros. Esta diferencia permitió evaluar una alternativa en la que la selección de explosivos formó parte de una modificación integral del diseño.

Los resultados también presentaron semejanzas con los hallazgos de Barzola (2025), quien relacionó la aplicación de criterios de voladura controlada con mejoras en la fragmentación y los costos operativos. En el presente estudio, la utilización de Split Desktop permitió cuantificar el P80 y comparar su comportamiento durante ambos periodos. El análisis de los registros correspondientes a octubre, noviembre y diciembre mostró que los menores valores de fragmentación se mantuvieron durante la etapa de implementación. No obstante, la disminución del P80 permitió establecer que el tamaño característico del material fue menor, sin que ello implicara necesariamente una distribución granulométrica más uniforme.

De manera complementaria, González (2022) destacó la importancia de distribuir adecuadamente las cargas explosivas para mejorar los resultados de las voladuras subterráneas. En la investigación desarrollada, el factor de carga aumentó de 3.971 a 4.160 kg/m³, mientras que el

P80 presentó una disminución considerable. La comparación de ambos indicadores mostró que durante el segundo periodo se empleó una mayor cantidad de explosivo por unidad de volumen de roca y, simultáneamente, se obtuvieron fragmentos de menor tamaño. Sin embargo, estos resultados debieron interpretarse considerando que también se modificaron la geometría de la malla y la ubicación de las cargas, por lo que no fue posible atribuir la variación de la fragmentación exclusivamente al incremento del factor de carga.

Respecto a las herramientas de evaluación, los resultados se relacionaron con Martínez (2023), quien resaltó la utilidad del modelo Kuz-Ram para estimar la fragmentación producida por una voladura. En el presente trabajo, este modelo se empleó como referencia para la predicción granulométrica, mientras que Split Desktop permitió evaluar el material obtenido después de los disparos. La utilización conjunta de ambas herramientas proporcionó información para comparar las estimaciones del diseño con los resultados observados en campo. Este procedimiento constituyó un aporte metodológico, al incorporar mediciones cuantitativas dentro de la evaluación del comportamiento de las voladuras.

En relación con el avance por disparo, se registró un incremento de 1.30 a 1.61 m entre el primer y segundo periodo, equivalente a una mejora aproximada del 24 %. Este resultado presentó concordancia con Acero (2021), quien relacionó la configuración geométrica de las mallas de perforación con el rendimiento del avance en labores subterráneas. En ambos casos se reconoció la importancia del arranque y de la disposición de los taladros para alcanzar una excavación efectiva. Sin embargo, la presente investigación complementó los ajustes geométricos con una distribución diferenciada de explosivos y el empleo de JKSimBlast y Holmberg-Persson como herramientas de diseño.

La aplicación del enfoque de Holmberg-Persson permitió organizar la configuración de la voladura considerando las distintas zonas funcionales del frente. De esta manera, la selección de cargas se realizó de acuerdo con los requerimientos del arranque, las ayudas, los hastiales, la corona y el piso. Esta distribución representó una modificación respecto al primer periodo, caracterizado por el empleo exclusivo de Emulnor 3000. La propuesta buscó adecuar las características de los explosivos a las necesidades de cada zona de perforación, en lugar de mantener una configuración uniforme para todos los taladros.

El incremento del avance también mostró semejanzas con los resultados de Huamán (2024), quien identificó mejoras en el rendimiento de excavación después de modificar el diseño de perforación y voladura. En el presente estudio, la comparación se desarrolló manteniendo la sección de 2.10 × 2.40 m, el equipo Jack Leg, la broca de 38 mm y la barra de 6 pies, bajo condiciones geomecánicas consideradas similares. Estas características facilitaron la evaluación de los cambios introducidos durante el segundo periodo. No obstante, debido a que se modificaron simultáneamente distintos parámetros del diseño, el incremento del avance se interpretó como un resultado asociado a la propuesta integral de optimización.

En cuanto al tiempo de limpieza, el promedio disminuyó de 1.42 a 1.05 horas por disparo. Esta reducción coincidió con la obtención de fragmentos de menor tamaño y con el incremento del avance registrado durante la etapa de implementación. Los resultados presentaron relación con Huerta (2023), quien destacó la importancia de mejorar las actividades operativas para reducir los tiempos improductivos en minería subterránea. A diferencia de ese enfoque general, la presente investigación examinó específicamente el comportamiento del tiempo de limpieza frente a las modificaciones realizadas en perforación y voladura. La comparación sugirió que las

características del material fragmentado pudieron influir favorablemente en su manipulación y retiro.

En relación con el control de la excavación, Onton (2023) señaló que la modificación de los parámetros de voladura podía contribuir a disminuir la sobreexcavación y los costos operativos. En el presente estudio, la distribución diferenciada de cargas en las zonas de corona y hastiales respondió a criterios de adecuación de la energía aplicada cerca del contorno. Sin embargo, debido a que la sobreexcavación no constituyó uno de los indicadores principales evaluados, no se estableció una reducción cuantificada de este fenómeno. La comparación con dicho antecedente permitió reconocer la importancia de incorporar mediciones de control de perfiles en futuras evaluaciones del diseño propuesto.

Desde la perspectiva económica, el costo unitario de extracción disminuyó de 116.79 a 92.08 USD/t, lo que representó una reducción aproximada del 21.16 %. Este resultado fue consistente con los antecedentes de Huamán (2024), Onton (2023) y Barzola (2025), quienes relacionaron las modificaciones en los procesos de perforación y voladura con resultados económicos favorables. En el caso estudiado, la disminución del costo coincidió con una mayor longitud excavada por disparo, menores tiempos de limpieza y una reducción del tamaño P80. Estos indicadores permitieron interpretar el comportamiento económico considerando el rendimiento global de la operación y no únicamente el consumo de explosivos.

Un aspecto relevante fue que el factor de carga presentó un incremento reportado del 4.74 %, mientras que el costo unitario de extracción disminuyó un 21.16 %. Esta relación mostró que el mayor consumo específico de explosivos durante el segundo periodo no estuvo acompañado de un aumento del costo por tonelada extraída. Por el contrario, se registró una reducción de este indicador económico. El resultado permitió reconocer que la evaluación del consumo de

explosivos debía complementarse con indicadores de productividad y costos, debido a que una menor cantidad de explosivo por metro cúbico no necesariamente representaba la alternativa de menor costo unitario.

Los hallazgos también guardaron relación con Rodríguez (2021), quien abordó la importancia de seleccionar adecuadamente los explosivos para mejorar el desempeño de las voladuras subterráneas. Durante el primer periodo de la investigación se utilizó Emulnor 3000 como explosivo principal, mientras que en el segundo se incorporó una combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000. Esta modificación permitió establecer una configuración diferenciada de las cargas según las características previstas para cada zona del frente. La comparación de los resultados proporcionó evidencia favorable sobre el comportamiento operativo de esta alternativa, aunque no permitió determinar de manera independiente la contribución de cada explosivo.

Por otra parte, Roa (2022) examinó la incorporación de tecnologías para mejorar el control de las voladuras mediante sistemas de iniciación y detonadores electrónicos. Aunque su propuesta tecnológica fue diferente, ambos estudios compartieron el interés por mejorar los resultados mediante decisiones sustentadas en criterios técnicos. En la presente investigación se trabajó con explosivos convencionales, perforación mediante Jack Leg y herramientas de simulación y análisis. Esta diferencia resultó relevante para las condiciones de pequeñas operaciones subterráneas, donde la disponibilidad de equipos y los recursos de inversión pueden limitar la incorporación de tecnologías más complejas.

El aporte técnico de la investigación se relacionó con la integración de la caracterización geomecánica, el diseño de perforación y voladura, la estimación granulométrica y la evaluación de resultados operativos. Para ello, se consideró un RMR promedio de 55 puntos, se utilizaron

JKSimBlast y Holmberg-Persson para apoyar el diseño, se incorporó Kuz-Ram para estimar la fragmentación y se empleó Split Desktop para determinar el P80 del material volado. Esta secuencia permitió establecer una relación metodológica entre las condiciones de la labor, las características del diseño y los indicadores obtenidos después de las voladuras.

Asimismo, la comparación entre los dos periodos permitió evaluar el comportamiento de la propuesta bajo condiciones de trabajo semejantes en cuanto a sección de excavación y equipo de perforación. El registro de 184 voladuras proporcionó una base de observaciones para describir las variaciones de los indicadores durante los seis meses estudiados. Sin embargo, al tratarse de una comparación temporal, también debieron considerarse posibles diferencias operativas no medidas entre ambos periodos. Por esta razón, los resultados respaldaron el desempeño favorable de la propuesta implementada, sin establecer una relación causal exclusiva con alguno de sus componentes.

Finalmente, los resultados mostraron que una labor subterránea de sección reducida, perforada mediante Jack Leg, podía incorporar herramientas de diseño y evaluación para analizar técnicamente sus voladuras. La experiencia desarrollada en el Crucero XC 584 del nivel 7 proporcionó información útil para operaciones que presentaran condiciones geomecánicas y operativas semejantes. No obstante, su aplicación en otras labores requeriría verificar previamente las características del macizo rocoso, la geometría de excavación, los equipos disponibles y los costos propios de cada operación.

En síntesis, la discusión permitió identificar coincidencias entre los resultados obtenidos y los antecedentes considerados, especialmente en la reducción del tamaño de fragmentación, el incremento del avance y la disminución de los costos unitarios. El aporte particular de la investigación consistió en evaluar conjuntamente el P80, el avance por disparo, el tiempo de

limpieza, el factor de carga y el costo de extracción, integrando herramientas de diseño, predicción y medición. De esta manera, la propuesta implementada mostró resultados técnicos y económicos favorables durante el segundo periodo y proporcionó una referencia para futuras evaluaciones de optimización de voladuras en minería subterránea.

Conclusiones

En relación con el objetivo general, se concluyó que la optimización del uso de explosivos, mediante la combinación de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000, junto con las modificaciones realizadas en el diseño de perforación y voladura, permitió obtener resultados favorables en la eficiencia operativa y los costos de extracción del Crucero XC 584 del nivel 7 durante el año 2025. La comparación entre ambos periodos evidenció una reducción reportada del 25.81 % en el tiempo de limpieza, un incremento aproximado del 24 % en el avance por disparo y una disminución reportada del 20.95 % en el tamaño característico de fragmentación P80. Asimismo, el costo unitario de extracción se redujo en un 21.16 %, lo que reflejó un mejor desempeño técnico y económico durante la etapa de implementación.

Respecto al primer objetivo específico, se determinó que la combinación diferenciada de explosivos y los ajustes introducidos en el diseño de voladura estuvieron asociados con una disminución del tamaño de fragmentación del macizo rocoso. Los resultados obtenidos mediante el software Split Desktop mostraron que el P80 promedio descendió de 7.78 pulgadas durante el primer periodo a 6.15 pulgadas en el segundo, lo que representó una reducción reportada del 20.95 %. Esta variación evidenció la obtención de fragmentos de menor tamaño, condición que favoreció el desarrollo de las operaciones posteriores a la voladura y proporcionó evidencia del cumplimiento del objetivo relacionado con la mejora de la fragmentación.

En cuanto al segundo objetivo específico, se estableció que el rediseño de la malla de perforación y de la distribución de las cargas explosivas estuvo acompañado de un incremento del avance por disparo en la labor minera de sección 2.10 × 2.40 m. Durante el periodo inicial se obtuvo un avance promedio de 1.30 m, mientras que en la etapa de implementación se alcanzaron 1.61 m, registrándose una mejora aproximada del 24 %. Esta diferencia, equivalente a 0.31 m

adicionales por disparo, reflejó un mayor rendimiento de excavación y permitió obtener una mayor longitud de avance por cada voladura ejecutada bajo las condiciones evaluadas.

Finalmente, en relación con el tercer objetivo específico, se concluyó que la propuesta de optimización estuvo asociada con una disminución del costo unitario de extracción. Los resultados mostraron que este indicador pasó de 116.79 USD/t durante el primer periodo a 92.08 USD/t en el segundo, lo que representó una reducción del 21.16 %, equivalente a 24.71 USD/t. Este comportamiento económico coincidió con la obtención de fragmentos de menor tamaño, el incremento del avance por disparo y la reducción del tiempo de limpieza. En consecuencia, se evidenció que las modificaciones implementadas estuvieron acompañadas de un mejor aprovechamiento operativo de los recursos y de menores costos por tonelada extraída, lo que respaldó el cumplimiento del objetivo económico de la investigación.

Recomendaciones

Se recomendó mantener la aplicación de la propuesta de optimización del uso de explosivos en las labores de desarrollo del Crucero XC 584 del nivel 7, considerando la combinación diferenciada de ANFO, Emulnor 500, Emulnor 1000 y Emulnor 3000, de acuerdo con las características del macizo rocoso y los requerimientos de cada zona del frente. Para ello, resultó necesario verificar periódicamente las condiciones geomecánicas y los parámetros del diseño, con la finalidad de conservar los resultados favorables obtenidos en fragmentación, avance por disparo y costo unitario de extracción.

Se recomendó establecer un procedimiento de seguimiento de la fragmentación del material volado mediante el empleo de Split Desktop, registrando sistemáticamente los valores de P80 obtenidos después de cada voladura. Esta información permitiría identificar variaciones en el tamaño de los fragmentos y evaluar la necesidad de introducir modificaciones en la distribución de las cargas explosivas. Asimismo, se consideró conveniente mantener una base de datos que facilitara la comparación de resultados y el análisis del comportamiento granulométrico en diferentes condiciones de operación.

Se sugirió continuar utilizando el modelo de Holmberg-Persson como herramienta de apoyo para el diseño de las mallas de perforación, prestando especial atención al burden, espaciamiento, número de taladros y distribución de las cargas explosivas. La revisión de estos parámetros debería realizarse considerando las características geomecánicas de cada frente y las dimensiones de la labor. De igual manera, se recomendó complementar el seguimiento del diseño con mediciones de sobreexcavación y subexcavación, a fin de disponer de información que permitiera evaluar el control del contorno y la calidad de la excavación.

Se recomendó incorporar el modelo Kuz-Ram dentro del procedimiento de evaluación técnica de las voladuras, utilizándolo para estimar la fragmentación esperada antes de la ejecución de los disparos. Los resultados de estas estimaciones deberían contrastarse posteriormente con las mediciones obtenidas mediante Split Desktop, con el propósito de identificar diferencias entre el comportamiento previsto y el observado. Esta comparación permitiría mejorar progresivamente la confiabilidad de las estimaciones y fortalecer los criterios empleados en la planificación de las operaciones de perforación y voladura.

Se sugirió desarrollar programas periódicos de capacitación dirigidos al personal responsable de las actividades de perforación y voladura, priorizando la interpretación de diseños, el control de los parámetros operativos, la aplicación de procedimientos de seguridad y el manejo autorizado de explosivos. Asimismo, se recomendó fortalecer la supervisión del cumplimiento de los diseños aprobados y promover el registro de las desviaciones identificadas durante la ejecución de los trabajos. Estas acciones contribuirían a mantener condiciones operativas controladas y favorecer la continuidad de las mejoras implementadas.

Se recomendó evaluar progresivamente la aplicación de la metodología en otras labores subterráneas que presentaran características geomecánicas y operativas semejantes a las del Crucero XC 584 del nivel 7. Antes de su implementación, sería necesario efectuar una caracterización específica del macizo rocoso, revisar las condiciones de perforación y establecer indicadores de referencia. Posteriormente, los resultados obtenidos deberían compararse con los registros iniciales de cada labor, con la finalidad de determinar la viabilidad técnica y económica de la propuesta en distintos escenarios de explotación.

Finalmente, se recomendó implementar un sistema de seguimiento de los costos asociados con las operaciones de perforación, voladura y limpieza, considerando el consumo de explosivos,

los accesorios utilizados, el rendimiento de los equipos, el avance alcanzado y el costo por tonelada extraída. El análisis periódico de estos indicadores permitiría identificar variaciones en el desempeño económico y adoptar medidas correctivas cuando fueran necesarias. De esta manera, se facilitaría la evaluación continua de los beneficios obtenidos y la sostenibilidad operativa de la propuesta de optimización.

Referencias Bibliográficas

Acero Vergara, A. F.. (2021) Propuesta de una malla de perforación y voladura para labores de avance. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú. Recuperado de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_12952ae44ea8093e839f1778a7b4e53b/Details

Fecha de consulta: 18 de marzo de 2026.

Barzola Romero, L.. (2025) Implementación de voladura controlada y su impacto en la fragmentación en la unidad minera Caravelí. Universidad Nacional, Perú. Recuperado de https://es.scribd.com/document/973657152/FINAL-TESIS-2-ESPANOL

Fecha de consulta: 18 de marzo de 2026.

Bieniawski, Z. T.. (1989) Engineering rock mass classifications. Wiley.

Cunningham, C. V. B.. (1983) The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. Proceedings of the First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting.

González, M.. (2022) Optimización de voladura subterránea para mejorar fragmentación en mina chilena. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P.. (2014) Metodología de la investigación. McGraw-Hill.

Hoek, E., & Brown, E. T.. (1997) Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.

Holmberg, R., & Persson, P. A.. (1979) Design of tunnel blasting round. Swedish Detonic Research Foundation.

Huamán Palpa, C. A.. (2024) Optimización del proceso de perforación y voladura subterránea para la sociedad minera Oro Sol Uno. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú. Recuperado de https://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/4282/1/T026_44569760_T.pdf Fecha de consulta: 18 de marzo de 2026.

Huerta, J.. (2023) Implementación del método de explotación corte y relleno ascendente en minera Magistral. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú.

Hustrulid, W., & Bullock, R.. (2001) Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies. SME.

Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J.. (1995) Drilling and blasting of rocks. A.A. Balkema.

Konya, C. J., & Walter, E. J.. (1990) Surface blast design. Prentice Hall.

Kuznetsov, V. M.. (1973) The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. Soviet Mining Science, 9(2)

Martínez, L.. (2023) Aplicación de modelos de fragmentación en voladura subterránea. Universidad de Oviedo, España.

Onton Enciso, E.. (2023) Evaluación de voladura para reducir la sobreexcavación en la rampa 2705 en la unidad minera Parcoy. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú. Recuperado de https://repositorio.unsch.edu.pe/items/0628f755-0147-

4f73-8bd2-71f3338119ae

Fecha de consulta: 18 de marzo de 2026.

Ouchterlony, F.. (2005) The Swebrec function: Linking fragmentation by blasting and crushing. Mining Technology, 114(1)

Persson, P. A., Holmberg, R., & Lee, J.. (1994) Rock blasting and explosives engineering. CRC Press.

Roa Pérez, P. C.. (2022) Implementación de voladura centralizada en mina subterránea. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú. Recuperado de https://tesis.pucp.edu.pe/items/164e2138-7ca5-4f42-863f-f4c0b6bcab68

Fecha de consulta: 18 de marzo de 2026.

Rodríguez, J.. (2021) Evaluación del uso de explosivos en minería subterránea. Universidad Politécnica de Madrid, España.

Tamayo, M., & Tamayo, M.. (2003) El proceso de la investigación científica. Limusa.