



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Optimización de la fragmentación y productividad en minería superficial
mediante la implementación de explosivos energéticos**

Tesis presentada por:

Salcedo Chuctaya, Veronica Alejandra

ORCID: 0009-0000-2738-3126

Para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Maestro Morales Valdivia, Javier Antonio

ORCID: 0000-0002-4761-8911

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 19 de Mayo del 2026

Dictamen: 015192-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 015192, presentado por:

2017101232 - SALCEDO CHUCTAYA VERONICA ALEJANDRA

Titulado:

**OPTIMIZACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN Y PRODUCTIVIDAD EN MINERÍA SUPERFICIAL
MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE EXPLOSIVOS ENERGÉTICOS**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

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

INGENIERO DE MINAS

**29688402 - BARREDA DE LA CRUZ MIGUEL ALBERTO
DICTAMINADOR**



**40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR**



**29640854 - MONTESINOS SOLORZANO CESAR GERARDO
DICTAMINADOR**



OPTIMIZACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN Y PRODUCTIVIDAD EN MINERÍA SUPERFICIAL MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE EXPLOSIVOS ENERGÉTICOS

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%	13%	0%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.ucsm.edu.pe	11%
	Fuente de Internet	
2	repositorio.unjbg.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
3	repositorio.unc.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	

Excluir citas	Apagado	Excluir coincidencias	< 1%
Excluir bibliografía	Apagado		

Dedicatoria

A Ercina y Diana, mi mamita y hermana que en todo momento de dificultades estuvieron para mí y dándome lo mejor de ellas y evitar que me rindiera y a mi mamita que fue un pilar en mi vida y ayudó en mi formación personal. las amo y me siento afortunada de ser equipo y ser familia. Una dedicatoria especial a la memoria de mi abuelito Jorge, cuyo amor, ejemplo y sabiduría siguen guiando mis pasos, incluso en su ausencia.



Agradecimientos

A mi querida mamita que nunca dudo de mí este agradecimiento especial es para ti, gracias por siempre estar para mí en todo momento y demostrarme que todo es posible, gracias por ser motor y motivo dentro de nuestra familia. Esto no hubiera sido posible sin ti. Gracias por ser mi mayor inspiración, por tu amor incondicional y por enseñarme a nunca rendirme.

Tus sacrificios, tu apoyo constante y tus palabras de aliento han sido la base sobre la que he construido cada logro. Este paso también es tuyo. Te amo con todo mi corazón.



Epígrafe

“Mejorar no es cambiar lo que se hace, sino entender por qué se hace y cómo puede hacerse mejor.”

— Autor desconocido



Resumen

La presente investigación tuvo como finalidad optimizar la fragmentación del macizo rocoso y la productividad operativa en una operación minera superficial mediante la implementación de un nuevo explosivos energéticos, específicamente el uso de Quantex 2.0, en la Unidad Minera Antapaccay durante el año 2024. El estudio se enmarcó dentro de un enfoque cuantitativo, con tipo de investigación aplicada y nivel explicativo, utilizando como fuente principal los registros técnicos proporcionados por la empresa Enaex.

Se realizó una comparación entre los resultados operativos del segundo trimestre (con voladura convencional y Quantex 1.0) y el tercer trimestre (con voladura optimizada y Quantex 2.0), evaluando indicadores clave como P80, P50, porcentaje de finos <1 pulgada, toneladas por hora (T/H), consumo de explosivo (kg/t) y costo por tonelada (USD/t). Los resultados mostraron una reducción del P80 de 3.57 a 3.03 pulgadas, un incremento del 14.57% en los finos y un aumento del 15.39% en la productividad. A pesar del mayor consumo específico de explosivo (+57.95%), el costo unitario por tonelada se redujo en -9.23%, lo que demuestra que una mayor inversión en energía de voladura fue compensada por mejoras operativas.

Los hallazgos validan que el uso de explosivos energéticos, permite obtener una fragmentación más uniforme, mayor eficiencia operativa y reducción de costos. El estudio concluye recomendando estandarizar el nuevo explosivo en zonas con rocas duras similares y aplicar un monitoreo continuo del P80 como indicador estratégico de control operativo.

Palabras clave: Fragmentación, voladura y productividad.

Abstract

This research aimed to optimize rock mass fragmentation and operational productivity in a surface mining operation through the implementation of a new blast design using high-energy explosives, specifically Quantex 2.0, at the Antapaccay Mining Unit during 2024. The study followed a quantitative approach, applied type and explanatory level, using operational records provided by the company Enaex as the main data source.

A comparative analysis was conducted between the results of the second quarter (using conventional blasting with Quantex 1.0) and the third quarter (with optimized blasting and Quantex 2.0), evaluating key indicators such as P80, P50, percentage of fines <1 inch, tons per hour (T/H), explosive consumption (kg/t), and unit cost (USD/t). The findings showed a reduction in P80 from 3.57 to 3.03 inches, a 14.57% increase in fines, and a 15.39% improvement in productivity. Despite a higher explosive consumption (+57.95%), the unit cost per ton decreased by 9.23%, demonstrating that a greater investment in blast energy was offset by operational gains.

The study confirms that a technically optimized blast design, supported by high-energy explosives, leads to better fragmentation, increased efficiency, and reduced costs. It is recommended to standardize the new blast parameters in similar hard rock conditions and implement continuous monitoring of P80 as a key performance indicator.

Keywords: Fragmentation, blasting and productivity.

Índice general

Dedicatoria

Agradecimientos

Epígrafe

Resumen

Abstract

Introducción 1

Capítulo I: Planteamiento de la investigación 3

1.1 Planteamiento del problema 3

1.2 Objetivos..... 4

1.2.1 Objetivo general..... 4

1.2.2 Objetivos específicos..... 4

1.3 Preguntas de investigación 4

1.3.1 Pregunta general..... 4

1.3.2 Preguntas específicos..... 4

1.4 Línea de investigación..... 5

1.5 Palabras clave 5

1.6 Aportes del desarrollo 5

Capítulo II: Fundamentos teóricos..... 8

2.1 Estado del arte..... 8

2.2	Antecedentes.....	9
2.2.1	Antecedentes locales	9
2.2.2	Antecedentes nacionales	12
2.2.3	Antecedentes internacionales	13
2.3	Bases teóricas de la investigación.....	15
2.3.1	Aplicación de explosivos energéticos en minería superficial	15
2.3.2	Impacto de la mala fragmentación en el rendimiento y costos operativos	16
2.3.3	Fragmentación del macizo rocoso	18
2.3.4	P80.....	19
2.3.5	Software Split Online	19
2.3.6	Voladura.....	20
2.3.7	Chancado primario.....	20
2.3.8	Quantex 2.0.....	20
2.3.9	Factor de potencia. (Powder Factor).....	20
2.3.10	Carga específica	20
2.3.11	Velocidad de detonación. (VOD).....	21
2.3.12	Modelo Kuz-Ram.....	21
2.3.13	Mine to Mill.....	21
2.3.14	Burden	21
2.3.15	Espaciamiento.....	21
2.3.16	Fragmentación secundaria.....	21

2.3.17	Sobredimensionado	22
2.3.18	Conminución	22
2.3.19	Eficiencia energética	22
2.3.20	Taladro de producción	22
2.3.21	Carga de columna	22
2.3.22	Taco. (Stemming)	22
2.3.23	Perforación en banco	23
2.3.24	Modelo de fragmentación de Rosin-Rammler	23
2.3.25	Modelo Kuz-Ram	23
2.3.26	Diámetro del taladro	23
2.3.27	Longitud de subperforación. (subdrill)	24
2.3.28	Relación Burden/Espaciamiento. (B/E)	24
2.4	Hipótesis	24
2.4.1	Hipótesis general	24
2.4.2	Hipótesis específica	24
2.5	Variables	25
2.5.1	Variable independiente	25
2.5.2	Variable dependiente	25
2.5.3	Operacionalización de variables	26
Capítulo III: Marco metodológico		27
3.1	Alcances y limitaciones	27

3.1.1	Alcances	27
3.1.2	Limitaciones	27
3.2	Tipo y diseño de la investigación	28
3.2.1	Tipo de la investigación.....	28
3.2.2	Diseño de la investigación.....	28
3.3	Población y muestra	28
3.3.1	Población	28
3.3.2	Muestra.....	29
3.4	Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	29
3.4.1	Método de la investigación.....	29
3.4.2	Técnicas de recolección de datos.....	29
3.4.3	Instrumentos de recolección de datos.....	30
3.5	Plan de análisis estadístico de los datos	30
3.5.1	Técnicas de análisis de datos	30
3.6	Procedimiento	31
3.6.1	Diagnóstico inicial de condiciones operativas.....	31
3.6.2	Selección del explosivo energético	31
3.6.3	Ejecución de la voladura piloto con Quantex 2.0	31
3.6.4	Medición de la fragmentación post-voladura	32
3.6.5	Evaluación de la productividad del chancado primario.....	32
3.6.6	Documentación técnica y validación operativa.....	32

Capítulo IV: Resultados y discusiones	33
4.1 Análisis e interpretación de resultados.....	33
4.2 Resultados del split on line	42
4.3 Análisis de los factores que influyen en los resultados de fragmentación.....	51
4.4 Resultados por objetivos	88
4.4.1 Resultado del objetivo general	88
4.4.2 Resultado del primer objetivo específico.....	88
4.4.3 Resultado del segundo objetivo específico	89
4.4.4 Resultado del tercer objetivo específico	89
4.5 Contrastación de hipótesis	90
4.5.1 Contrastación de la hipótesis general	90
4.5.2 Contrastación de la hipótesis específica 1	90
4.5.3 Contrastación de la hipótesis específica 2	90
4.5.4 Contrastación de la hipótesis específica 3	91
1.1. Discusión.....	91
Conclusiones	93
Recomendaciones	95
Referencias Bibliográficas	97

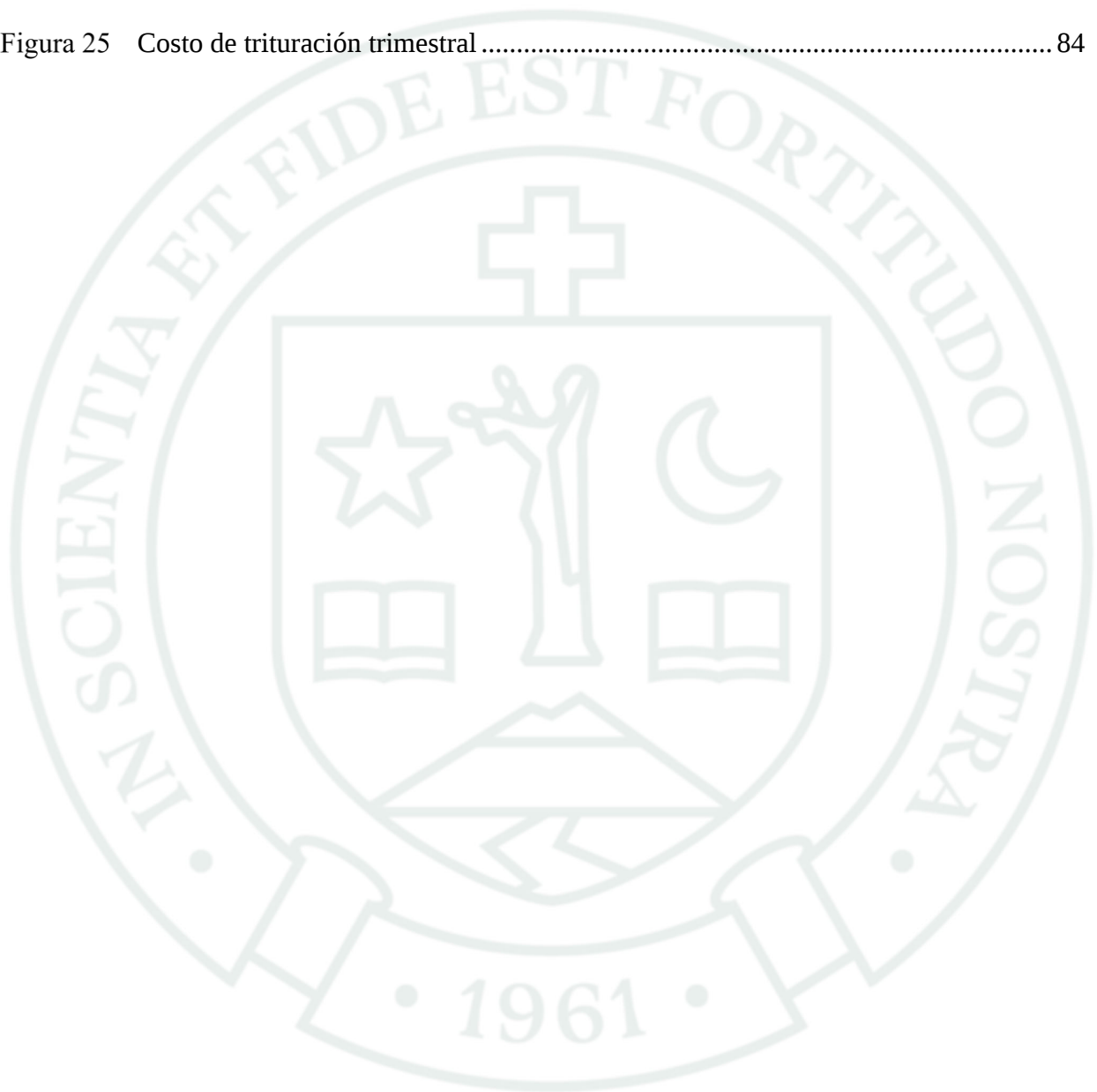
Índice de tablas

Tabla 1	Impacto de la fragmentación en el rendimiento operativo en minería superficial ...	17
Tabla 2	Impacto de la fragmentación en los costos operativos	18
Tabla 3	Relación entre fragmentación y desempeño del proceso Mine to Mill	18
Tabla 4	Operacionalización de variables	26
Tabla 5	Parámetros del segundo trimestre	34
Tabla 6	Resultados de voladura y granulometría tajo Norte	41
Tabla 7	Influencia de las condiciones geomecánicas en la fragmentación del macizo rocoso	52
Tabla 8	Influencia de factores operativos en la calidad de fragmentación.....	53
Tabla 9	Relación entre factor de potencia (kg/t) y resultados de fragmentación	53
Tabla 10	Factores que explican la mejora de resultados en el tercer trimestre	54
Tabla 11	Parámetros del tercer trimestre	54
Tabla 12	Parámetros abril 2024.....	56
Tabla 13	Parámetros mayo 2024	58
Tabla 14	Parámetros junio 2024.....	60
Tabla 15	Parámetros julio 2024.....	62
Tabla 16	Parámetros agosto 2024.....	64
Tabla 17	Parámetros septiembre 2024.....	66
Tabla 18	Resultados generales.....	86

Índice de figuras

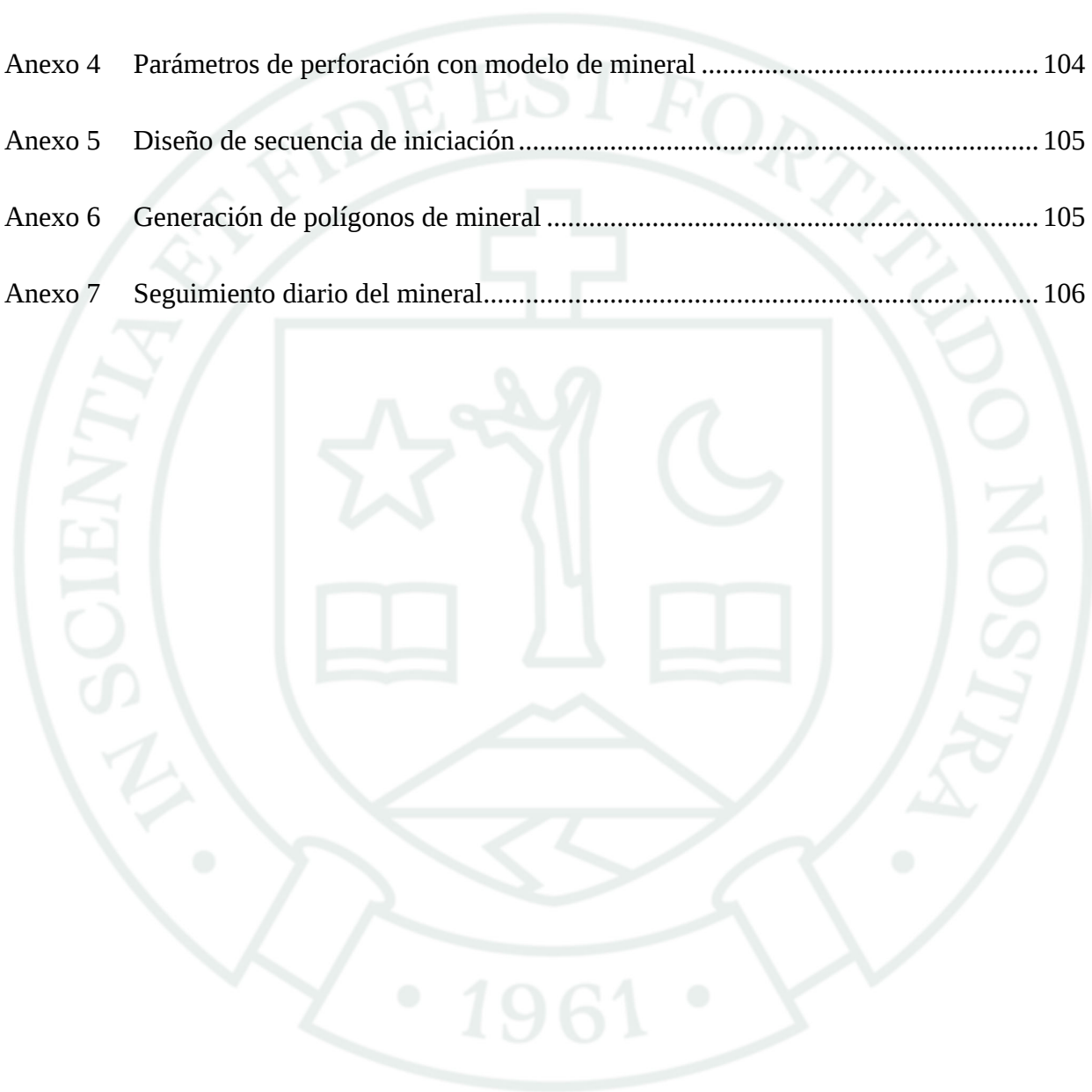
Figura 1	Plan semanal.....	35
Figura 2	Proyecciones mineralógicas	36
Figura 3	Parámetros de malla de perforación y voladura	37
Figura 4	Parámetros de voladura	38
Figura 5	Análisis granulométrico.....	39
Figura 6	Versus explosivos energéticos.....	40
Figura 7	Posición de equipos del Split on Line	43
Figura 8	Equipo Split on Line.....	44
Figura 9	Frente de minado	45
Figura 10	Escala de grises.....	46
Figura 11	Proceso split on line.....	47
Figura 12	Procesamiento split on line.....	48
Figura 13	Procesamiento split on line con escala	49
Figura 14	Diagrama split on line.....	49
Figura 15	Resultados fragmentación.....	50
Figura 16	Producción mensual.....	68
Figura 17	Finos mensual	69
Figura 18	Fragmentación mensual.....	71
Figura 19	Factor de Potencia mensual	73
Figura 20	Costo de trituración mensual	75

Figura 21	Producción trimestral.....	77
Figura 22	Finos trimestral.....	79
Figura 23	Fragmentación trimestral.....	80
Figura 24	Factor de potencia trimestral	82
Figura 25	Costo de trituración trimestral.....	84



Índice de anexos

Anexo 1	Análisis granulométrico.....	103
Anexo 2	Malla de perforación.....	103
Anexo 3	Parámetros con AxB.....	104
Anexo 4	Parámetros de perforación con modelo de mineral	104
Anexo 5	Diseño de secuencia de iniciación	105
Anexo 6	Generación de polígonos de mineral	105
Anexo 7	Seguimiento diario del mineral.....	106



Introducción

En la minería a cielo abierto, el proceso de voladura representa una de las etapas más críticas del ciclo productivo, ya que condiciona directamente la eficiencia del carguío, transporte y posterior conminución del mineral. Una voladura mal diseñada puede generar fragmentaciones inadecuadas, presencia de material sobredimensionado y pérdida de continuidad operativa, afectando tanto la productividad como los costos. Por esta razón, la selección del explosivo juega un papel fundamental en la optimización de las operaciones.

La presente investigación se desarrolla en la Unidad Minera Antapaccay, donde se identificó que el diseño convencional de voladura, basado en el uso de explosivos estándar (Quantex 1.0), generaba un tamaño de fragmento promedio (P80) de 3.57 pulgadas, lo que no resultaba óptimo para las condiciones geomecánicas del macizo rocoso. Ante esta situación, se propuso implementar un nuevo explosivo energético Quantex 2.0, el cual posee una mayor velocidad de detonación y densidad energética, permitiendo una fragmentación más controlada y eficiente.

El objetivo del estudio es demostrar que la implementación de un explosivo energético, puede mejorar significativamente la calidad de fragmentación (reduciendo el P80 a aproximadamente 3 pulgadas), incrementar la generación de finos útiles ($<1''$), elevar la productividad (medida en T/H) y reducir el costo unitario por tonelada procesada. La investigación se desarrolló con un enfoque cuantitativo, utilizando como fuente principal los registros operativos entregados por la empresa Enaex, correspondientes al segundo y tercer trimestre del año 2024.

Este trabajo busca generar evidencia técnica que sustente la viabilidad de aplicar estrategias de optimización energética en la voladura como herramienta clave para mejorar el

desempeño global de la operación minera, con impacto directo en los resultados económicos y operativos de la unidad.



Capítulo I: Planteamiento de la investigación

1.1 Planteamiento del problema

En operaciones de minería superficial, la calidad de la fragmentación generada por la voladura tiene un impacto directo sobre la eficiencia del carguío, transporte y procesamiento del mineral. Una fragmentación deficiente, caracterizada por un alto valor de P80 y bajo porcentaje de finos, suele ocasionar sobrecarga en los equipos de conminución, mayor consumo energético, incremento de retrabajos y reducción de la productividad operativa. Esta situación, observada de forma recurrente en diversos frentes de explotación, refleja que el uso de explosivos convencionales, aunque económicamente accesible, no siempre resulta eficiente frente a macizos rocosos de alta resistencia.

Durante el segundo trimestre del año 2024, se registraron limitaciones operativas derivadas del uso del explosivo Quantex 1.0, que generaba una fragmentación poco óptima pese a mantener una malla de perforación técnicamente correcta. Frente a este escenario, se implementó en el tercer trimestre el explosivo energético Quantex 2.0, sin modificar el diseño de malla, con el objetivo de evaluar su impacto en los resultados de fragmentación (P80, finos <1”), consumo específico (kg/t), productividad (T/H) y costo unitario (USD/t).

Esta investigación busca analizar si la incorporación de un explosivo de mayor energía, como el Quantex 2.0, permite optimizar la operación sin necesidad de rediseñar la voladura, generando mejoras sustanciales en los indicadores clave del proceso (Austin Powder, 2023; Gómez & Palacios, 2021).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Analizar el impacto de la implementación del explosivo energético Quantex 2.0 en la fragmentación del macizo rocoso y en la productividad operativa, manteniendo el diseño de malla de perforación en una operación minera superficial.

1.2.2 Objetivos específicos

- Comparar los resultados de fragmentación (P80 y porcentaje de finos <1”) obtenidos con Quantex 1.0 y Quantex 2.0, aplicados bajo el mismo diseño de malla.
- Evaluar la variación del consumo específico de explosivo (kg/t) y su relación con el costo unitario por tonelada (USD/t) tras la implementación de Quantex 2.0.
- Determinar el efecto de la implementación de Quantex 2.0 sobre la productividad operativa (T/H) en comparación con el periodo anterior.

1.3 Preguntas de investigación

1.3.1 Pregunta general

- ¿Cómo influye la implementación del explosivo energético Quantex 2.0 en la fragmentación del macizo rocoso y la productividad operativa en una operación de minería superficial, manteniendo el mismo diseño de malla de perforación?

1.3.2 Preguntas específicas

- ¿Qué diferencia existe en los resultados de fragmentación (P80 y porcentaje de finos) al comparar el uso de Quantex 1.0 y Quantex 2.0 bajo la misma malla de perforación?

- ¿Cómo varía el consumo específico de explosivo (kg/t) al implementar Quantex 2.0, y cuál es su impacto en los costos unitarios (USD/t) de la operación?
- ¿Qué efecto tiene la implementación de Quantex 2.0 sobre la productividad operativa (T/H) en comparación con el explosivo convencional?

1.4 Línea de investigación

La investigación que aquí se desarrolla está al interior de la línea de optimización de los procesos de la minería; la cual se enfoca precisamente en el mejoramiento de la eficiencia operativa de las etapas que configuran el ciclo productivo, siendo potenciada esta línea de optimización de los procesos con tecnologías, técnicas y estrategias de mejora que se orientan a maximizar el rendimiento y/o disminuir los costos en las operaciones extractivas. Esta línea de optimización de los procesos busca implementar soluciones novedosas que optimicen parámetros claves de los procesos tales como la fragmentación del macizo rocoso, el consumo de insumos y la eficiencia energética de las plantas de procesamiento, colaborando con una minería más productiva, más segura y más sostenible (Torres & Zegarra, 2021).

1.5 Palabras clave

Fragmentación de rocas, Explosivos energéticos y Productividad minera.

1.6 Aportes del desarrollo

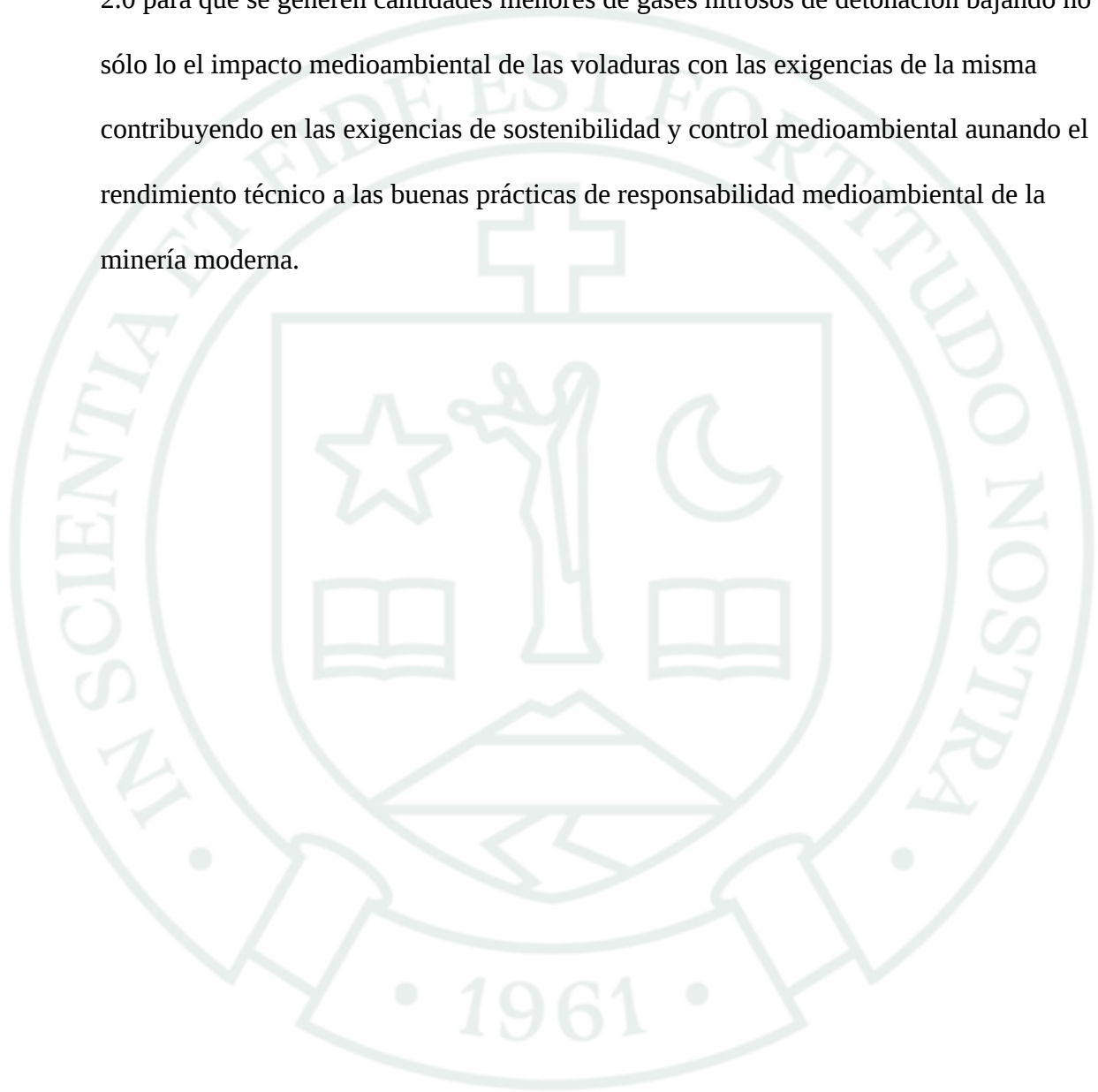
- Desde la vista técnica, el explosivo Quantex 2.0 supone una innovación importante en cuanto a la mejora de la fragmentación del macizo rocoso, ya que gracias a su alta velocidad de detonación y su densidad energética da lugar a fragmentaciones más uniformes y más controladas. Y esto pasa a ser parte directa del proceso de conminución, pues reduce el tamaño del P80 del material extraído de 3.56 a 3.04 , 5 pulgadas, hecho que mejora el rendimiento del chancado primario y del posterior

tratamiento mineralógico (Austin Powder, 2023). El enfoque técnico del estudio busca demostrar que una buena selección del tipo de explosivo es importante para obtener un mejor aprovechamiento del potencial mecánico del macizo rocoso en condiciones reales de operación.

- Desde la perspectiva operativa, la adopción del Quantex 2.0 propicia una mejor sincronización entre las etapas de perforación, voladura y chancado por cuanto eliminar estos cuellos de botella operativas y los tiempos muertos en planta. Una mejora en la fragmentación hará que la alimentación que llega al chancador sea más constante y fluida, lo que incrementa la disponibilidad y así el rendimiento diario, alcanzando 105,600 tpd en vez de 96,000 tpd, lo que permitirá a que el diagrama de operación sea más por la obstrucción o el sobredimensionamiento del material (Gómez, Palacios, 2021).
- Desde el punto de vista económico, el proyecto permite generar ahorros importantes ya que permite reducir la cantidad de energía consumida por la tonelada chancada, reducir el desgaste de los equipos de trituración y minimizar el número de voladuras secundarias. Por otro lado, la mejora de la capacidad de procesamiento diario trae consigo también un incremento en el volumen de mineral tratado al día, convirtiéndolo en un factor que hace aumentar la rentabilidad operativa de la unidad minera en el mercado. Esta orientación económica pone de manifiesto que la inversión en explosivos de clase premium rendirá rápidamente a partir de mejoras productivas concretas.
- En cuanto a la seguridad, el uso del Quantex 2.0 es también un factor que permite disminuir los riesgos de manipulación y post-voladura, debido a que los mismos consiguen generar fragmentaciones más adecuadas y a la vez lo que se sabe es que se pueden reducir las rocas sobredimensionadas, como consecuencia, también, de los

accidentes en las operaciones de carguío, transporte y chancado. También es la necesidad de explosiones secundarias.

- Para terminar en el ámbito medioambiental también se ve beneficiado al usar el Quantex 2.0 para que se generen cantidades menores de gases nitrosos de detonación bajando no sólo lo el impacto medioambiental de las voladuras con las exigencias de la misma contribuyendo en las exigencias de sostenibilidad y control medioambiental aunando el rendimiento técnico a las buenas prácticas de responsabilidad medioambiental de la minería moderna.



Capítulo II: Fundamentos teóricos

2.1 Estado del arte

En los últimos años, la optimización de la fragmentación del macizo rocoso se ha consolidado como un factor clave en la mejora de la productividad minera. Diversos estudios han demostrado que una voladura bien diseñada, alineada con las propiedades geomecánicas del terreno y el uso de explosivos de alta energía, permite obtener fragmentaciones más uniformes, reducir los costos operativos y mejorar la eficiencia de procesos posteriores como el carguío, transporte y chancado primario.

Según Jimeno et al. (1995) y Cunningham (1987), la fragmentación está directamente relacionada con la cantidad de energía transmitida al macizo rocoso, siendo esta controlada por parámetros como el factor de carga (kg/t), el tipo de explosivo y el diseño de la malla de perforación (burden y espaciamiento). En ese contexto, los explosivos energéticos, como el Quantex 2.0, han sido desarrollados para aplicaciones en rocas de alta resistencia, proporcionando velocidades de detonación superiores y una mejor transmisión de energía, lo cual genera fragmentos más pequeños y homogéneos.

A nivel operativo, modelos empíricos como el Kuz-Ram (Kuznetsov, 1973; Cunningham, 1983) y simulaciones mediante software como Split Desktop, JKSimBlast y BlastMetrix permiten estimar y validar la distribución de fragmentación antes y después de cada voladura. Estos sistemas han sido utilizados por minas de gran escala como Cerro Verde, Cuajone y Las Bambas, donde se ha reportado que la aplicación de cargas específicas mayores a 0.45 kg/t permitió reducir el P80 por debajo de las 6 pulgadas y mejorar significativamente los tiempos de ciclo de carguío y chancado (Berrospi, 2021; Fernández, 2022).

En la Unidad Minera Antapaccay, el diseño de voladura convencional mantenía un P80 promedio de 3.57 pulgadas, pero con un bajo porcentaje de finos y una productividad limitada. Investigaciones como las de Toribio Yaranga (2021) y Rojas Peña (2023) evidencian que la mejora en la calidad de fragmentación puede lograrse mediante el uso de explosivos de alta energía y ajustes técnicos en la malla, generando impactos positivos no solo en la productividad (T/H), sino también en la reducción de costos unitarios y desgaste de equipos.

Finalmente, las tendencias actuales apuntan hacia la voladura inteligente, donde el monitoreo continuo, la fragmentación en tiempo real y el uso de modelos predictivos permiten controlar de forma precisa los resultados de cada disparo. Estas prácticas están siendo adoptadas progresivamente en operaciones sudamericanas como Chuquicamata (Chile), Quellaveco y Toquepala (Perú), con resultados consistentes en la mejora del P80 y la reducción de desviaciones operativas.

2.2 Antecedentes

2.2.1 Antecedentes locales

- Según Quispe (2022), en su tesis “Optimización de la fragmentación mediante el uso de explosivos energéticos en minería a cielo abierto”, en la Universidad Nacional de San Agustín. El objetivo de la investigación fue evaluar el impacto del uso de explosivos energéticos en la fragmentación del macizo rocoso en una operación minera superficial. La metodología aplicada fue cuantitativa, con diseño no experimental de tipo comparativo, utilizando registros de voladuras en bancos de producción. La muestra estuvo conformada por frentes de explotación en roca de alta resistencia. Los resultados evidenciaron que el uso de explosivos energéticos permitió reducir el tamaño de fragmentación (P80) en

aproximadamente 18%, así como incrementar el porcentaje de finos por encima del 50%, generando mejoras en la productividad de carguío y reducción de costos operativos. Se concluyó que la energía del explosivo es un factor determinante en la eficiencia del proceso de voladura. Este estudio aporta a la investigación al demostrar que el uso de explosivos energéticos mejora la fragmentación sin necesidad de modificar la malla de perforación.

- Según Condori (2022), en su tesis “Optimización de la fragmentación del macizo rocoso mediante parámetros de voladura en una mina a cielo abierto – Espinar”, en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC). El objetivo de la investigación fue optimizar la fragmentación del macizo rocoso en una operación minera superficial mediante la evaluación de parámetros de voladura y su influencia en el tamaño de fragmento. La metodología aplicada fue cuantitativa, con un enfoque analítico y diseño no experimental de tipo comparativo, utilizando registros operativos de voladuras realizadas en bancos de producción. La muestra estuvo conformada por frentes de explotación en roca tipo pórfido de cobre en la zona de Espinar. Los resultados evidenciaron que la mejora en la energía de voladura permitió reducir el P80 y aumentar el porcentaje de finos, lo cual impactó positivamente en la productividad del sistema de carguío. Se concluyó que el control del factor de potencia y la selección adecuada del explosivo son determinantes para lograr una fragmentación eficiente. Este antecedente aporta a la investigación al demostrar que es posible mejorar la fragmentación sin modificar necesariamente la geometría de la malla, enfocándose en la energía aplicada.

- Según Rojas & Miranda (2021), en su tesis “Impacto del uso de explosivos energéticos en los procesos de mina y planta en la Compañía Minera Antapaccay”, elaborado en Espinar, Cusco, en el cual evalúan en primer lugar el uso de explosivos de alta energía y una metodología Mine to Mill dirigidas a contribuir a aumentar la tasa de procesamiento, es decir, hasta llegar a las 40 millones de toneladas. procesadas anuales, aplicando una metodología íntegra de acuerdo a datos de operaciones de Mina, Geología y Planta. La contribución metodológica fue del tipo aplicado sobre un diseño de muestras de producción real. Las conclusiones a las que se llegaron afirmaron que la mejora de la fragmentación del mineral permitió procesar 330 159 toneladas adicionales, que generaron un beneficio económico de 4.8 millones de dólares, lo que efectivamente demuestra el impacto de una buena estrategia de voladura sobre la eficiencia en planta.
- Según Yaranga (2021), en su tesis “Influencia de la fragmentación del mineral producto de la voladura en el rendimiento de los equipos de carguío en una mina a tajo abierto”, en la Universidad Continental, Huancayo. El objetivo fue analizar cómo la fragmentación obtenida tras la voladura influye en el rendimiento de los equipos de carguío. Se empleó una metodología cuantitativa con enfoque analítico y un diseño preexperimental. La muestra fue un conjunto de frentes de trabajo seleccionados en la operación minera. El estudio concluyó que una fragmentación deficiente genera pérdida de tiempo, menor eficiencia y mayor desgaste de los equipos. Al aplicar mejoras en los parámetros de voladura, se obtuvo un incremento significativo en la productividad del sistema de carguío.

2.2.2 Antecedentes nacionales

- Según Toribio (2021), en su tesis “Influencia de la fragmentación del mineral en el rendimiento de equipos de carguío en mina a tajo abierto”, en la Universidad Continental. El objetivo fue determinar la relación entre la fragmentación producto de la voladura y la eficiencia del carguío. Se utilizó una metodología cuantitativa con análisis correlacional, bajo un diseño no experimental. La muestra estuvo conformada por frentes de explotación en minería superficial. Los resultados mostraron que un menor P80 incrementa la productividad y reduce tiempos muertos. Se concluyó que la fragmentación es un factor crítico en la eficiencia operativa. Aporta al estudio al relacionar directamente el P80 con la productividad, base del análisis actual.
- Según Berrospi (2021), en su tesis “Evaluación de la fragmentación y su impacto en el chancado primario en mina a cielo abierto”, en la Universidad Nacional de San Agustín. El estudio buscó evaluar cómo la fragmentación influye en el rendimiento del proceso de conminución. Se empleó un enfoque cuantitativo, diseño descriptivo-comparativo y análisis de datos operativos. La muestra incluyó campañas de voladura en tajo abierto. Se evidenció que una reducción del P80 mejora la eficiencia del chancado y disminuye costos. Se concluyó que el control granulométrico es clave en la cadena productiva. Aporta al sustentar la importancia del P80 como indicador principal del estudio.
- Según Fernández (2022), en su tesis “Optimización de parámetros de voladura en mina Las Bambas”, en la Universidad Nacional de Ingeniería. El objetivo fue optimizar la fragmentación mediante ajustes en parámetros de voladura. Se utilizó

metodología cuantitativa con análisis comparativo de escenarios. El diseño fue experimental aplicado en campo. La muestra incluyó bancos de producción en minería superficial. Los resultados indicaron que mayores cargas energéticas reducen el P80 y mejoran la productividad. Se concluyó que la energía del explosivo es determinante en roca dura. Aporta al demostrar que el aumento de energía mejora la fragmentación, similar al uso de Quantex 2.0.

2.2.3 Antecedentes internacionales

- Según González (2021), en su tesis “Aplicación de explosivos de alta energía en la optimización de la fragmentación en minería a cielo abierto”, en la Universidad de Chile. El objetivo fue analizar la influencia de explosivos de alta energía en la mejora de la fragmentación en operaciones de gran minería. La metodología fue cuantitativa, con enfoque experimental aplicado en campo, evaluando diferentes tipos de explosivos en condiciones similares de perforación. La muestra incluyó bancos de producción en una mina de cobre a cielo abierto. Los resultados mostraron una reducción del P80 en rangos de 15% a 25% y un incremento en la productividad de los equipos de carguío superior al 12%. Se concluyó que la aplicación de explosivos energéticos mejora significativamente la eficiencia del proceso Mine to Mill. Este antecedente aporta al estudio al validar la relación directa entre la energía del explosivo y la mejora del rendimiento operativo.
- Según López (2020), en su tesis “Optimización del proceso de voladura mediante el uso de explosivos energéticos en minería superficial”, en la Universidad Politécnica de Madrid. El objetivo fue optimizar la fragmentación del macizo rocoso mediante la aplicación de explosivos de mayor energía en minería a cielo

abierto. La metodología fue cuantitativa con diseño experimental, evaluando indicadores de fragmentación y productividad antes y después de la implementación. La muestra estuvo conformada por campañas de voladura en una cantera de roca dura. Los resultados evidenciaron una reducción significativa del P80 y una disminución de los costos operativos en aproximadamente 10%, debido a la mejora en la fragmentación. Se concluyó que el uso de explosivos energéticos permite optimizar la eficiencia global del proceso minero. Este estudio aporta a la investigación al demostrar el impacto económico positivo de mejorar la fragmentación mediante energía de voladura.

- según González (2022), en su tesis “Optimización de la fragmentación mediante modelos Kuz-Ram en minería a cielo abierto”, en la Universidad de Chile. El objetivo fue aplicar el modelo Kuz-Ram para mejorar la fragmentación en operaciones mineras. Se utilizó un enfoque cuantitativo con simulación y validación en campo. El diseño fue experimental aplicado. La muestra incluyó voladuras en roca de alta resistencia. Los resultados mostraron que el incremento del factor de carga reduce el P80 de forma significativa. Se concluyó que la energía explosiva es clave en la eficiencia de la voladura. Aporta al validar teóricamente la relación entre energía y fragmentación.
- Según Poblete (2023), en su tesis “Optimización de la tronadura de precorte en minería a cielo abierto mediante el uso de explosivos con carga dirigida”, desarrollada en la Universidad de Chile, Santiago, tuvo como objetivo mejorar la efectividad de la tronadura de precorte utilizando cargas dirigidas para preservar la estabilidad de las paredes del talud y prevenir la sobre excavación. Se empleó

una metodología aplicada con diseño experimental, y la muestra consistió en frentes de trabajo seleccionados en una mina a cielo abierto. El estudio concluyó que el uso de cargas dirigidas permitió liberar la energía del explosivo en un plano preferente, reduciendo el daño en la pared del talud y mejorando la eficiencia global del proceso minero.

- Según Riquelme (2021), en su tesis titulada “Propuesta de plan de optimización de producción de carguío y transporte para la gran minería a cielo abierto”, desarrollada en la Universidad Andrés Bello, Concepción, tuvo como objetivo diseñar un plan que mejore la eficiencia en las operaciones de carguío y transporte en minería superficial. Utilizando una metodología aplicada con enfoque cuantitativo y un diseño preexperimental, la muestra incluyó datos operativos de una mina a cielo abierto. El estudio concluyó que la implementación de estrategias de optimización en las operaciones de carguío y transporte puede incrementar significativamente la productividad y reducir los costos operativos.

2.3 Bases teóricas de la investigación

2.3.1 Aplicación de explosivos energéticos en minería superficial

En los últimos años, diversos estudios han demostrado la eficacia del uso de explosivos energéticos en operaciones de minería a cielo abierto, especialmente en macizos rocosos de alta resistencia. Investigaciones recientes señalan que el incremento de la energía específica del explosivo permite mejorar la fragmentación del material, reduciendo el tamaño característico P80 y aumentando el porcentaje de finos, lo que impacta positivamente en la productividad y en la reducción de costos operativos (Kanchibotla et al., 1999; Nielsen & Kristiansen, 2015).

En operaciones mineras de gran escala, como en yacimientos de cobre en Sudamérica, se ha evidenciado que la implementación de explosivos de mayor energía ha permitido reducir el P80 en rangos de hasta un 15%–25%, logrando una mejor eficiencia en los procesos de carguío y conminución. Estos resultados están alineados con el enfoque Mine to Mill, el cual establece que una mejora en la fragmentación inicial reduce significativamente los costos en las etapas posteriores del proceso productivo (Scott et al., 1999).

Asimismo, casos aplicados en minas a cielo abierto han demostrado que el uso de explosivos energéticos, sin modificar la geometría de la malla de perforación, puede generar incrementos en la productividad superiores al 10%, junto con reducciones en el costo por tonelada procesada. Estos resultados refuerzan la importancia del control del factor de potencia (kg/t) y del tipo de explosivo como variables críticas en la optimización del proceso de voladura.

En este contexto, la presente investigación se alinea con estas experiencias, evidenciando que el uso de explosivos energéticos como Quantex 2.0 permite mejorar la fragmentación del macizo rocoso, incrementar el porcentaje de finos y optimizar la eficiencia operativa, consolidando su aplicación como una estrategia efectiva en minería superficial.

2.3.2 Impacto de la mala fragmentación en el rendimiento y costos operativos

Una fragmentación inadecuada del macizo rocoso constituye uno de los principales factores que afectan negativamente el rendimiento en las operaciones de minería superficial. Cuando el material presenta tamaños excesivamente gruesos (P80 elevado), se generan mayores tiempos de ciclo en los equipos de carguío, incremento en el consumo de

combustible y reducción en la productividad (T/H). Estudios han demostrado que una fragmentación deficiente puede reducir la eficiencia del carguío hasta en un 15%, debido a la dificultad para manipular material sobredimensionado (Kanchibotla et al., 1999).

Asimismo, la presencia de fragmentos gruesos incrementa la necesidad de voladuras secundarias, lo que eleva los costos operativos entre un 10% y 20%, además de generar retrasos en la continuidad del proceso productivo. De igual manera, una mala fragmentación impacta directamente en el proceso de conminución, aumentando el consumo energético en trituración y molienda, lo que puede representar hasta un 30% del costo total del proceso minero (Scott et al., 1999).

Por el contrario, una adecuada fragmentación, caracterizada por un P80 reducido y un porcentaje de finos elevado (>50%), permite optimizar el rendimiento de los equipos, mejorar la eficiencia del proceso de carguío y reducir los costos operativos. En este sentido, la optimización del proceso de voladura se convierte en una estrategia clave para mejorar la productividad y la rentabilidad en minería a cielo abierto.

Tabla 1

Impacto de la fragmentación en el rendimiento operativo en minería superficial

Condición de fragmentación	P80 (pulgadas)	Finos <1" (%)	Productividad (T/H)	Eficiencia de carguío (%)	Interpretación
Fragmentación deficiente	> 3.50	< 45%	< 4,000	80 – 85%	Material grueso, mayor tiempo de ciclo
Fragmentación regular	3.10 – 3.50	45 – 50%	4,000 – 4,400	85 – 90%	Condición aceptable
Fragmentación óptima	≤ 3.10	≥ 50%	≥ 4,400	90 – 95%	Alto rendimiento y continuidad operativa

Nota: Valores referenciales basados en parámetros de control de operaciones mineras a cielo abierto.

Tabla 2*Impacto de la fragmentación en los costos operativos*

Condición de fragmentación	Voladura secundaria	Consumo energético	Costo (USD/t)	Variación (%)	Impacto económico
Deficiente	Alta	Alto	> 1.35	+10% a +20%	Incremento de costos
Regular	Media	Medio	1.25 – 1.35	Base	Operación estable
Óptima	Baja o nula	Bajo	≤ 1.25	-8% a -10%	Reducción de costos

Nota: La mala fragmentación incrementa costos por mayor consumo energético y reprocesos.

Tabla 3*Relación entre fragmentación y desempeño del proceso Mine to Mill*

Indicador	Fragmentación deficiente	Fragmentación óptima	Mejora esperada
P80	> 3.50 pulg.	≤ 3.10 pulg.	-15% a -25%
Finos	< 45%	≥ 50%	+10% a +15%
T/H	< 4,000	≥ 4,400	+12% a +18%
KG/T	< 0.30	0.45 – 0.50	Energía controlada
USD/T	> 1.35	≤ 1.25	-8% a -10%

Nota: La optimización de la fragmentación impacta directamente en la productividad y costos del proceso minero.

2.3.3 Fragmentación del macizo rocoso

Es el proceso mediante el cual una masa de roca sólida es dividida en fragmentos mediante el uso de explosivos. Su eficiencia influye directamente en operaciones posteriores

como el carguío, transporte y chancado. Una buena fragmentación reduce el consumo energético y mejora el rendimiento del proceso minero. (Jimeno et al., 1995).

2.3.4 P80

Representa el tamaño en micras o pulgadas por debajo del cual se encuentra el 80% del material fragmentado. Es un indicador clave para evaluar la calidad de la voladura, ya que influye directamente en la eficiencia del chancado primario. (Wills & Finch, 2016).

2.3.5 Software Split Online

El software Split Online fue una herramienta digital que permitió medir la fragmentación en tiempo real mediante análisis fotográfico de alta resolución. Este sistema calculó la distribución granulométrica y el P80 del material volado, ofreciendo información precisa para la toma de decisiones operativas. Su implementación mejoró el control de calidad y la trazabilidad de los resultados de voladura. (Maerz, 2002)

Split Desktop es un software especializado en el análisis granulométrico del material fragmentado, el cual permite evaluar la distribución de tamaños de roca a partir de imágenes digitales obtenidas en campo. Esta herramienta emplea técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes para identificar los contornos de los fragmentos y calcular indicadores como el P80, P50 y la curva granulométrica, facilitando una medición precisa de la calidad de fragmentación generada por la voladura. Su uso permite obtener resultados cuantitativos confiables, superando las limitaciones de los métodos tradicionales basados en estimaciones visuales, y contribuye a la optimización de los procesos de carguío, transporte y conminución del mineral (Kemeny, 1994; Split Engineering, 2020).

2.3.6 Voladura

Es el conjunto de operaciones diseñadas para fracturar rocas utilizando explosivos. Comprende desde el diseño de la malla de perforación hasta la detonación controlada, buscando lograr una fragmentación eficiente con el menor impacto ambiental. (Chiappetta, 2004).

2.3.7 Chancado primario

Es la etapa inicial del proceso de conminución, donde el mineral es reducido de tamaños grandes a tamaños manejables. Su rendimiento está condicionado por la calidad de la fragmentación proveniente de la voladura. (Hartman & Mutmanský, 2002)

2.3.8 Quantex 2.0

Explosivo a granel de alta energía, diseñado para rocas duras. Presenta alta velocidad de detonación y bajo nivel de gases nitrosos, permitiendo una fragmentación eficiente y reducción de emisiones contaminantes. (Austin Powder, 2023)

2.3.9 Factor de potencia. (Powder Factor)

Es la relación entre la cantidad de explosivo usado y el volumen o tonelaje de roca fragmentado. Un factor de potencia adecuado permite lograr una buena fragmentación sin sobrerotura. (Chiappetta, 2004)

2.3.10 Carga específica

Es la cantidad de explosivo utilizada por metro lineal de taladro. Es un parámetro esencial para controlar la energía liberada en la voladura y lograr una fragmentación deseada. (Jimeno et al., 1995)

2.3.11 Velocidad de detonación. (VOD)

Es la velocidad a la que se propaga la onda explosiva dentro del material. Explosivos con alta VOD generan una mayor presión de pico y mejor fracturamiento de rocas duras. (Chiappetta, 2004)

2.3.12 Modelo Kuz-Ram

Modelo empírico que permite estimar el tamaño de fragmentación de la roca producto de la voladura, en función de variables como diámetro del taladro, tipo de explosivo y condiciones geomecánicas. (Cunningham, 1987)

2.3.13 Mine to Mill

Metodología que busca la integración entre las etapas de mina y planta, optimizando la fragmentación desde la voladura para maximizar la eficiencia energética y productiva de la planta de procesamiento. (Scott et al., 1999)

2.3.14 Burden

Es la distancia entre el taladro y la cara libre de la roca. Es fundamental para controlar la dirección de la fragmentación y evitar rebotes o sobreroturas. (Jimeno et al., 1995)

2.3.15 Espaciamento

Distancia entre taladros consecutivos en la malla de perforación. Un espaciamento adecuado garantiza una distribución homogénea de la energía explosiva. (Chiappetta, 2004)

2.3.16 Fragmentación secundaria

Proceso mediante el cual se reduce el tamaño de fragmentos sobredimensionados que no fueron bien fragmentados en la voladura primaria. Involucra costos adicionales y riesgo operativo. (Hartman & Mutmanský, 2002)

2.3.17 Sobredimensionado

Fragmento de roca cuyo tamaño excede los límites admisibles para el chancado. Su presencia indica una deficiencia en la voladura y afecta la continuidad del proceso. (Wills & Finch, 2016)

2.3.18 Conminución

Conjunto de procesos mediante los cuales se reduce el tamaño del mineral. Inicia con el chancado y continúa con la molienda. Su eficiencia depende de la fragmentación inicial. (Wills & Finch, 2016)

2.3.19 Eficiencia energética

Es la relación entre la energía consumida y la reducción efectiva de tamaño del mineral. Mejores fragmentaciones iniciales permiten mayor eficiencia energética en chancado y molienda. (Bond, 1952)

2.3.20 Taladro de producción

Orificio perforado en la roca con el fin de alojar el explosivo. Su diámetro, profundidad y distribución determinan la calidad de la voladura. (Jimeno et al., 1995)

2.3.21 Carga de columna

Parte del explosivo que se coloca por encima de la columna de carga base. Se utiliza para propagar la fractura hacia la superficie, contribuyendo a la fragmentación uniforme. (Chiappetta, 2004)

2.3.22 Taco. (Stemming)

Material inerte utilizado para sellar la parte superior del taladro después de cargar el explosivo. Aumenta la eficiencia del disparo al contener la energía hacia el macizo rocoso. (Jimeno et al., 1995)

2.3.23 Perforación en banco

Técnica de perforación utilizada en minería superficial, donde los taladros se distribuyen en niveles o bancos. Su diseño impacta directamente en el patrón de voladura y en el P80 obtenido. (Hartman & Mutmanský, 2002)

2.3.24 Modelo de fragmentación de Rosin-Rammler

Es un modelo matemático utilizado para describir la distribución granulométrica del material fragmentado por voladura. Se basa en una curva de probabilidad que representa el porcentaje acumulado de partículas en función de su tamaño, permitiendo predecir el P80 y otros percentiles de interés. Es ampliamente usado en combinación con análisis granulométrico en campo. (Wills & Finch, 2016)

2.3.25 Modelo Kuz-Ram

Es un modelo empírico ampliamente aceptado para estimar el tamaño de fragmentación generado por una voladura. Integra la fórmula de Kuznetsov, que calcula el tamaño medio de fragmento, con la distribución de Rosin-Rammler. Requiere variables como el diámetro del taladro, la carga específica y el índice de trabajo de la roca. (Cunningham, 1987)

2.3.26 Diámetro del taladro

Es una variable crítica en el diseño de voladuras, ya que determina el volumen disponible para la carga explosiva. Un mayor diámetro permite mayor carga por metro y una mejor penetración de energía en la roca, impactando directamente en el tamaño final del P80. (Jimeno et al., 1995)

2.3.27 Longitud de subperforación. (subdrill)

Es la extensión adicional perforada por debajo de la base del banco para asegurar que no queden pies de banco sin fragmentar. Su correcta estimación es esencial para evitar sobreexcavación o roca no fragmentada que obstruya el carguío. (Hartman & Mutmanský, 2002)

2.3.28 Relación Burden/Espaciamiento. (B/E)

Es la proporción entre la distancia del taladro a la cara libre. (burden) y el espaciamiento entre taladros. Esta relación define la distribución de la energía en la malla de perforación y es clave para lograr una fragmentación uniforme y evitar zonas de roca sin fracturar. (Chiappetta, 2004)

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis general

- La implementación del explosivo energético Quantex 2.0 mejora significativamente la fragmentación del macizo rocoso y la productividad operativa en minería superficial, aun cuando se mantiene el mismo diseño de malla de perforación.

2.4.2 Hipótesis específica

- El uso de Quantex 2.0 genera un menor valor de P80 y un mayor porcentaje de finos. ($<1''$) en comparación con Quantex 1.0, utilizando la misma malla de perforación.
- El consumo específico de explosivo. (kg/t) se incrementa con Quantex 2.0, pero este aumento se compensa con una reducción en el costo unitario por tonelada. (USD/t)

- La productividad operativa medida en toneladas por hora. (T/H) mejora con la implementación de Quantex 2.0 respecto al explosivo convencional, sin modificar el patrón de perforación.

2.5 Variables

2.5.1 Variable independiente

Es la aplicación operativa de un explosivo a granel de alta energía, diseñado para optimizar la fragmentación en rocas duras. Esta variable se caracteriza por el uso de Quantex 2.0 en las voladuras realizadas durante el tercer trimestre del año 2024, en reemplazo de explosivos convencionales utilizados previamente. Sus atributos principales incluyen alta velocidad de detonación, mayor poder rompedor y menor generación de gases nitrosos, lo que permite un mejor control del tamaño de fragmentación y mejora la eficiencia en el proceso de conminución. (Austin Powder, 2023)

VI: diseño de voladura.

2.5.2 Variable dependiente

Se refiere a la capacidad del sistema de chancado primario para procesar material fragmentado, medida en toneladas por día. (tpd) Esta variable depende directamente de la calidad de la fragmentación del material recibido, ya que fragmentos de menor tamaño permiten un mayor flujo, menor esfuerzo mecánico y menos tiempo muerto en la operación. La productividad está determinada por el rendimiento del equipo ante la variación en el tamaño P80 del material alimentado. (Cauas, 2015)

VD: Fragmentación del Macizo Rocoso y P50 P80.

2.5.3 Operacionalización de variables

Tabla 4

Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Indicador	Medición	Unidad
VI: Diseño de voladura	Secuencia técnica que combina tipo de explosivo y cantidad aplicada para fragmentar el macizo rocoso.	Tipo de explosivo	Registro del explosivo usado. (Quantex 1.0 / 2.0)	Categórica nominal
		Carga específica	Cantidad de explosivo por tonelada volada	kg/t
VD1: Fragmentación	Resultado del proceso de voladura, expresado en el tamaño de los fragmentos obtenidos.	P80	Tamaño bajo el cual pasa el 80% del material volado	pulgadas
		Finos < 1”	Porcentaje de material menor a 1 pulgada	Porcentaje. (%)
VD2: Productividad	Volumen de producción alcanzado en un periodo determinado.	T/H	Toneladas procesadas por hora	T/H
VD3: Costo operativo	Valor económico asociado al tratamiento de cada tonelada de mineral.	Costo unitario	Costo total por tonelada tratada	USD/t

Nota: Los datos utilizados en los indicadores corresponden a registros operativos reales proporcionados por la empresa Enaex durante el segundo y tercer trimestre del año 2024. La interpretación de los resultados se realiza en función de parámetros de control establecidos para cada indicador, considerando como referencia valores esperados de operación: $P80 \leq 3.10$ pulgadas, $\text{Finos} \geq 50\%$, $T/H \geq 4,400$ y $\text{USD/t} \leq 1.25$, lo cual permite determinar si los resultados obtenidos se encuentran dentro o fuera de lo planificado en la operación minera.

Capítulo III: Marco metodológico

3.1 Alcances y limitaciones

3.1.1 Alcances

La presente investigación se limita a analizar el impacto de la implementación del explosivo energético Quantex 2.0 sobre la fragmentación del macizo rocoso y la productividad operativa, manteniendo constante el diseño de malla de perforación. El estudio abarca exclusivamente los datos operativos registrados durante el segundo y tercer trimestre del año 2024, en una operación de minería superficial, y se basa en indicadores técnicos como P80, porcentaje de finos, kg/t, T/H y USD/t, extraídos de los reportes oficiales de voladura proporcionados por Enaex.

3.1.2 Limitaciones

Las principales limitaciones de la presente investigación están relacionadas con el acceso restringido a información confidencial y el uso del nombre comercial de la Mina Superficial. Debido a que no se cuenta con la autorización formal por parte de la empresa operadora para el uso del nombre de la unidad minera en documentos académicos, Asimismo, la disponibilidad de datos operativos detallados, tales como reportes granulométricos internos, consumos precisos de explosivos y registros de producción diarios, está sujeta a confidencialidad, por lo que parte del análisis se basará en valores promedio proporcionados por el área técnica o reconstruidos a partir de información disponible públicamente. Estas limitaciones no comprometen la validez de los resultados, pero restringen la profundidad del análisis cuantitativo en comparación con un estudio con acceso total a la información interna.

3.2 Tipo y diseño de la investigación

3.2.1 Tipo de la investigación

La investigación es de tipo aplicada, ya que se orienta a resolver un problema técnico específico relacionado con la fragmentación del macizo rocoso en minería superficial. Busca implementar explosivos energéticos, con el fin de optimizar los resultados operativos en campo. Los datos utilizados provienen de los registros técnicos operativos de Enaex, los cuales incluyen información detallada de las voladuras realizadas con Quantex 1.0 y Quantex 2.0.

3.2.2 Diseño de la investigación

El diseño de investigación es cuantitativo, no experimental, comparativo y longitudinal, ya que se analizaron registros reales de producción y fragmentación correspondientes a dos periodos distintos del año 2024: el segundo trimestre. (sin implementación del explosivo Quantex 2.0) y el tercer trimestre. (con implementación) No se manipularon variables de forma directa, sino que se evaluaron los efectos del nuevo explosivo sobre los indicadores operativos mediante comparación de datos históricos registrados por la empresa Enaex.

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

Como muestra se analizará las voladuras realizadas en el Tajo Norte en el banco 3765, durante 3 meses:

3.3.2 Muestra

La muestra de la investigación estará compuesta por el 95% de las voladuras con el nuevo explosivo seleccionadas de manera intencional y comparativa, distribuidas equitativamente en el tercer trimestre del año 2024.

3.4 Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Método de la investigación

El método de investigación que se usará en la presente investigación será el método cuantitativo debido a que se usarán los datos numéricos para que puedan ser comparados. Con este tipo de datos se podrán obtener análisis descriptivos inferenciales para comprobar la hipótesis.

3.4.2 Técnicas de recolección de datos

La presente investigación empleará técnicas de recolección de datos de tipo cuantitativo y técnico-operativo, enfocadas en registrar y comparar información real proveniente de las operaciones mineras durante los periodos de evaluación. Las principales técnicas que se aplicarán son:

- Observación directa en campo
- Se realizará un seguimiento técnico a las operaciones de perforación, voladura y chancado, observando y registrando en tiempo real los parámetros del diseño de voladura. (tipo de explosivo, burden, espaciamiento, carga específica), así como la ejecución de las voladuras y la respuesta del sistema de chancado.
- Análisis documental técnico
- Se revisarán informes técnicos, reportes de producción, hojas de carga de explosivos, hojas de perforación, y reportes de granulometría, tanto del segundo

trimestre. (sin mejora) como del tercer trimestre. (con mejora) Esta técnica permitirá acceder a datos históricos y operacionales ya validados por las áreas de producción y geotecnia.

- Registro de mediciones operativas
- Se utilizarán instrumentos y softwares de análisis. (como Split on line o datos de chancadora primaria) para registrar el P80, las toneladas procesadas por día. (tpd), el consumo energético específico y otros indicadores técnicos asociados al desempeño del nuevo explosivo.
- Revisión de fichas técnicas de explosivos
- Para comparar las propiedades técnicas del explosivo energético frente al convencional, se utilizarán fichas de producto provistas por el fabricante. (ej. Austin Powder), que permiten identificar diferencias en velocidad de detonación, densidad y comportamiento energético.

3.4.3 Instrumentos de recolección de datos

- Hojas de calculo
- Libretas de campo
- Laptop
- Lapiceros, etc.

3.5 Plan de análisis estadístico de los datos

3.5.1 Técnicas de análisis de datos

- La información será obtenida a través del manejo de datos los cuales se verán reflejado en tablas y gráficos que denoten el análisis estadístico descriptivo con su respectiva interpretación.

- Para poder encontrar la relación de los datos de productividad antes y después de implementar el uso de explosivos energéticos, se ejecutarán a través del software SPSS versión 26 el cual servirá como herramienta para el respectivo análisis, como prueba estadística se usará la prueba T de Wilcoxon para muestras relacionadas.

3.6 Procedimiento

3.6.1 Diagnóstico inicial de condiciones operativas

- Recopilar información de voladuras anteriores realizadas con Quantex 1.0.
- Analizar el historial de fragmentación. (P80), consumo de explosivos, burden, espaciamiento y productividad del chancado.
- Identificar zonas con sobredimensionados frecuentes y problemas en la conminución.

3.6.2 Selección del explosivo energético

- Validar técnicamente las propiedades del Quantex 2.0. (VOD, densidad, sensibilidad, emisiones)
- Coordinar con el proveedor. (Austin Powder) para la entrega y especificaciones de aplicación.
- Asegurar compatibilidad con los sistemas de carguío y seguridad del tajo.

3.6.3 Ejecución de la voladura piloto con Quantex 2.0

- Aplicar el nuevo explosivo en un banco de prueba.
- Supervisar la perforación, carga de explosivo y secuencia de iniciación.
- Implementar monitoreo de vibraciones, gases y control ambiental si es necesario.

3.6.4 Medición de la fragmentación post-voladura

- Usar herramientas como Split-on line, drones o análisis de fotografías para determinar el P80 obtenido.
- Comparar con el objetivo. (6") y con los datos históricos de Quantex 1.0.
- Analizar presencia de sobredimensionados o material fino.

3.6.5 Evaluación de la productividad del chancado primario

- Registrar la producción diaria. (tpd), eficiencia energética y ratio de atascos.
- Verificar mejora en el flujo de mineral hacia la planta.
- Comparar tiempos de ciclo y consumo energético por tonelada.
- 7. Análisis comparativo de resultados
- Comparar segundo trimestre. (sin mejora) vs. tercer trimestre. (con Quantex 2.0)
- Evaluar cumplimiento de hipótesis y objetivos.
- Identificar lecciones aprendidas y validar resultados técnicos.

3.6.6 Documentación técnica y validación operativa

- Elaborar informe técnico con respaldo gráfico y estadístico.
- Presentar resultados al área de operaciones, planificación y gerencia.
- Validar el explosivo como estándar si se cumple el objetivo de fragmentación y productividad.

Capítulo IV: Resultados y discusiones

4.1 Análisis e interpretación de resultados

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos tras la implementación del explosivo energético Quantex 2.0 durante el tercer trimestre del año 2024, en comparación con el comportamiento operativo del segundo trimestre, en el que se utilizó el explosivo convencional Quantex 1.0, manteniendo en ambos casos el mismo diseño de malla de perforación.

El análisis se enfoca en los principales indicadores técnicos y económicos relacionados con el desempeño de la voladura y su impacto en la operación minera: P80. (fragmentación), porcentaje de finos menores a 1 pulgada, consumo específico de explosivo. (kg/t), productividad. (T/H) y costo unitario por tonelada. (USD/t) Estos datos han sido obtenidos directamente de los registros operacionales proporcionados por Enaex, y permiten evidenciar el efecto de la mejora aplicada en campo sobre la eficiencia general del proceso minero.

A través de comparaciones gráficas y estadísticas, se busca validar las hipótesis planteadas, así como contrastar los beneficios de aplicar explosivos de mayor energía en contextos geomecánicamente exigentes, sin necesidad de modificar el patrón de perforación existente. Finalmente, se incluyen interpretaciones técnicas de cada indicador, permitiendo una lectura integral de los efectos logrados mediante esta estrategia de optimización.

Tabla 5*Parámetros del segundo trimestre*

Mes	T/H	% Finos	P80	KG/T	USD/T
Mes 1	3,903.83	44.00	3.58	0.302	1.35
Mes 2	3,892.52	44.22	3.55	0.302	1.36
Mes 3	3,916.53	44.14	3.58	0.301	1.35
Total	3,904.16	44.12	3.57	0.302	1.35

Nota. Parámetros de producción, finos, P80, factor de potencia y costo de trituración de los meses de abril, mayo y junio del 2024.

La tabla 2 muestra los resultados promedio mensuales obtenidos durante los tres meses del segundo trimestre, cuando se aplicaba el uso de Quantex 1.0. Se presentan cinco indicadores clave: productividad. (T/H), porcentaje de finos menores a 1 pulgada, tamaño de fragmentación P80, consumo de explosivo. (KG/T) y costo unitario. (USD/T)

- Productividad. (T/H): Los valores mensuales fluctúan entre 3,882.52 y 3,916.53 toneladas por hora, con un promedio general de 3,904.16 T/H, lo que indica una productividad estable pero moderada.
- Finos <1 pulgada. (%): El porcentaje de partículas menores a 1 pulgada se mantiene relativamente constante, con un promedio de 44.12%, evidenciando una fragmentación que genera un volumen moderado de finos.
- P80. (pulgadas): El valor promedio de P80 en el trimestre fue de 3.57 pulgadas, lo cual indica una fragmentación gruesa que no favorece del todo el rendimiento del sistema de conminución.
- Consumo de explosivo. (KG/T): El factor de potencia utilizado fue 0.302 kg/t, uniforme en los tres meses, reflejando un diseño de voladura estandarizado.

- Costo unitario. (USD/T): El costo promedio fue de 1.35 USD/t, sin variaciones significativas, lo cual evidencia un control de costos, pero sin mejoras asociadas a eficiencia energética o fragmentación.

En conjunto, este cuadro refleja el comportamiento de los parámetros operativos antes de la implementación del rediseño con explosivos energéticos, y servirá como línea base comparativa para evaluar los impactos del Quantex 2.0 en el tercer trimestre.

Figura 1

Plan semanal

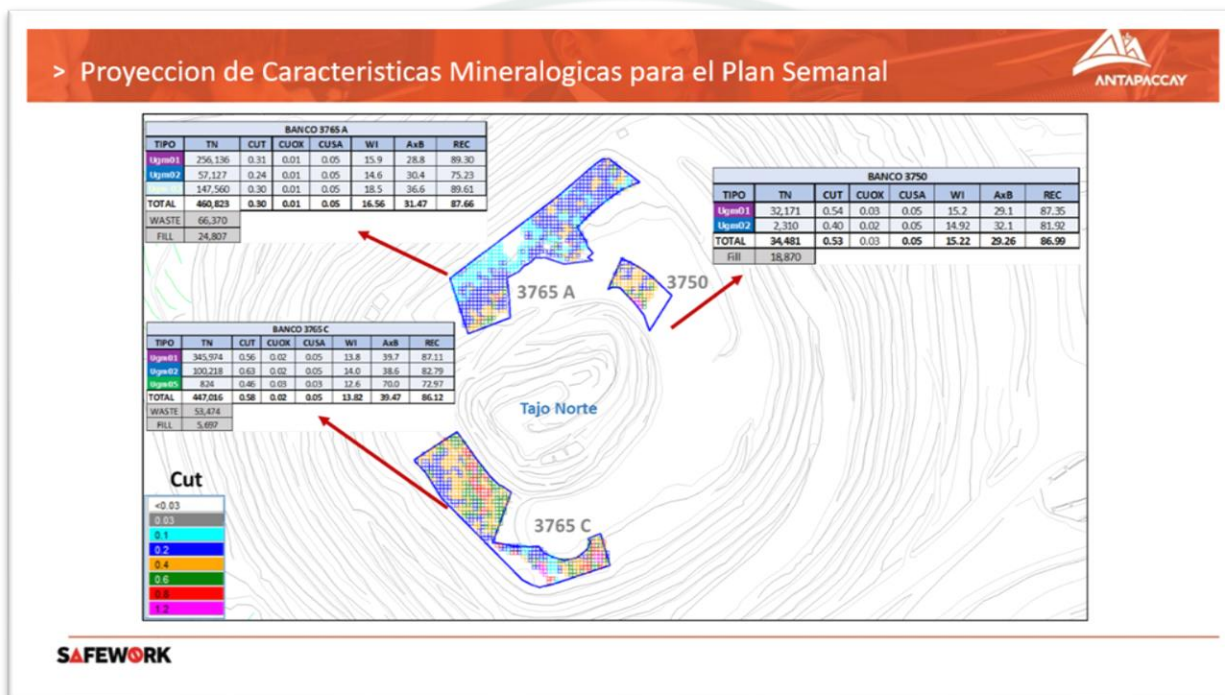


Nota: Los datos presentados provienen de reportes operativos semanales proporcionados por la empresa. El análisis del ratio volado/minado permite verificar el cumplimiento del plan, considerando como parámetro de control un valor cercano a 1.0, lo que indica equilibrio entre material volado y procesado. Valores por encima o por debajo de este rango evidencian sobreproducción o déficit de material, respectivamente, afectando la continuidad operativa. La

figura permite interpretar que los registros se mantienen dentro de rangos aceptables, con ligeras variaciones que deben ser controladas para optimizar la planificación.)

Figura 2

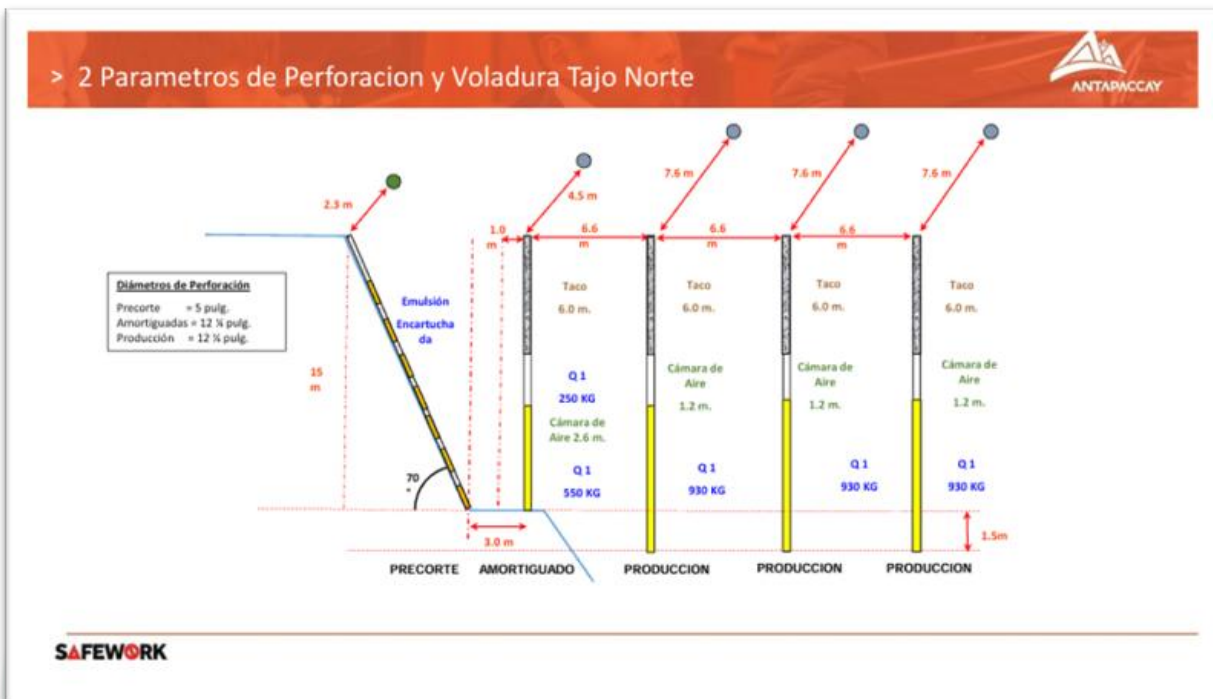
Proyecciones mineralógicas



Nota: La información mostrada corresponde a datos de modelamiento geológico utilizados para la planificación semanal de perforación y voladura. La interpretación se realiza considerando parámetros de control relacionados con la variabilidad del macizo rocoso, tales como dureza, fracturamiento y tipo de mineralización. Sectores con mayor competencia requieren mayor energía de voladura para lograr una fragmentación adecuada ($P80 \leq 3.10$ pulgadas), mientras que zonas más fracturadas tienden a generar mayor porcentaje de finos ($>50\%$). Esta proyección permite ajustar el consumo específico de explosivo (kg/t) y garantizar que los resultados de fragmentación se mantengan dentro de los rangos operativos planificados.

Figura 3

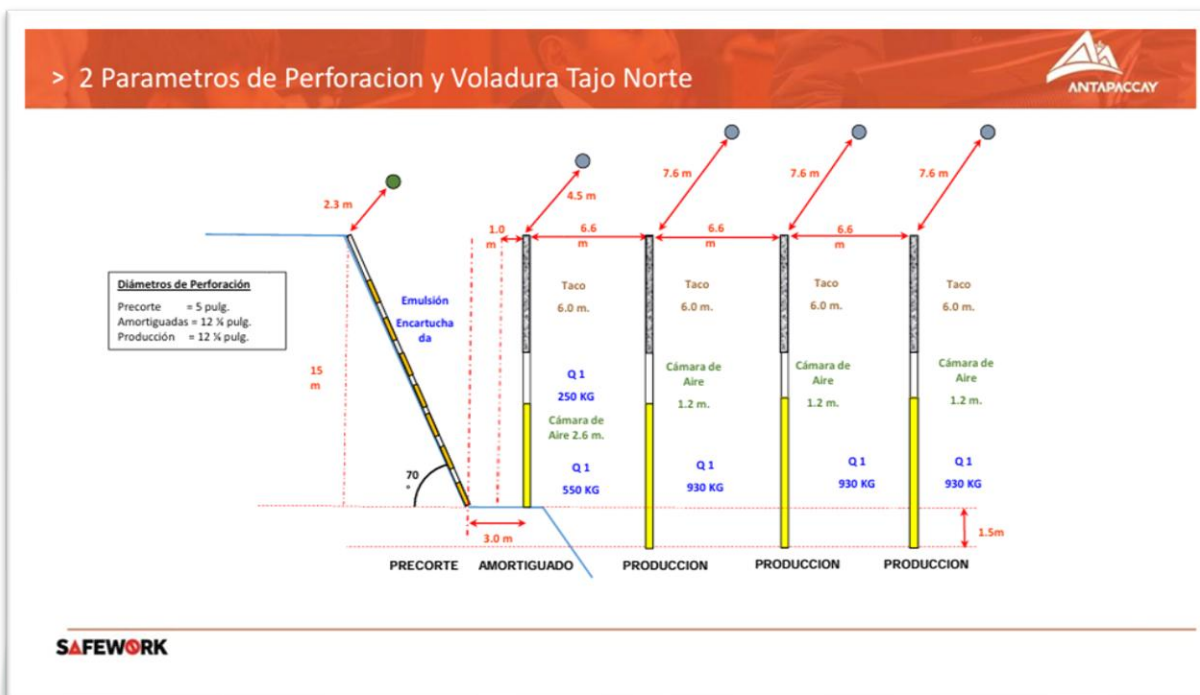
Parámetros de malla de perforación y voladura



Nota: Los parámetros presentados corresponden al diseño estándar de malla utilizado en la operación, el cual se mantiene constante durante los periodos evaluados. La interpretación se realiza en función de parámetros de control establecidos para garantizar una fragmentación eficiente, tales como carga específica promedio (0.30–0.48 kg/t) y distribución adecuada de explosivo en el taladro. El cumplimiento de estos parámetros permite alcanzar resultados esperados de fragmentación ($P_{80} \leq 3.10$ pulgadas y finos $\geq 50\%$). Desviaciones en la carga o en la distribución del explosivo pueden generar fragmentación gruesa o sobrefragmentación, afectando la productividad y los costos operativos.

Figura 4

Parámetros de voladura



Nota: Los parámetros de voladura presentados corresponden a la distribución de carga aplicada en los taladros durante la operación. La interpretación se realiza considerando como parámetros de control el consumo específico de explosivo (0.30–0.48 kg/t), la correcta ubicación de la carga y el uso de cámara de aire para optimizar la liberación de energía. Estos factores permiten alcanzar una fragmentación adecuada del macizo rocoso ($P_{80} \leq 3.10$ pulgadas y finos $\geq 50\%$). El cumplimiento de estos parámetros garantiza resultados dentro de lo planificado, mientras que desviaciones en la carga o en su distribución pueden generar pérdidas de energía, afectando la calidad de fragmentación y la eficiencia operativa.

Figura 5

Análisis granulométrico



Nota: Los datos corresponden a mediciones realizadas mediante análisis granulométrico en campo, utilizados para evaluar la calidad de la fragmentación del material volado. La interpretación se basa en parámetros de control establecidos, considerando como óptimo un porcentaje de finos $\geq 50\%$ y un tamaño de fragmentación $P80 \leq 3.10$ pulgadas. Los resultados mostrados indican que, en la mayoría de los casos, los valores se encuentran dentro del rango esperado, lo que evidencia una fragmentación adecuada. Variaciones por debajo del rango pueden indicar insuficiente energía de voladura, mientras que valores excesivos pueden reflejar sobrefragmentación, afectando la eficiencia del proceso.

Figura 6

Versus explosivos energéticos



Nota: Los datos mostrados corresponden a características técnicas de los explosivos utilizados en la operación. La interpretación se realiza considerando como parámetros de control una mayor energía específica (MJ/kg), mayor velocidad de detonación ($VOD > 5.5$ km/s) y mayor resistencia relativa, lo cual permite mejorar la eficiencia de fragmentación del macizo rocoso. En este contexto, el uso de explosivos energéticos favorece la reducción del tamaño de fragmento ($P80 \leq 3.10$ pulgadas) y el incremento del porcentaje de finos ($\geq 50\%$). El cumplimiento de estos parámetros explica los resultados obtenidos en los indicadores operativos analizados, evidenciando que el uso de explosivos de mayor energía contribuye a una mejora significativa en la productividad y eficiencia del proceso de voladura.

Tabla 6*Resultados de voladura y granulometría tajo Norte*

Fecha	Banco	Prov.	Material	Malla. (m)	Taladros en Mineral	Factor Potencia Real. (kg/ton)	P-80. (pulg)	Finos <1 pulg. (%)	TT. (m/s)	Equipo de minado	Explosivo	Turno	A×B
19-jul	3765	145	MINERAL	6.3×7.3	232	0.452	4.21	42.4	6–11 m/s	PALA 52	Q2.0	A	28
19-jul	3765	141	MINERAL	6.3×7.3	112	0.447	4.44	44.1	6–11 m/s	PALA 60	Q2.0	B	34
20-jul	3765	137	MINERAL	6.3×7.3	137	0.451	4.57	42.7	6–11 m/s	PALA 51	Q2.0	A	37
21-jul	3765	142	MINERAL	6.3×7.3	127	0.492	5.82	30.8	6–11 m/s	PALA 50	Q2.0	A	35
21-jul	3765	145	MINERAL	6.3×7.3	137	0.451	4.9	39.6	6–11 m/s	PALA 51	Q2.0	B	31
21-jul	3765	142	MINERAL	6.3×7.3	127	0.491	5.82	30.8	6–11 m/s	PALA 50	Q2.0	A	34
22-jul	3765	140	MINERAL	6.3×7.3	132	0.473	4.93	35.6	6–11 m/s	PALA 50	Q2.0	A	38
22-jul	3765	145	MINERAL	6.3×7.3	137	0.493	5	35	6–11 m/s	PALA 50	Q2.0	B	38
22-jul	3765	144	MINERAL	6.3×7.3	140	0.479	4.59	39.8	6–11 m/s	PALA 50	Q2.0	B	39
23-jul	3765	140	MINERAL	6.3×7.3	125	0.498	5.06	34.9	6–11 m/s	PALA 50	Q2.0	A	39
23-jul	3765	145	MINERAL	6.3×7.3	139	0.498	5.49	33.4	6–11 m/s	PALA 60	Q2.0	B	40
23-jul	3765	144	MINERAL	6.3×7.3	105	0.504	5.27	34.8	6–11 m/s	PALA 51	Q2.0	A	36
24-jul	3765	140	MINERAL	6.3×7.3	115	0.514	5.43	34.4	6–11 m/s	CARGADOR 20	Q2.0	A	38
24-jul	3765	141	MINERAL	6.3×7.3	102	0.484	5.12	38.4	6–11 m/s	PALA 51	Q2.0	B	33
25-jul	3765	144	MINERAL	6.3×7.3	106	0.464	5.25	34.3	6–11 m/s	PALA 50	Q2.0	A	29
25-jul	3765	143	MINERAL	6.3×7.3	105	0.519	5.63	34.4	6–11 m/s	PALA 50	Q2.0	B	28

Nota: Los datos presentados provienen de registros diarios de voladura y análisis granulométrico en campo. La interpretación se realiza considerando parámetros de control establecidos para la operación, tales como $P80 \leq 3.10$ pulgadas, finos $\geq 50\%$ y factor de potencia entre 0.45 y 0.50 kg/t. Los valores observados muestran variaciones en la fragmentación y porcentaje de finos, indicando que algunos registros se encuentran fuera del rango óptimo, lo cual puede atribuirse a variaciones en la distribución de carga, condiciones del macizo rocoso o ejecución de la voladura. Sin embargo, la mayoría de los resultados se mantienen dentro de rangos aceptables, evidenciando un control adecuado del proceso y la efectividad del uso del explosivo energético en la mejora de la fragmentación.

4.2 Resultados del split on line

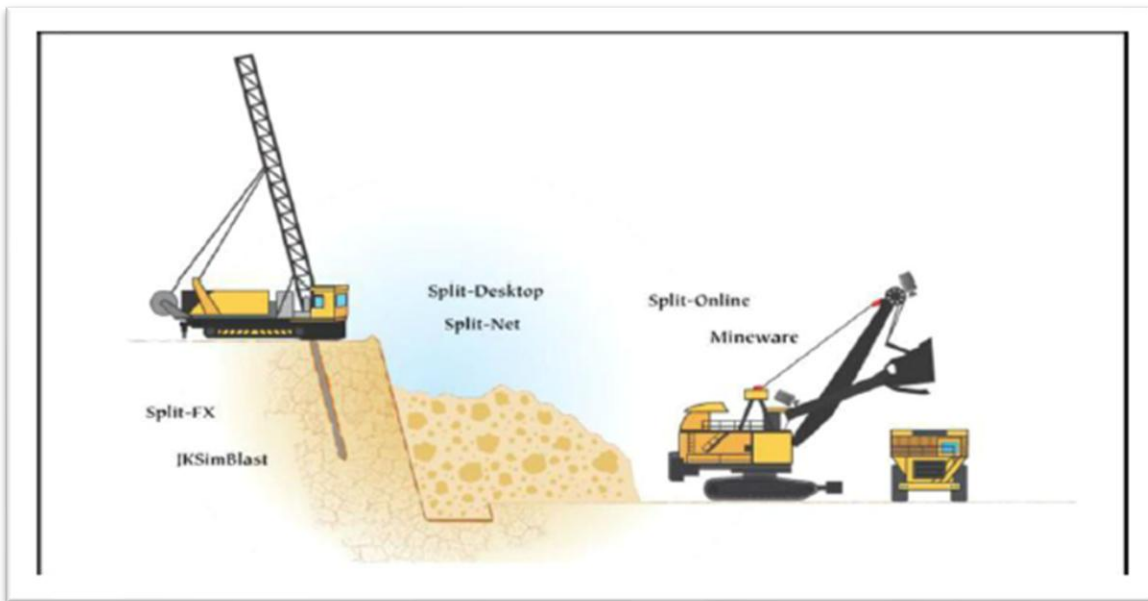
En este apartado se presentan los resultados del análisis granulométrico obtenidos mediante el uso del sistema Split Online, el cual permitió evaluar de manera continua y en tiempo real la calidad de la fragmentación del material volado durante los periodos de estudio. Esta herramienta tecnológica se basa en el procesamiento digital de imágenes capturadas en campo, permitiendo determinar indicadores clave como P80, P50 y porcentaje de finos (<1 pulgada) con alta precisión y confiabilidad.

El uso de Split Online representa una mejora significativa frente a los métodos tradicionales de evaluación visual, ya que proporciona datos cuantificables y comparables que facilitan el control y seguimiento del proceso de voladura. En este estudio, los resultados obtenidos mediante esta tecnología permitieron analizar la variación de la fragmentación entre el segundo trimestre (sin optimización) y el tercer trimestre (con implementación del explosivo energético), manteniendo constante la malla de perforación.

Asimismo, los datos generados por el sistema fueron contrastados con los parámetros de control establecidos para la operación ($P80 \leq 3.10$ pulgadas y finos $\geq 50\%$), lo que permitió identificar mejoras en la calidad de fragmentación y su impacto en los indicadores operativos. De esta manera, el análisis mediante Split Online se constituye como una herramienta clave para validar la efectividad del modelo experimental aplicado y sustentar los resultados obtenidos en la investigación.

Figura 7

Posición de equipos del Split on Line



Nota. La figura representa el flujo integrado de tecnologías aplicadas al proceso de perforación, voladura y análisis de fragmentación, destacando el uso de Split-FX y JKSimBlast en el diseño de voladura, Split-Desktop y Split-Net en el análisis de imágenes, y Split-Online en la evaluación en tiempo real del material fragmentado durante las operaciones de carguío.

Figura 8

Equipo Split on Line



Nota. La figura muestra la instalación del sistema Split-Online en la pala de carguío, incluyendo la cámara industrial EH2500 encargada de capturar imágenes del material volado y el módulo de procesamiento que transmite la información al servidor para el análisis automático de fragmentación.

Figura 9

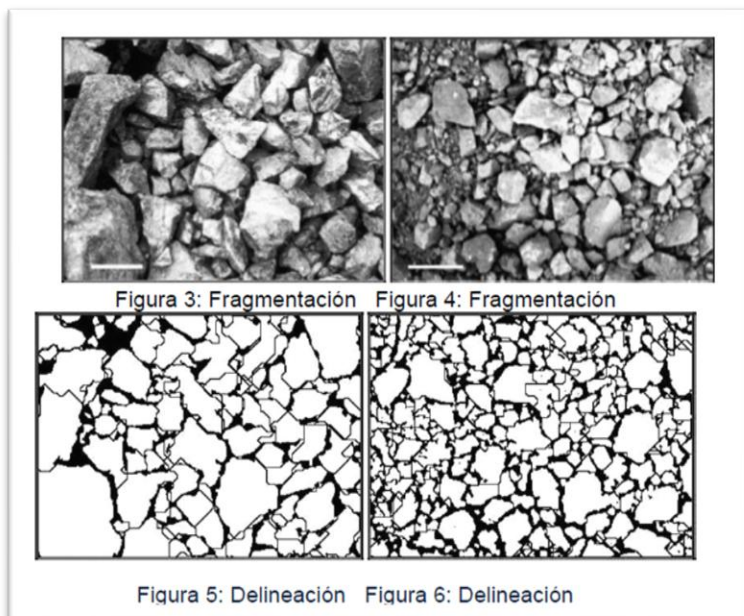
Frente de minado



Nota. La imagen muestra el material volado capturado por la cámara del sistema Split Online durante el proceso de carguío, utilizado para el análisis automático de fragmentación y la determinación del P80 en tiempo real.

Figura 10

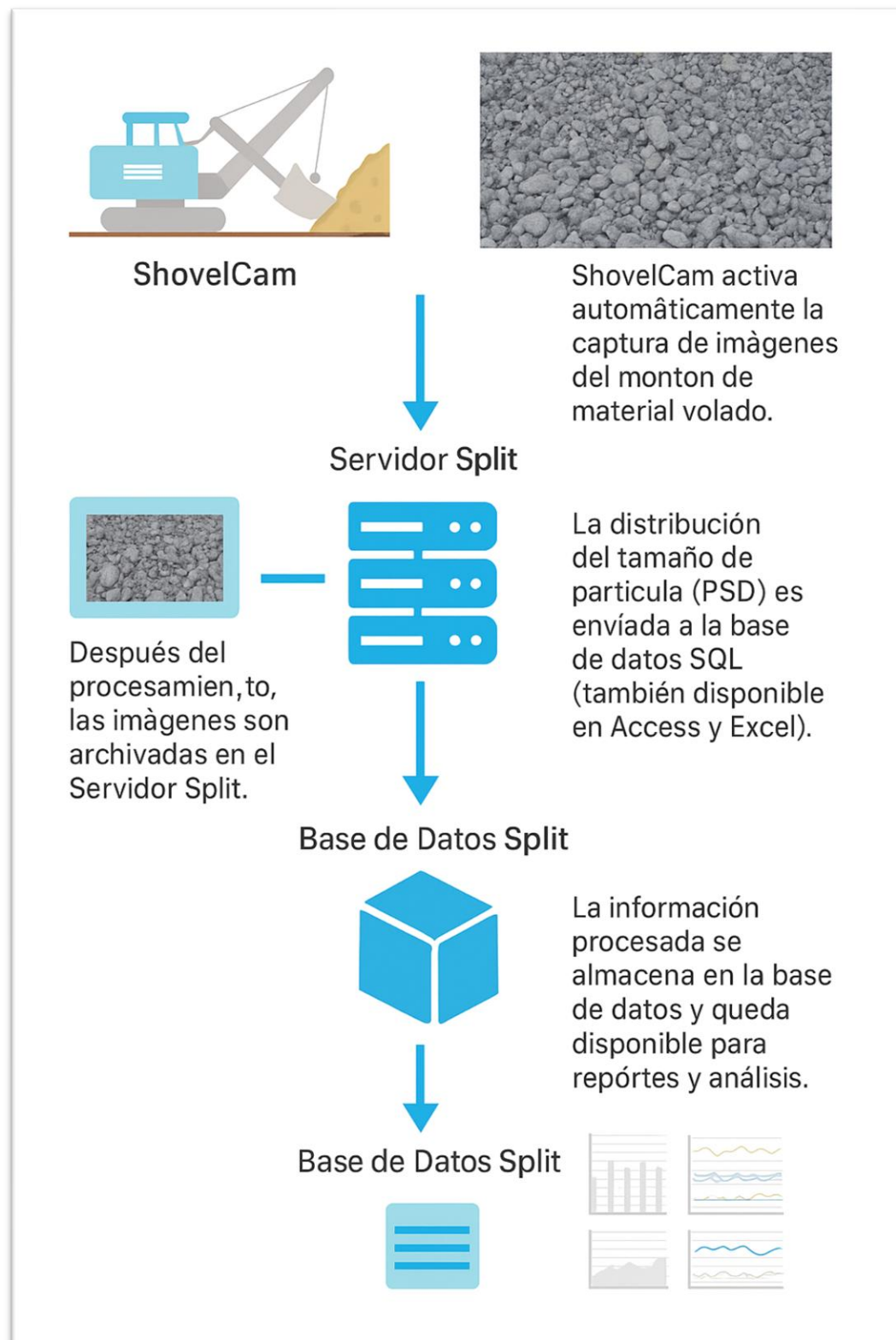
Escala de grises



Nota. La figura muestra el tamaño y la distribución de fragmentos del material volado correspondiente al primer trimestre, caracterizado por una granulometría más gruesa.

Figura 11

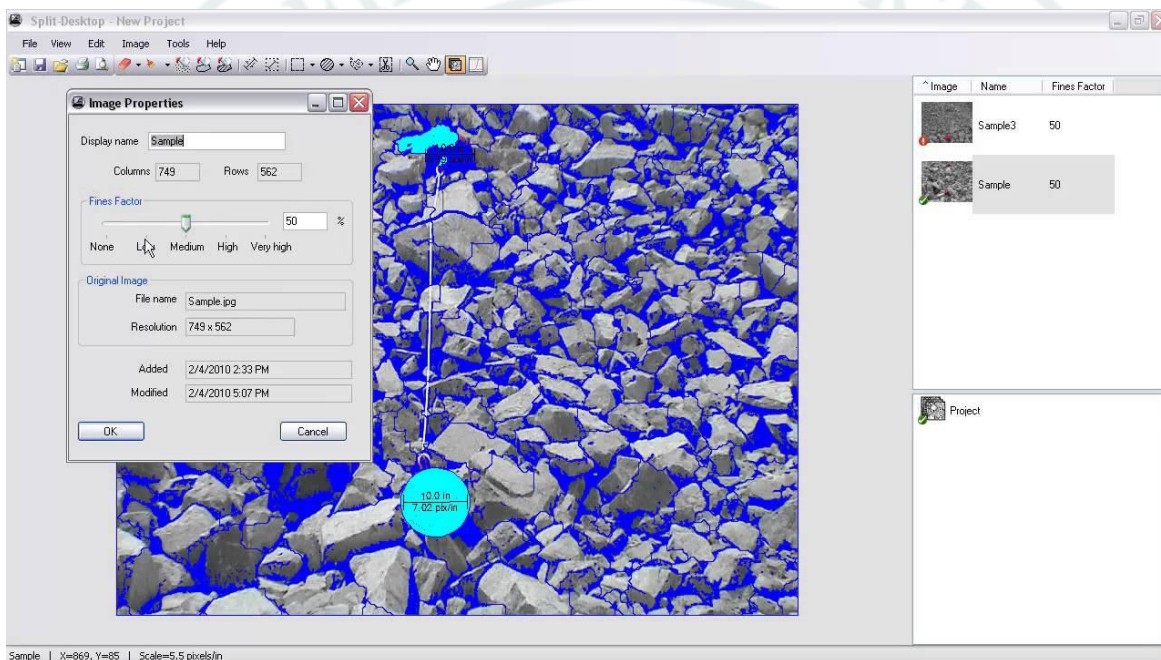
Proceso split on line



Nota. La figura muestra el flujo de funcionamiento del sistema Split Online, desde la captura automática de imágenes mediante ShovelCam, su envío y procesamiento en el Servidor Split, hasta el almacenamiento final en la base de datos donde la información granulométrica queda disponible para análisis y generación de reportes.

Figura 12

Procesamiento split on line



Nota. La figura muestra la interfaz del software Split-Desktop durante el proceso de delineación de fragmentos, donde se visualizan los contornos detectados, el ajuste del Fines Factor y las propiedades de la imagen empleada para el análisis granulométrico.

Figura 13

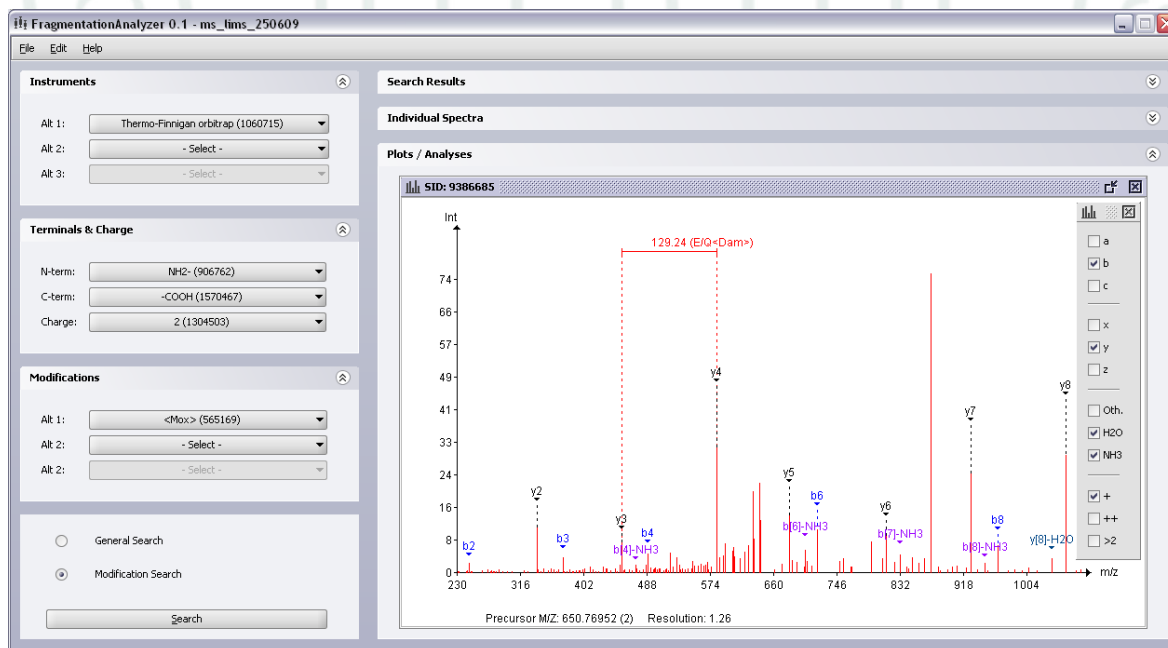
Procesamiento split on line con escala



Nota. La imagen compara el material volado antes y después del proceso de delineación automática en split online, donde el software identifica los bordes de cada fragmento para calcular la distribución granulométrica. (PSD) con apoyo de objetos de escala.

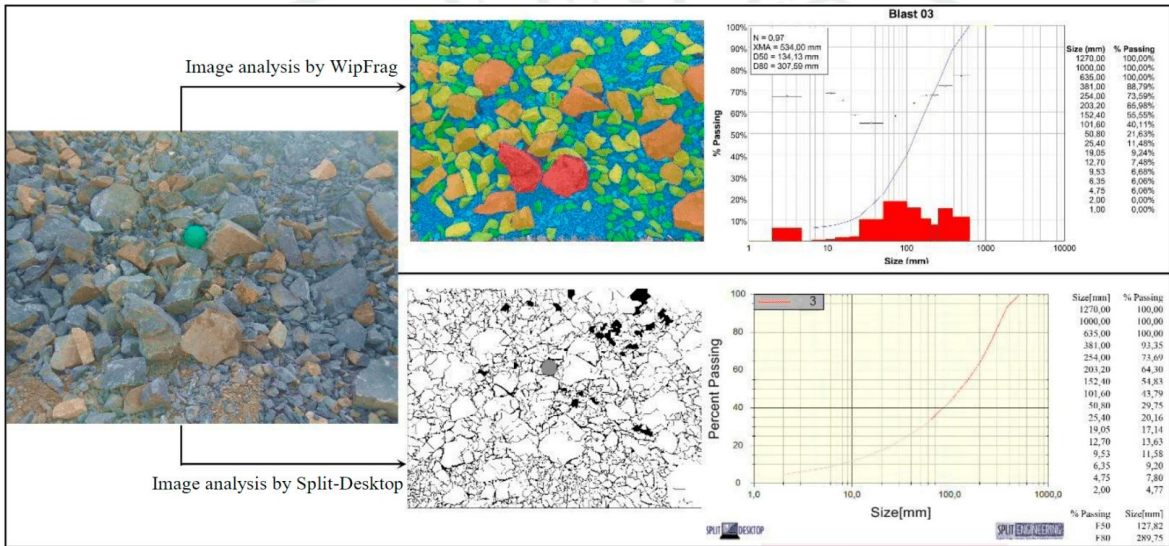
Figura 14

Diagrama split on line



Nota. La figura muestra una interfaz de análisis espectral utilizada como referencia ilustrativa para explicar el procesamiento digital de datos; no corresponde al software split online, pero ejemplifica la lectura automatizada de información para la evaluación técnica.

Figura 15
Resultados fragmentación



Nota: La figura compara el análisis de fragmentación realizado con WipFrag y Split-Desktop, mostrando la segmentación digital de partículas y las curvas granulométricas resultantes. Se emplea únicamente como ilustración del proceso de evaluación de la distribución de tamaños mediante software especializado.

4.3 Análisis de los factores que influyen en los resultados de fragmentación

Los resultados obtenidos en la presente investigación no solo dependen del tipo de explosivo utilizado y del factor de potencia aplicado, sino también de diversos factores inherentes al macizo rocoso y a las condiciones operativas. Entre los principales factores que influyen en la calidad de la fragmentación se encuentran las condiciones geomecánicas del terreno, tales como la resistencia a la compresión de la roca, el grado de fracturamiento, la presencia de discontinuidades y la heterogeneidad del macizo rocoso. Estas características determinan la forma en que la energía del explosivo se propaga en el interior del macizo, afectando directamente el tamaño de los fragmentos obtenidos.

Asimismo, la variabilidad geológica dentro de un mismo banco puede generar diferencias en los resultados de fragmentación, aun cuando se mantengan constantes los parámetros de diseño de voladura. Zonas con roca más competente tienden a generar fragmentos más gruesos (mayor P80), mientras que sectores más fracturados facilitan la generación de finos. En este sentido, el comportamiento observado en los indicadores evaluados puede estar parcialmente influenciado por estas condiciones, lo cual resalta la importancia de considerar el contexto geomecánico en el análisis de resultados.

Por otro lado, factores operativos como la precisión en la perforación, la correcta ejecución de la carga explosiva, la distribución de la energía en el taladro y la secuencia de detonación también juegan un rol importante en la calidad de la fragmentación. Variaciones en la profundidad de perforación, desviaciones en los taladros o una inadecuada distribución del explosivo pueden generar pérdidas de energía y afectar la eficiencia del proceso.

Finalmente, el análisis realizado permite afirmar que, si bien las condiciones geomecánicas y operativas influyen en los resultados, la mejora observada en el tercer trimestre

está principalmente asociada al incremento de la energía de voladura mediante el uso de explosivos energéticos, lo cual permitió compensar la variabilidad del macizo rocoso y lograr una fragmentación más uniforme y eficiente.

Tabla 7

Influencia de las condiciones geomecánicas en la fragmentación del macizo rocoso

Parámetro geomecánico	Condición	Efecto en P80	Efecto en finos (%)	Interpretación
Resistencia a compresión (UCS)	Alta (>150 MPa)	Aumenta (>3.50")	Disminuye (<45%)	Fragmentación gruesa
	Media (80–150 MPa)	Moderado (3.10–3.50")	Regular (45–50%)	Fragmentación aceptable
	Baja (<80 MPa)	Disminuye (≤3.10")	Aumenta (>50%)	Fragmentación fina
Grado de fracturamiento	Bajo	P80 alto	Finos bajos	Roca masiva
	Alto	P80 bajo	Finos altos	Roca fracturada
Discontinuidades	Escasas	Fragmentos grandes	Menos finos	Baja liberación de energía
	Abundantes	Fragmentos pequeños	Mayor finos	Alta liberación de energía

Nota: La respuesta del macizo rocoso a la voladura depende de sus propiedades geomecánicas.

Tabla 8*Influencia de factores operativos en la calidad de fragmentación*

Factor operativo	Condición inadecuada	Impacto en fragmentación	Indicadores afectados
Perforación	Desviación de taladros	Mala distribución de energía	↑ P80, ↓ finos
Carga explosiva	Subcarga (<0.30 kg/t)	Energía insuficiente	↑ P80
	Sobrecarga (>0.50 kg/t)	Sobrefragmentación	↑ finos excesivos
Distribución de carga	Incorrecta	Pérdida de energía	Fragmentación irregular
Secuencia de detonación	Mal diseño	Interferencia de ondas	Fragmentación no uniforme

Nota: La correcta ejecución de la voladura es clave para lograr una fragmentación eficiente.

Tabla 9*Relación entre factor de potencia (kg/t) y resultados de fragmentación*

Factor de potencia (kg/t)	P80 (pulgadas)	Finos (%)	Resultado
< 0.30	> 3.50	< 45%	Fragmentación deficiente
0.30 – 0.45	3.10 – 3.50	45 – 50%	Fragmentación regular
0.45 – 0.50	≤ 3.10	≥ 50%	Fragmentación óptima
> 0.50	< 2.90	> 55%	Sobrefragmentación

Nota: El factor de potencia es uno de los principales controladores del tamaño de fragmentación.

Tabla 10*Factores que explican la mejora de resultados en el tercer trimestre*

Factor	Segundo trimestre	Tercer trimestre	Impacto en resultados
Tipo de explosivo	Convencional	Energético (Quantex 2.0)	Mayor energía
Factor de potencia	~0.30 kg/t	~0.47 kg/t	Mejor fragmentación
P80	3.57”	3.03”	-15%
Finos	44%	50.50%	14%
T/H	3,900	4,500	15%
USD/T	1.35	1.23	-9%

Nota: La mejora está asociada principalmente al incremento de la energía de voladura.

Tabla 11*Parámetros del tercer trimestre*

Mes	T/H	% Finos	P80	KG/T	USD/T
Mes 1	4,502.68	50.44	3.03	0.476	1.23
Mes 2	4,500.84	50.75	3.03	0.478	1.23
Mes 3	4,512.33	50.47	3.04	0.474	1.23
Total	4,505.21	50.55	3.03	0.476	1.23

Nota. Parámetros de producción, finos, P80, factor de potencia y costo de trituración de los meses de abril, mayo y junio del 2024.

Este cuadro 4 presenta el rendimiento mensual de la operación minera durante el tercer trimestre del 2024, luego de la implementación del explosivo energético Quantex 2.0 y un nuevo diseño de voladura. Se analizan cinco indicadores técnicos: T/H, finos menores a 1 pulgada, P80, consumo de explosivo. (KG/T), y costo unitario. (USD/T)

- Productividad. (T/H): Se observa una mejora significativa en la productividad, con un promedio general de 4,505.21 toneladas por hora, lo que representa un incremento de más de 600 T/H respecto al trimestre anterior.

- Finos <1 pulgada. (%): El porcentaje de finos aumentó a un promedio de 50.55%, lo cual indica una fragmentación más fina y homogénea, ideal para mejorar la eficiencia en las etapas posteriores de conminución.
- P80. (pulgadas): Se logró una notable reducción del tamaño de fragmentación, con un promedio de 3.03 pulgadas, acercándose al objetivo de 6 pulgadas como P80 ideal. Esta mejora es un reflejo del mejor control energético y diseño técnico de la voladura.
- Consumo de explosivo. (KG/T): El consumo promedio fue de 0.476 kg/t, superior al del trimestre anterior. (0.302 kg/t), lo que confirma el uso de un explosivo de mayor energía y densidad, necesario para alcanzar la fragmentación deseada.
- Costo unitario. (USD/T): A pesar del mayor consumo de explosivo, el costo se mantuvo en 1.23 USD/t, evidenciando que la mejora en fragmentación y productividad compensó económicamente el incremento en consumo.

Este cuadro demuestra claramente el impacto positivo de la implementación de Quantex 2.0 en el diseño de voladura, con resultados favorables en fragmentación, volumen de finos, y productividad operativa, sin incrementar los costos unitarios.

Tabla 12*Parámetros abril 2024*

Fecha	T/H	% Finos	P80	KG/T	USD/T
1/04/2024	3,873.00	42.98	3.58	0.295	1.37
2/04/2024	3,900.00	43.30	3.55	0.307	1.33
3/04/2024	3,888.00	45.05	3.52	0.299	1.39
4/04/2024	3,972.00	43.94	3.63	0.298	1.37
5/04/2024	3,871.00	43.02	3.59	0.299	1.34
6/04/2024	3,985.00	43.63	3.60	0.309	1.39
7/04/2024	3,839.00	44.39	3.53	0.304	1.32
8/04/2024	3,819.00	43.18	3.51	0.300	1.30
9/04/2024	3,872.00	45.09	3.63	0.299	1.39
10/04/2024	3,951.00	43.13	3.57	0.301	1.37
11/04/2024	3,898.00	44.86	3.50	0.298	1.35
12/04/2024	3,883.00	43.99	3.56	0.309	1.39
13/04/2024	3,915.00	43.86	3.55	0.303	1.37
14/04/2024	3,839.00	44.60	3.62	0.299	1.33
15/04/2024	3,961.00	43.74	3.48	0.308	1.38
16/04/2024	3,881.00	43.05	3.66	0.298	1.35
17/04/2024	3,889.00	44.72	3.59	0.308	1.40
18/04/2024	3,901.00	43.44	3.61	0.305	1.40
19/04/2024	3,908.00	44.37	3.55	0.301	1.30
20/04/2024	3,995.00	43.03	3.56	0.294	1.36
21/04/2024	3,935.00	44.48	3.62	0.307	1.36
22/04/2024	3,820.00	43.80	3.55	0.308	1.30
23/04/2024	3,866.00	43.78	3.62	0.295	1.32
24/04/2024	3,972.00	43.25	3.53	0.309	1.30
25/04/2024	3,992.00	45.05	3.64	0.305	1.30
26/04/2024	3,979.00	44.13	3.51	0.301	1.36
27/04/2024	3,808.00	45.08	3.56	0.299	1.33
28/04/2024	3,867.00	44.56	3.65	0.304	1.31
29/04/2024	3,915.00	44.18	3.63	0.302	1.40
30/04/2024	3,921.00	44.33	3.61	0.302	1.31
Promedio	3,903.83	44.00	3.58	0.302	1.35

Nota. Parámetros de producción, finos, P80, factor de potencia y costo de trituración de los meses de abril, mayo y junio del 2024.

En la Tabla 5 se presentan los parámetros operativos correspondientes al mes de abril de 2024, donde se observa que la productividad (T/H) mantiene un comportamiento relativamente estable, con un promedio de 3,903.83 T/H, valor que se encuentra por debajo del parámetro de control establecido ($\geq 4,400$ T/H), evidenciando una limitación en el rendimiento operativo durante este periodo. Asimismo, el porcentaje de finos ($<1''$) registra un promedio de 44.00%, lo cual indica que la fragmentación del material no alcanza el nivel óptimo requerido ($\geq 50\%$), reflejando una menor eficiencia en la generación de material fino adecuado para los procesos posteriores.

Por otro lado, el indicador de fragmentación P80 presenta un promedio de 3.58 pulgadas, valor superior al rango óptimo (≤ 3.10 pulgadas), lo que confirma la presencia de fragmentación gruesa. De igual manera, el factor de potencia (kg/t) muestra un promedio de 0.302 kg/t, ubicándose por debajo del rango recomendado (0.45 – 0.50 kg/t), lo cual explica la baja energía aplicada en la voladura. En consecuencia, el costo unitario (USD/t) alcanza un promedio de 1.35 USD/t, superando el parámetro de control (≤ 1.25 USD/t), evidenciando una menor eficiencia económica. En conjunto, los resultados de la Tabla 5 reflejan que los indicadores se encuentran fuera de los rangos óptimos, lo que justifica la necesidad de optimizar el proceso de voladura para mejorar la fragmentación y la productividad.

Tabla 13*Parámetros mayo 2024*

Fecha	T/H	% Finos	P80	KG/T	USD/T
1/05/2024	3,889.00	44.61	3.49	0.302	1.30
2/05/2024	3,806.00	44.81	3.58	0.304	1.35
3/05/2024	3,912.00	44.20	3.63	0.297	1.33
4/05/2024	3,834.00	44.65	3.65	0.302	1.39
5/05/2024	3,978.00	43.25	3.53	0.303	1.40
6/05/2024	3,904.00	44.16	3.54	0.299	1.39
7/05/2024	3,875.00	43.31	3.49	0.306	1.38
8/05/2024	3,938.00	44.58	3.55	0.301	1.36
9/05/2024	3,837.00	44.13	3.61	0.299	1.36
10/05/2024	3,825.00	43.68	3.59	0.302	1.40
11/05/2024	3,910.00	43.77	3.63	0.302	1.30
12/05/2024	3,875.00	43.19	3.51	0.302	1.40
13/05/2024	3,923.00	44.86	3.54	0.294	1.35
14/05/2024	3,856.00	43.23	3.51	0.294	1.36
15/05/2024	3,800.00	44.01	3.53	0.306	1.32
16/05/2024	3,893.00	45.13	3.58	0.307	1.30
17/05/2024	3,900.00	43.37	3.48	0.303	1.30
18/05/2024	3,899.00	45.19	3.62	0.300	1.37
19/05/2024	3,962.00	45.11	3.53	0.298	1.38
20/05/2024	3,804.00	43.85	3.54	0.302	1.34
21/05/2024	3,988.00	44.89	3.52	0.299	1.39
22/05/2024	3,841.00	45.11	3.54	0.297	1.39
23/05/2024	3,824.00	43.02	3.55	0.306	1.36
24/05/2024	3,870.00	43.61	3.48	0.305	1.35
25/05/2024	3,976.00	42.94	3.54	0.307	1.31
26/05/2024	3,900.00	45.20	3.50	0.296	1.39
27/05/2024	3,892.00	45.18	3.61	0.300	1.35
28/05/2024	3,999.00	44.68	3.66	0.307	1.39
29/05/2024	3,936.00	44.78	3.59	0.302	1.38
30/05/2024	3,981.00	44.68	3.58	0.307	1.31
31/05/2024	3,841.00	43.65	3.49	0.302	1.34
Promedio	3,892.52	44.22	3.55	0.302	1.36

Nota. Parámetros de producción, finos, P80, factor de potencia y costo de trituración de los meses de abril, mayo y junio del 2024.

En la Tabla 6 se presentan los parámetros operativos correspondientes al mes de mayo de 2024, donde se observa que la productividad (T/H) mantiene un comportamiento estable, con un promedio de 3,892.52 T/H, valor que continúa por debajo del parámetro de control establecido ($\geq 4,400$ T/H), evidenciando que el rendimiento operativo aún no alcanza niveles óptimos. Asimismo, el porcentaje de finos ($<1''$) presenta un promedio de 44.22%, manteniéndose por debajo del rango esperado ($\geq 50\%$), lo que indica que la fragmentación del material sigue siendo limitada en cuanto a la generación de finos adecuados.

Por otro lado, el indicador de fragmentación P80 registra un promedio de 3.55 pulgadas, valor superior al parámetro óptimo (≤ 3.10 pulgadas), confirmando la presencia de material sobredimensionado. De igual manera, el factor de potencia (kg/t) presenta un promedio de 0.302 kg/t, ubicándose por debajo del rango recomendado (0.45 – 0.50 kg/t), lo cual refleja una baja energía aplicada durante la voladura. Como consecuencia, el costo unitario (USD/t) alcanza un promedio de 1.36 USD/t, superando el parámetro de control (≤ 1.25 USD/t), evidenciando una menor eficiencia económica. En conjunto, los resultados de la Tabla 6 muestran que los indicadores continúan fuera de los rangos óptimos, manteniendo la tendencia observada en el mes anterior y reforzando la necesidad de optimizar el proceso de voladura.

Tabla 14*Parámetros junio 2024*

Fecha	T/H	% Finos	P80	KG/T	USD/T
1/06/2024	3,868.00	44.68	3.58	0.304	1.34
2/06/2024	3,888.00	43.55	3.48	0.304	1.36
3/06/2024	3,992.00	44.52	3.64	0.308	1.31
4/06/2024	3,935.00	44.88	3.66	0.295	1.35
5/06/2024	3,849.00	43.40	3.51	0.295	1.39
6/06/2024	3,957.00	44.83	3.59	0.302	1.40
7/06/2024	3,975.00	43.24	3.48	0.305	1.34
8/06/2024	3,931.00	44.14	3.53	0.296	1.33
9/06/2024	3,937.00	44.33	3.66	0.298	1.36
10/06/2024	3,912.00	43.15	3.62	0.309	1.37
11/06/2024	3,863.00	44.61	3.55	0.297	1.40
12/06/2024	3,907.00	43.67	3.57	0.301	1.32
13/06/2024	3,984.00	43.27	3.56	0.294	1.33
14/06/2024	3,896.00	44.53	3.51	0.300	1.40
15/06/2024	3,958.00	44.68	3.53	0.305	1.36
16/06/2024	3,859.00	44.19	3.62	0.300	1.32
17/06/2024	3,869.00	43.16	3.50	0.296	1.34
18/06/2024	3,948.00	44.88	3.64	0.305	1.32
19/06/2024	3,897.00	44.99	3.59	0.297	1.39
20/06/2024	3,851.00	44.60	3.56	0.299	1.40
21/06/2024	3,976.00	43.45	3.58	0.300	1.32
22/06/2024	3,902.00	44.76	3.50	0.309	1.32
23/06/2024	3,882.00	44.43	3.63	0.298	1.39
24/06/2024	3,973.00	43.00	3.55	0.308	1.31
25/06/2024	3,950.00	44.25	3.66	0.308	1.40
26/06/2024	3,983.00	43.51	3.61	0.302	1.33
27/06/2024	3,820.00	43.12	3.64	0.294	1.36
28/06/2024	3,952.00	44.39	3.56	0.295	1.36
29/06/2024	3,924.00	44.89	3.63	0.296	1.32
30/06/2024	3,858.00	45.18	3.52	0.303	1.31
Promedio	3,916.53	44.14	3.58	0.301	1.35

Nota. Parámetros de producción, finos, P80, factor de potencia y costo de trituración de los meses de abril, mayo y junio del 2024.

En la Tabla 7 se presentan los parámetros operativos correspondientes al mes de junio de 2024, donde se observa que la productividad (T/H) mantiene un comportamiento relativamente constante, con un promedio de 3,916.53 T/H, valor que continúa por debajo del parámetro de control establecido ($\geq 4,400$ T/H), evidenciando que la operación aún no alcanza niveles óptimos de rendimiento. Asimismo, el porcentaje de finos ($<1''$) presenta un promedio de 44.14%, manteniéndose por debajo del rango esperado ($\geq 50\%$), lo que indica que la fragmentación del material sigue siendo limitada en términos de generación de finos adecuados para optimizar los procesos posteriores.

Por otro lado, el indicador de fragmentación P80 registra un promedio de 3.58 pulgadas, valor superior al parámetro óptimo (≤ 3.10 pulgadas), confirmando la presencia de material sobredimensionado. De igual manera, el factor de potencia (kg/t) presenta un promedio de 0.301 kg/t, ubicándose por debajo del rango recomendado (0.45 – 0.50 kg/t), lo que refleja una menor energía aplicada en la voladura. En consecuencia, el costo unitario (USD/t) alcanza un promedio de 1.35 USD/t, superando el parámetro de control (≤ 1.25 USD/t), lo que evidencia una menor eficiencia económica. En conjunto, los resultados de la Tabla 7 mantienen la tendencia observada en los meses anteriores, confirmando que durante el segundo trimestre los indicadores operativos se encuentran fuera de los rangos óptimos y justificando la necesidad de implementar mejoras en el proceso de voladura.

Tabla 15*Parámetros julio 2024*

Fecha	T/H	% Finos	P80	KG/T	USD/T
1/07/2024	4,433.00	50.58	3.01	0.485	1.24
2/07/2024	4,479.00	51.54	3.05	0.476	1.24
3/07/2024	4,558.00	49.53	3.02	0.471	1.21
4/07/2024	4,528.00	50.00	3.05	0.482	1.22
5/07/2024	4,428.00	49.47	3.02	0.489	1.25
6/07/2024	4,582.00	51.12	3.09	0.471	1.24
7/07/2024	4,403.00	49.23	3.03	0.482	1.22
8/07/2024	4,468.00	51.35	3.01	0.480	1.21
9/07/2024	4,417.00	49.97	2.96	0.478	1.24
10/07/2024	4,599.00	50.38	3.02	0.483	1.20
11/07/2024	4,487.00	51.24	3.10	0.466	1.23
12/07/2024	4,416.00	50.80	3.07	0.470	1.23
13/07/2024	4,601.00	49.50	3.05	0.466	1.22
14/07/2024	4,402.00	50.04	3.08	0.475	1.24
15/07/2024	4,526.00	49.75	2.97	0.472	1.24
16/07/2024	4,537.00	49.92	3.02	0.469	1.23
17/07/2024	4,500.00	51.41	3.04	0.480	1.24
18/07/2024	4,579.00	51.60	3.01	0.484	1.21
19/07/2024	4,435.00	50.20	3.05	0.470	1.25
20/07/2024	4,616.00	50.44	2.96	0.476	1.21
21/07/2024	4,588.00	50.61	3.10	0.477	1.21
22/07/2024	4,518.00	50.51	2.96	0.469	1.25
23/07/2024	4,411.00	50.90	3.06	0.473	1.24
24/07/2024	4,598.00	51.04	3.00	0.473	1.24
25/07/2024	4,422.00	51.66	2.97	0.485	1.25
26/07/2024	4,439.00	49.37	3.02	0.481	1.23
27/07/2024	4,556.00	51.01	3.01	0.480	1.22
28/07/2024	4,533.00	49.61	3.10	0.471	1.25
29/07/2024	4,516.00	50.34	3.06	0.470	1.23
30/07/2024	4,468.00	49.81	3.08	0.486	1.23
31/07/2024	4,540.00	50.57	3.06	0.473	1.24
Promedio	4,502.68	50.44	3.03	0.476	1.23

Nota. Parámetros de producción, finos, P80, factor de potencia y costo de trituración de los meses de abril, mayo y junio del 2024.

En la Tabla 8 se presentan los parámetros operativos correspondientes al mes de julio de 2024, donde se observa una mejora significativa en la productividad (T/H), alcanzando un promedio de 4,502.68 T/H, valor que supera el parámetro de control establecido ($\geq 4,400$ T/H), evidenciando un incremento en el rendimiento operativo. Asimismo, el porcentaje de finos ($<1''$) presenta un promedio de 50.44%, ubicándose dentro del rango óptimo ($\geq 50\%$), lo que indica una adecuada fragmentación del material y una mayor generación de finos favorables para los procesos posteriores.

Por otro lado, el indicador de fragmentación P80 registra un promedio de 3.03 pulgadas, valor que se encuentra dentro del parámetro óptimo (≤ 3.10 pulgadas), evidenciando una fragmentación más fina y uniforme. De igual manera, el factor de potencia (kg/t) presenta un promedio de 0.476 kg/t, ubicándose dentro del rango recomendado (0.45 – 0.50 kg/t), lo que refleja una adecuada energía aplicada en la voladura. En consecuencia, el costo unitario (USD/t) alcanza un promedio de 1.23 USD/t, valor que se encuentra dentro del parámetro de control (≤ 1.25 USD/t), evidenciando una mejora en la eficiencia económica. En conjunto, los resultados de la Tabla 8 muestran que todos los indicadores se encuentran dentro de los rangos óptimos, confirmando la efectividad de la optimización del proceso de voladura.

Tabla 16*Parámetros agosto 2024*

Fecha	T/H	% Finos	P80	KG/T	USD/T
1/08/2024	4,457.00	51.33	3.07	0.486	1.23
2/08/2024	4,453.00	50.95	2.99	0.481	1.22
3/08/2024	4,494.00	50.26	3.04	0.489	1.23
4/08/2024	4,420.00	49.76	2.96	0.483	1.23
5/08/2024	4,410.00	51.11	3.01	0.481	1.25
6/08/2024	4,613.00	49.36	2.97	0.483	1.21
7/08/2024	4,404.00	51.36	3.08	0.480	1.22
8/08/2024	4,484.00	51.39	2.98	0.466	1.23
9/08/2024	4,514.00	51.13	3.00	0.479	1.23
10/08/2024	4,567.00	51.51	3.09	0.471	1.23
11/08/2024	4,612.00	50.23	3.03	0.478	1.24
12/08/2024	4,586.00	49.93	3.03	0.470	1.21
13/08/2024	4,576.00	50.44	3.01	0.476	1.22
14/08/2024	4,452.00	49.74	3.01	0.473	1.24
15/08/2024	4,451.00	50.73	3.06	0.488	1.22
16/08/2024	4,453.00	51.15	2.97	0.469	1.21
17/08/2024	4,469.00	49.78	3.07	0.481	1.21
18/08/2024	4,501.00	51.24	2.97	0.486	1.24
19/08/2024	4,418.00	51.14	3.08	0.478	1.23
20/08/2024	4,412.00	49.91	3.10	0.484	1.21
21/08/2024	4,474.00	51.32	3.07	0.472	1.25
22/08/2024	4,567.00	50.54	3.01	0.472	1.23
23/08/2024	4,597.00	51.09	3.09	0.482	1.21
24/08/2024	4,591.00	51.56	3.07	0.469	1.25
25/08/2024	4,460.00	50.95	3.02	0.466	1.21
26/08/2024	4,572.00	51.38	3.01	0.486	1.25
27/08/2024	4,440.00	50.61	2.98	0.485	1.23
28/08/2024	4,616.00	51.29	3.06	0.466	1.25
29/08/2024	4,571.00	50.57	3.02	0.481	1.22
30/08/2024	4,409.00	50.51	2.99	0.486	1.22
31/08/2024	4,483.00	50.89	3.08	0.476	1.22
Promedio	4,500.84	50.75	3.03	0.478	1.23

Nota. Parámetros de producción, finos, P80, factor de potencia y costo de trituración de los meses de abril, mayo y junio del 2024.

En la Tabla 9 se presentan los parámetros operativos correspondientes al mes de agosto de 2024, donde se observa que la productividad (T/H) mantiene un comportamiento estable y eficiente, alcanzando un promedio de 4,500.84 T/H, valor que se encuentra dentro del parámetro de control ($\geq 4,400$ T/H). Asimismo, el porcentaje de finos ($<1''$) presenta un promedio de 50.75%, lo que indica una adecuada fragmentación del material volado, ubicándose dentro del rango óptimo ($\geq 50\%$) y confirmando la mejora sostenida en la generación de material fino.

Por otro lado, el indicador de fragmentación P80 registra un promedio de 3.03 pulgadas, valor que se mantiene dentro del parámetro óptimo (≤ 3.10 pulgadas), evidenciando una fragmentación fina y homogénea. De igual manera, el factor de potencia (kg/t) presenta un promedio de 0.478 kg/t, ubicándose dentro del rango recomendado (0.45 – 0.50 kg/t), lo que refleja una adecuada energía aplicada en la voladura. En consecuencia, el costo unitario (USD/t) alcanza un promedio de 1.23 USD/t, valor que se encuentra dentro del parámetro de control (≤ 1.25 USD/t), evidenciando una operación eficiente desde el punto de vista económico. En conjunto, los resultados de la Tabla 9 confirman la estabilidad y consistencia de los indicadores dentro de los rangos óptimos, consolidando la efectividad del proceso de optimización aplicado.

Tabla 17*Parámetros septiembre 2024*

Fecha	T/H	% Finos	P80	KG/T	USD/T
1/09/2024	4,419.00	51.15	3.10	0.466	1.21
2/09/2024	4,413.00	50.15	3.02	0.470	1.20
3/09/2024	4,491.00	51.44	2.97	0.473	1.23
4/09/2024	4,547.00	51.01	3.01	0.476	1.23
5/09/2024	4,404.00	50.99	3.10	0.479	1.20
6/09/2024	4,462.00	50.79	3.04	0.467	1.25
7/09/2024	4,620.00	50.20	2.96	0.475	1.20
8/09/2024	4,588.00	50.61	3.04	0.482	1.22
9/09/2024	4,514.00	50.42	2.96	0.467	1.25
10/09/2024	4,489.00	50.07	3.08	0.473	1.22
11/09/2024	4,471.00	50.36	3.10	0.467	1.23
12/09/2024	4,471.00	51.66	2.99	0.472	1.23
13/09/2024	4,604.00	50.55	2.98	0.480	1.24
14/09/2024	4,567.00	49.74	3.05	0.489	1.24
15/09/2024	4,458.00	51.49	3.06	0.483	1.23
16/09/2024	4,423.00	51.18	3.09	0.476	1.21
17/09/2024	4,576.00	50.12	3.07	0.466	1.25
18/09/2024	4,572.00	49.80	3.09	0.484	1.21
19/09/2024	4,580.00	49.64	3.10	0.479	1.22
20/09/2024	4,615.00	49.78	2.98	0.476	1.24
21/09/2024	4,418.00	50.76	2.98	0.468	1.22
22/09/2024	4,576.00	49.54	2.99	0.466	1.21
23/09/2024	4,587.00	50.75	2.96	0.477	1.21
24/09/2024	4,491.00	49.33	3.04	0.483	1.25
25/09/2024	4,574.00	49.39	3.08	0.469	1.25
26/09/2024	4,571.00	49.66	3.09	0.471	1.24
27/09/2024	4,518.00	51.14	3.00	0.478	1.22
28/09/2024	4,510.00	49.84	2.98	0.472	1.24
29/09/2024	4,434.00	51.23	3.05	0.476	1.21
30/09/2024	4,407.00	51.25	3.10	0.473	1.22
Promedio	4,512.33	50.47	3.04	0.474	1.23

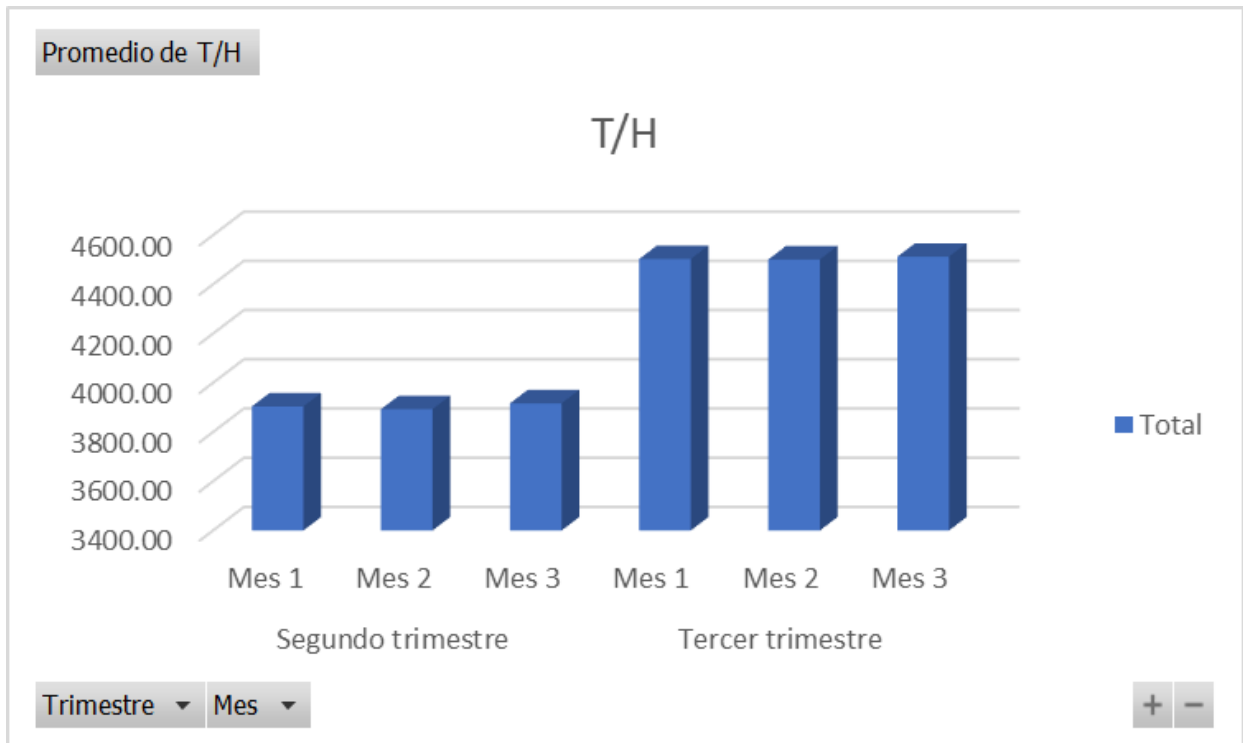
Nota. Parámetros de producción, finos, P80, factor de potencia y costo de trituración de los meses de abril, mayo y junio del 2024.

En la Tabla 10 se presentan los parámetros operativos correspondientes al mes de septiembre de 2024, donde se observa que la productividad (T/H) mantiene un comportamiento estable, alcanzando un promedio de 4,512.33 T/H, valor que se encuentra dentro del parámetro de control ($\geq 4,400$ T/H), evidenciando un adecuado rendimiento operativo. Asimismo, el porcentaje de finos ($<1''$) presenta un promedio de 50.47%, ubicándose dentro del rango óptimo ($\geq 50\%$), lo que confirma una fragmentación eficiente y una adecuada generación de material fino durante este periodo.

Por otro lado, el indicador de fragmentación P80 registra un promedio de 3.04 pulgadas, valor que se mantiene dentro del parámetro óptimo (≤ 3.10 pulgadas), evidenciando una fragmentación homogénea. De igual manera, el factor de potencia (kg/t) presenta un promedio de 0.474 kg/t, ubicándose dentro del rango recomendado (0.45 – 0.50 kg/t), lo que refleja una adecuada energía aplicada en la voladura. En consecuencia, el costo unitario (USD/t) alcanza un promedio de 1.23 USD/t, valor que se encuentra dentro del parámetro de control (≤ 1.25 USD/t), evidenciando una operación eficiente desde el punto de vista económico. En conjunto, los resultados de la Tabla 10 confirman que los indicadores se mantienen dentro de los rangos óptimos, consolidando la mejora lograda durante el tercer trimestre.

Figura 16

Producción mensual



Nota: Los datos presentados corresponden al promedio de producción mensual (T/H) registrados durante el segundo y tercer trimestre del año 2024, obtenidos de los reportes operativos de la empresa. La interpretación se realiza considerando como parámetro de control un rendimiento esperado de $T/H \geq 4,400$, el cual representa una operación eficiente. Se observa que los valores del segundo trimestre se encuentran por debajo del rango planificado, mientras que en el tercer trimestre los resultados superan el parámetro establecido, evidenciando una mejora en la productividad operativa asociada a la optimización del proceso de voladura.

El gráfico 7 de barras muestra la comparación mensual de la productividad operativa, medida en toneladas por hora. (T/H), entre el segundo trimestre. (sin mejora) y el tercer trimestre. (con implementación del explosivo energético Quantex 2.0)

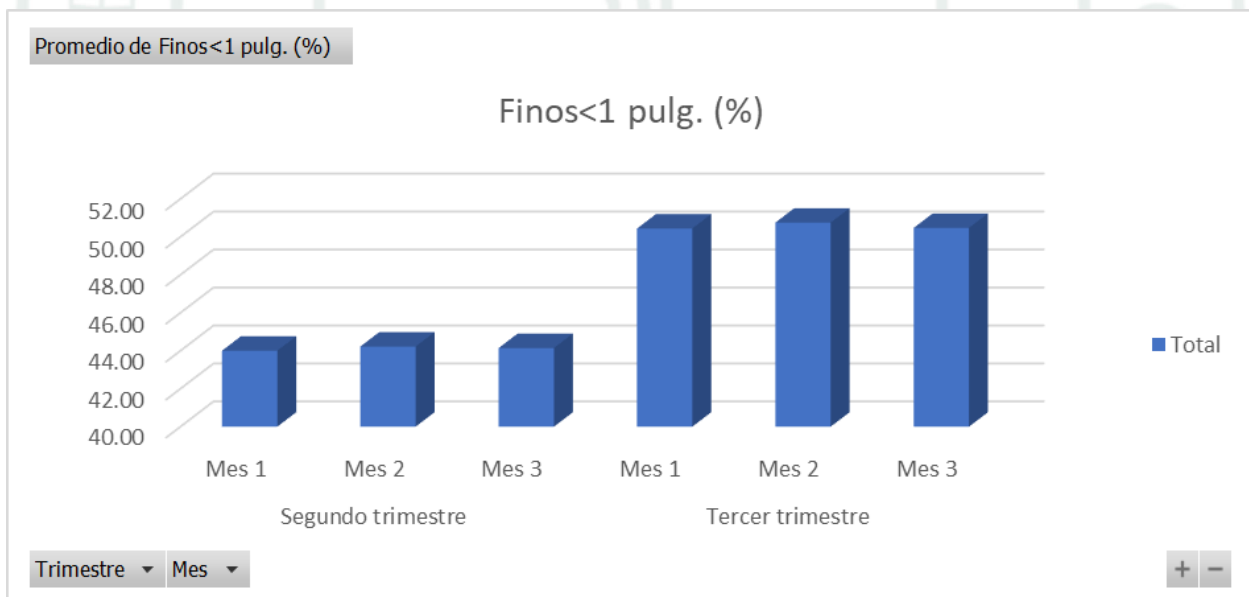
Durante el segundo trimestre, se observa un rendimiento moderado con valores mensuales estables cercanos a las 3,900 T/H, con ligeras variaciones entre los meses. Esta etapa corresponde a las voladuras realizadas con el diseño convencional y uso de Quantex 1.0.

En contraste, en el tercer trimestre, tras la implementación del nuevo diseño de voladura y el uso de Quantex 2.0, se registra un aumento significativo en la productividad. Cada uno de los tres meses muestra valores superiores a 4,500 T/H, reflejando una mejora consistente en el rendimiento del sistema de fragmentación y carguío.

La diferencia entre ambos trimestres evidencia una mejora promedio de aproximadamente 15.39% en la productividad, lo cual respalda el impacto positivo en el cambio de explosivo sobre el rendimiento operativo de la mina.

Figura 17

Finos mensuales



Nota: Los datos corresponden al promedio mensual del porcentaje de finos menores a 1 pulgada (%) registrados durante el segundo y tercer trimestre del año 2024, obtenidos de los reportes operativos de fragmentación. La interpretación se realiza considerando como parámetro de control un valor óptimo de finos $\geq 50\%$, el cual indica una fragmentación eficiente del material

volado. Se observa que los resultados del segundo trimestre se encuentran por debajo del rango establecido, mientras que en el tercer trimestre los valores superan el parámetro de control, evidenciando una mejora en la calidad de fragmentación asociada a la optimización del proceso de voladura.

La figura 8 muestra la evolución mensual del porcentaje de material fino. (partículas menores a 1 pulgada) producido como resultado de las voladuras realizadas durante los trimestres comparados.

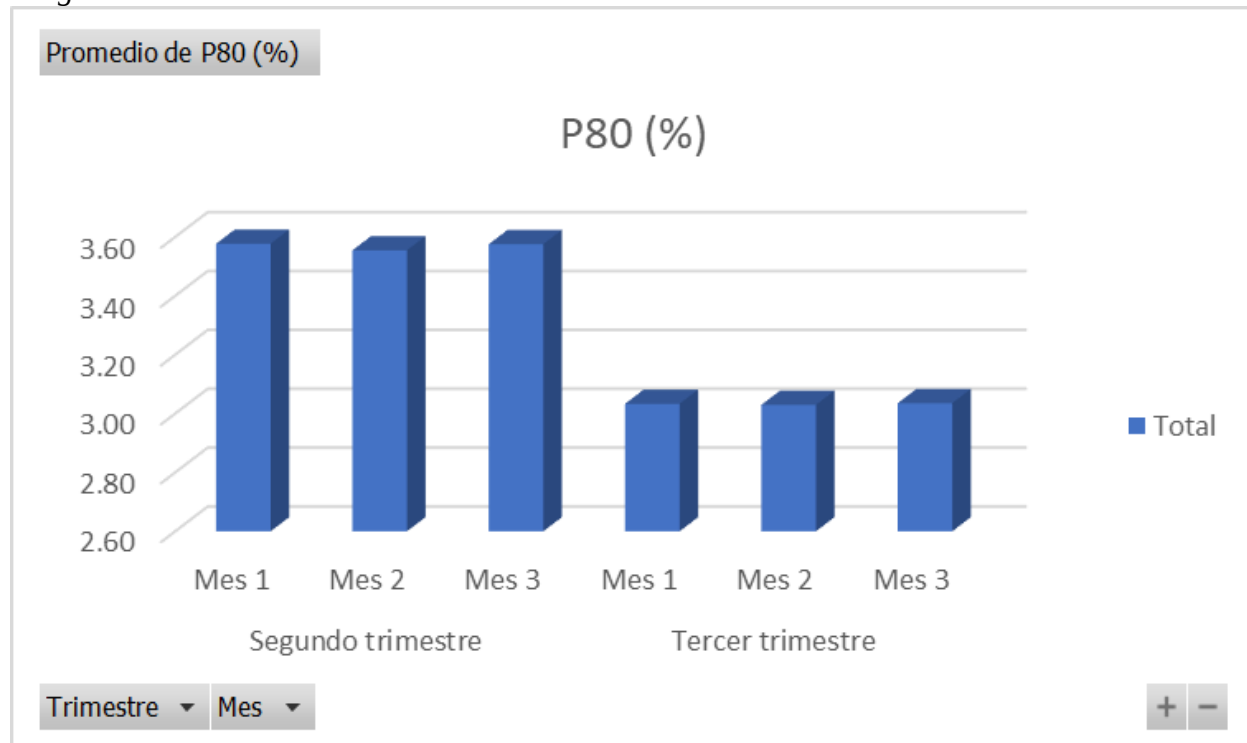
Durante el segundo trimestre, se observa que el porcentaje de finos se mantuvo relativamente constante, con valores entre 44.00% y 44.22%, lo que refleja una fragmentación moderada generada por el uso del explosivo Quantex 1.0 y un diseño de voladura tradicional. Este nivel de finos es típico de una voladura que no logra una ruptura homogénea del macizo rocoso.

En contraste, en el tercer trimestre, tras la implementación del explosivo energético Quantex 2.0, se evidencia un salto considerable en el porcentaje de finos, con un promedio mensual que supera el 50% en cada uno de los tres meses evaluados. Estos valores reflejan una fragmentación mucho más eficiente y consistente, lo que favorece significativamente el rendimiento en procesos posteriores como el carguío y la conminución.

La diferencia entre ambos trimestres indica un incremento promedio del 14.57% en la generación de material fino, lo cual valida técnicamente la efectividad del cambio de explosivo en la optimización del proceso.

Figura 18

Fragmentación mensual



Nota: Los datos corresponden al promedio mensual del tamaño de fragmentación P80 (pulgadas) registrados durante el segundo y tercer trimestre del año 2024, obtenidos de los reportes de análisis granulométrico en campo. La interpretación se realiza considerando como parámetro de control un valor óptimo de $P80 \leq 3.10$ pulgadas, el cual indica una fragmentación eficiente del material volado. Se observa que en el segundo trimestre los valores se encuentran por encima del rango establecido, evidenciando una fragmentación más gruesa; mientras que en el tercer trimestre los resultados se sitúan dentro del parámetro de control, lo que refleja una mejora significativa en la calidad de fragmentación asociada a la optimización del proceso de voladura.

La figura 9 presenta la evolución mensual del valor P80, que representa el tamaño bajo el cual se encuentra el 80% del material fragmentado tras la voladura. Este es uno de los indicadores más relevantes para evaluar la eficiencia del explosivo y la calidad de la fragmentación.

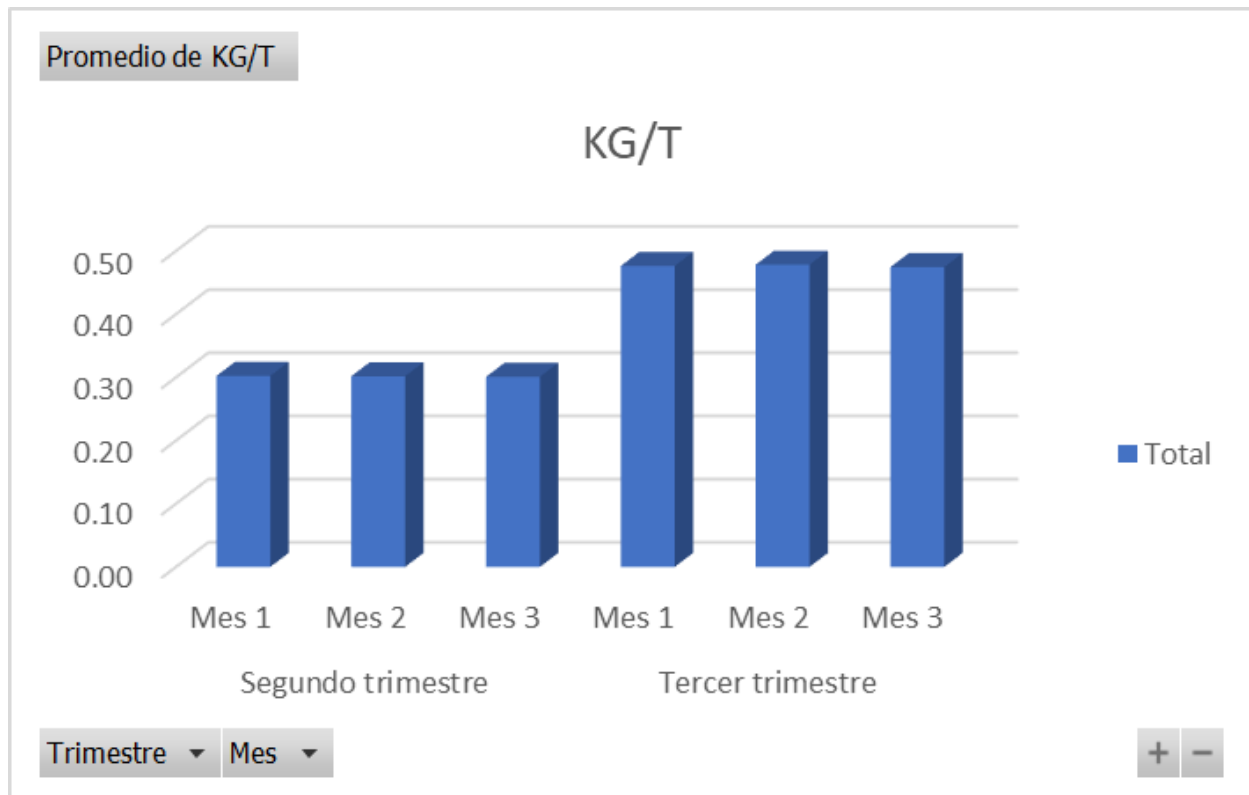
Durante el segundo trimestre, se observa que el valor de P80 se mantiene elevado, con promedios mensuales de 3.58, 3.55 y 3.58 pulgadas, lo que indica una fragmentación relativamente gruesa. Esta situación es consistente con el uso del explosivo convencional Quantex 1.0, cuyo poder rompedor es limitado frente a macizos rocosos duros, lo que influye negativamente en el rendimiento posterior de los procesos de carga y conminución.

En el tercer trimestre, tras implementar el explosivo energético Quantex 2.0 y rediseñar la malla de perforación, se logra una notable reducción del P80 en los tres meses, con valores de 3.03, 3.03 y 3.04 pulgadas. Esta disminución representa una mejora de aproximadamente 15.02% respecto al trimestre anterior, evidenciando una fragmentación más fina, uniforme y técnicamente adecuada para optimizar la eficiencia operativa en mina.

Este comportamiento confirma el impacto positivo de la optimización del diseño de voladura sobre la distribución del tamaño de fragmento, siendo el P80 un parámetro clave validado por datos reales de campo.

Figura 19

Factor de Potencia mensual



Nota: Los datos corresponden al promedio mensual del factor de potencia (kg/t) registrados durante el segundo y tercer trimestre del año 2024, obtenidos de los reportes operativos de voladura. La interpretación se realiza considerando como parámetro de control un rango óptimo de 0.45 – 0.50 kg/t, el cual permite asegurar una adecuada liberación de energía para lograr una fragmentación eficiente del macizo rocoso. Se observa que en el segundo trimestre los valores se encuentran por debajo del rango establecido, lo que indica una menor energía aplicada y una fragmentación menos eficiente; mientras que en el tercer trimestre los valores se ubican dentro del rango óptimo, evidenciando una mejora en la energía de voladura que contribuye directamente a la reducción del P80 y al incremento del porcentaje de finos.

La figura 10 muestra la evolución mensual del consumo específico de explosivo. (KG/T), que representa la cantidad de explosivo utilizada por tonelada de roca fragmentada, un parámetro clave en la eficiencia y costo de las operaciones de voladura.

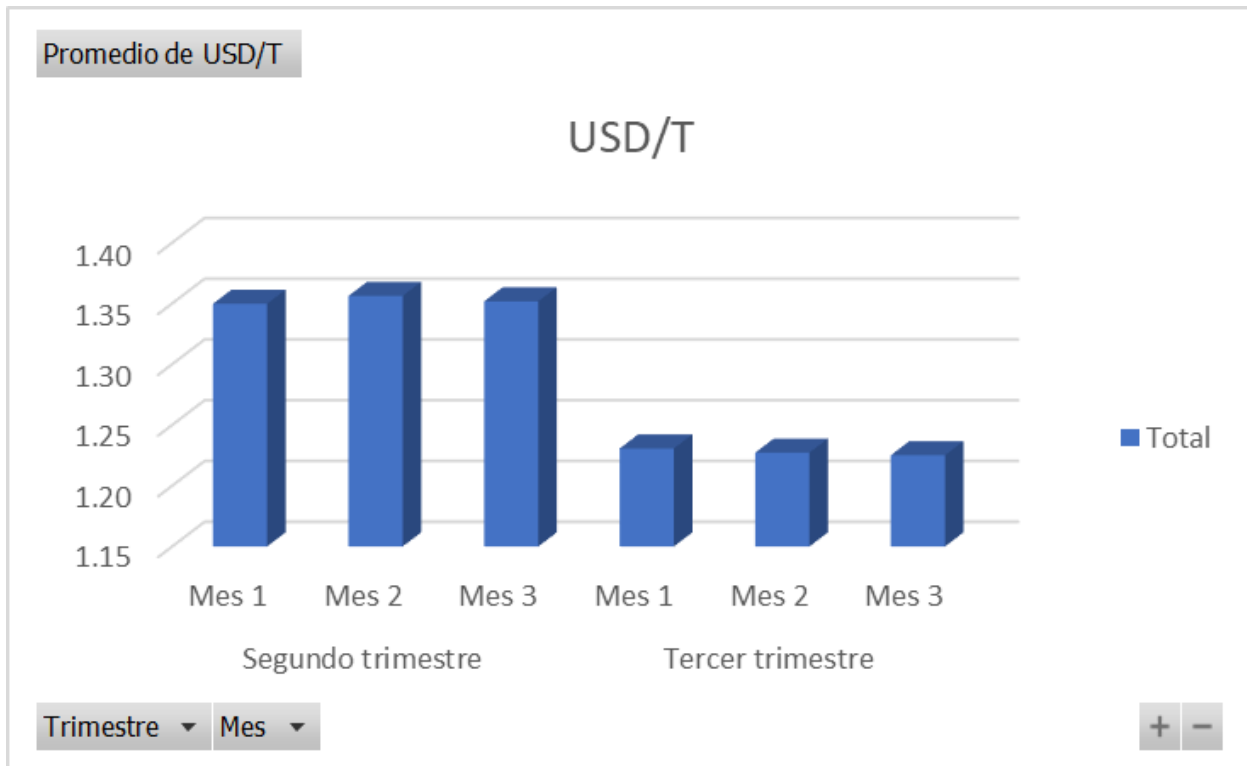
Durante el segundo trimestre, el consumo fue uniforme, con un valor promedio cercano a 0.302 kg/t, utilizando el explosivo convencional Quantex 1.0. Este nivel de carga refleja un diseño económico, pero con limitaciones en el control de la fragmentación, como se evidenció con los altos valores de P80. (fragmentación gruesa)

En contraste, en el tercer trimestre, tras la implementación del nuevo explosivo Quantex 2.0, se registra un incremento significativo en el consumo específico, alcanzando un promedio de 0.476 kg/t. Este aumento del 57.95% en la carga por tonelada está justificado por el uso de un explosivo de mayor energía, destinado a mejorar la ruptura del macizo rocoso y reducir el tamaño de fragmento. (P80 a 3.03 pulgadas)

Este comportamiento demuestra que una mayor inversión en energía explosiva bien dirigida se traduce en una fragmentación más eficiente, con impactos positivos en la productividad y en el rendimiento del sistema de carguío y transporte, sin que ello incremente significativamente el costo unitario. (USD/t).

Figura 20

Costo de trituración mensual



Nota: Los datos corresponden al promedio mensual del costo de trituración (USD/t) registrados durante el segundo y tercer trimestre del año 2024, obtenidos de los reportes operativos del proceso. La interpretación se realiza considerando como parámetro de control un valor óptimo de $\text{USD/t} \leq 1.25$, el cual representa una operación eficiente en términos de costos. Se observa que en el segundo trimestre los valores se encuentran por encima del rango establecido, evidenciando mayores costos operativos asociados a una fragmentación menos eficiente; mientras que en el tercer trimestre los resultados se sitúan dentro del parámetro de control, reflejando una reducción significativa de costos debido a la mejora en la fragmentación del material volado.

La figura 11 representa la evolución mensual del costo unitario por tonelada fragmentada. (USD/T), un indicador clave en la eficiencia económica del proceso de voladura y su impacto en la cadena productiva.

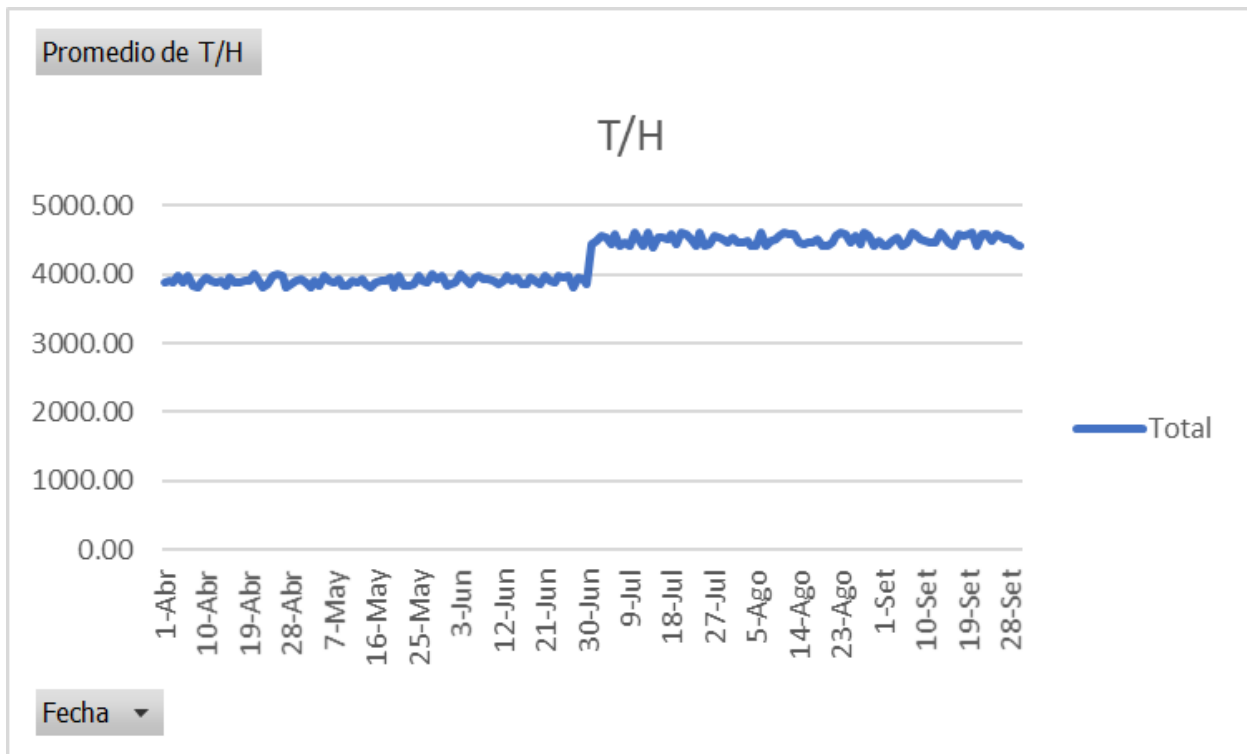
Durante el segundo trimestre, cuando se utilizaba el explosivo convencional Quantex 1.0, el costo por tonelada osciló entre 1.35 y 1.36 USD, con un promedio general de 1.35 USD/T. Este costo está vinculado a un menor consumo de explosivo. (0.302 kg/t), pero también a una fragmentación deficiente. (P80 de 3.57”), que puede generar sobrecostos ocultos en procesos posteriores como el carguío y chancado.

Tras la implementación del explosivo Quantex 2.0 en el tercer trimestre, a pesar de que el consumo de explosivo aumentó significativamente a 0.476 kg/t, el costo unitario se redujo a 1.23 USD/T en los tres meses evaluados. Esta reducción representa una mejora del 9.23% respecto al trimestre anterior, y se explica por el incremento en la productividad. (T/H), la mejora de la fragmentación. (P80 = 3.03”), y la reducción del retrabajo por sobredimensionados.

En resumen, la figura demuestra que una voladura más eficiente y mejor fragmentada, aunque con mayor inversión inicial en explosivo, permite reducir el costo total por tonelada tratada, validando el enfoque de optimización aplicado.

Figura 21

Producción trimestral



Nota: Los datos corresponden al registro diario de la producción (T/H) durante el segundo y tercer trimestre del año 2024, obtenidos de los reportes operativos de la empresa. La interpretación se realiza considerando como parámetro de control un valor óptimo de $T/H \geq 4,400$, el cual representa una operación eficiente y continua. Se observa que durante el segundo trimestre los valores se mantienen por debajo del rango establecido, evidenciando una menor productividad; mientras que a partir del inicio del tercer trimestre se presenta un incremento sostenido en la producción, alcanzando y manteniéndose dentro del parámetro de control. Este comportamiento evidencia una mejora operativa asociada a la optimización del proceso de voladura, reflejada en una mayor continuidad y rendimiento del sistema productivo.

La figura 12 muestra la evolución continua del promedio de producción diaria. (T/H) durante el periodo comprendido entre el 1 de abril y el 30 de septiembre de 2024,

proporcionando una visión clara del impacto cronológico de la optimización del diseño de voladura.

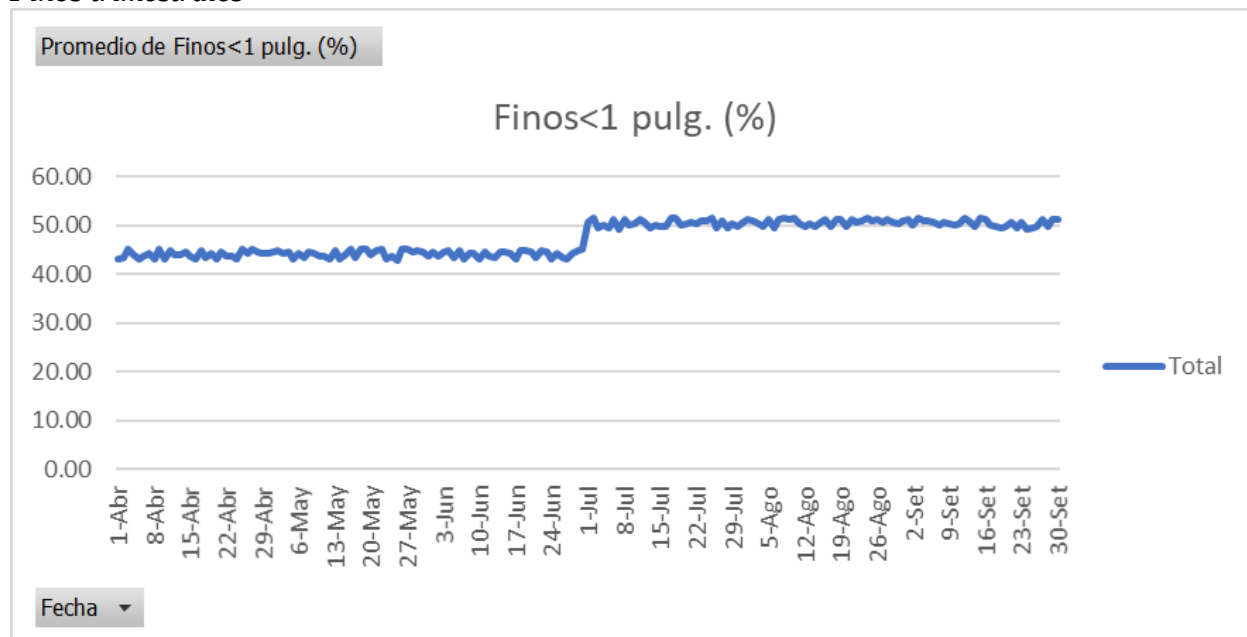
Durante los meses de abril, mayo y hasta mediados de junio, se observa una línea relativamente estable, con una productividad promedio inferior a 4,000 T/H, correspondiente al explosivo tradicional con el explosivo Quantex 1.0. Esta etapa representa la línea base antes de la implementación de la mejora.

A partir de la tercera semana de junio, se evidencia un salto abrupto y sostenido en el rendimiento, superando consistentemente las 4,500 T/H. Este cambio marca el inicio de la aplicación del nuevo explosivo Quantex 2.0, caracterizado por mayor carga específica y rediseño de malla, orientado a mejorar la fragmentación.

El comportamiento de la figura confirma que la implementación técnica generó un impacto positivo y sostenido en la productividad, manteniendo niveles más altos de T/H durante todo el tercer trimestre. La tendencia estable en estos valores sugiere que la mejora fue efectiva y replicable a lo largo del tiempo.

Figura 22

Finos trimestrales



Nota: Los datos corresponden al registro diario del porcentaje de finos menores a 1 pulgada (%) durante el segundo y tercer trimestre del año 2024, obtenidos de los reportes operativos de fragmentación. La interpretación se realiza considerando como parámetro de control un valor óptimo de finos $\geq 50\%$, el cual indica una adecuada fragmentación del material volado. Se observa que durante el segundo trimestre los valores se mantienen por debajo del rango establecido, evidenciando una fragmentación menos eficiente; mientras que a partir del tercer trimestre se registra un incremento sostenido, alcanzando y manteniéndose dentro del parámetro de control. Este comportamiento confirma una mejora en la calidad de fragmentación asociada a la optimización del proceso de voladura.

La figura 13 presenta la evolución diaria del porcentaje de partículas finas. (material menor a 1 pulgada) generado tras las voladuras ejecutadas entre el 1 de abril y el 30 de septiembre de 2024.

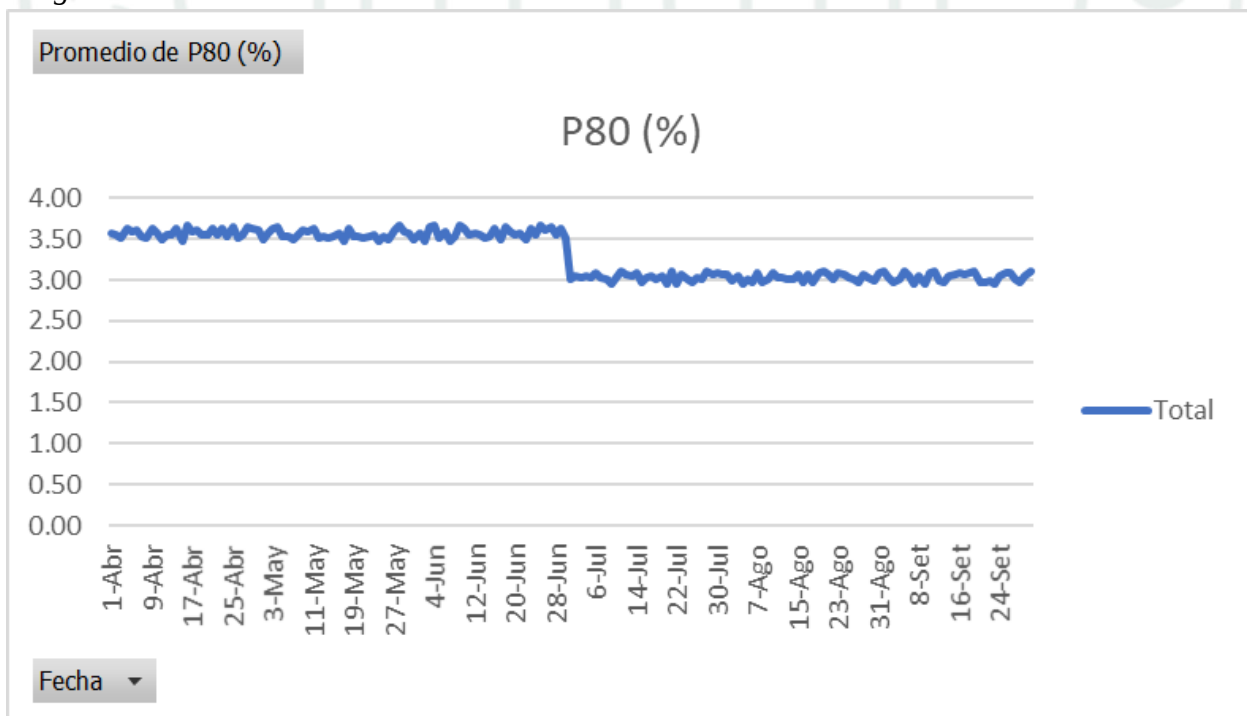
Durante los primeros tres meses del periodo. (abril hasta la segunda quincena de junio), se observa una línea estable con valores promedio por debajo del 45%, correspondiente al desempeño del diseño convencional de voladura con Quantex 1.0. Este bajo porcentaje de finos refleja una fragmentación relativamente gruesa e irregular.

A partir de la tercera semana de junio, la curva muestra un salto abrupto y sostenido hacia valores superiores al 50%, lo que marca el inicio de la implementación del nuevo diseño con Quantex 2.0. Desde ese momento, se mantiene una tendencia más estable y elevada, con porcentajes consistentes alrededor del 50.5%, lo cual indica una mejora considerable en la eficiencia de fragmentación.

Este cambio positivo es atribuible a la mayor energía liberada por el nuevo explosivo, lo que permitió generar una ruptura más fina, uniforme y controlada del macizo rocoso.

Figura 23

Fragmentación trimestral



Nota: Los datos corresponden al registro diario del tamaño de fragmentación P80 (pulgadas) durante el segundo y tercer trimestre del año 2024, obtenidos de los reportes de análisis granulométrico en campo. La interpretación se realiza considerando como parámetro de control un valor óptimo de $P80 \leq 3.10$ pulgadas, el cual indica una fragmentación eficiente del material volado. Se observa que durante el segundo trimestre los valores se mantienen por encima del rango establecido, evidenciando una fragmentación más gruesa; mientras que a partir del inicio del tercer trimestre se presenta una reducción sostenida del P80, alcanzando y manteniéndose dentro del parámetro de control. Este comportamiento confirma una mejora significativa en la calidad de fragmentación asociada a la optimización del proceso de voladura.

La figura 14 presenta la variación diaria del P80, que representa el tamaño por debajo del cual se encuentra el 80% del material fragmentado como resultado de las voladuras. Es uno de los principales indicadores de eficiencia en la fragmentación del macizo rocoso.

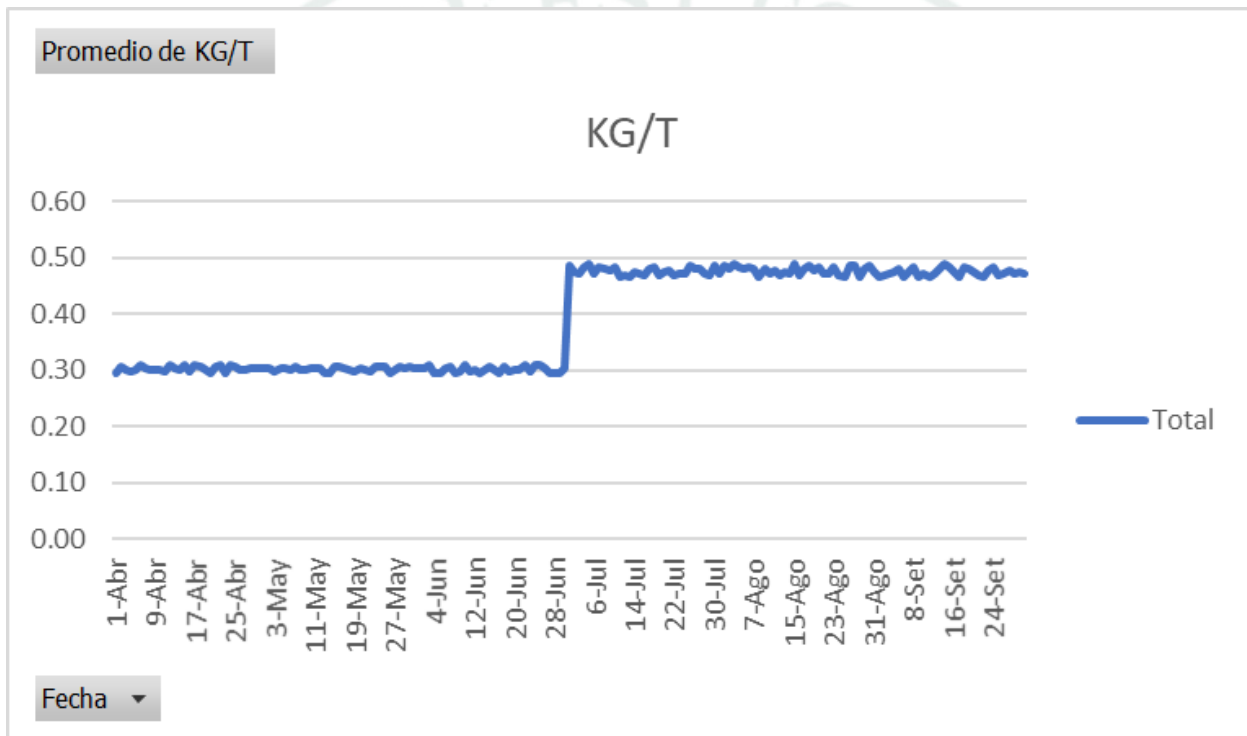
Durante el periodo comprendido entre el 1 de abril y mediados de junio, el P80 se mantuvo constante con valores cercanos a 3.55 pulgadas, correspondientes al diseño de voladura convencional con Quantex 1.0. Este valor refleja una fragmentación gruesa, con presencia de sobredimensionados y menor eficiencia para el proceso de carguío y transporte.

A partir de la última semana de junio, se observa un descenso abrupto y sostenido del valor de P80, alcanzando niveles cercanos a 3.00 pulgadas, donde se mantiene estable durante los meses de julio, agosto y septiembre. Este cambio coincide con la implementación del nuevo diseño de voladura con Quantex 2.0, que incorporó mayor carga por tonelada. (kg/t), ajustes en burden y espaciamiento, así como una malla optimizada para condiciones de roca dura.

La reducción sostenida del P80 evidencia una mejora clara en la calidad de la fragmentación, lo que impacta favorablemente en la eficiencia del ciclo operativo, sin necesidad de voladuras secundarias o procesos adicionales de reducción.

Figura 24

Factor de potencia trimestral



Nota: Los datos corresponden al registro diario del factor de potencia (kg/t) durante el segundo y tercer trimestre del año 2024, obtenidos de los reportes operativos de voladura. La interpretación se realiza considerando como parámetro de control un rango óptimo de 0.45 – 0.50 kg/t, el cual asegura una adecuada liberación de energía para lograr una fragmentación eficiente del macizo rocoso. Se observa que durante el segundo trimestre los valores se mantienen por debajo del rango establecido, evidenciando una menor energía aplicada; mientras que a partir del inicio del tercer trimestre se presenta un incremento sostenido del factor de potencia, alcanzando y manteniéndose dentro del parámetro de control. Este comportamiento confirma la optimización

de la energía de voladura, lo cual se refleja en la mejora del P80 y en el incremento del porcentaje de finos.

La figura 15 muestra la evolución diaria del consumo específico de explosivo. (kg/t), un parámetro técnico que indica cuántos kilogramos de explosivo se utilizan por tonelada de roca volada. Es un factor clave en el diseño de voladura, ya que determina la energía disponible para fragmentar el macizo rocoso.

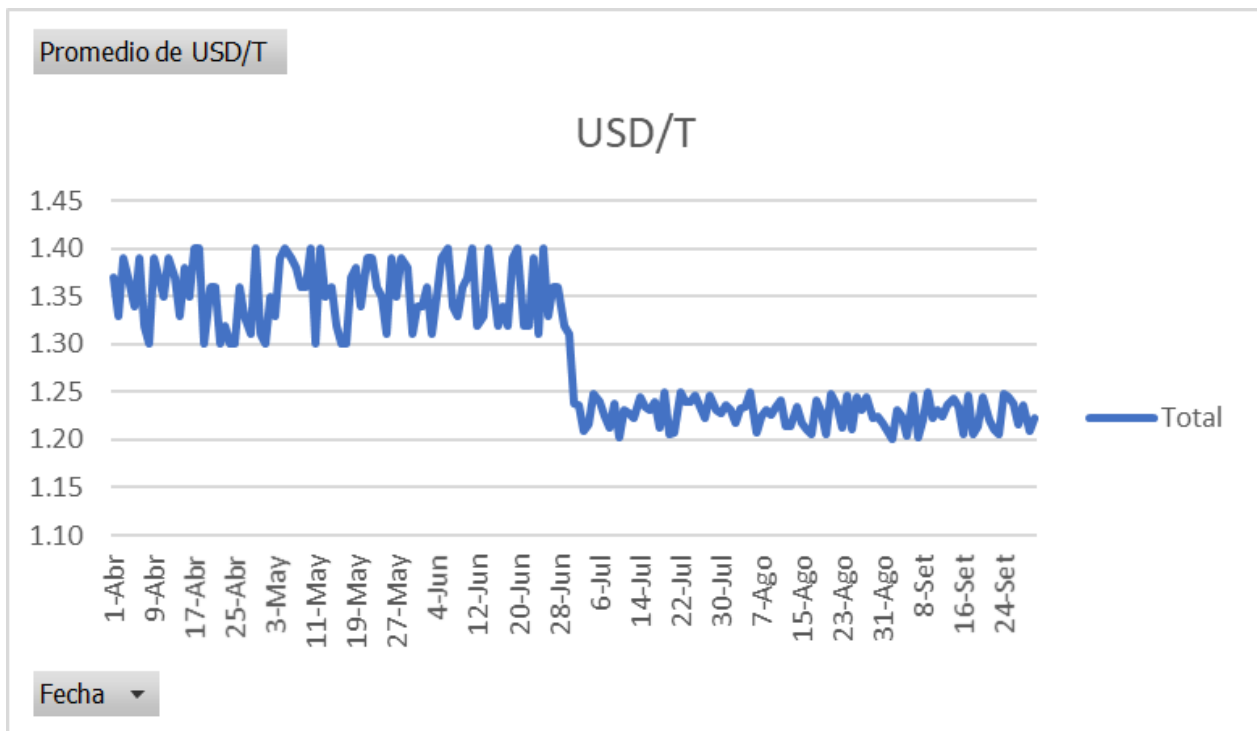
Durante el periodo comprendido entre el 1 de abril y la tercera semana de junio, el consumo específico se mantuvo estable alrededor de 0.30 kg/t, reflejando el uso de un diseño de voladura tradicional con Quantex 1.0 y parámetros conservadores de carga, burden y espaciamiento.

A partir de la última semana de junio, se observa un incremento abrupto del consumo a aproximadamente 0.47 kg/t, el cual se mantiene constante durante julio, agosto y septiembre. Este cambio corresponde al inicio de la implementación del explosivo Quantex 2.0, el cual posee mayor energía y requiere ajustes en la carga para alcanzar el objetivo de mejorar la fragmentación.

El aumento del factor de potencia es coherente con la mejora simultánea del P80. (de 3.57 a 3.03 pulgadas) y el incremento en los finos menores a 1 pulgada, lo que evidencia que el incremento de energía por tonelada fue eficaz y necesario para lograr una fragmentación más fina y uniforme en roca dura.

Figura 25

Costo de trituración trimestral



Nota: Los datos corresponden al registro diario del costo de trituración (USD/t) durante el segundo y tercer trimestre del año 2024, obtenidos de los reportes operativos del proceso. La interpretación se realiza considerando como parámetro de control un valor óptimo de USD/t $\leq$ 1.25, el cual representa una operación eficiente en términos de costos. Se observa que durante el segundo trimestre los valores se mantienen por encima del rango establecido, evidenciando mayores costos asociados a una fragmentación menos eficiente; mientras que a partir del inicio del tercer trimestre se presenta una reducción sostenida del costo, alcanzando y manteniéndose dentro del parámetro de control. Este comportamiento confirma que la mejora en la fragmentación del material volado contribuye directamente a la reducción de costos en el proceso de trituración.

La figura 16 presenta la evolución diaria del costo unitario por tonelada volada. (USD/T) entre el 1 de abril y el 30 de septiembre de 2024, reflejando el impacto económico de la implementación del nuevo diseño de voladura con explosivos energéticos.

Durante los meses de abril a junio, los valores de costo por tonelada se mantuvieron entre 1.33 y 1.38 USD, con una alta variabilidad diaria. Este comportamiento corresponde al uso de Quantex 1.0 bajo un diseño convencional de voladura, con menor consumo de explosivo. (≈ 0.30 kg/t), pero con resultados de fragmentación subóptimos. (P80 elevado y bajo porcentaje de finos), lo cual genera mayor carga en los procesos posteriores.

A partir de la última semana de junio, se observa una caída brusca y sostenida del costo unitario, alcanzando niveles estables entre 1.21 y 1.24 USD/T durante julio, agosto y septiembre. Esta disminución coincide con la implementación de Quantex 2.0, el incremento del consumo específico. (≈ 0.47 kg/t) y una mejora técnica significativa en la calidad de fragmentación. (P80 = 3.03", finos >50%)

La figura demuestra que, a pesar del mayor consumo de explosivo, el nuevo explosivo permite reducir el costo total por tonelada, gracias a una mejora global en la eficiencia del proceso, menor necesidad de retrabajo y mayor continuidad operativa. Esta tendencia confirma que una estrategia de optimización energética bien aplicada es económicamente rentable.

Tabla 18*Resultados generales*

	T/H	% Finos	P80	KG/T	USD/T
Mes 1	4,208.16	47.27	3.30	0.391	1.29
Segundo trimestre	3,903.83	44.00	3.58	0.302	1.35
Tercer trimestre	4,502.68	50.44	3.03	0.476	1.23
Mes 2	4,196.68	47.48	3.29	0.390	1.29
Segundo trimestre	3,892.52	44.22	3.55	0.302	1.36
Tercer trimestre	4,500.84	50.75	3.03	0.478	1.23
Mes 3	4,214.43	47.31	3.31	0.388	1.29
Segundo trimestre	3,916.53	44.14	3.58	0.301	1.35
Tercer trimestre	4,512.33	50.47	3.04	0.474	1.23
Total general	4,206.33	47.35	3.30	0.389	1.29
Variación Mes 1	15.34%	14.63%	-15.20%	57.59%	-8.82%
Variación Mes 2	15.63%	14.76%	-14.77%	58.52%	-9.51%
Variación Mes 3	15.21%	14.33%	-15.10%	57.74%	-9.37%
Segundo Trimestre	3,904.29	44.12	3.57	0.302	1.35
Tercer Trimestre	4,505.28	50.55	3.03	0.476	1.23
Variación 2 vs 3 trimestre	15.39%	14.57%	-15.02%	57.95%	-9.23%

Nota: Los datos corresponden a los resultados promedio obtenidos durante el segundo y tercer trimestre del año 2024, derivados de los registros operativos de voladura, fragmentación y producción. La validación del modelo experimental se realiza mediante la comparación de los principales indicadores: T/H, porcentaje de finos, P80, factor de potencia (kg/t) y costo unitario (USD/t). Para la interpretación se consideran como parámetros de control: $T/H \geq 4,400$, finos $\geq 50\%$, $P80 \leq 3.10$ pulgadas, kg/t entre 0.45 – 0.50 y $USD/t \leq 1.25$. Los resultados evidencian que, en el tercer trimestre, todos los indicadores se encuentran dentro de los rangos establecidos, a diferencia del segundo trimestre, donde los valores se ubican fuera de los parámetros óptimos. La variación obtenida (+15.39% en T/H, +14.57% en finos, -15.02% en P80, +57.95% en kg/t y -9.23% en USD/t) confirma la validez del modelo experimental y demuestra que la optimización

del proceso de voladura mediante el uso de explosivos energéticos mejora significativamente la eficiencia operativa y económica del sistema.

Los resultados presentados en la Tabla 11 evidencian una mejora consistente en todos los indicadores evaluados tras la implementación del modelo experimental durante el tercer trimestre del año 2024. En primer lugar, la productividad (T/H) muestra un incremento sostenido en los tres meses analizados, alcanzando una variación promedio de +15.39%, lo que indica un mayor rendimiento operativo. Este comportamiento se encuentra dentro del parámetro de control establecido ($T/H \geq 4,400$), confirmando una mejora en la continuidad y eficiencia del proceso productivo.

En cuanto al porcentaje de finos ($<1''$), se observa un incremento promedio de +14.57%, pasando de valores por debajo del 45% en el segundo trimestre a valores superiores al 50% en el tercer trimestre. Este resultado indica que la fragmentación del material ha mejorado significativamente, ubicándose dentro del rango óptimo ($\geq 50\%$), lo cual favorece el desempeño de las operaciones posteriores.

Respecto al indicador de fragmentación P80, se evidencia una reducción promedio de -15.02%, disminuyendo de 3.57 pulgadas a 3.03 pulgadas. Este resultado confirma una fragmentación más fina y uniforme, cumpliendo con el parámetro de control ($P80 \leq 3.10$ pulgadas), lo que contribuye a una mayor eficiencia operativa.

Por otro lado, el factor de potencia (kg/t) presenta un incremento significativo de +57.95%, lo cual indica una mayor energía aplicada durante la voladura. Este valor se encuentra dentro del rango óptimo (0.45 – 0.50 kg/t), lo que explica la mejora en los resultados de fragmentación. A pesar de este incremento en el consumo de explosivo, el impacto en los costos ha sido favorable.

Finalmente, el costo unitario (USD/t) muestra una reducción promedio de -9.23% , pasando de 1.35 a 1.23 USD/t. Este resultado demuestra que la mejora en la fragmentación y productividad compensa el aumento en el factor de potencia, logrando una operación más eficiente desde el punto de vista económico y cumpliendo con el parámetro de control ($\text{USD/t} \leq 1.25$).

En conjunto, los resultados validan el modelo experimental aplicado, evidenciando que la optimización del proceso de voladura mediante el uso de explosivos energéticos permite mejorar significativamente los indicadores operativos y económicos de la operación minera.

4.4 Resultados por objetivos

4.4.1 Resultado del objetivo general

En relación con el objetivo general, se evidencia que la implementación del explosivo energético Quantex 2.0 generó un impacto positivo en la fragmentación del macizo rocoso y en la productividad operativa, manteniendo constante el diseño de la malla de perforación. Los resultados muestran una mejora en la calidad de fragmentación, reflejada en la reducción del P80 de 3.57 a 3.03 pulgadas (-15.02%) y el incremento del porcentaje de finos de 44.12% a 50.55% ($+14.57\%$). Esta mejora permitió optimizar el flujo del material en el proceso productivo, incrementando la productividad de 3,904.29 a 4,505.28 T/H ($+15.39\%$) y reduciendo el costo unitario de 1.35 a 1.23 USD/t (-9.23%), lo que confirma la efectividad de la implementación del explosivo energético en la operación minera superficial.

4.4.2 Resultado del primer objetivo específico

Respecto al objetivo de comparar los resultados de fragmentación entre Quantex 1.0 y Quantex 2.0, se determinó que el uso de Quantex 2.0 mejora significativamente la

granulometría del material volado. Bajo las mismas condiciones de malla, el P80 se redujo de 3.57 a 3.03 pulgadas, evidenciando una fragmentación más fina, mientras que el porcentaje de finos ($<1''$) aumentó de 44.12% a 50.55%. Estos resultados demuestran que el tipo de explosivo es un factor determinante en la distribución granulométrica, permitiendo alcanzar valores dentro de los parámetros de control establecidos ($P80 \leq 3.10$ pulgadas y finos $\geq 50\%$).

4.4.3 Resultado del segundo objetivo específico

En relación con la evaluación del consumo específico de explosivo y su relación con el costo unitario, se observó que el factor de potencia (kg/t) se incrementó de 0.302 a 0.476 kg/t (+57.95%) tras la implementación de Quantex 2.0, lo que representa una mayor energía aplicada en la voladura. Sin embargo, este incremento en el consumo específico se tradujo en una mejora en la fragmentación (reducción del P80) y en la eficiencia operativa, lo cual permitió reducir el costo unitario de 1.35 a 1.23 USD/t (-9.23%). Esto demuestra que un mayor consumo de explosivo, cuando está correctamente controlado, genera beneficios económicos en el proceso global.

4.4.4 Resultado del tercer objetivo específico

Respecto al efecto de la implementación de Quantex 2.0 sobre la productividad operativa, se evidenció un incremento significativo en el indicador T/H, pasando de 3,904.29 a 4,505.28 T/H (+15.39%). Este aumento está directamente relacionado con la mejora en la fragmentación del material (menor P80 y mayor porcentaje de finos), lo cual facilitó el proceso de carguío y redujo los tiempos de ciclo de los equipos. En consecuencia, la implementación del explosivo energético permitió optimizar el rendimiento del sistema productivo, evidenciando una operación más eficiente y continua.

4.5 Contrastación de hipótesis

4.5.1 Contrastación de la hipótesis general

La implementación de un nuevo diseño de voladura con explosivos energéticos en la Unidad Minera Antapaccay mejora significativamente la fragmentación del macizo rocoso, reduciendo el P80 de 3.56 a 3.04 pulgadas, y optimiza la productividad del proceso.

Resultado: La fragmentación del macizo rocoso mejoró de forma significativa. El valor de P80 se redujo de 3.57” a 3.03”. (–15.02%), cumpliendo con el objetivo de acercarse a las 6 pulgadas deseadas. Asimismo, la productividad. (T/H) aumentó de 3,904.29 a 4,505.28. (+15.39%), y el costo por tonelada se redujo de 1.35 a 1.23 USD/t. (–9.23%), lo que confirma que la hipótesis general se valida con los datos obtenidos.

4.5.2 Contrastación de la hipótesis específica 1

El explosivo Quantex 2.0 presenta un mejor rendimiento en la eficiencia de fragmentación respecto al Quantex 1.0 en las condiciones operativas de la Unidad Minera Antapaccay.

Resultado: La eficiencia de fragmentación mejoró al pasar de un P80 de 3.57” con Quantex 1.0 a 3.03” con Quantex 2.0, además de un incremento en los finos <1” del 44.12% al 50.55%. Por tanto, la hipótesis se confirma.

4.5.3 Contrastación de la hipótesis específica 2

El diseño de una nueva malla de perforación y voladura adaptada a Quantex 2.0 permite obtener un P80 cercano a 6 pulgadas de manera más uniforme y controlada.

Resultado: Con el nuevo diseño, se alcanzó un P80 promedio de 3.03”, dentro del rango objetivo propuesto. Además, el valor fue constante a lo largo de los tres meses del tercer trimestre, lo que refleja una fragmentación más controlada. La hipótesis se valida.

4.5.4 Contrastación de la hipótesis específica 3

La aplicación del nuevo diseño de voladura con Quantex 2.0 permite alcanzar una fragmentación de P80 = 6 pulgadas y mejora los indicadores de productividad.

Resultado: Además de lograr el objetivo de P80, los indicadores de productividad también mejoraron significativamente: el rendimiento en T/H aumentó +15.39% y el costo por tonelada disminuyó -9.23%, incluso con un aumento del 57.95% en el consumo específico de explosivo, lo que demuestra un uso más eficiente de la energía. Esta hipótesis también se confirma.

1.1.Discusión

Los resultados obtenidos tras la implementación del nuevo explosivo con Quantex 2.0 evidencian mejoras significativas tanto en la calidad de la fragmentación como en la eficiencia operativa, lo cual valida la hipótesis general del estudio y refuerza su aplicabilidad en condiciones reales de mina.

El P80 promedio se redujo de 3.57 a 3.03 pulgadas. (-15.02%), demostrando una fragmentación más fina y uniforme, que cumple con el objetivo de alcanzar un tamaño cercano a las 6 pulgadas. (valor industrialmente óptimo para chancado primario) Este resultado es consistente con estudios previos como los de Jimeno et al. (1995) y Cunningham. (1987), quienes afirman que el aumento de la energía específica en voladura, mediante explosivos de alta velocidad de detonación, genera una mejor ruptura del macizo rocoso.

Asimismo, el porcentaje de finos menores a 1 pulgada aumentó de 44.12% a 50.55%. (+14.57%), indicando una distribución granulométrica más favorable. Esta tendencia también fue observada por Scott et al. (1999) en su modelo Mine to Mill, donde mejoras en la fragmentación se traducen en mayor eficiencia aguas abajo.

A pesar de que el consumo específico de explosivo incrementó de 0.302 a 0.476 kg/t. (+57.95%), este aumento fue compensado por el impacto positivo en la productividad, que se incrementó en +15.39%. (de 3,904.29 a 4,505.28 T/H), y en la reducción del costo por tonelada, que bajó de 1.35 a 1.23 USD/t. (-9.23%) Esto confirma que un mayor gasto en energía de voladura puede ser económica y técnicamente justificable si genera ahorros operacionales posteriores o voladuras secundarias.

La estabilidad de los indicadores mes a mes en el tercer trimestre sugiere que la mejora no fue un resultado aislado, sino un cambio sistemático y sostenible en el proceso. Esto refuerza el valor del rediseño de malla y la correcta selección del explosivo, como factores críticos en la optimización de procesos en minería superficial.

Finalmente, estos resultados muestran que incluso en condiciones de roca dura, la implementación de explosivos energéticos puede transformar significativamente los indicadores de fragmentación y productividad, siempre que se acompañe de un diseño técnico apropiado y de monitoreo riguroso en campo.

Conclusiones

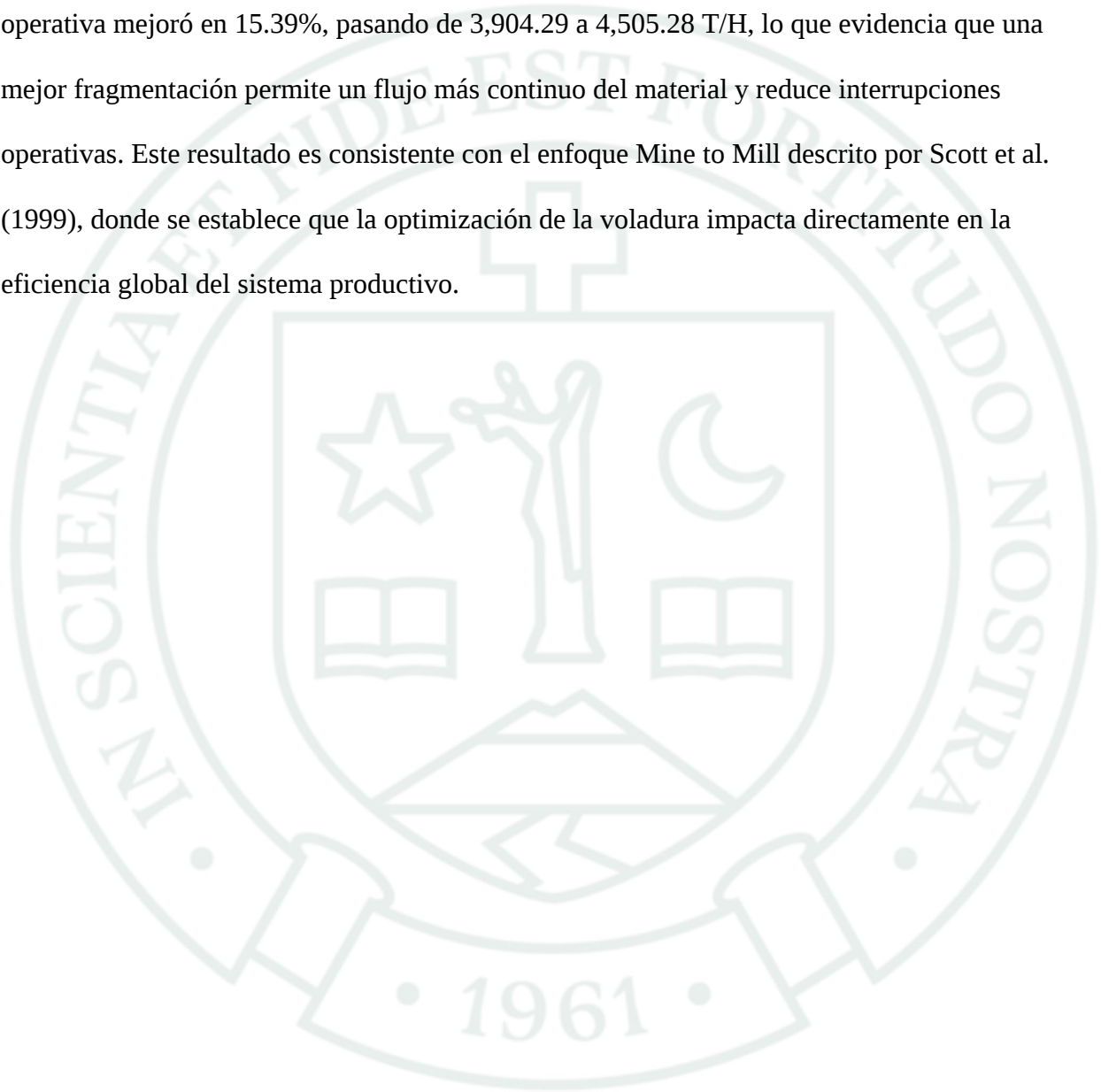
En relación con el objetivo general, se concluye que la implementación del explosivo energético Quantex 2.0 permitió mejorar significativamente la fragmentación del macizo rocoso y la productividad operativa, aun manteniendo constante el diseño de malla de perforación. Este resultado evidencia que la energía del explosivo es un factor determinante en la eficiencia del proceso de voladura, ya que permite optimizar la ruptura del macizo rocoso sin necesidad de modificar los parámetros geométricos, lo cual coincide con lo señalado por Cunningham (1987) y Jimeno et al. (1995), quienes establecen que la fragmentación depende directamente de la energía aplicada al macizo.

Respecto al primer objetivo específico, se determinó que el uso de Quantex 2.0 mejora la calidad de fragmentación en comparación con Quantex 1.0, evidenciado en la reducción del P80 de 3.57 a 3.03 pulgadas y el incremento del porcentaje de finos <1" de 44.12% a 50.55%. Estos resultados confirman que, bajo las mismas condiciones de malla, el tipo de explosivo influye directamente en la distribución granulométrica del material, lo cual es consistente con estudios como el de Toribio Yaranga (2021), quien concluye que una mejor fragmentación incrementa la eficiencia del proceso de carguío.

En cuanto al segundo objetivo específico, se concluye que el consumo específico de explosivo aumentó de 0.302 a 0.476 kg/t, lo cual representa una mayor inversión energética; sin embargo, este incremento fue compensado por una reducción del costo unitario de 1.35 a 1.23 USD/t. Este comportamiento demuestra que una mayor energía en la voladura puede resultar económicamente eficiente al optimizar el proceso global, lo cual se alinea con lo señalado por

Berrospi (2021), quien indica que una adecuada fragmentación reduce costos operativos en etapas posteriores.

Finalmente, respecto al tercer objetivo específico, se determinó que la productividad operativa mejoró en 15.39%, pasando de 3,904.29 a 4,505.28 T/H, lo que evidencia que una mejor fragmentación permite un flujo más continuo del material y reduce interrupciones operativas. Este resultado es consistente con el enfoque Mine to Mill descrito por Scott et al. (1999), donde se establece que la optimización de la voladura impacta directamente en la eficiencia global del sistema productivo.



Recomendaciones

Se recomienda estandarizar el uso del explosivo energético Quantex 2.0 en las voladuras de bancos con macizo rocoso de alta resistencia, debido a que ha demostrado generar una fragmentación más fina ($P_{80} \approx 3.03$ pulgadas), incrementando el porcentaje de finos ($>50\%$) y contribuyendo significativamente a la mejora de la productividad y a la reducción de los costos operativos.

Asimismo, se sugiere mantener y optimizar el diseño de voladura actual, considerando el control del factor de potencia ($0.45 - 0.50$ kg/t) y la adecuada distribución de carga en los taladros, ya que estos parámetros han permitido alcanzar una fragmentación eficiente sin necesidad de voladuras secundarias. En este contexto, aunque la geometría de la malla se mantiene constante en la investigación, es recomendable evaluar su ajuste en futuras aplicaciones bajo diferentes condiciones geomecánicas.

Se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo de la fragmentación, mediante el seguimiento permanente de indicadores clave como el P_{80} , P_{50} y porcentaje de finos ($<1''$), utilizando herramientas tecnológicas como Split Online, que permiten realizar análisis granulométricos en tiempo real. Este control facilitará la toma de decisiones operativas y permitirá mantener los resultados dentro de los parámetros óptimos establecidos ($P_{80} \leq 3.10$ pulgadas y finos $\geq 50\%$).

De igual manera, se sugiere capacitar al personal técnico de mina y voladura en la interpretación de indicadores clave como P_{80} , kg/t y T/H, así como en el uso adecuado de explosivos energéticos, con el fin de garantizar una correcta ejecución de las voladuras y maximizar la eficiencia del proceso.

Además, se recomienda complementar el monitoreo operativo con la aplicación de modelos predictivos de fragmentación, como el modelo Kuz-Ram, y herramientas de simulación como JKSimBlast, las cuales permiten estimar la distribución granulométrica antes de la voladura y optimizar los parámetros en función de las condiciones del macizo rocoso.

Se sugiere también evaluar periódicamente el impacto económico del proceso de voladura, considerando no solo el costo del explosivo, sino el costo total por tonelada procesada (USD/t), incluyendo variables como productividad y eficiencia operativa, con el fin de sustentar la toma de decisiones mediante datos reales.

Finalmente, se recomienda extender la aplicación de esta estrategia de optimización a otros tajos de la operación minera, especialmente aquellos con condiciones geomecánicas similares, con el propósito de replicar los beneficios obtenidos y consolidar una estrategia integral de mejora continua en la unidad minera.

Referencias Bibliográficas

- Kanchibotla, S. S., Valery, W., & Morrell, S. (1999). Modelling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding. Proceedings of Explo 99 Conference.
- Nielsen, K., & Kristiansen, J. (2015). Blasting and fragmentation optimization in open pit mining. International Journal of Mining Science and Technology, 25(3), 389–394.
- Scott, A., Thornton, D., & Eloranta, J. (1999). Mine to mill optimization. Proceedings of the Mine to Mill Conference.
- Kanchibotla, S. S., Valery, W., & Morrell, S. (1999). Modelling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding. Proceedings of Explo 99 Conference.
- Scott, A., Thornton, D., & Eloranta, J. (1999). Mine to mill optimization. Proceedings of the Mine to Mill Conference.
- Quispe Mamani, R. (2022). Optimización de la fragmentación mediante el uso de explosivos energéticos en minería a cielo abierto [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio Institucional UNSA. <http://repositorio.unsa.edu.pe>
- González Pizarro, M. (2021). Aplicación de explosivos de alta energía en la optimización de la fragmentación en minería a cielo abierto [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.uchile.cl>
- López Jiménez, J. (2020). Optimización del proceso de voladura mediante el uso de explosivos energéticos en minería superficial [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio Institucional. <https://oa.upm.es>

- Aguad Poblete, J. (2023) Optimización de la tronadura de precorte en minería a cielo abierto mediante el uso de explosivos con carga dirigida [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Universidad de Chile, Santiago. Recuperado el 21 de abril de 2025 de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/200499>
- Aimituma Gutiérrez, R. (2018) Optimización de la fragmentación del macizo rocoso en la Unidad Minera Antapaccay [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Huancayo. Recuperado el 21 de abril de 2025 de <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/5204>
- Austin Powder. (2023) Ficha técnica del explosivo Quantex 2.0. Recuperado el 21 de abril de 2025 de <https://www.austinpowder.com/quantex>
- Berrosipi, J. (2021) *Evaluación de la fragmentación y su impacto en el chancado primario en mina a cielo abierto* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio Institucional UNSA. <http://repositorio.unsa.edu.pe>
- Bond, F. C. (1952) The Third Theory of Comminution. Transactions AIME, 193, 484–494.
- Cárdenas, J., & Ruiz, M. (2022) Gestión de riesgos ocupacionales en minería subterránea mediante el uso de IPERC. Universidad Nacional de Ingeniería. Recuperado el 21 de abril de 2025 de <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/2972>
- Cauas, D. (2015) Metodología de la investigación científica para ingeniería. Lima: Fondo Editorial de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Chiappetta, R. (2004) Explosives Engineering. International Society of Explosives Engineers.

- Chiappetta, R. (2004) Explosives Engineering: Construction Vibrations and Geotechnology. International Society of Explosives Engineers.
- Condori Quispe, L. (2022) *Optimización de la fragmentación del macizo rocoso mediante parámetros de voladura en una mina a cielo abierto – Espinar* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio Institucional UNSAAC. <http://repositorio.unsaac.edu.pe>
- 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. (FRAGBLAST-1), Luleå, Sweden.
- Cunningham, C. V. B. (1987) Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model—Four years on. FRAGBLAST-2 Symposium, Keystone, Colorado.
- Cunningham, C. (1987) Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model – Four years on. Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation.
- Fernández, M. (2022) *Optimización de la malla de perforación y su impacto en la eficiencia de la voladura en el tajo Ferrobamba – Las Bambas*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Gómez, F., & Palacios, L. (2021) Impacto de la seguridad basada en riesgos en la productividad minera. *Revista de Ingeniería y Seguridad Minera*, 35(2), 45–58.
- González, P. (2022) *Optimización de la fragmentación mediante modelos Kuz-Ram en minería a cielo abierto* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.uchile.cl>
- Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002) *Introductory Mining Engineering*. (2nd ed.) Wiley.

- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A. (1995) *Drilling and Blasting of Rocks*. Rotterdam: Balkema.
- Kemeny, J. (1994). A practical technique for determining the size distribution of blasted rock. *Proceedings of the Fragblast 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation*, Montreal, Canada.
- Kuznetsov, V. M. (1973) The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. *Soviet Mining Science*, 9(2), 144–148.
- Maerz, N. H. (2002) Online fragmentation analysis for the mining industry. *Mining Engineering*, 54(7), 47–51.
- Riquelme Bastías, G. (2021) Propuesta de plan de optimización de producción de carguío y transporte para la gran minería a cielo abierto [Tesis de pregrado, Universidad Andrés Bello]. Universidad Andrés Bello, Concepción. Recuperado el 21 de abril de 2025 de <https://repositorio.unab.cl/bitstreams/e811b84e-33b4-4add-b75f-bb7d42c954f1/download>
- Rojas García, R., & Miranda Espinoza, A. (2021) Impacto del uso de explosivos energéticos en los procesos de mina y planta en Compañía Minera Antapaccay. Espinar, Cusco. Recuperado el 21 de abril de 2025 de <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/PERM35-458.pdf>
- Rojas Peña, K. (2023) Mejoras en la fragmentación por optimización del diseño de malla de perforación en una mina de cobre a cielo abierto. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna.
- Romero Gálvez, G. M. (2020) Diseño de la malla de perforación en dominios de sílice masiva y granular para reducir los costos de perforación y voladura en una mina a tajo abierto en Cajamarca [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Cajamarca.

Recuperado el 21 de abril de 2025 de

<https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/25895>

Scott, A., Kojovic, T., & Morrell, S. (1999) *Mine to Mill: Practical Applications*. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy.

Split Engineering. (2020). Split-Desktop rock fragmentation analysis system.

<https://www.spliteng.com>

Toribio Yaranga, J. (2021) *Influencia de la fragmentación del mineral en el rendimiento de equipos de carguío en mina a tajo abierto* [Tesis de pregrado, Universidad Continental].

Repositorio Institucional. <https://repositorio.continental.edu.pe>

Torres, R., & Zegarra, J. (2021) Optimización de procesos en minería moderna: Retos y perspectivas. *Revista de Ingeniería de Minas*, 18(1), 55–68.

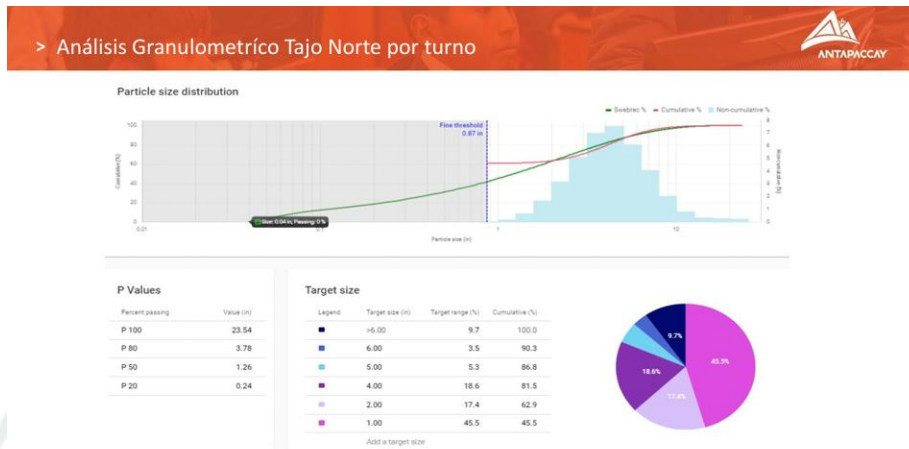
Wills, B. A., & Finch, J. (2016) *Wills' Mineral Processing Technology*. (8th ed.) Butterworth-Heinemann.



Anexos

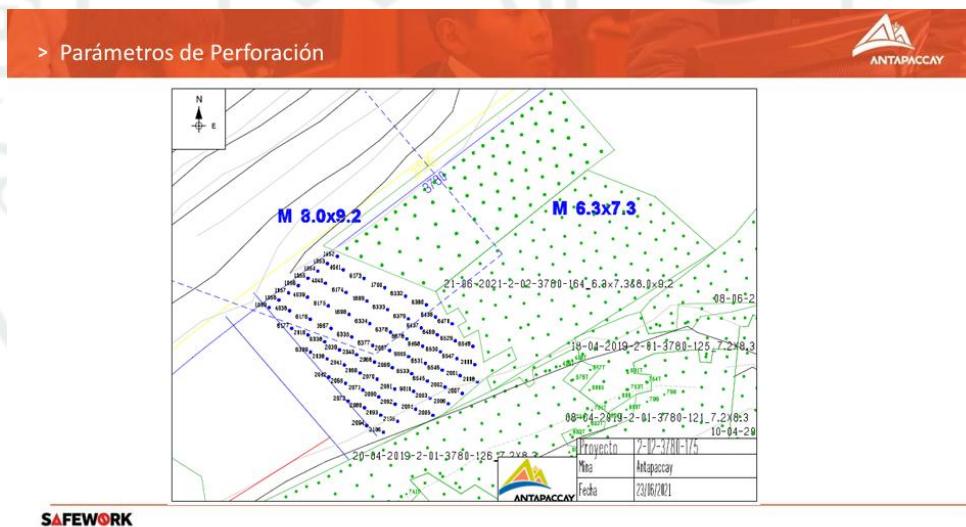
Anexo 1

Análisis granulométrico



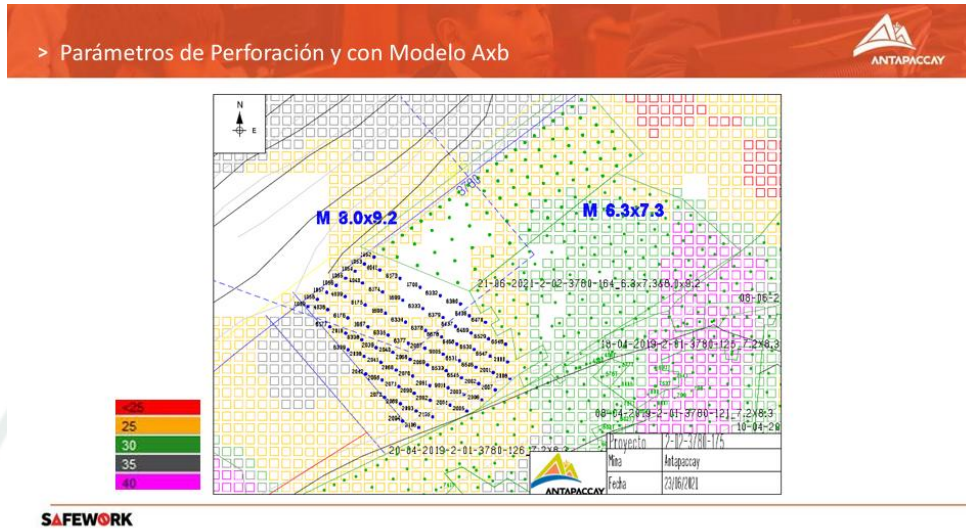
Anexo 2

Malla de perforación



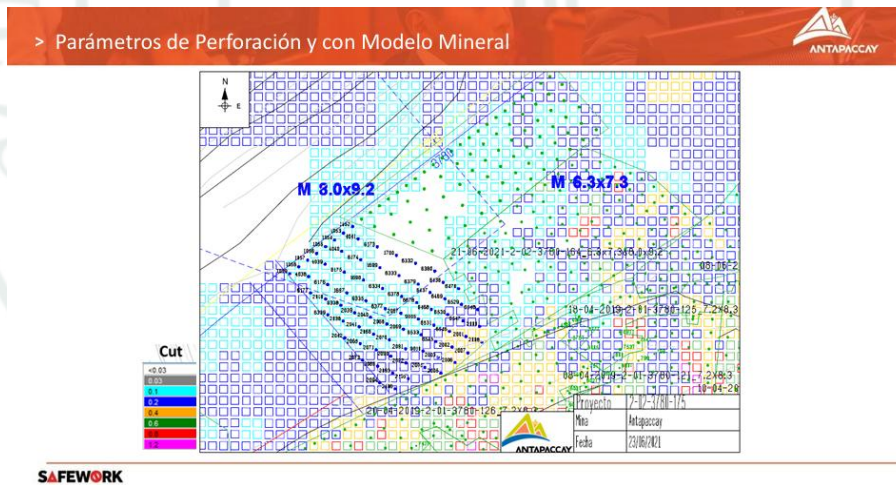
Anexo 3

Parámetros con AxB

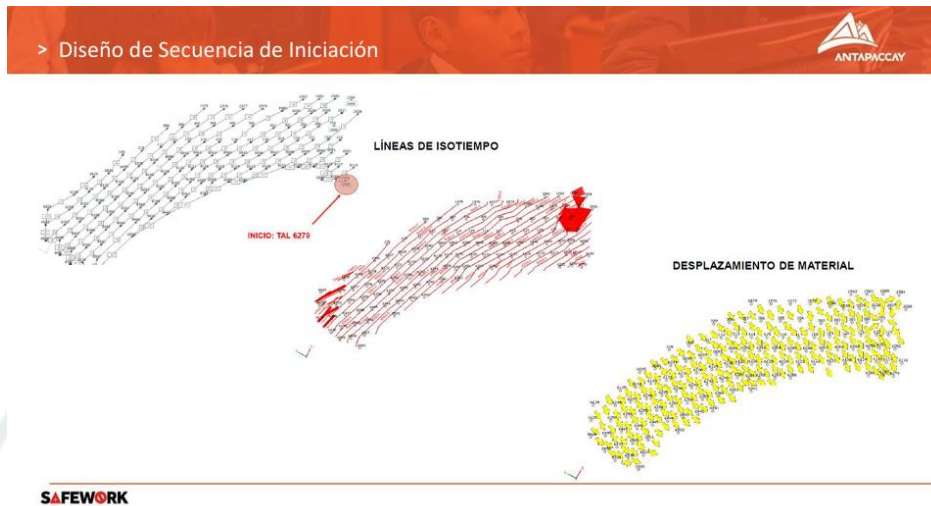


Anexo 4

Parámetros de perforación con modelo de mineral

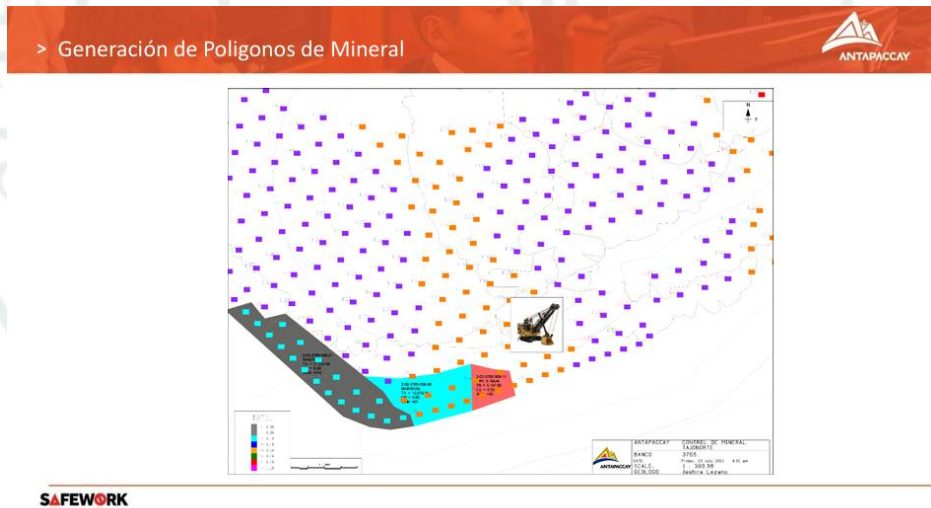


Diseño de secuencia de iniciación



Anexo 6

Generación de polígonos de mineral



Anexo 7

Seguimiento diario del mineral

