

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



Tesis

Optimización de la fragmentación en voladura para aumentar productividad de material
triturado en planta en la minera Magistral de Huaraz S.A.C, Abancay - 2024

Presentado por:

Harold Since Sanchez

Jhon Zanabria Rojas

Para optar el título de Ingeniero de Minas

Abancay, Perú

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

Optimización de la fragmentación en voladura para aumentar productividad de material triturado en planta en la minera Magistral de Huaraz S.A.C, Abancay – 2024

Presentado por **Harold Since Sánchez y Jhon Zanabria Rojas** para optar el título en Ingeniero de Minas

Sustentado y aprobado 11 de diciembre del 2025 ante el jurado evaluador:

Presidente:


Dr. Crisologo Conza Ancaypuro

Primer miembro:


MSc. Agustín Pérez Quispe

Segundo miembro:


Ing. Rosa Cruz Medina

Asesor:


Mtro. Dante Darío Sánchez Castillo



UNIVERSIDAD NACIONAL
MICAELA BASTIDAS
DE APURÍMAC

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA



25
AÑOS
MINAS DE PLATA

"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD **Nº 223-2025**

La Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, a través de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería declara que, la tesis titulada: **"OPTIMIZACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN EN VOLADURA PARA AUMENTAR PRODUCTIVIDAD DE MATERIAL TRITURADO EN PLANTA EN LA MINERA MAGISTRAL DE HUARAZ S.A.C, ABANCAY - 2024"**, Presentado por los bachilleres: **HAROLD SINCE SANCHEZ y JHON ZANABRIA ROJAS**; para optar el Título de **Ingeniero de Minas**; ha sido sometido a un mecanismo de evaluación y verificación de similitud, a través del Software Turnitin, siendo el índice de similitud **ACEPTABLE** de **(19%)** por lo que, cumple con los criterios de originalidad establecidos por la Universidad.

Abancay, 03 de septiembre del 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
[Firma]
Dra. Heymeraldy Enriquez
DIRECTORA DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA

C. c.
Archivo
REG. Nº 738

Av. Inca Garcilaso de la Vega S/N Tamburco, Abancay | (083) 636 050 | www.unamba.edu.pe



Agradecimiento

Agradecimiento a la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac y más aún a la carrera profesional de Ingeniería de Minas, institución que nos acogió en sus aulas y que a través de los docentes que nos compartieron sus conocimientos y experiencias, nos sirvieron para realizar nuestras prácticas profesionales como tal y enfrentar los desafíos suscitados en este proceso.



Dedicatoria

El presente informe está dedicado a nuestros padres y hermanos quienes son nuestra mayor motivación, por el apoyo sincero que nos brindan en todo momento y las ganas de superación que siempre nos inculcan.

A la universidad nacional Micaela Bastidas de Apurímac. Por ser el cimiento de nuestra formación profesional y por brindar las herramientas necesarias.



Optimización de la fragmentación en voladura para aumentar productividad de material
triturado en planta en la minera magistral de Huaraz S.A.C, Abancay - 2024

Línea de investigación: Minería, procesamiento de minerales

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
CAPÍTULO I	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.1 Descripción del problema	5
1.2 Enunciado del problema	5
1.2.1 Problema general	5
1.2.2 Problemas específicos	6
1.3 Justificación de la investigación	6
1.3.1 Justificación técnica	6
1.3.2 Justificación operacional	6
1.3.3 Justificación económica	7
1.3.4 Justificación social	7
1.3.5 Justificación en seguridad	7
1.3.6 Justificación ambiental	7
1.4 Ubicación y contextualización	8
1.4.1 Ubicación	8
1.4.2 Acceso	10
1.4.3 Topografía	10
1.4.4 Recursos naturales	10
1.4.5 Clima y vegetación	10
1.4.6 Geología regional	11
1.4.7 Geología local	12
1.4.8 Geología estructural	12
1.4.9 Geología económica	13
1.4.10 Litología	14
1.4.11 Contextualización	15
CAPÍTULO II	16
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	16
2.1 Objetivos de la investigación	16
2.1.1 Objetivo general	16
2.1.2 Objetivos específicos	16
2.2 Hipótesis de la investigación	16



2.2.1	Hipótesis general	16
2.2.2	Hipótesis específicas	17
2.3	Operacionalización de variables	17
2.3.1	Variable independiente	17
2.3.2	Variable dependiente	17
CAPÍTULO III		19
MARCO TEÓRICO		19
3.1	Antecedentes	19
3.1.1	Nacionales	19
3.1.2	Internacionales	20
3.2	Marco teórico.	21
3.2.1	Fragmentación del macizo rocoso	21
3.2.2	Diseño de malla de perforación y voladura	22
3.2.3	Productividad en el chancado primario	22
3.2.4	Eficiencia energética en la conminución	22
3.2.5	Tecnología de análisis de fragmentación (Split Desktop)	22
3.2.6	Modelo de optimización operacional	22
3.3	Marco conceptual	23
CAPÍTULO IV		25
METODOLOGÍA		25
4.1	Tipo y nivel de investigación	25
4.1.1	Tipo de investigación	25
4.1.2	Nivel de investigación	25
4.2	Diseño de investigación	25
4.3	Población y muestra	25
4.3.1	Población	25
4.3.2	Muestra	26
4.4	Procedimiento	26
4.4.1	Diagnóstico de la situación inicial	26
4.4.2	Identificación de problemas en el diseño de voladura	26
4.4.3	Rediseño de parámetros de voladura	27
4.4.4	Implementación y monitoreo de mejoras	27
4.4.5	Análisis comparativo y validación estadística	27
4.4.6	Descripción del proceso	27
4.5	Técnica e instrumentos	53
CAPÍTULO V		54
RESULTADOS Y DISCUSIONES		54
5.1	Análisis de resultados	54
5.2	Contrastación de hipótesis	78
5.3	Discusión	79
CAPÍTULO VI		80

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
6.1 Conclusiones	80
6.2 Recomendaciones	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
ANEXOS	84

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 — Distancias aproximadas de la ruta a la mina Magistral	10
Tabla 2 — Minerales de mina	14
Tabla 3 — Operacionalización de variables	18
Tabla 4 — Parámetros de diseño de veta cobre	29
Tabla 5 — Distribución de mano de obra por Cía.	31
Tabla 6 — Distribución de personal Ctta.	32
Tabla 7 — Distancia entre los taladros de la labor por m ²	37
Tabla 8 — Coeficiente o factor de roca	37
Tabla 9 — Cálculo del número de taladros en un frente 2.10 m x 2.40 m	38
Tabla 10 — Diámetro equivalente de un taladro vacío	42
Tabla 11 — Dimensión arranque	42
Tabla 12 — Profundidad	43
Tabla 13 — Burden	43
Tabla 14 — Auxiliares	44
Tabla 15 — Contorno	44
Tabla 16 — Taladros de piso	44
Tabla 17 — Taladros	45
Tabla 18 — Volumen	48
Tabla 19 — Factor de carga	48
Tabla 20 — Densidad lineal	49
Tabla 21 — Cantidad emulsión	49
Tabla 22 — Emulsión	50
Tabla 23 — Carga promedio	50
Tabla 24 — Emulsión por taladro	51
Tabla 25 — Carga por taladro	51
Tabla 26 — Parámetros del segundo trimestre	55
Tabla 27 — Parámetros del tercer trimestre	55
Tabla 28 — Descripción de indicadores	55
Tabla 29 — Parámetros abril 2024	56
Tabla 30 — Parámetros mayo 2024	58

Tabla 31 — Parámetros junio 2024	59
Tabla 32 — Parámetros julio 2024	62
Tabla 33 — Parámetros agosto 2024	63
Tabla 34 — Parámetros septiembre 2024	65
Tabla 35 — Validación del modelo experimental	77
Tabla 36 — Matriz de consistencia	85

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 — Ubicación de la mina Magistral	9
Figura 2 — Estándar de galería/crucero/by pass Sección 2.10m x 2.40m	35
Figura 3 — Estándar galería/crucero/by pass sección 2.40m x 2.40m	35
Figura 4 — Medidas y áreas de un frente 2.10 m x 2.40 m	37
Figura 5 — Malla de perforación	40
Figura 6 — Malla de perforación	41
Figura 7 — Emulsión	45
Figura 8 — ANFO	45
Figura 9 — Detonadores	46
Figura 10 — Mecha rápida	46
Figura 11 — Cordón detonante	47
Figura 12 — Conector	47
Figura 13 — Carga post voladura	52
Figura 14 — Carga post voladura en la galería 559 Nv 8	52
Figura 15 — Producción	66
Figura 16 — Consumo de energía	67
Figura 17 — Fragmentación	67
Figura 18 — Factor de carga	68
Figura 19 — Costo de trituración	68
Figura 20 — Producción	69
Figura 21 — Consumo de energía	69
Figura 22 — Consumo de energía	69
Figura 23 — Fragmentación	70
Figura 24 — Factor de carga	70
Figura 25 — Costo de trituración	71
Figura 26 — Producción mes 1	71
Figura 27 — Producción mes 2	72
Figura 28 — Producción mes 3	72
Figura 29 — Consumo de energía mes 1	73
Figura 30 — Consumo de energía mes 2	73



Figura 31 — Consumo de energía mes 3	74
Figura 32 — Fragmentación mes 1	74
Figura 33 — Fragmentación mes 2	75
Figura 34 — Fragmentación mes 3	75
Figura 35 — Factor de carga mes 1	76
Figura 36 — Factor de carga mes 2	76
Figura 37 — Factor de carga mes 3	77
Figura 38 — Post-voladura GL 599 Nv 8	87
Figura 39 — Post-limpieza GL 599 Nv 8	87
Figura 40 — Desatado para perforación GL 559 Nv 8	88
Figura 41 — Limpieza de carga GL 599 Nv 8	88
Figura 42 — Perforación de frente GL 599 Nv 8	89
Figura 43 — Carguío de frente GL 599 Nv 8	89
Figura 44 — Alimentación de carga al chancado	90
Figura 45 — Tolva del chancado primario	90
Figura 46 — Recuperación de mineral en las celdas flotación	91

INTRODUCCIÓN

En la minería subterránea moderna, la fragmentación del material volado fue un factor determinante para la productividad global y la sostenibilidad económica de la operación. La calidad de dicha fragmentación influyó directamente en las etapas posteriores, como el carguío, transporte y trituración primaria, afectando el consumo energético, los costos operativos y la vida útil de los equipos.

En ese contexto, la investigación titulada “Optimización de la fragmentación en voladura para aumentar la productividad de material triturado en planta en la Minera Magistral de Huaraz S.A.C., Abancay – 2024”, consideró como variable independiente los parámetros de diseño y ejecución de voladura (burden, espaciamiento, diámetro, profundidad, carga explosiva y secuencia de detonación) y como variable dependiente la productividad del material triturado en planta, evaluada mediante indicadores como granulometría P80, toneladas procesadas, consumo energético y costos unitarios de trituración.

El problema central radicó en que, pese a contar con una capacidad instalada óptima, las variaciones granulométricas derivadas de diseños de voladura no optimizados generaron atascos, sobreconsumo de energía y mayor desgaste en la trituradora primaria. Ante esta problemática, se planteó que ajustar los parámetros de voladura y aplicar un control riguroso de la fragmentación permitiría obtener un flujo constante de mineral con tamaño de partícula adecuado, mejorando así la eficiencia y reduciendo los costos operativos.

La metodología aplicada fue de tipo cuantitativa, con un diseño longitudinal y experimental, que permitió comparar los resultados del segundo y tercer trimestre de 2024. Se utilizó la prueba estadística de Wilcoxon para validar los efectos de la mejora implementada. Los resultados mostraron un incremento del 13.42 % en la producción y una reducción del 15.84 % en el costo unitario de trituración, confirmando la hipótesis de que la optimización de la fragmentación impactó positivamente en la productividad y eficiencia del proceso.

En el capítulo I se da a conocer el planteamiento del problema en el cual se describió el contexto técnico y operativo de la mina, identificando que la fragmentación inadecuada



generaba cuellos de botella en la trituración primaria. Se formularon el problema general y los específicos, se justificó la investigación desde perspectivas técnicas, operacionales, económicas y de seguridad, y se detallaron la ubicación, geología y el proceso productivo de la unidad minera.

En el capítulo II que trata sobre los objetivos e hipótesis se presentó el objetivo general de optimizar la fragmentación para aumentar la productividad del material triturado y tres objetivos específicos enfocados en el ajuste de parámetros, evaluación del impacto en consumo y desgaste, e implementación de mejoras en secuencia y monitoreo. Se plantearon la hipótesis general y las específicas, estableciendo la relación directa entre la variable independiente (parámetros de voladura) y la variable dependiente (productividad en planta). En el capítulo III se toca el marco teórico donde se incluyeron antecedentes nacionales e internacionales, conceptos técnicos sobre voladura y fragmentación, factores que influyen en el tamaño de partícula, su impacto en el procesamiento secundario, métodos de optimización y la descripción del software Split-Desktop como herramienta de análisis granulométrico.

En el capítulo IV que es metodología se definió la investigación como aplicada, de nivel relacional y con un diseño longitudinal-experimental. Se describieron la población (labores de preparación y desarrollo) y la muestra (Nivel 8, sección 2.10 m × 2.40 m), el procedimiento de recolección y análisis de datos, y los instrumentos utilizados (software de simulación, hojas de cálculo y registros operativos).

Para el capítulo V que son Resultados y Discusión se compararon los parámetros operativos antes y después de la optimización, evidenciando mejoras en P80, producción, consumo energético y costos unitarios. Se validaron estadísticamente los resultados y se contrastaron las hipótesis, concluyendo que los ajustes en voladura tuvieron un impacto significativo y medible en toda la cadena productiva.

En el Capítulo VI Conclusiones y Recomendaciones se confirmó que la optimización de la fragmentación incrementó la productividad, redujo los costos y mejoró la integración de los procesos. Se recomendó implementar un monitoreo continuo de parámetros, capacitar al personal, incorporar tecnología avanzada y extender el enfoque Mine to Mill para optimizar otras etapas del proceso minero.



RESUMEN

La investigación titulada “Optimización de la fragmentación en voladura para aumentar la productividad de material triturado en planta en la Minera Magistral de Huaraz S.A.C., Abancay – 2024” tuvo como objetivo optimizar la fragmentación del material producto de voladuras, con el propósito de incrementar la productividad en planta, reducir costos operativos y mejorar la eficiencia del proceso mediante el ajuste de parámetros de diseño y ejecución. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con un diseño longitudinal y experimental de nivel comparativo. Se analizaron datos operativos correspondientes al segundo y tercer trimestre de 2024, utilizando la prueba de Wilcoxon para muestras relacionadas, con un nivel de confianza del 95 % y un margen de error del 5 %. La muestra incluyó todos los disparos realizados en labores de preparación y desarrollo del Nivel 8, sección 2.10 m x 2.40 m. Se emplearon instrumentos como software de simulación de voladuras, Split-Desktop para análisis granulométrico, hojas de cálculo y registros operativos de producción, energía y costos. Los resultados mostraron una reducción de la granulometría (P80) de 14.6 a 8.2 pulgadas, incremento de la producción de 273 a 308 TPD (13.42 %), y disminución del consumo energético 15.57 % y costo de trituración en 15.51 %. El factor de carga aumentó en 8.78 %. La prueba estadística ($p = 0.000$) evidenció diferencias significativas. Se concluye que la optimización de parámetros de voladura mejora la fragmentación, reduce atascos, disminuye el desgaste de equipos y favorece un flujo continuo de mineral, incrementando la eficiencia global.

Palabras clave: *Optimización, fragmentación, voladura, productividad.*



ABSTRACT

The research entitled "Optimization of fragmentation in blasting to increase the productivity of crushed material in the plant at Minera Magistral de Huaraz S.A.C., Abancay – 2024" aimed to optimize the fragmentation of the material product of blasting, with the purpose of increasing productivity in the plant, reducing operating costs and improving process efficiency by adjusting design and execution parameters. The study was developed under a quantitative approach, with a longitudinal and experimental design of comparative level. Operating data for the second and third quarters of 2024 were analyzed, using the Wilcoxon test for related samples, with a 95% confidence level and a margin of error of 5%. The sample included all the shots fired in preparation and development work of Level 8, section 2.10 m x 2.40 m. Instruments such as blast simulation software, Split-Desktop for particle size analysis, spreadsheets and operational records of production, energy and costs were used. The results showed a reduction in the granulometry (P80) from 14.6 to 8.2 inches, an increase in production from 273 to 308 TPD (13.42 %), and a decrease in energy consumption by 15.57 % and crushing cost by 15.51 %. The load factor increased by 8.78%. The statistical test ($p = 0.000$) showed significant differences. It is concluded that the optimization of blasting parameters improves fragmentation, reduces blockages, decreases equipment wear and favors a continuous flow of ore, increasing overall efficiency.

Keywords: *Optimization, fragmentation, blasting, productivity.*



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

En la unidad minera subterránea de la Minera Magistral de Huaraz S.A.C., ubicada en la región de Áncash, Perú, específicamente en el Nivel 8, se llevan a cabo operaciones de perforación, voladura, y posterior procesamiento del mineral en planta de chancado (JIMENEZ, 2020).

Las áreas de ingeniería de mina y operaciones son responsables de diseñar y ejecutar las voladuras, así como de garantizar que el mineral fragmentado cumpla con los requerimientos granulométricos para una eficiente alimentación a la planta de chancado y procesamiento (BERROSPI, 2019).

Se ha identificado que los parámetros de voladura no optimizados como el burden, espaciamiento, diámetro de taladro, carga explosiva y secuencia de iniciación han generado fragmentación deficiente, ocasionando sobretamaños que afectan directamente la eficiencia del chancado primario, provocan interrupciones en el flujo de mineral, aumentan el consumo energético y elevan los costos unitarios de trituración. Esta situación, además de impactar en la productividad diaria, expone al personal a mayores riesgos operacionales durante el tratamiento manual de bloques sobredimensionados (FLORES, 2022).

1.2 Enunciado del problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo optimizar los parámetros de fragmentación en las voladuras para aumentar la productividad del material triturado en la planta de una minería subterránea?



1.2.2 Problemas específicos

- ¿Qué parámetros de diseño de voladura (burden, espaciamiento, diámetro, profundidad, y carga explosiva) deben ajustarse para obtener una granulometría más uniforme y adecuada para la trituración?
- ¿Cómo impacta la optimización de la fragmentación en el consumo energético y en el desgaste de los equipos de trituración primaria y secundaria?
- ¿Qué mejoras en la secuencia de detonación y en el uso de tecnologías de monitoreo podrían implementarse para garantizar un flujo constante y eficiente de material hacia la planta?

1.3 Justificación de la investigación

1.3.1 Justificación técnica

Desde el enfoque técnico, la fragmentación adecuada del macizo rocoso es un factor crítico en la eficiencia del ciclo minero, ya que determina directamente el rendimiento del chancado primario y el consumo energético. La aplicación de un diseño de voladura optimizado considerando parámetros como burden, espaciamiento, diámetro, distribución de carga y tiempos de retardo permite controlar la granulometría del material, reduciendo la generación de sobre tamaños y mejorando la continuidad del proceso de conminución (SANCHIDRIAN, 2014).

1.3.2 Justificación operacional

En el plano operativo, una fragmentación deficiente genera bloqueos frecuentes en la tolva del chancador primario, incrementa los tiempos muertos y exige mayor intervención del personal para ejecutar voladuras secundarias. Al optimizar la fragmentación, se incrementa la eficiencia de carga y descarga, se reduce el desgaste de equipos y se mejora la continuidad del proceso, lo que se traduce en un aumento de toneladas procesadas por día y una disminución del tiempo de ciclo de los equipos de planta (FLORES, 2022).



1.3.3 Justificación económica

Desde una perspectiva económica, una fragmentación adecuada permite reducir los costos unitarios de chancado y energía, al facilitar el trabajo del chancador y disminuir la resistencia del material. Estudios demuestran que una voladura bien diseñada puede reducir hasta en un 15 % el consumo energético por tonelada procesada, además de disminuir la necesidad de voladuras secundarias y repuestos por desgaste prematuro (KANCHIBOTLA, 1999).

1.3.4 Justificación social

La optimización del proceso de voladura también tiene implicancias sociales al mejorar las condiciones laborales del personal operativo. La reducción de voladuras secundarias, maniobras manuales y riesgos por caída de bloques sobredimensionados disminuye la exposición a peligros físicos y favorece un entorno laboral más seguro y eficiente. Esto fortalece la relación entre la empresa y sus trabajadores, contribuyendo a una cultura de seguridad y bienestar (FLORES, 2022).

1.3.5 Justificación en seguridad

Desde el enfoque de seguridad, la mala fragmentación incrementa la exposición a accidentes, especialmente durante la remoción de sobre tamaños en el área de tolvas o en la ejecución de voladuras no planificadas. Una voladura correctamente diseñada minimiza la necesidad de intervenciones manuales en zonas críticas, reduce los riesgos por proyecciones de roca y mejora el control general del área operativa (MCKENZIE, 2020).

1.3.6 Justificación ambiental

Finalmente, desde la dimensión ambiental, una fragmentación eficiente permite un uso más racional de los explosivos, reduce la generación de polvo y vibraciones, y minimiza la necesidad de reprocesamientos. Además, permite aprovechar mejor el recurso mineral, disminuyendo el desperdicio y contribuyendo a una operación minera más sostenible, alineada con los principios de eficiencia energética y menor huella ambiental (SANCHIDRIAN, 2014).

1.4 Ubicación y contextualización

1.4.1 Ubicación

La Mina Magistral se encuentra ubicada en la sierra central del Perú, específicamente en el distrito de Aquia, provincia de Bolognesi, en el departamento de Áncash. Esta unidad minera se sitúa en la vertiente oriental de la Cordillera Occidental, en la subcuenca del río Pativilca. Administrativamente, el área de operación forma parte del ámbito de influencia del centro poblado de Tuco.

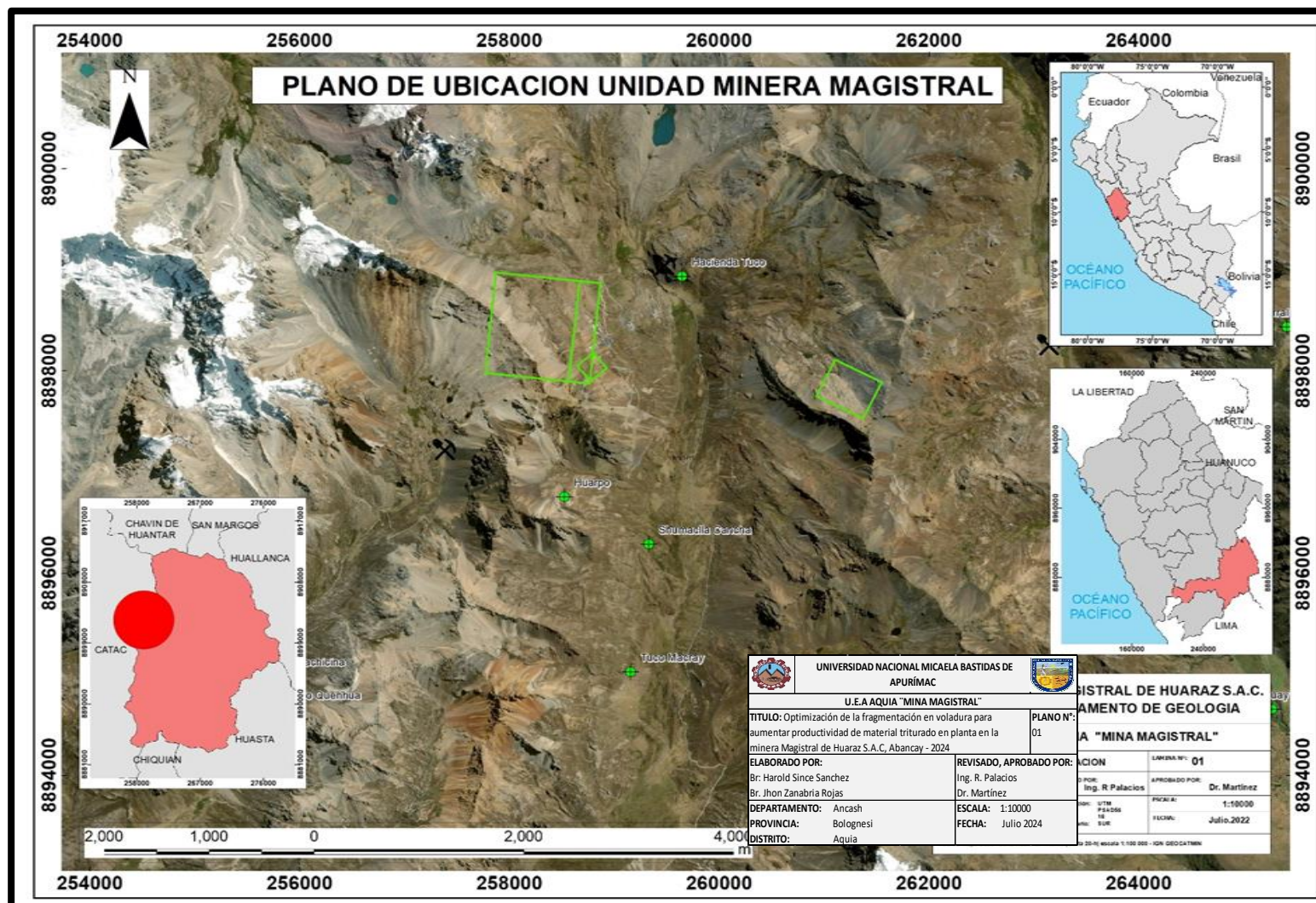
Geográficamente, la zona de estudio se localiza entre las coordenadas aproximadas:

- Este: 248,500 a 250,000 m E
- Norte: 9'092,500 a 9'094,000 m N
- Zona UTM: 18S
- Datum: WGS84

El acceso principal a la mina se realiza a través de la carretera Pativilca–Conococha, tomando un desvío hacia el centro poblado de Tuco, desde donde parte una vía afirmada que conduce directamente a las instalaciones de la unidad minera.

La altitud promedio de la zona minera varía entre los 3,800 y 4,300 m.s.n.m., presentando un relieve abrupto, típico de zonas altoandinas, con laderas empinadas y cobertura vegetal escasa. Estas características topográficas condicionan tanto el diseño de accesos como las operaciones de perforación, voladura y acarreo dentro del yacimiento.





FUENTE: Planeamiento Mina, 2023.

Figura 1 — Ubicación de la mina Magistral

1.4.2 Acceso

Tabla 1 — Distancias aproximadas de la ruta a la mina Magistral

ORIGEN - DESTINO	DISTANCIAS
Abancay - Lima	905.0 Kilómetros
Lima – Pativilca	204.0 kilómetros
Pativilca – Conococha	123.0 kilómetros
Conococha – Desvío a mina (Casablanca)	9.0 kilómetros
Desvío a mina – mina	21.0 kilómetros
Total	1258.0 kilómetros
FUENTE: Planeamiento Mina, 2023.	

1.4.3 Topografía

La mina Magistral abarca terrenos accidentados en su zona más elevada, algunos de los cuales son difíciles de acceder. En la parte intermedia, el terreno se torna más uniforme, con pendientes que varían entre 15° y 20°. Cerca del río Tucu, el paisaje se caracteriza por ser mayormente plano, ya que corresponde al valle del río.

1.4.4 Recursos naturales

Flora: En el entorno de la mina Magistral, la vegetación está constituida por arbustos nativos como el quenual, además de pastizales naturales y especies típicas de la región altoandina, entre las que destaca el ichu.

Fauna: La fauna local incluye aves silvestres, chinchillas y diversos tipos de roedores característicos de las áreas altoandinas. Adicionalmente, en la zona se practica el pastoreo de animales domésticos, especialmente ganado ovino y vacuno.

1.4.5 Clima y vegetación

De acuerdo con la clasificación climática, el área de estudio presenta un clima frío característico de las zonas andinas. Durante los meses de mayo a agosto, las temperaturas mínimas oscilan entre los -15°C y los 10°C. Las precipitaciones más intensas tienen lugar entre noviembre y abril. En cuanto a la vegetación, esta es limitada en los alrededores de la mina y sus áreas adyacentes, predominando especies como *Stepha Obtusa*. En zonas de mayor

densidad vegetal, como las áreas bajas cercanas a la bocamina del nivel 01, se reduce el impacto de la erosión causada por el agua de lluvia.

La altitud de la zona varía entre los 4,500 y 5,100 m.s.n.m., con un clima clasificado como húmedo a húmedo frío. Las temperaturas presentan fluctuaciones estacionales, desde los 10°C hasta valores por debajo de los 0°C. La humedad relativa promedio es del 60%, aumentando en temporadas lluviosas y disminuyendo en los meses secos. La vegetación predominante incluye gramíneas como el ichu y plantas herbáceas pertenecientes a las compuestas. En áreas rocosas y húmedas se encuentran géneros como *Asplenium*, *Polystichum* y *Polypodium*. Además, en zonas húmedas destacan especies como la jurea y la yareta, mientras que en áreas bajas existe una mayor diversidad vegetal, con presencia de plantas semi-arbustivas.

Según la Oficina Nacional de Evaluación de los Recursos Naturales (ONERN), el Parque Nacional Huascarán alberga una rica flora con 93 familias, 309 géneros y 551 especies de plantas, incluyendo arbóreas y arbustivas. La fauna nativa de la región incluye vizcachas, zorros andinos y zorrinos. Entre las aves se encuentran fringídeos, lechuzas de arenales, pamperos, perdices, pucos y gansos andinos. En las laderas, la fauna es más diversa, con especies como bandurrias, yanavicos, tórtolas cordilleranas, golondrinas y jilgueros negros. Cabe destacar que algunas especies, como el cóndor andino, la comadreja, el puma, la taruca y el venado gris de los Andes, se encuentran en peligro de extinción.

1.4.6 Geología regional

La geología regional de la zona de estudio en la mina Magistral está compuesta por una secuencia de sedimentos del Jurásico-Cretácico, sobre los que reposan en discordancia depósitos volcánicos terciarios de la Formación Calipuy. Esta secuencia incluye unidades estratigráficas clave como la Formación Chimú, compuesta por cuarcitas y areniscas fuertemente deformadas; la Formación Santa, con calizas grises y dolomitas plegadas; la Formación Carhuaz, de lutitas meteorizadas e incompetentes; y la Formación Pariahuanca, relevante por su control estructural sobre la mineralización. La Formación Calipuy



presenta piroclastos brechoides y flujos andesíticos porfíricos, cubriendo discordantemente las formaciones más antiguas. Además, se reconocen depósitos morrénicos glaciares del Pleistoceno y terrazas aluviales recientes. Finalmente, afloran cuerpos intrusivos como granodioritas, tonalitas y pórfidos cuarzomonzoníticos, que intruyen tanto formaciones sedimentarias como volcánicas, indicando una evolución geológica compleja con influencia en la ubicación y control del yacimiento.

1.4.7 Geología local

La geología local del distrito minero donde se ubica el yacimiento Magistral está dominada por una secuencia sedimentaria del Cretáceo medio-superior, compuesta principalmente por lutitas negras de la Formación Carhuaz y calizas grises de la Formación Pariahuanca, las cuales afloran en el núcleo de un sinclinal inclinado con dirección N 20–30° W y buzamiento de 30–46° hacia el suroeste. Este sinclinal constituye la estructura principal que aloja la mineralización, la cual se presenta en forma de mantos, vetas y cuerpos irregulares, alojados en un estrato calcáreo de hasta 400 metros de espesor. Las alteraciones superficiales, como óxidos y carbonatos recristalizados, son visibles sobre todo en los sectores no cubiertos por depósitos glaciares. En profundidad, las estructuras mineralizadas están controladas por fallas transversales casi verticales que provocan desplazamientos en el horizonte calcáreo. Asimismo, se observan fallas de rumbo asociadas a planos de estratificación y estructuras plegadas como sinclinales y pliegues decumbentes, lo que evidencia una intensa deformación tectónica. Las formaciones geológicas locales relevantes incluyen, además, a la Formación Farrat con areniscas blancas, la Formación Pariatambo con margas bituminosas, y cuerpos intrusivos como diques, sills y stocks de composición granodiorítica, porfirítica y monzonítica, que afectan principalmente a la Formación Pariahuanca y controlan en parte la mineralización del depósito.

1.4.8 Geología estructural

La geología estructural del yacimiento Magistral está dominada por una intensa deformación compresiva, evidenciada en una serie de pliegues con orientación predominante NW–SE, resultado de esfuerzos tectónicos dirigidos NE–SW



durante la orogenia andina. Aproximadamente el 90 % del distrito presenta secuencias sedimentarias del Cretácico intensamente plegadas, desarrollando sinclinales y pliegues recumbentes. En la margen derecha de la quebrada Tuco se observa un sinclinal volcado que afecta a las lutitas de la Formación Carhuaz, mientras que su núcleo está compuesto por calizas de la Formación Pariahuanca. En la margen opuesta se reconocen pliegues decumbentes sobre calizas plásticas de la Formación Santa. El área también está atravesada por dos sistemas principales de fallas: el primero, de rumbo NW–SE, controla parcialmente la red de drenaje y sigue la orientación general de la cordillera; el segundo, de rumbo E–W, provoca dislocaciones en los estratos calcáreos sin evidencias de mineralización asociada. Además, se han identificado fallas menores que aprovechan planos de estratificación, algunas con mineralización incipiente, aunque limitada por la baja permeabilidad de las lutitas. Finalmente, las fracturas presentan una dirección paralela a los sistemas de fallamiento (NW–SE) y reflejan una historia tectónica compleja con múltiples eventos que condicionan la geometría y continuidad de los cuerpos mineralizados.

1.4.9 Geología económica

El yacimiento Magistral corresponde a un depósito hidrotermal de reemplazo con características estratoligadas, alojado principalmente en calizas de la Formación Pariahuanca y lutitas de la Formación Carhuaz. La mineralización se presenta en forma de mantos lenticulares concordantes con la estratificación, distribuidos en tres niveles principales: Sorpresa, Manto y 240, con espesores entre 1 y 20 metros y una extensión discontinua de hasta 600 metros. Estos cuerpos se emplazan dentro de un sinclinal inclinado al suroeste, vinculado a la deformación andina, y muestran desplazamientos por fallas subverticales NW-SE. También se identificó un cuerpo mineralizado Ag-Cu en la Formación Carhuaz, de forma lenticular, con rumbo N 40–50° W, espesor de 0.60–1.50 m y longitud de 300 m. El depósito presenta continuidad vertical hasta 250 m y desarrollo profundo bajo el eje sinclinal hasta 200 m. Además, intrusiones de diques granodioríticos cortan la secuencia sedimentaria, posteriores a la mineralización. Mineralógicamente, los niveles inferiores contienen principalmente galena argentífera y pirita, mientras que los niveles superiores presentan esfalerita como mineral dominante. Las alteraciones predominantes



incluyen argilización y silicificación leve, tanto en los mantos como en las rocas anfitrionas.

Tabla 2 — Minerales de mina

NOMBRE	ABREVIATURA
Galena argentífera: Sulfuro de plomo y plata	(AgPbS)
Calcopirita: Sulfuro de hierro y cobre	(CuFeS ₂).
Esfalerita: Sulfuro de zinc	(ZnS).
Bornita: Sulfuro de cobre y hierro	(Cu ₅ FeS ₄).
MINERALES DE GANGA:	
Calcita: Carbonato de calcio	(CaCO ₃).
Pirita: Sulfuro de hierro	(FeS ₂).
Rodocrosita: Carbonato de manganeso	(MnCO ₃).
FUENTE: Elaboración propia	

1.4.10 Litología

El área de estudio presenta una compleja secuencia estratigráfica que abarca desde el Jurásico Superior hasta el Cenozoico, iniciando con la Formación Chicama, compuesta por lutitas, pizarras y areniscas metamorizadas por intrusiones del Batolito Andino. Le sigue la Formación Oyón, constituida por lutitas y niveles de carbón antracítico, que transiciona hacia las areniscas cuarzosas blancas de la Formación Chimú, las cuales alcanzan hasta 600 metros de espesor. Por encima se sitúa la Formación Santa, caracterizada por calizas azuladas con concreciones de chert, y luego la Formación Carhuaz, de estratificación delgada, compuesta por limoarcillitas y yeso, con intercalaciones de areniscas. La Formación Farrat, una unidad delgada de areniscas blancas, subyace a la Formación Pariahuanca, conformada por calizas grises de hasta 400 metros, de edad Aptiana-Albiana. Posteriormente aparece la Formación Pariatambo, de margas bituminosas y calizas delgadas, y la Formación Jumasha, integrada por calizas macizas grises con hasta 700 metros de espesor. Discordantemente sobre las unidades anteriores se sitúa el Grupo Calipuy, compuesto por lavas andesíticas, dacíticas y depósitos piroclásticos, originados por actividad volcánica durante el Eoceno-Mioceno.

Finalmente, el Cuaternario está representado por depósitos morrénicos y glacio-fluviales, no consolidados, distribuidos en quebradas y sectores altos, producto de procesos glaciares y fluvio-glaciares del Pleistoceno, los cuales modelan la geomorfología actual del terreno.

1.4.11 Contextualización

La minería subterránea, vital para la economía en regiones como Perú, enfrenta varios desafíos, entre los cuales se destaca la mejora en la eficiencia operativa, especialmente en el chancado primario. Una fragmentación adecuada del material, que depende de las técnicas de voladura, es crucial para el procesamiento eficiente y el uso adecuado de los recursos energéticos. En este contexto, la estrategia Mine to Mill se presenta como una solución integral para optimizar toda la cadena productiva, alineando las fases de perforación, voladura y chancado para obtener una fragmentación más controlada y eficiente. Esto no solo mejora el rendimiento del chancado, sino que también contribuye a reducir el consumo energético y aumenta la competitividad y sostenibilidad de las operaciones mineras.



CAPÍTULO II

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos de la investigación

2.1.1 Objetivo general

Optimizar la fragmentación del material en las voladuras para incrementar la productividad del material triturado en la planta de una minería subterránea, reduciendo costos operativos y mejorando la eficiencia del proceso.

2.1.2 Objetivos específicos

- Ajustar los parámetros de diseño de voladura, como el burden, espaciamiento, diámetro, profundidad y carga explosiva, para obtener una granulometría uniforme y adecuada para la trituración primaria.
- Evaluar el impacto de la fragmentación optimizada en el consumo energético y el desgaste de los equipos de trituración, con el fin de mejorar su rendimiento y prolongar su vida útil.
- Implementar mejoras en la secuencia de detonación y tecnologías de monitoreo para garantizar un flujo constante y eficiente del material desde el frente de voladura hasta la planta.

2.2 Hipótesis de la investigación

2.2.1 Hipótesis general

La optimización de los parámetros de diseño y ejecución de voladuras en una minería subterránea mejora la fragmentación del material, lo que incrementa la productividad de la planta al reducir costos operativos, consumo energético y tiempos de procesamiento.



2.2.2 Hipótesis específicas

- La modificación de parámetros como burden, espaciamiento, diámetro, profundidad y carga explosiva genera una granulometría más uniforme que reduce los atascos y mejora el rendimiento de la trituración primaria.
- Una fragmentación optimizada disminuye el consumo energético y el desgaste de los equipos de trituración, contribuyendo a una operación más eficiente y económica.
- La implementación de secuencias de detonación mejoradas y el uso de tecnologías de monitoreo permiten garantizar un flujo continuo del material hacia la planta, aumentando la eficiencia global del proceso.

2.3 Operacionalización de variables

2.3.1 Variable independiente

La optimización de la fragmentación en voladura hace referencia al conjunto de ajustes técnicos y estratégicos aplicados en el diseño y ejecución de la voladura —como el control del burden, espaciamiento, distribución de carga, tipo de explosivo, tiempos de retardo y geología del macizo rocoso— con el objetivo de lograr una granulometría adecuada del material fragmentado. Esta mejora permite reducir la generación de sobre tamaños, disminuir la necesidad de voladuras secundarias y facilitar la eficiencia del proceso de conminución en planta, impactando positivamente en la productividad global (SANCHIDRIAN, 2014).

VI: Optimización de la Fragmentación en Voladura.

2.3.2 Variable dependiente

La productividad del material triturado en planta se refiere a la cantidad de mineral procesado eficientemente en el chancado primario y etapas sucesivas por unidad de tiempo, expresada normalmente en toneladas por hora (T/H) o toneladas por día (TPD). Esta productividad está influenciada por el tamaño y uniformidad de la fragmentación del material volado, ya que una granulometría inadecuada puede generar atascos, aumento del tiempo de ciclo, mayor desgaste de equipos y menor eficiencia en la línea de trituración (SANCHIDRIAN, 2014). VD: Productividad del Material Triturado en Planta.



Tabla 3 — Operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES	HERRAMIENTAS
VI: Optimización de la Fragmentación en Voladura	Conjunto de ajustes técnicos en el diseño y ejecución de voladura orientados a obtener una granulometría adecuada que favorezca el rendimiento en planta.	•Diseño de voladura •Control de fragmentación	•Burden •(m)Espaciamiento •(m)Peso de explosivo por taladro (kg) •P80 (in)	•Registro de campo •Plan de voladura •Split-Desktop •JKSimBlast
VD: Productividad del Material Triturado en Planta	Cantidad de material triturado que procesa la planta por unidad de tiempo, influenciada por la granulometría de alimentación y eficiencia del chancador primario.	•Rendimiento de planta •Continuidad operativa	•Toneladas trituradas por día (TPD) •Tiempo promedio de ciclo (min) •Número de bloqueos por semana	•Reportes de planta •Parte diario •Formato de control de tolva

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 Antecedentes

3.1.1 Nacionales

- a) BERROSPI (2019), en su tesis titulada “Optimización de la perforación y voladura para mejorar la zona de profundización en la mina Andaychagua de la Cía. Minera Volcan S.A.A.”, desarrollada en la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, tuvo como objetivo optimizar la eficiencia operativa en zonas profundas mediante el rediseño de los parámetros de perforación y voladura. Aplicó una metodología cuantitativa de tipo experimental, y su muestra estuvo conformada por diversas secciones de la mina Andaychagua. Como instrumentos utilizó el análisis de granulometría post-voladura, registros operativos y medición de vibraciones. Los resultados demostraron una mejora significativa en la eficiencia de la fragmentación, una reducción de los costos operativos y un mejor control de las vibraciones. En conclusión, se comprobó que una adecuada planificación del diseño de voladura permite mejorar la productividad y la seguridad en minería subterránea. Este estudio se relaciona con la presente investigación, ya que ambos trabajos abordan cómo la optimización de los parámetros de voladura impacta directamente en la eficiencia de procesos posteriores como el chancado y la productividad global.

- b) PÉREZ (2024), en su investigación titulada “Aplicación del modelo matemático de Pearse en el diseño de malla de perforación y voladura en la Unidad Minera San Cristóbal – Volcan Compañía Minera S.A.A.”, desarrollada en la Universidad Nacional del Centro del Perú, tuvo como objetivo optimizar el diseño de la malla de perforación y voladura mediante la aplicación del modelo matemático de Pearse, con la finalidad



de mejorar la fragmentación del macizo rocoso. La investigación aplicó una metodología cuantitativa de tipo experimental, y la muestra estuvo conformada por áreas específicas de la Unidad Minera San Cristóbal donde se implementaron mallas optimizadas. Como instrumentos, se emplearon software de simulación, análisis granulométrico del material volado y monitoreo de vibraciones. Los resultados evidenciaron una mejora significativa en la calidad de la fragmentación, una reducción en el uso de explosivos y un control más eficiente de las vibraciones, lo que permitió incrementar la productividad y la eficiencia operativa. En conclusión, el estudio confirmó que el modelo matemático de Pearse es una herramienta eficaz para optimizar el diseño de voladuras en minería subterránea. Este antecedente se relaciona con la presente investigación, ya que ambos trabajos buscan mejorar la fragmentación mediante la optimización del diseño de voladura y evaluar su impacto en la productividad de los procesos posteriores.

3.1.2 Internacionales

- a) FERNÁNDEZ (2020), en su tesis titulada “Impacto del cambio de diámetro de la perforación de socavación en División Andina, Codelco”, desarrollada en la Universidad de Chile, tuvo como objetivo evaluar cómo la variación del diámetro de perforación influye en la fragmentación, los tiempos de perforación y los costos operativos en minería subterránea. Aplicó una metodología cuantitativa con diseño experimental, utilizando como muestra zonas específicas de socavación dentro de la División Andina de Codelco. Los instrumentos empleados incluyeron software de control de perforación, registros operativos y análisis del consumo de explosivos. Los resultados demostraron que el uso de diámetros mayores permitió lograr una fragmentación más eficiente, una reducción en el uso de explosivos, y una disminución en los tiempos de ejecución, optimizando así la productividad general del proceso de voladura. En conclusión, el ajuste del diámetro de perforación puede ser una estrategia técnica clave para mejorar la eficiencia y reducir costos operativos. Este estudio guarda relación con la presente investigación, ya que respalda la importancia de optimizar los parámetros de perforación y voladura como



medio para mejorar la fragmentación y la productividad en procesos posteriores como el chancado (FERNANDEZ, 2020).

- b) Cortez (2019), en la tesis titulada “Análisis de la implementación del control computarizado en la perforación para desarrollos horizontales”, realizada en la Universidad de Chile, tuvo como objetivo evaluar los beneficios de incorporar tecnologías digitales en el control de la perforación en minería subterránea, con énfasis en desarrollos horizontales. Empleó una metodología cuantitativa con diseño experimental, y la muestra estuvo conformada por diversas secciones de desarrollos horizontales en una mina subterránea. Los instrumentos utilizados incluyeron el sistema de control computarizado y registros operativos de perforación. Los resultados evidenciaron que la incorporación de esta tecnología mejoró significativamente la precisión de los barrenos, redujo los tiempos de operación, incrementó la eficiencia en el uso de equipos y elevó los niveles de seguridad, al minimizar los errores humanos en ambientes operativos complejos. En conclusión, se comprobó que el control digital automatizado es una herramienta efectiva para optimizar el proceso de perforación en minería subterránea. Este estudio se relaciona con la presente investigación, ya que ambas propuestas buscan la mejora técnica de los procesos de perforación y voladura como base para una mayor eficiencia productiva y reducción de riesgos operacionales (CORTES, 2019).

3.2 Marco teórico.

3.2.1 Fragmentación del macizo rocoso

La fragmentación se refiere al resultado del proceso de voladura sobre el macizo rocoso, generando partículas de diferentes tamaños. Una buena fragmentación es clave para el posterior chancado y acarreo, ya que disminuye los bloqueos, mejora la fluidez del material y reduce el consumo energético. Los parámetros que más influyen son el burden, espaciamiento, diámetro de perforación y el tipo de explosivo (LOPEZ JIMENO, 1995).



3.2.2 Diseño de malla de perforación y voladura

El diseño de malla consiste en la distribución geométrica de los taladros (burden, espaciamiento, profundidad) y la secuencia de iniciación. Un diseño deficiente puede causar subfragmentación, sobre tamaños, exceso de polvo o vibraciones. La optimización del diseño de malla es esencial para lograr una fragmentación uniforme y eficiente (SANCHIDRIAN, 2014).

3.2.3 Productividad en el chancado primario

La productividad del chancado primario está directamente influenciada por la granulometría del material que se alimenta. Fragmentaciones inadecuadas generan bloqueos en la tolva, tiempos muertos y mayor desgaste de componentes. Por lo tanto, la calidad de voladura impacta en la eficiencia de todo el circuito de procesamiento (KANCHIBOTLA, 1999).

3.2.4 Eficiencia energética en la conminución

La conminución (chancado y molienda) consume alrededor del 50–70% de la energía total en una planta de procesamiento. Fragmentaciones finas desde la voladura reducen el esfuerzo de chancado, disminuyendo el consumo específico de energía por tonelada. Este beneficio se traduce en menores costos operativos (GUPTA & YAN, 2006).

3.2.5 Tecnología de análisis de fragmentación (Split Desktop)

Split Desktop es un software de análisis de imágenes que permite calcular curvas granulométricas a partir de fotografías del material volado. Su uso en minería moderna permite tomar decisiones en tiempo real, retroalimentar el diseño de voladura y controlar la eficiencia del proceso fragmentación-voladura-chancado (MAERZ, 2004).

3.2.6 Modelo de optimización operacional

La optimización en minería implica la mejora continua de procesos como perforación, voladura, carguío, acarreo y chancado. Aplicar modelos de mejora permite reducir tiempos muertos, maximizar el rendimiento de equipos y minimizar costos por tonelada procesada. Estos modelos se basan en la identificación de variables clave y su monitoreo constante (SANCHEZ, 2020).



3.3 Marco conceptual

- a) **Fragmentación:** Es el proceso mediante el cual una roca sólida es fracturada en fragmentos más pequeños como resultado de la voladura. La calidad de la fragmentación influye directamente en la eficiencia del chancado y del transporte del mineral (LOPEZ JIMENO, 1995).
- b) **Voladura:** Proceso mediante el cual se libera energía contenida en un explosivo para romper la roca de forma controlada, con el objetivo de facilitar su extracción y transporte (MCKENZIE, 2020).
- c) **Chancado primario:** Es la primera etapa de reducción del tamaño del mineral, donde el material de gran tamaño es triturado para alcanzar una granulometría que permita su procesamiento posterior (GUPTA & YAN, 2006).
- d) **Burden (Carga frontal):** Distancia entre el taladro de voladura y la cara libre más próxima; su correcta selección garantiza la fragmentación deseada y previene voladuras mal direccionadas (LOPEZ JIMENO, 1995).
- e) **Espaciamiento:** Distancia entre taladros paralelos en una malla de perforación. Junto con el burden, determina el patrón de rotura del macizo rocoso (SANCHIDRIAN, 2014).
- f) **Explosivo:** Sustancia capaz de liberar una gran cantidad de energía en un corto período de tiempo mediante una reacción química rápida (detonación), utilizada para romper la roca (ISEE, 2011).
- g) **P80:** Tamaño de partícula (en milímetros o pulgadas) para el cual el 80 % del material volado tiene un tamaño igual o inferior. Es un indicador clave de la calidad de fragmentación (KANCHIBOTLA, 1999).
- h) **Split-Desktop:** Software especializado para el análisis de fragmentación a través de imágenes digitales, que permite determinar curvas granulométricas de forma rápida y precisa (MAERZ, 2004).



- i) **Voladura secundaria:** Acción correctiva que implica realizar una nueva voladura sobre fragmentos de roca de gran tamaño que no pueden ser manipulados por los equipos de carguío o chancado (FLORES, 2022).
- j) **Macizo rocoso:** Conjunto de rocas que forman una unidad estructural, cuyas propiedades geomecánicas influyen directamente en el diseño de voladura y en el comportamiento frente a la excavación (HOEK, 1997).
- k) **Ciclo de minado:** Conjunto de actividades secuenciales en una operación minera subterránea, que incluye perforación, voladura, ventilación, carguío y acarreo (HARTMAN, 2022).
- l) **Conminución:** Proceso de reducción de tamaño del mineral desde su estado natural hasta un tamaño adecuado para su procesamiento metalúrgico. Comprende el chancado y la molienda (GUPTA & YAN, 2006).
- m) **Factor de carga:** Relación entre la cantidad de explosivo y el volumen o peso de roca a fragmentar. Es fundamental para calcular la potencia de la voladura (LOPEZ JIMENO, 1995).
- n) **Energía específica de conminución:** Cantidad de energía requerida para reducir una tonelada de material a una determinada granulometría, influenciada por la dureza del mineral y el grado de fragmentación inicial (BOND, 1952).
- o) **Optimización:** Proceso de mejora continua en la toma de decisiones técnicas que busca maximizar el rendimiento y eficiencia de un sistema, minimizando costos y tiempos operativos (SANCHEZ, 2020).



CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1 Tipo y nivel de investigación

4.1.1 Tipo de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, ya que buscó resolver un problema operativo concreto mediante la mejora del diseño de voladura, con impacto directo en la productividad del material triturado en planta.

4.1.2 Nivel de investigación

El nivel fue relacional, pues analizó la relación entre la variable independiente (fragmentación en voladura) y la variable dependiente (productividad del material triturado).

4.2 Diseño de investigación

El diseño de la investigación es cuasi-experimental, de tipo longitudinal y enfoque cuantitativo. Es cuasi-experimental porque se manipula la variable independiente (parámetros de voladura) para observar su efecto en la dependiente (productividad/fragmentación), pero sin una asignación aleatoria de los grupos, ya que se trabajan con labores mineras preestablecidas. Es longitudinal porque se comparan datos recolectados en dos periodos de tiempo distintos: el segundo y tercer trimestre del año 2024.

4.3 Población y muestra

4.3.1 Población

La población estuvo conformada por las operaciones de perforación, voladura y chancado primario realizadas en las labores de preparación y explotación en el Nv 8 de la mina subterránea Minera Magistral de Huaraz S.A.C., durante el año 2024. Se incluyeron todos los frentes operativos en los distintos niveles de la unidad minera que aportaron mineral a la planta de procesamiento.



4.3.2 Muestra

La muestra fue no probabilística de tipo intencional y estuvo compuesta por un total de 20 voladuras, ejecutadas en el Nivel 8 en la galería GL510 de la unidad subterránea de Minera Magistral de Huaraz S.A.C., en la sección 2.10 m × 2.40 m, durante el año 2024.

La muestra se dividió en dos periodos comparativos:

- 10 voladuras correspondientes al segundo trimestre (abril–junio), realizadas sin mejoras en el diseño.
- 10 voladuras correspondientes al tercer trimestre (julio–septiembre), realizadas con la aplicación del rediseño de la malla de perforación y mejoras en la carga explosiva.

Estas voladuras fueron seleccionadas por su representatividad en la secuencia de explotación y por contar con registros operativos completos para el análisis de los indicadores clave: P80, toneladas por día (TPD), consumo energético y costos unitarios de chancado.

4.4 Procedimiento

El procedimiento de la presente investigación se desarrolló en cinco etapas secuenciales:

4.4.1 Diagnóstico de la situación inicial

Se recopilaron los registros operativos del segundo trimestre de 2024 (abril–junio) correspondientes a las voladuras realizadas sin mejoras. Se analizaron los datos relacionados con la granulometría (P80), la producción diaria en planta (TPD), el consumo energético (kWh/T) y los costos unitarios de chancado (USD/T).

4.4.2 Identificación de problemas en el diseño de voladura

A través del análisis técnico de los reportes de campo y los resultados granulométricos, se detectaron deficiencias en la malla de perforación (burden,



espaciamiento, diámetro, profundidad de taladro y carga explosiva), lo que ocasionaba fragmentación irregular, sobre tamaños y cuellos de botella en el proceso de chancado.

4.4.3 Rediseño de parámetros de voladura

Se aplicó un nuevo diseño de malla en el Nivel 8, sección 2.10 m × 2.40 m, incorporando mejoras como el ajuste del factor de carga, incremento de burden y espaciamientos óptimos, modificación del diámetro de taladro, uso de explosivos con mejor densidad energética y aplicación de una secuencia de detonación más eficiente.

4.4.4 Implementación y monitoreo de mejoras

Durante el tercer trimestre (julio–septiembre 2024), se ejecutaron 10 voladuras bajo el nuevo diseño. Se realizó el monitoreo detallado mediante software Split Desktop para la medición del P80 post-voladura y se recopilieron datos de planta sobre TPD, consumo energético y costos.

4.4.5 Análisis comparativo y validación estadística

Los datos de ambos periodos fueron organizados en tablas comparativas. Se aplicó la prueba estadística de Wilcoxon para muestras relacionadas, con el fin de validar la significancia de los cambios observados tras la intervención. Finalmente, se discutieron los resultados en relación con los objetivos específicos y las hipótesis formuladas.

4.4.6 Descripción del proceso

4.4.6.1 Descripción de las operaciones mineras subterráneas

Sociedad Minera Magistral en su Unidad Económica Administrativa AQUIA presenta una mina netamente convencional, polimetálica (Pb, Cu, Zn y Ag) que en periodos anteriores pudo ejecutar distintos métodos de explotación subterránea como shrinkage convencional, cámaras y pilares además de corte y relleno ascendente convencional siendo este último el método de explotación que hasta la fecha se desarrolla, al método de explotación corte y relleno ascendente convencional se le incluyó una semi mecanización con microscopes



de 0.75 yardas cubicas de capacidad esto para optimizar costos operativos y alta productividad. La UEA AQUIA desde el año 2020 (la época de pandemia) ha estado trabajando con personal perteneciente a compañía con una fuerza laboral aproximada de 75 trabajadores entre empleados y obreros no ha requerido a las contratistas ya que se tenía zonas preparadas hasta el año 2020 en las distintas vetas tales como: Veta sorpresa, Veta Manto Sur, Veta Cobre, Veta +60 entre otros.

Durante el año 2020 – 2022 se trabajó en zonas de Pb y Zn y desde el año 2023 hasta la actualidad se viene trabajando en minerales de Cobre específicamente en veta Cobre.

Se estuvo reclutando más personal desde el año 2020 hasta el año 2022 para realizar el trabajo de desarrollo y preparación por parte de compañía de manera incipiente con bajos metrajes, pero con alta productividad con dificultades como demasiada rotación de personal y personal nuevo para entrenamiento por lo que no se alcanzó los resultados esperados.

4.4.6.2 Situación actual

El escenario actual y futuro de las cotizaciones del mineral de Cu generan un escenario favorable para la mecanización en la veta Cobre se espera con ello alcanzar óptimos costos operativos, a partir de favorables precios unitarios para las empresas especializadas teniendo presente que las contratistas son un aliado estratégico para actuar de forma conjunta en los próximos desafíos operativos.

Actualmente se está trabajando con dos empresas especializadas (Comiluz SAC y Laces SAC) para realizar las labores de desarrollo y preparación pendientes de casi tres años, estas empresas durante los primeros 5 meses del presente año no han alcanzado los metros del programa mensual siendo hasta la fecha un objetivo no alcanzado esto por varios factores desde rotación de personal, Factores de Trabajo, Equipo de Limpieza entre otros.



La producción hasta diciembre del año 2023 fue de 3000 Ton/Mes este año se proyecta a llegar como plan de minado mensual a los 4000 Ton /Mes, aumentando más zonas de producción y teniendo aporte de mineral de los contratistas.

a) Ingeniería del proyecto

- **Parámetros de diseño actual para la explotación de veta cobre**

Tabla 4 — Parámetros de diseño de veta cobre

Mineral	Cu
Veta	Veta Cobre
Longitud de veta	650 m aprox. Medido en superficie
Ley promedio de reservas de mineral (Cu)	3.50%
Producción diaria Veta Cobre	100 ton/día
Producción mensual	3000 ton/mes
Producción anual	36000 ton/año
Número de días /mes	30 días
Número de días /año	360 días
Guardias / día	2
Horas guardia	12 horas
Factor de esponjamiento	30%
Buzamiento promedio de veta	75°
Condiciones de cajas	Buena- Regular
Potencia promedio	Min 1.20 m - Max 2.00
	Prom 1.6 m
Distribución de valores en veta	Irregular
Características Geomecánicas	
Veta	Mala
Caja Techo	Competente
Caja Piso	Competente
FUENTE: Elaboración propia	

b) Vida económica del proyecto (LOM)

La vida económica del proyecto estará en función del mineral tratado en planta concentradora Sacracancha 350 ton/día teniendo en cuenta que el aporte de UEA AQUIA es de 100 ton el resto viene del aporte de las demás unidades económicas administrativas.

Vida económica del proyecto: $146\,250 / 36\,000 \text{ ton/año} = 4.06$ años.

c) Descripción de las etapas en la operación minera veta cobre

- **Exploración:** En esta etapa se realizan labores horizontales y verticales (cortadas, estocada, chimeneas) cuyos objetivos son: llegar a las proyecciones de las vetas para su posterior desarrollo, así mismo de ejecutar cámaras diamantinas de donde se realizarán taladros diamantinos que confirmaran o descartaran la presencia de vetas en las proyecciones dadas a las labores de exploración.
- **Desarrollo:** Luego que las cortadas llegan a su objetivo (Vetas) se realizan labores horizontales o verticales (galerías, chimeneas) siguiendo la estructura de la veta y que permiten su reconocimiento y la confirmación de leyes y potencias a lo largo de su recorrido, estas labores permiten la cubicación de reservas minerales.
- **Preparación:** En esta etapa realizada después o en forma paralela al desarrollo se realizan labores horizontales o verticales, chimeneas, subniveles) que permiten la preparación de blocks de mineral que conformaran las zonas de explotación.

- **Explotación:** Es la etapa final en que se extrae en forma sistemática el recurso mineral preparado y cubicado en las zonas llamadas tajos.

4.4.6.3 Diseño de labores de desarrollo y preparación

El diseño de las labores de desarrollo y preparación lo realizara el área de operaciones mina conjuntamente con el área de topografía compañía y se les encargara la ejecución a las contratistas (Comiluz SAC y Laces SAC), luego compañía realizara tajeo de las zonas preparadas.

4.4.6.4 Mano de obra de contratistas

Las contratistas deben tener como mano de obra 15 obreros por guardia de incidencia mayor al 50% como mínimo incrementándose en función de las necesidades operativas por Cía.

La distribución de Mano de Obra de las contratistas en Sociedad Minera Magistral ha sido durante los 5 meses de la siguiente manera:

Tabla 5 — Distribución de mano de obra por Cía.

LABORES	NUMERO DE OBREROS
Frente 1 Galería 2.10m x 2.40m pala	2
Frente 2 Galería 2.40m x 2.40m scoop	2
Subnivel 1.20m x 1.80m pulso	2
Subnivel 1.20m x 1.80m winche	2
Chimenea Simple 1.20m x 1.50m	2
Chimenea Doble 1.20m x 2.40m	2
Operador de Scoop	1
Motoristas	2
FUENTE: Base de datos mina Magistral	

Considerar la siguiente distribución de personal por parte de las contratistas:

Tabla 6 — Distribución de personal Ctta.

PERSONAL OBRERO CONTRATISTA						
GUARDIA A	Nº	GUARDIA B	Nº	GUARDIA C	Nº	TOT AL
Capataz	1	Capataz		Capataz		1
Maestro Perforista		Maestro Perforista -		Maestro Perforista -		
palero	4	palero	4	palero	4	12
Maestro Perforista		Maestro Perforista -		Maestro Perforista -		
Chimenero	2	Chimenero	2	Chimenero	2	6
Motorista	1	Motorista	1	Motorista	1	3
Operador de Scoop	1	Operador de Scoop	1	Operador de Scoop	1	3
Ayudante Motorista	1	Ayudante Motorista	1	Ayudante Motorista	1	3
Ayudante Perforista	6	Ayudante Perforista	6	Ayudante Perforista	6	18
TOTAL						46
FUENTE: Base de datos mina Magistral						

4.4.6.5 Rendimientos de la mano de obra

Los rendimientos de la mano de obra se detallan en función a los trabajos que ha realizado compañía durante la ejecución de labores de preparación según el siguiente detalle:

- Una cuadrilla de 2 personas coloca durante una guardia 2 cuadros completos sea de subnivel y/o Galería.
- Una cuadrilla de 2 personas puede perforar e instalar 28 split set de 5 pies durante la guardia.

- Una cuadrilla de 2 personas puede instalar 42.5 m² de malla electrosoldada toda una guardia.
- Una cuadrilla de 2 personas previo al traslado de madera tanto con locomotora como hacia el área a sostener pueden encribar dos cuadros 6 vueltas durante toda una guardia de una labor realizada.
- Una Tolva Americana se puede culminar durante 3 guardias.
- En una guardia con una cuadrilla se puede colocar 3 colleras de riel durante toda la guardia sin el doblado (santiagado) del mismo.
- Para el colocado de tuberías ya sea de 1", de 2" y de 4" se necesitará el estirado por parte de un camión previo a su colocación, para la manipulación de tuberías de 4" se necesitará un mínimo de 5 personas tanto para llevar e instalar, el rendimiento en base a este detalle es 300 metros de tubería de 1" por 3 personas, 200 metros de tubería de 2" por 3 personas mínimo y 200 metros de tubería de 4" con 5 personas durante toda la guardia.
- Un Maestro Palero puede realizar limpieza de desmonte con pala neumática hacia un carro minero en 5 min.

4.4.6.6 Análisis del proceso de desarrollo y preparación por las contratistas

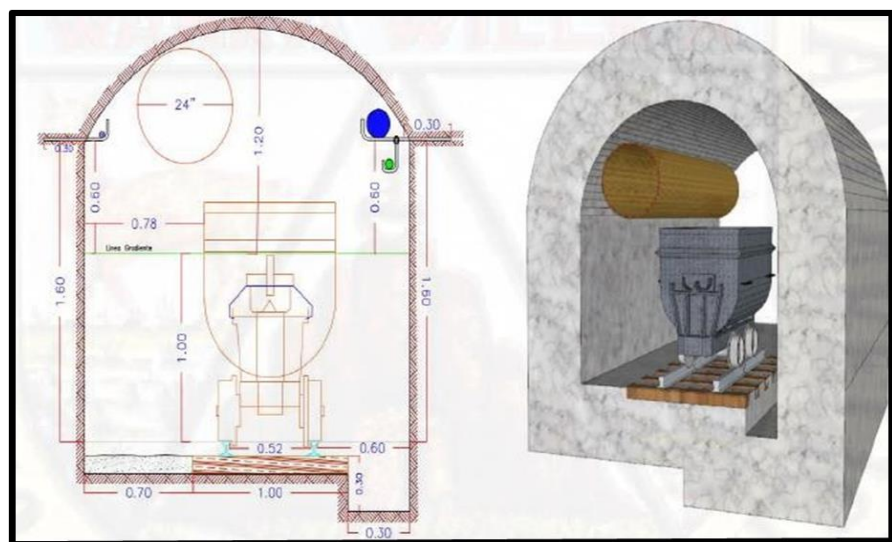
La etapa de preparación se realiza después o en forma paralela al desarrollo en donde se realizan labores horizontales o verticales que permitan la preparación de blocks de mineral que conformaran las zonas de explotación.



En función al método de explotación Corte y Relleno Ascendente Semi – Mecanizado los tipos de labores que se han ejecutado en Sociedad Minera Magistral son:

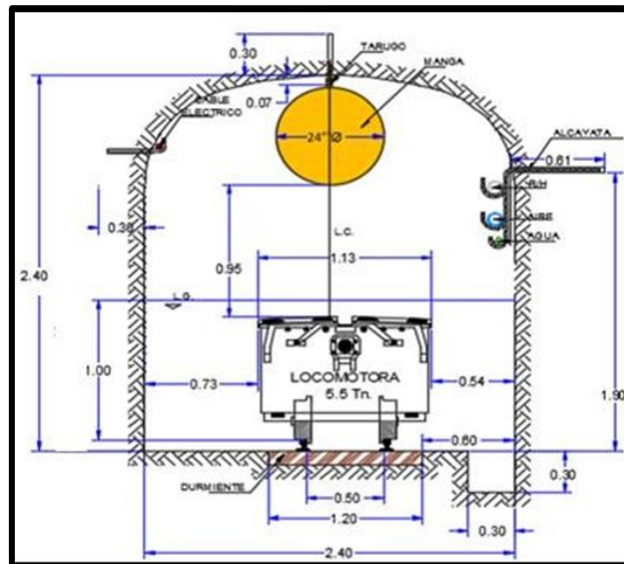
4.4.6.7 Diseño e ingeniería en galería

Las labores de Galería para Sociedad Minera Magistral tienen secciones de 2.10 m x 2.40 m ,2.40 m x 2.40 m y excepcionalmente si hubiera una sección diferente a estas se pagará como la sección mayor y la diferencia como desquinche por lo que se apoyara con el área de topografía para dichos cálculos. Las labores serán llevadas con una gradiente igual a 5/1000. La cuneta debe ser ribeteada con 30 cm de profundidad por 30 cm de ancho. Los refugios cada 50 m con sección de 1.50 m ancho x 1.80 m alto x 1.50 m de longitud. Se realizará labores para los cambios para carros U-35 cada 100 m como estándar. Se difunde el siguiente estándar de Galería (By pass/Frente/Crucero/Estacada/Ventana) con sección de 2.40 m x 2.40 m y 2.10 m x 2.40 m.



FUENTE: Área planeamiento mina Magistral, 2023.

Figura 2 — Estándar de galería/crucero/by pass Sección 2.10m x 2.40m



FUENTE: Área planeamiento mina Magistral, 2023.

Figura 3 — Estándar galería/crucero/by pass sección 2.40m x 2.40m

4.4.6.8 Perforación en galería

Se realiza mediante el empleo de una perforadora convencional; usando como energía el aire comprimido, para realizar huecos de diámetro pequeño con los barrenos cónicos de 2", 4", 6" y 8" y brocas los cuales se encargan de triturar la roca al momento de realizar el trabajo de perforación en la roca.

Para la perforación, utilizar barras cónicas de 4' y 6' de longitud con brocas de 38 y 36 mm. Para los taladros de alivio, utilizar barra piloto de 4' y 6' con rimadora de 64 mm de ameritarse según el estándar de perforación.

Para esta actividad se usa el equipo Jack Leg ya que las secciones no sobrepasan los 3m x 3m.

4.4.6.9 Voladura en galería

La selección de explosivo es muy importante para realizar una buena voladura. La cantidad de cartuchos está en función a la calidad del macizo rocoso, longitud y ubicación de los taladros. Para mejorar la eficiencia de voladura usar las cañas y los tacos de arcilla.

4.4.6.10 Parámetros de voladura para una sección de 2.10m x 2.40m

a) **Avance / disparo:** 90% de la longitud nominal del taladro, debido a los inconvenientes siguientes:

- Perforación incompleta
- Ángulo de perforación.
- Desviación de los taladros.
- Mala ubicación de la máquina perforadora
- Otros factores (cuele inapropiado, grado de confinamiento de la carga, experiencia del operador, etc.)

b) **Longitud del barreno:** 6 pies = 1.83 m

c) **Longitud/Perforada:** $0.183 \times 0.90 = 1.65$ m

d) **Eficiencia:** de la voladura 91% debido a:

- Mal carguío
- Número de cartuchos por taladro.

e) **Avance /Disparo** = $1.65 \text{ m} \times 0.91 = 1.50$ m

f) **Numero de taladros (Nt)**

- Aplicando el siguiente modulo:

$$N_t = P/E + K \times S$$

Donde:

P= Perímetro de la sección de galería, se obtiene mediante ($P = 4 \sqrt{S}$)

E=Distancia entre los taladros de la labor por m²
(Según el Cuadro)



Tabla 7 — Distancia entre los taladros de la labor por m²

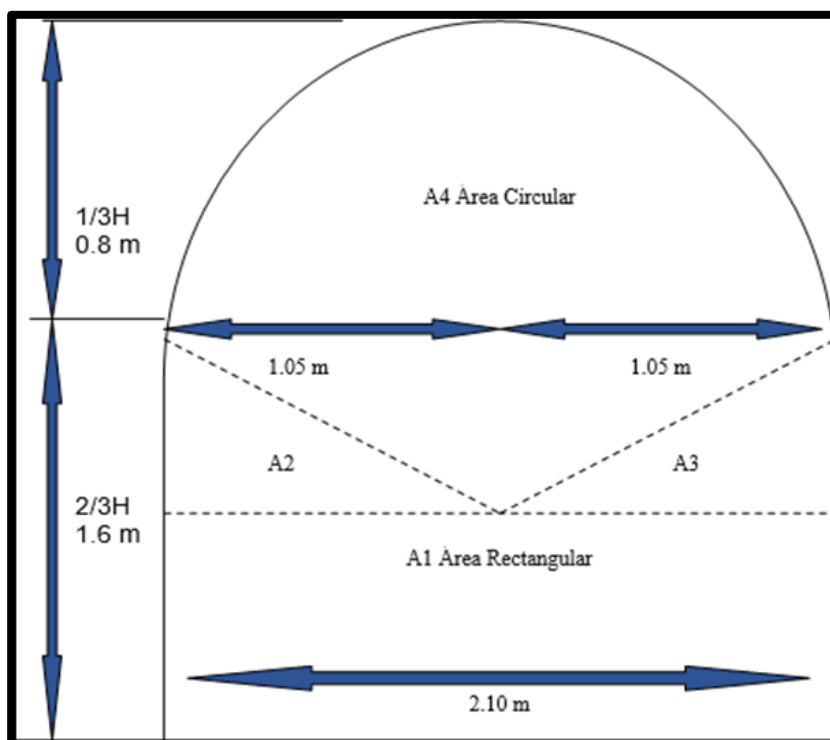
Tipo de roca	E
Dura	0,40 - 0,55
Intermedia	0,60 - 0,65
Blanda	0,70 - 0,75

- K = Coeficiente o factor de roca (Según el cuadro)

Tabla 8 — Coeficiente o factor de roca

Tipo de roca	K
Dura	2,00 - 2,50
Intermedia	1,50 - 1,70
Blanda	1,00 - 1,20

g) Sección del Frente: Debemos tener en cuenta el siguiente gráfico.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 4 — Medidas y áreas de un frente 2.10 m x 2.40 m

- **Calculando At (Área Total)** $A_t = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$

Obs: Por geometría la altura del rectángulo de las áreas A2 y A3 se obtiene con la formula pitagórica $x^2 = (x-0.8)^2 + (1.05)^2$ donde $x = 0.29$ $A_1 = 1.31 \text{ m} \times 2.10 \text{ m} = 2.75 \text{ m}^2$

$$A_2 = (b \times h) / 2 = (1.05 \text{ m} \times 0.29 \text{ m}) / 2 = 0.15 \text{ m}^2$$

$$A_3 = (b \times h) / 2 = (0.15 \text{ m}^2 \times 0.29 \text{ m}) / 2 = 0.15 \text{ m}^2$$

- **De la Figura 4**

Para el cálculo del Angulo en A4 se tiene que calcular el ángulo referente al lado base del rectángulo de los triángulos en A2 y A3 para lo cual debemos aplicar la formula $\tan(a) = (0.29/1.05)$ dándonos el ángulo 15.44° que multiplicado por 2 es 30.88° . Por geometría $\beta = 180^\circ - 30.88^\circ = 149.12^\circ$

$$A_4 = \frac{1}{2} \times \beta \times r^2 = 0.5 \times 0.83 \times (3.1416) \times (1.09)^2 = 1.55 \text{ m}^2$$

$$A_t = 2.75 \text{ m}^2 + 0.15 \text{ m}^2 + 0.15 \text{ m}^2 + 1.55 \text{ m}^2 = 4.6 \text{ m}^2$$

Tabla 9 — Cálculo del número de taladros en un frente 2.10 m x 2.40 m

$N_t = P/E + K \times S = 8.58/E + K \times 4.6$		
Roca Dura	Roca Intermedia	Roca Blanda
E=0.40 – 0.55	E= 0.60 – 0.65	E= 0.70 – 0.75
K= 2.00 – 2.50	K= 1.50 – 1.70	K= 1.00 – 1.20
Nt = 30.65	Nt= 21.2	Nt= 16.86
Nt = 31	Nt = 21	Nt = 17
Tal Alivio = 4	Tal Alivio = 3	Tal Alivio= 3
FUENTE: Elaboración propia		

h) Explosivos y accesorios

Los explosivos que se utilizan en Sociedad Minera Magistral son:

- Emulnor 3000
- Anfo
- Fulminante
- Conector
- Mecha Rápida
- Block de Sugesion
- Guía de Seguridad

El carguío de los taladros es manual, con el previo uso de cucharilla, sopleteo con aire comprimido y el atacador de madera.

i) Cálculo de cantidad de explosivos

$\text{Kg de Explosivo} = \text{Nt} \times 6 \text{ cart/Tal} \times \text{Peso del Cart.}$
 $\text{Guía de Seguridad} = \text{Nt} \times \text{Medida Guía (2.1)}$
 $\text{Conectores} = \text{Nt Taladros Cargados}$

$\text{Blok de Sugesion} = \text{Nt Taladros Cargados}$
 $\text{Fulminante} = \text{Nt Taladros Cargados}$
 $\text{Mecha Rápida} = 3.5 \text{ m}$



Tabla 10 — Diámetro equivalente de un taladro vacío

DH (mm)	dH (mm)	N
53.7	38	2
167.6	38	1.41
NOTA El diseño básico de voladura considera un arranque por corte quemado de 6.6 pulg.		

4.4.6.15 Cálculo de dimensiones del arranque

Tabla 11 — Dimensión arranque

CUADRO	1er Cuadrante	2do Cuadrante	3er Cuadrante	4to Cuadrante
B=	1.5 DH	2.12 DH	4.5 DH	9.54 DH
R=	1.5 DH	3.8 DH	6.75 DH	14.31 DH
E=	2.12 DH	4.5 DH	9.54 DH	20.23 DH
T=	1.5 DH	1.06 DH	2.25 DH	4.77 DH
REVISAR	Sc = vH	Sc = vH	Sc = vH	Sc = vH
CUADRO	1er Cuadrante	2do Cuadrante	3er Cuadrante	4to Cuadrante
B=	0.25	0.36	0.75	1.60
R=	0.25	0.64	1.13	14.31 DH
E=	0.36	0.75	1.60	20.23 DH
T=	0.25	0.18	2.25 DH	4.77 DH
REVISAR	Sc = vH	Sc = vH	Sc = vH	Sc = vH
FUENTE: Elaboración propia				

4.4.6.16 Profundidad del taladro (H)

$$H = (DH + 16.51)/41.67$$

Donde:

H: Profundidad del taladro (m)

DH: Diámetro del taladro (mm)

Tabla 12 — Profundidad

H (m)	(DH+16.51)	
1.685867899	70.3	41.67

4.4.6.17 Profundidad de avance esperada (L)

$$L = 0.95 \times H$$

Revise si la carga puede romper los bordes de cada cuadrante.

Utilice la formula del burden:

Profundidad

$$L = 0.95 \times H$$

$$1.6 = 0.95 \times 1.685867899$$

$$B = 0.012 \left(\left(\frac{2SGE}{SGR} \right) + 1.5 \right) \times De$$

Donde:

SGE: Gravedad especifica del explosivo

SGR: Gravedad especifica de la roca

De: Diametro del explosivo (m)\

Tabla 13 — Burden

B	0.012	2SGE	SGR	1.5	De
0.72	0.012	2.4	2.8	1.5	25.4

Taladros Auxiliares

$$B = 0.012 \left(\left(\frac{2SGE}{SGR} \right) + 1.5 \right) \times De$$

$$S = 1.1B$$

$$T = 0.5B$$

Donde:

Espaciamiento (m)

B=Burden (m)

T=Taco (m)

Tabla 14 — Auxiliares

B	0.012	2SGE	SGR	1.5	De
0.7	0.012	2.4	2.8	1.5	25.4
S (m)	1.1	B			
0.8	1.1	0.718			
T	0.5	B			
0.36	0.5	0.7			

4.4.6.18 Taladros de contorno (costilla y techo)

$$B = 0.012 \left(\left(\frac{2SGE}{SGR} \right) + 1.5 \right) \times De$$

$$S = 1.1B$$

$$T = B$$

Tabla 15 — Contorno

B	0.012	2SGE	SGR
0.7	0.012	2.4	2.8
S (m)	1.1	B	1.5
0.8	1.1	0.718	1.5
T	0.5	B	De
0.7	0.5	0.718	25.4

4.4.6.19 Taladros de piso

Tabla 16 — Taladros de piso

2.1	2	1.05
2.1	3	0.7
2.1	4	0.525
2.1	5	0.42

NOTA

Utilice 3 espacios y 4 taladros

Tabla 17 — Taladros

TIPO DE TALADRO	CANTIDAD	TIPO DE TALADRO	CANTIDAD
Piso	4	Hastial	4
Auxiliares	2	Corona	3
Arranque	14		
		TOTAL	27

4.4.6.20 Emulsión encartuchada

Características técnicas		EMULNOR® 500	EMULNOR® 1000	EMULNOR® 3000	EMULNOR® 5000
DENSIDAD RELATIVA (g/cm³)		0,90	1,13	1,14	1,16
VELOCIDAD DE DETONACIÓN (m/s)	CONFINADO *	4 400	5 800	5 700	5 500
	SI/CONFINAR **	3 500	4 500	4 400	4 200
PRESIÓN DE DETONACIÓN (kbar)		44	95	93	88
ENERGÍA (kcal/kg)		628	785	920	1010
VOLUMEN NORMAL DE GASES (L/kg)		952	920	880	870
POTENCIA RELATIVA EN PESO *** (%)		63	85	100	105
POTENCIA RELATIVA EN VOLUMEN *** (%)		75	120	145	155
SENSIBILIDAD AL FULMINANTE		Nº 8	Nº 8	Nº 8	Nº 8
RESISTENCIA AL AGUA		Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
CATEGORÍA DE HUMOS		Primera	Primera	Primera	Primera

* Velocidad de detonación en tubo de 1 ½ pulgadas de diámetro.
 ** Velocidad de detonación como cartucho de 1 pulgada de diámetro.
 *** Potencias relativas referidas al ANFO con potencia convencional de 100.

FUENTE: Famesa

Figura 7 — Emulsión

4.4.6.21 Anfo superfam dos

Características técnicas		SUPERFAM DOS®
DENSIDAD APARENTE (g/cm³)		0,80
VELOCIDAD DE DETONACIÓN * (m/s)		3 000
ENERGÍA TEÓRICA	Por peso (cal/g)	900
	Por volumen (cal/cm³)	738
ENERGÍA RELATIVA	Por peso (%)	100
	Por volumen (%)	100
PRESIÓN DETONACIÓN (kbar)		32

* Confinado en tubo de 2 pulgadas de diámetro.

Presentación

El SUPERFAM DOS® se presenta envasado en dos bolsas: una interior de polietileno y una externa de polipropileno con peso neto de 25 kg y un peso bruto de 25,3 kg.

FUENTE: Famesa

Figura 8 — ANFO

4.4.6.22 Detonador de mecha o fulminante

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:		FULMINANTE 8-45 mm AB			
LONGITUD DEL FULMINANTE (mm)		45			
DIÁMETRO DEL FULMINANTE (mm)		6,3			
PRUEBA DE ESOPPO, DIÁMETRO DE PERFORACIÓN (mm)		Min. 9,0			
VOLUMEN TRAUZL (cm ³)		Min. 23			
RESISTENCIA A LA HUMEDAD RELATIVA DEL 100% POR 24 HORAS		Detona			
RESISTENCIA AL IMPACTO 2 kg/1m		No Detona			
SENSIBILIDAD A LA CHISPA DE LA MECHA DE SEGURIDAD		Buena			

PRESENTACIÓN:

En cajas de cartón corrugado, conteniendo cajitas de cartón dúplex de 100 unidades cada una.

	MATERIAL DE CAJA	CAPACIDAD DE CAJA	PESO NETO (Kg)	PESO BRUTO (kg)	DIMENSIONES EXTERIORES (cm)
FULMINANTE 8-45 mm AB	Cartón	100 cajas x 100 unid.	14,40	17,30	34,3 x 32,0 x 26,7

FUENTE: Famesa

Figura 9 — Detonadores

4.4.6.23 Mecha de seguridad

Características Técnicas		MECHA DE SEGURIDAD			
COLOR DE RECUBRIMIENTO PLÁSTICO		Blanco			
NÚCLEO DE PÓLVORA (g/m)		6			
TIEMPO DE COMBUSTIÓN a.n.m. (s/m)		150 ± 10%			
LONGITUD DE LA CHISPA a.n.m. (mm)		50			
DIÁMETRO EXTERNO (mm)		5,2			
IMPERMEABILIDAD		Muy buena			
RESISTENCIA A LA TENSIÓN DURANTE 3 MINUTOS (kg)		30			

Presentación

	MATERIAL DE CAJA	CAPACIDAD DE CAJA	PESO NETO (kg)	PESO BRUTO (kg)	DIMENSIONES EXTERIORES (cm)
MECHA DE SEGURIDAD	Cartón	2 rollos x 500 m	23,8	24,5	37,1 x 37,1 x 31,0
MECHA DE SEGURIDAD	Cartón	10 rollos x 50 m	13,4	14,5	74,0 x 30,5 x 16,5

FUENTE: Famesa

Figura 10 — Mecha rápida

4.4.6.24 Cordón de ignición

Características Técnicas		MECHA RÁPIDA Z - 18	MECHA RÁPIDA Z - 19
COLOR DE LA MECHA RÁPIDA		Rojo	Verde
MATERIAL DE LA COBERTURA EXTERIOR		Plástico	Plástico
PESO DEL MATERIAL PIROTÉCNICO (g/m)		3,4	3,4
TIEMPO DE COMBUSTIÓN a.n.m (s/m)		35	26
DIÁMETRO EXTERNO (mm)		1,8	1,8
PESO TOTAL (g/m)		6,5	6,5

Presentación	MATERIAL DE CAJA	CAPACIDAD DE CAJA	PESO NETO (kg)	PESO BRUTO (kg)	DIMENSIONES EXTERIORES (cm)
MECHA RÁPIDA Z - 18	Cartón	10 rollos x 150 m	10,35	11,35	45,3 x 27,3 x 14,0
MECHA RÁPIDA Z - 19	Cartón	10 rollos x 150 m	10,45	11,45	45,3 x 27,3 x 14,0

FUENTE: Famesa

Figura 11 — Cordón detonante

4.4.6.25 Conector para cordón de ignición

Características técnicas					
Conector para mecha rápida 45 mm					
Diámetro externo (mm)	6,3				
Longitud del casquillo (mm)	45				
Ancho de la ranura (mm)	2,3 ± 0,2				
Carga de material pirotécnico (g)	0,5 ± 0,1				
Altura de carga (mm)	11,0 ± 3,0				

Presentación					
	Material de caja	Capacidad de caja	Peso neto (kg)	Peso bruto (kg)	Dimensiones exteriores (cm)
Conector para Mecha Rápida 45 mm	Cartón corrugado	40 cajas x 100 unid.	5,3	6,2	36,5 x 33,0 x 11,5

FUENTE: Famesa

Figura 12 — Conector

4.4.6.26 Volumen de roca a romper

$$\text{Volumen (V)} = S * L$$

Donde:

V: Volumen de roca

S: Dimensión de la sección (m²)

L: Longitud de avance (m), Longitud de barra (m), Longitud efecto. de Perforación (m).

P: Densidad de la roca

$$\text{Tonelaje}(t) = V * \rho$$

Tabla 18 — Volumen

V(m3)	S		L
	H	A	
7.92	2.1	2.4	1.6
Ton	V	TON/m3	
19.8	7.92	2.5	
FUENTE: Famesa			

4.4.6.27 Cantidad de carga promedio

- Factor de carga (Kg/m³)

Tabla 19 — Factor de carga

Área del túnel en m ²	En roca dura y tenaz (Kg/m ³)	En roca intermedia (Kg/m ³)	En roca suave y friable (Kg/m ³)
de 1 a 5	2.60 a 3.20	1.80 a 2.30	1.20 a 1.60
de 5 a 10	2.00 a 2.60	1.40 a 1.80	0.90 a 1.20
de 10 a 20	1.65 a 2.00	1.10 a 1.40	0.60 a 0.90
de 20 a 40	1.20 a 1.65	0.75 a 1.10	0.40 a 0.60
de 40 a 60	0.80 a 1.20	0.50 a 0.75	0.30 a 0.40
FUENTE: EXSA			

$$Qt = V \times \frac{Kg}{m^3}$$

Donde:

V: Volumen estimado Kg/m³

Factor de carga: Kg por m³ (cuadro anterior)

Carga

Qt (Kg)	V	kg/m ³
23	7.92	2.9

CARGA / TALADRO (CT)

Número de taladros = 24 Tal.

CT (Kg/Tal) Carga por taladro 0.957 Kg/Tal.

4.4.6.28 Cantidad de ANFO por metro de taladro

$$DL = 0.507 \times \rho_{exp} \times (\phi(")) ^2$$

Tabla 20 — Densidad lineal

DENSIDAD LINEAL (Kg/m)		
Ø(")	1.49606	pulg.
Densidad ANFO	0.80	g/cm ³
DL: Densidad lineal	0.91	Kg ANFO/m. Tal.
FUENTE: Famesa		

4.4.6.29 Cantidad de emulsión por taladro

Tabla 21 — Cantidad emulsión

Dimensión del cartucho =	0.2032	m
	0	
- Para un taladro de 4 pies, la longitud efecto. perforación =	1.10	m
La longitud de 4 cartuchos es =	0.81	m
En un taladro de 4 pies ingresan	4	cartuchos
- Para un taladro de 6 pies, la longitud efect. perforación =	1.70	m
La longitud de 7 cartuchos es =	1.42	m

En un taladro de 6 pies ingresan	7	cartuchos
FUENTE: Famesa		

En base a la información del manual práctico de voladura y a las pruebas realizadas en campo se obtiene las proporciones para la distribución de carga explosiva

Por la presencia de agua se decide colocar una mayor cantidad de emulsión para asegurar el disparo.

4.4.6.30 Cantidad de emulsión por disparo

Tabla 22 — Emulsión

TIPO DE TAL.	Nº TAL. (a)	Distribución (b)	CT (c)	KG. EXPLO. (d = a × b × c)	EMULNOR 3000 1¼" x 8" - Cart. x Tal (und)	EMULNOR 3000 1¼" x 8" - Carga Total (Kg)	ANFO SUPERFAM DOS - ANFO x Tal (Kg)	ANFO SUPERFAM DOS - Carga Total (Kg)
ARRANQUE	3	1.3	0.957	3.73	1	0.33	1.13	3.4
1ER AYUDA	4	1.1	0.957	4.21	1	0.44	0.94	3.77
2DA AYUDA	4	1.1	0.957	4.21	1	0.44	0.94	3.77
3RA AYUDA	2	1.1	0.957	2.1	1	0.22	0.94	1.89
HASTIALES	4	1	0.957	3.83	1	0.44	0.85	3.39
TECHO	3	1	0.957	2.87	1	0.33	0.85	2.54
PISO	4	1.1	0.957	4.21	1	0.33	0.85	0
TOTAL	24			25.17	7	3.07	0	0
FUENTE: Famesa								

4.4.6.31 Carga promedio por taladro

Tabla 23 — Carga promedio

DENOMINACIÓN	CARGA DOS	VACIO	E.3000 (kg)	ANFO (kg)	FULM. COMUN	M. SEGURIDAD	M. DE IGNICIÓN	C. IGNICIÓN
ARRANQUE	3	3	0.33	3.4	3	7.2		3
AYUDAS	10		1.1	9.43	10	24		10
HASTIALES	4		0.44	3.39	4	9.6		4
TECHO	3		0.33	2.54	3	7.2		3
PISO	4		3.07	0	4	9.6	1.2	4
TOTALES	24	3	5.26	18.77	24	57.6	1.2	24
FUENTE: Facto de carga 3.034 kg/m3								

Ejemplo Tercer Trimestre 2024 (Con la mejora)



4.4.6.32 Cantidad de emulsión

Tabla 24 — Emulsión por taladro

TIPO DE TAL.	Nº TAL. (a)	Distribución (b)	CT (c)	KG. EXPLO. (d = a × b × c)	EMULNOR 3000 1¼" x 8" - Cart. x Tal (und)	EMULNOR 3000 1¼" x 8" - Carga Total (Kg)	ANFO SUPERFAM DOS - ANFO x Tal (Kg)	ANFO SUPERFAM DOS - Carga Total (Kg)
ARRANQUE	3	1.3	0.957	3.73	1	0.33	1.13	3.4
1ER AYUDA	5	1.1	0.957	5.26	1	0.55	0.94	4.72
2DA AYUDA	5	1.1	0.957	5.26	1	0.55	0.94	4.72
3RA AYUDA	2	1.1	0.957	2.11	1	0.22	0.94	1.89
HASTIALES	4	1	0.957	3.83	1	0.44	0.85	3.39
TECHO	3	1	0.957	2.87	1	0.33	0.85	2.54
PISO	4	1.1	0.957	4.21	1	0.33	0	0
TOTAL	26			27.27	7	3.07	0	0
FUENTE: Famesa								

4.4.6.33 Carga promedio por taladro

Tabla 25 — Carga por taladro

DENOMINACIÓN	CARGA DOS	VACIO	E.3000 (Kg)	ANFO (Kg)	FULM. COMUN	M. SEGURIDAD	M. DE IGNICIÓN	C. IGNICIÓN
ARRANQUE	3	3	0.33	3.4	3	7.2		3
AYUDAS	12		1.32	11.32	12	28.8		12
HASTIALES	4		0.44	3.39	4	9.6		4
TECHO	3		0.33	2.54	3	7.2		3
PISO	4		3.07	0	4	9.6	1.2	4
TOTALES	26	3	5.48	20.65	26	62.4	1.2	26
FUENTE: Factor de carga 3.300 kg/m ³								

Con el aumento de 2 taladros de producción el factor de carga pasa de 3.034 a 3.300 lo que representa un 8.76% de aumento del factor de carga.

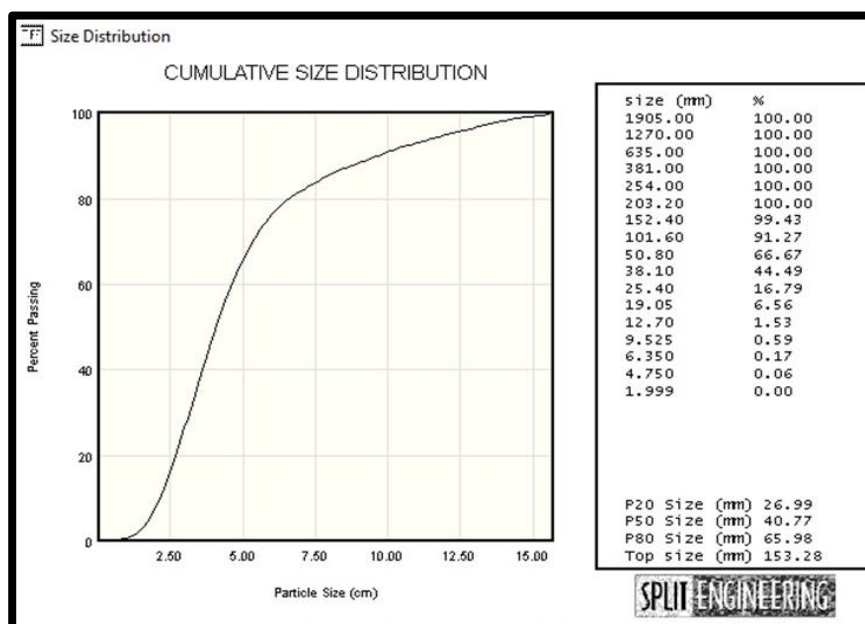
4.4.6.34 Análisis Spit Desktop

Se adjunta resultados de la fragmentación en la GL 559 Nv 8.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 13 — Carga post voladura



FUENTE: Elaboración propia

Figura 14 — Carga post voladura en la galería 559 Nv 8

4.5 Técnica e instrumentos

Para el desarrollo de la presente investigación se empleó la observación estructurada como técnica principal, complementada con el análisis documental de reportes operativos y software especializado. Estas técnicas permitieron recolectar datos cuantitativos fiables y comparables en los dos periodos de estudio (antes y después de la optimización del diseño de voladura).

Los instrumentos utilizados fueron los siguientes:

- Fichas de registro de campo: para documentar las características operativas de cada voladura (burden, espaciamiento, diámetro, carga explosiva, profundidad, secuencia de detonación).
- Informes de planta de chancado: para obtener indicadores de productividad como toneladas por día (TPD), consumo de energía por tonelada (kWh/T) y costos unitarios de trituración (USD/T).
- Software Split-Desktop: empleado para el análisis de la granulometría P80 mediante procesamiento digital de imágenes del material volado en la zona de tolva, permitiendo una evaluación precisa del tamaño de fragmentación.
- Hojas de cálculo (Excel): utilizadas para organizar, sistematizar y comparar los datos obtenidos, permitiendo la elaboración de tablas de resultados por voladura, por trimestre y por indicador.
- Software estadístico (SPSS o Excel): aplicado para ejecutar la prueba no paramétrica de Wilcoxon para muestras relacionadas, con el fin de determinar la significancia estadística de las mejoras obtenidas entre el segundo y tercer trimestre del año 2024.

Estos instrumentos garantizaron la confiabilidad y validez de los datos recolectados, facilitando una interpretación técnica rigurosa y alineada con los objetivos de la investigación.



CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Análisis de resultados

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de la aplicación del rediseño de voladura en la Minera Magistral de Huaraz S.A.C., con el objetivo de optimizar la fragmentación del material volado y, en consecuencia, mejorar la productividad del material triturado en planta. Los datos recolectados fueron organizados en función de los indicadores establecidos: granulometría P80, toneladas procesadas por día (TPD), consumo energético por tonelada (kWh/T) y costo unitario de trituración (USD/T).

La información se estructuró comparativamente entre dos periodos: el segundo trimestre de 2024, correspondiente a las voladuras realizadas sin optimización, y el tercer trimestre del mismo año, que contempló la ejecución del nuevo diseño de voladura. Se procesaron los datos mediante hojas de cálculo y se aplicó la prueba estadística de Wilcoxon para evaluar la significancia de los cambios.

Los resultados permiten verificar si la hipótesis planteada fue validada y si la optimización de los parámetros de voladura tuvo un impacto positivo y medible sobre la eficiencia y productividad del proceso de chancado. A continuación, se detallan los hallazgos correspondientes a cada indicador de desempeño, acompañados de tablas, gráficos y análisis técnico-interpretativo.



Tabla 26 — Parámetros del segundo trimestre

Mes	TPD	KW-H/T	P80	KG/m3	USD/T
Mes 1	272	12.2	14.6	0.318	5.31
Mes 2	272	12.2	14.7	0.318	5.32
Mes 3	272	12.2	14.7	0.316	5.29
Total	272	12.2	14.7	0.317	5.31
NOTA Parámetros de consumo de energía, fragmentación, producción y costo de trituración de los meses de abril, mayo y junio del 2024.					

Tabla 27 — Parámetros del tercer trimestre

Mes	TPD	KW-H/T	P80	KG/m3	USD/T
Mes 1	310	10.2	8.2	0.363	4.48
Mes 2	308	10.3	8.2	0.365	4.48
Mes 3	308	10.3	8.2	0.364	4.47
Total	309	10.3	8.2	0.364	4.48
NOTA Parámetros de consumo de energía, fragmentación, producción y costo de trituración de los meses de julio, agosto y septiembre del 2024.					

Tabla 28 — Descripción de indicadores

INDICADOR	DESCRIPCIÓN
TPD	Toneladas por hora trituradora
KW-H/T	Work index
P80	Fragmentación
KG/M3	Factor de carga
USD/T	Costo de trituración
NOTA Descripción de los parámetros utilizados	

Tabla 29 — Parámetros abril 2024

TRIMESTRE	MES	MES	FECHA	TP D	KW- H/T	P80	KG/M3	USD/T
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	1/04/2024	277	12.4	14.5	0.309	5.35
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	2/04/2024	280	11.9	14.5	0.320	5.32
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	3/04/2024	276	12.3	15.0	0.312	5.30
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	4/04/2024	268	11.9	14.9	0.312	5.36
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	5/04/2024	270	11.9	14.8	0.312	5.34
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	6/04/2024	266	12.4	14.4	0.309	5.39
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	7/04/2024	276	12.3	14.6	0.312	5.40
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	8/04/2024	272	12.4	14.7	0.319	5.18
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	9/04/2024	266	12.5	14.7	0.314	5.39
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	10/04/2024	276	12.2	14.4	0.318	5.18
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	11/04/2024	270	11.9	14.9	0.322	5.18
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	12/04/2024	267	12.3	14.5	0.311	5.20
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	13/04/2024	266	12.4	14.5	0.319	5.21
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	14/04/2024	271	12.3	15.0	0.309	5.38
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	15/04/2024	274	12.3	14.3	0.309	5.26
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	16/04/2024	268	12.1	14.6	0.323	5.33



Segundo trimestre	Mes 1	Abril	17/04/2024 4	278	11.9	14.5	0.325	5.37
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	18/04/2024 4	273	12.1	14.3	0.323	5.44
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	19/04/2024 4	269	12.2	14.5	0.325	5.45
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	20/04/2024 4	267	12.3	14.3	0.324	5.21
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	21/04/2024 4	267	12.0	14.8	0.314	5.30
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	22/04/2024 4	268	12.4	14.6	0.324	5.38
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	23/04/2024 4	276	12.1	14.8	0.325	5.21
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	24/04/2024 4	270	12.0	14.9	0.324	5.32
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	25/04/2024 4	278	12.4	14.7	0.312	5.27
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	26/04/2024 4	274	12.5	14.8	0.313	5.27
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	27/04/2024 4	271	12.0	14.6	0.323	5.22
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	28/04/2024 4	275	12.4	14.7	0.325	5.42
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	29/04/2024 4	267	12.2	14.5	0.322	5.42
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	30/04/2024 4	273	12.4	14.7	0.325	5.38
Promedio				272	12.2	14.6	0.318	5.31
NOTA Parámetros de consumo de energía, fragmentación, producción y costo de trituración de abril del 2024								

Tabla 30 — Parámetros mayo 2024

TRIMESTRE	MES	MES	FECHA	TPD	KW-H/T	P80	KG/M3	USD/T
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	1/05/2024	266	12.4	14.5	0.315	5.32
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	2/05/2024	272	12.4	14.5	0.323	5.26
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	3/05/2024	276	12.0	14.9	0.318	5.43
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	4/05/2024	271	12.5	14.3	0.322	5.25
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	5/05/2024	267	12.1	14.8	0.321	5.34
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	6/05/2024	270	12.0	14.6	0.314	5.28
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	7/05/2024	272	11.9	14.4	0.323	5.42
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	8/05/2024	277	12.2	14.3	0.322	5.33
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	9/05/2024	278	12.4	14.7	0.317	5.42
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	10/05/2024	278	12.5	15.0	0.324	5.39
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	11/05/2024	266	11.9	14.3	0.318	5.28
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	12/05/2024	276	12.4	14.9	0.309	5.31
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	13/05/2024	274	11.9	15.0	0.325	5.24
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	14/05/2024	269	12.1	14.8	0.313	5.30
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	15/05/2024	275	12.4	14.9	0.320	5.42
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	16/05/2024	272	12.1	14.9	0.314	5.30
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	17/05/2024	280	12.4	14.6	0.315	5.27
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	18/05/2024	268	12.4	14.7	0.315	5.20
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	19/05/2024	267	12.0	14.5	0.323	5.33

Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	20/05/2024	266	12.5	14.3	0.324	5.35
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	21/05/2024	278	12.2	14.9	0.322	5.21
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	22/05/2024	273	12.2	14.7	0.320	5.36
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	23/05/2024	277	12.5	14.8	0.312	5.40
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	24/05/2024	268	12.4	14.3	0.316	5.38
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	25/05/2024	279	12.0	14.7	0.317	5.31
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	26/05/2024	267	12.5	15.0	0.312	5.33
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	27/05/2024	267	12.0	14.8	0.319	5.33
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	28/05/2024	278	12.2	14.4	0.324	5.29
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	29/05/2024	266	12.3	14.6	0.309	5.22
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	30/05/2024	271	12.1	14.9	0.312	5.35
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	31/05/2024	274	12.1	14.6	0.312	5.20
Promedio				272	12.2	14.7	0.318	5.32
NOTA. Parámetros de consumo de energía, fragmentación, producción y costo de trituración de mayo del 2024.								

Tabla 31 — Parámetros junio 2024

TRIMESTRE	MES	MES	FECHA	TPD	KW-H/T	P80	KG/M3	USD/T
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	1/06/2024	272	12.1	14.7	0.317	5.25
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	2/06/2024	267	12.5	15.0	0.314	5.30
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	3/06/2024	268	12.3	14.5	0.310	5.22



Segundo trimestre	Mes 3	Junio	4/06/2024	272	12.4	14.5	0.318	5.23
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	5/06/2024	269	12.3	14.4	0.318	5.36
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	6/06/2024	272	12.4	14.5	0.313	5.27
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	7/06/2024	269	12.5	14.4	0.310	5.43
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	8/06/2024	277	12.4	14.3	0.315	5.30
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	9/06/2024	276	12.0	14.8	0.318	5.19
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	10/06/2024	275	12.2	14.7	0.323	5.23
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	11/06/2024	270	12.3	14.6	0.324	5.31
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	12/06/2024	274	12.1	14.7	0.319	5.21
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	13/06/2024	272	12.4	14.9	0.319	5.35
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	14/06/2024	275	11.9	14.8	0.313	5.31
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	15/06/2024	272	12.1	14.5	0.317	5.32
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	16/06/2024	268	12.0	14.7	0.316	5.30
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	17/06/2024	272	12.5	14.9	0.320	5.27
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	18/06/2024	270	12.2	15.0	0.315	5.22
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	19/06/2024	273	11.9	14.6	0.319	5.42



Segundo trimestre	Mes 3	Junio	20/06/2024	278	11.9	14.4	0.325	5.23
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	21/06/2024	277	12.0	14.9	0.310	5.23
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	22/06/2024	267	12.3	15.0	0.311	5.26
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	23/06/2024	267	11.9	14.6	0.311	5.40
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	24/06/2024	271	12.2	14.6	0.313	5.18
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	25/06/2024	268	12.3	14.4	0.315	5.37
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	26/06/2024	280	12.3	14.6	0.315	5.22
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	27/06/2024	276	12.5	14.8	0.322	5.18
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	28/06/2024	269	12.5	14.9	0.310	5.23
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	29/06/2024	270	12.3	14.6	0.321	5.40
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	30/06/2024	270	12.3	14.5	0.321	5.42
			Promedio	272	12.2	14.7	0.316	5.29
NOTA. Parámetros de consumo de energía, fragmentación, producción y costo de trituración de junio del 2024.								

Tabla 32 — Parámetros julio 2024

TRIMESTRE	MES	MES	FECHA	TPD	KW-H/T	P80	KG/M3	USD/T
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	1/07/2024	312	10.3	8.2	0.356	4.42
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	2/07/2024	310	10.1	8.2	0.372	4.57
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	3/07/2024	313	10.1	8.1	0.368	4.40
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	4/07/2024	309	10.1	8.2	0.356	4.57
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	5/07/2024	310	10.3	8.0	0.358	4.42
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	6/07/2024	309	10.1	8.1	0.363	4.41
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	7/07/2024	302	10.0	8.4	0.369	4.48
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	8/07/2024	315	10.5	8.2	0.365	4.41
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	9/07/2024	312	10.4	8.1	0.365	4.47
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	10/07/2024	309	10.4	8.2	0.355	4.56
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	11/07/2024	312	10.3	8.3	0.359	4.39
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	12/07/2024	312	10.4	8.2	0.358	4.46
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	13/07/2024	309	10.3	8.3	0.370	4.46
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	14/07/2024	312	10.0	8.3	0.368	4.54
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	15/07/2024	313	10.3	8.0	0.359	4.48
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	16/07/2024	309	10.1	8.3	0.370	4.38
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	17/07/2024	312	10.3	8.3	0.369	4.52
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	18/07/2024	311	10.0	8.1	0.359	4.45
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	19/07/2024	313	10.1	8.3	0.360	4.56



Tercer trimestre	Mes 1	Julio	20/07/2024	307	10.4	8.4	0.360	4.56
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	21/07/2024	312	10.5	8.1	0.365	4.53
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	22/07/2024	303	10.4	8.1	0.366	4.46
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	23/07/2024	310	10.3	8.2	0.355	4.52
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	24/07/2024	304	10.2	8.3	0.370	4.58
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	25/07/2024	303	10.5	8.4	0.372	4.55
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	26/07/2024	310	10.4	8.2	0.357	4.47
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	27/07/2024	306	10.3	8.0	0.362	4.40
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	28/07/2024	313	10.0	8.3	0.358	4.59
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	29/07/2024	308	10.4	8.0	0.363	4.40
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	30/07/2024	307	10.3	8.2	0.367	4.48
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	31/07/2024	312	10.2	8.1	0.368	4.52
Promedio				310	10.2	8.2	0.363	4.48
NOTA. Parámetros de consumo de energía, fragmentación, producción y costo de trituración de julio del 2024.								

Tabla 33 — Parámetros agosto 2024

TRIMESTRE	MES	MES	FECHA	TPD	KW-H/T	P80	KG/M3	USD/T
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	1/08/2024	310	10.3	8.1	0.361	4.40
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	2/08/2024	311	10.4	8.2	0.367	4.53
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	3/08/2024	311	10.1	8.4	0.366	4.54
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	4/08/2024	305	10.3	8.3	0.358	4.49
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	5/08/2024	311	10.4	8.1	0.372	4.47

Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	6/08/2024	300	10.4	8.1	0.362	4.51
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	7/08/2024	314	10.2	8.1	0.355	4.44
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	8/08/2024	311	10.1	8.3	0.367	4.50
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	9/08/2024	303	10.1	8.3	0.371	4.42
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	10/08/2024	315	10.4	8.1	0.370	4.38
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	11/08/2024	300	10.4	8.1	0.359	4.40
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	12/08/2024	307	10.0	8.1	0.358	4.41
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	13/08/2024	314	10.4	8.0	0.372	4.39
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	14/08/2024	308	10.1	8.3	0.358	4.45
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	15/08/2024	314	10.1	8.0	0.371	4.39
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	16/08/2024	301	10.5	8.3	0.367	4.39
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	17/08/2024	313	10.1	8.1	0.370	4.59
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	18/08/2024	312	10.3	8.3	0.365	4.57
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	19/08/2024	312	10.1	8.3	0.368	4.50
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	20/08/2024	302	10.5	8.4	0.364	4.39
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	21/08/2024	303	10.5	8.4	0.355	4.55
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	22/08/2024	313	10.1	8.1	0.365	4.57
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	23/08/2024	309	10.2	8.4	0.370	4.51
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	24/08/2024	301	10.0	8.0	0.360	4.59
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	25/08/2024	306	10.3	8.2	0.357	4.43
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	26/08/2024	304	10.3	8.0	0.372	4.55
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	27/08/2024	302	10.3	8.1	0.365	4.46

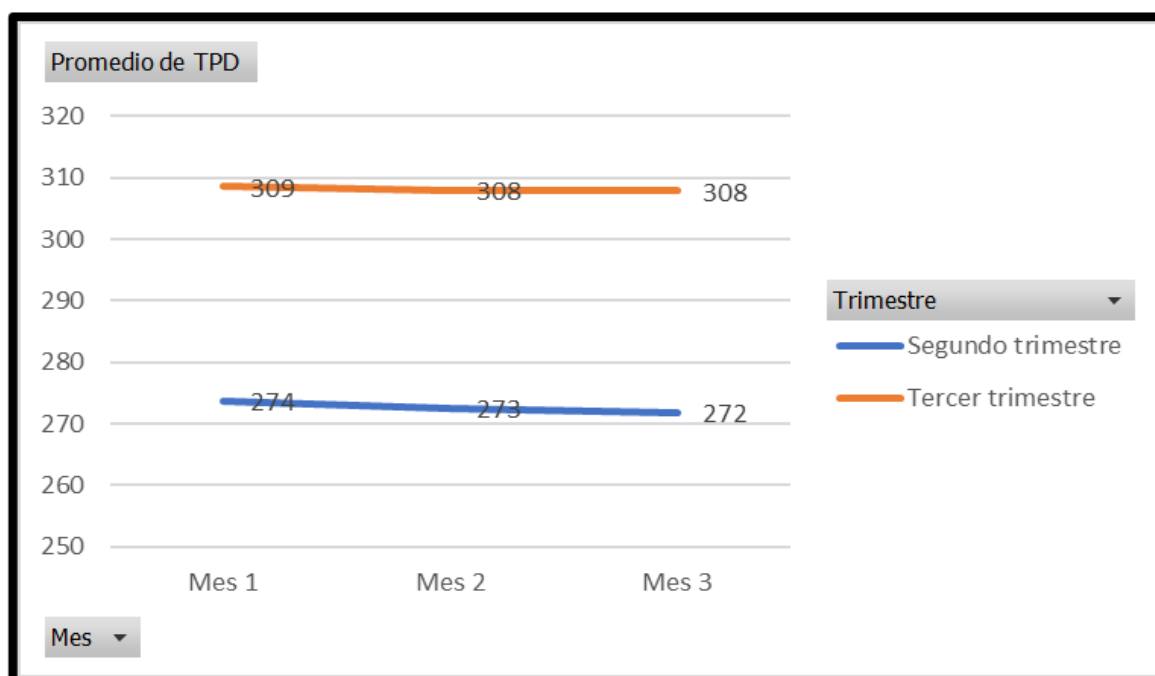


Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	28/08/2024	308	10.0	8.2	0.367	4.57
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	29/08/2024	307	10.3	8.4	0.362	4.40
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	30/08/2024	307	10.3	8.4	0.371	4.58
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	31/08/2024	301	10.3	8.2	0.368	4.48
			Promedio	308	10.3	8.2	0.365	4.48
NOTA. Parámetros de consumo de energía, fragmentación, producción y costo de trituración de agosto del 2024								

Tabla 34 — Parámetros septiembre 2024

TRIMESTRE	MES	MES	FECHA	TP D	KW- H/T	P80	KG/M 3	USD/T
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	1/09/2024	303	10.2	8.0	0.372	4.54
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	2/09/2024	12	10.4	8.3	0.363	4.40
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	3/09/2024	315	10.1	8.3	0.369	4.40
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	4/09/2024	300	10.4	8.1	0.357	4.41
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	5/09/2024	315	10.5	8.3	0.365	4.38
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	6/09/2024	308	10.2	8.4	0.368	4.39
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	7/09/2024	302	10.2	8.3	0.364	4.52
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	8/09/2024	303	10.4	8.0	0.371	4.51
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	9/09/2024	312	10.2	8.1	0.357	4.59
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	10/09/2024	304	10.2	8.3	0.365	4.55
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	11/09/2024	308	10.1	8.0	0.365	4.47
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	12/09/2024	307	10.2	8.2	0.368	4.46
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	13/09/2024	311	10.2	8.0	0.367	4.50
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	14/09/2024	314	10.5	8.0	0.368	4.53
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	15/09/2024	307	10.2	8.4	0.369	4.44
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	16/09/2024	311	10.2	8.3	0.367	4.39
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	17/09/2024	309	10.1	8.0	0.355	4.47
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	18/09/2024	309	10.3	8.3	0.357	4.41
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	19/09/2024	303	10.1	8.0	0.362	4.55
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	20/09/2024	309	10.3	8.2	0.370	4.54
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	21/09/2024	312	10.1	8.2	0.369	4.46
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	22/09/2024	311	10.4	8.3	0.364	4.51

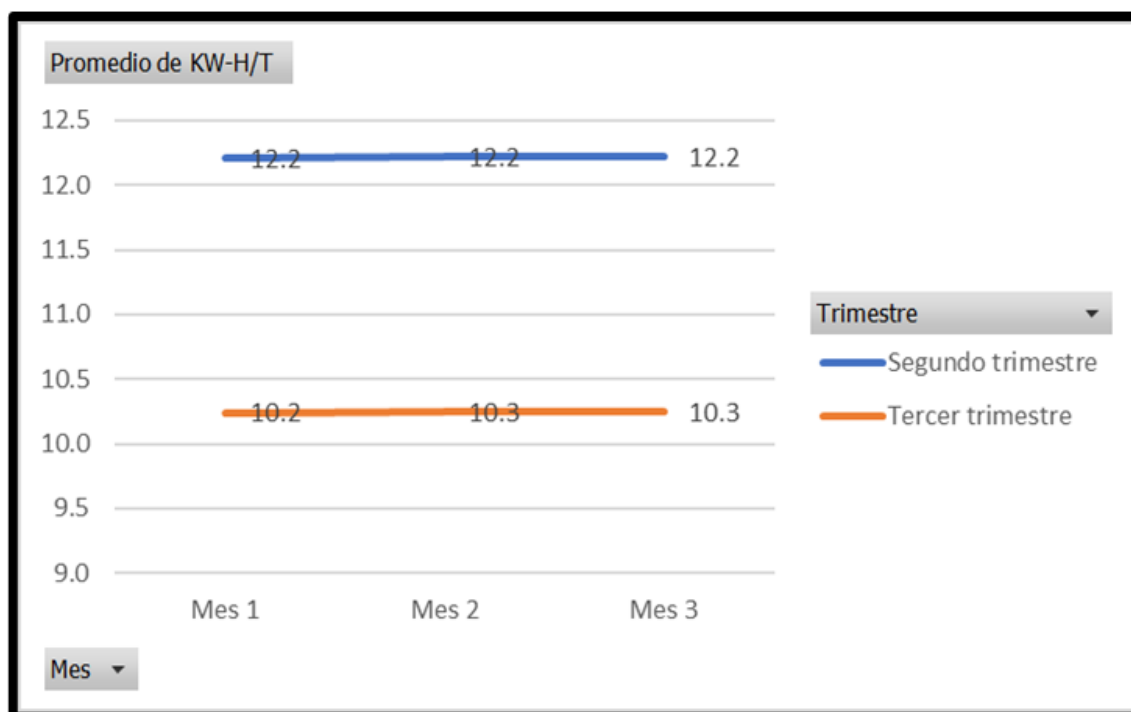
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	23/09/2024	308	10.2	8.4	0.355	4.44
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	24/09/2024	302	10.0	8.1	0.359	4.43
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	25/09/2024	303	10.2	8.1	0.372	4.49
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	26/09/2024	307	10.3	8.2	0.369	4.38
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	27/09/2024	300	10.3	8.4	0.359	4.53
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	28/09/2024	313	10.2	8.3	0.357	4.54
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	29/09/2024	314	10.4	8.0	0.356	4.55
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	30/09/2024	307	10.3	8.0	0.356	4.41
Promedio				308	10.3	8.2	0.364	4.47
NOTA.								
Parámetros de consumo de energía, fragmentación, producción y costo de trituración de septiembre del 2024.								



NOTA

Producción de los meses del segundo vs tercer trimestre del 2024

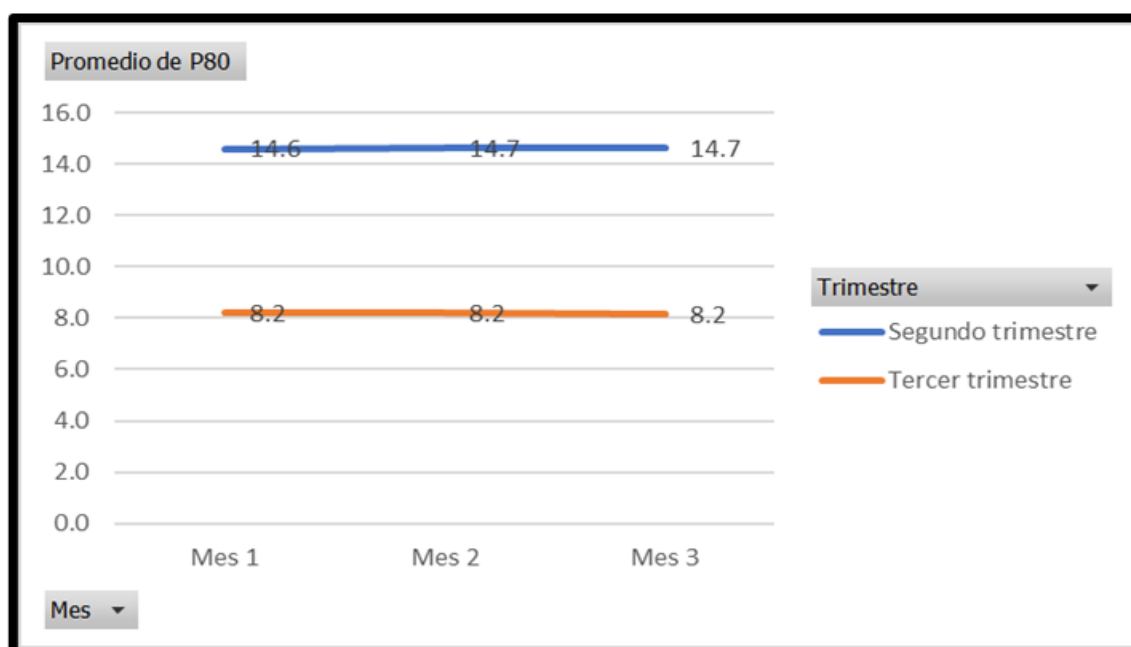
Figura 15 — Producción



NOTA

Consumo de energía de los meses del segundo vs tercer trimestre del 2024.

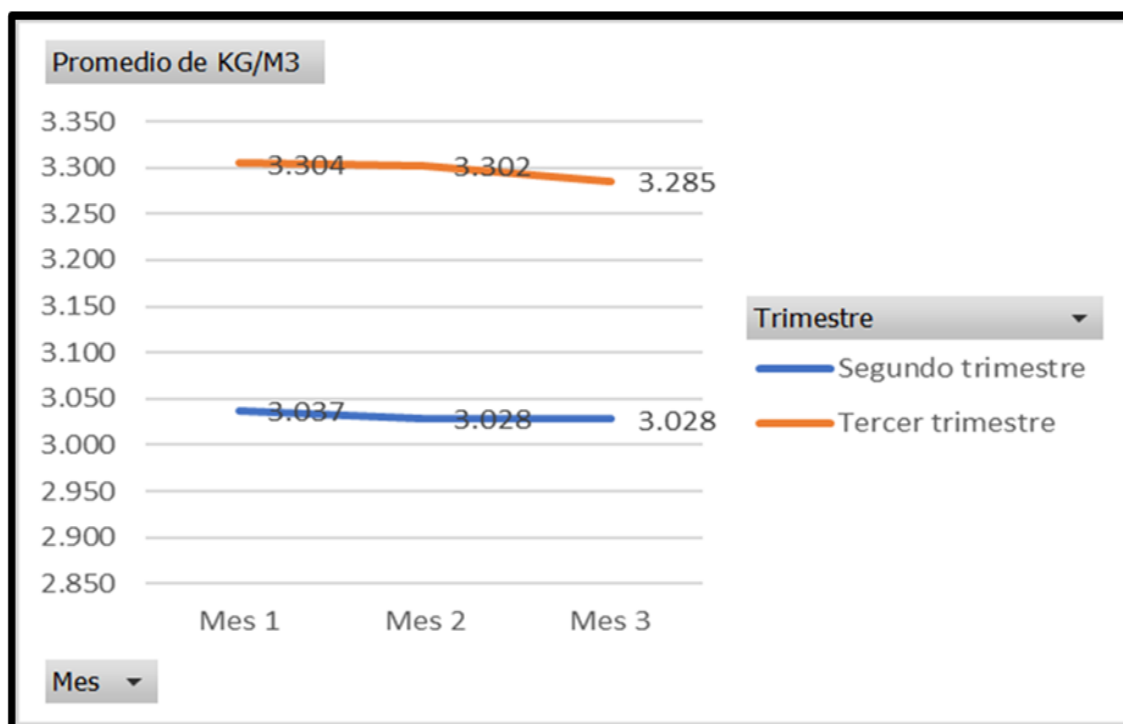
Figura 16 — Consumo de energía



NOTA

Fragmentación de los meses del segundo vs tercer trimestre del 2024

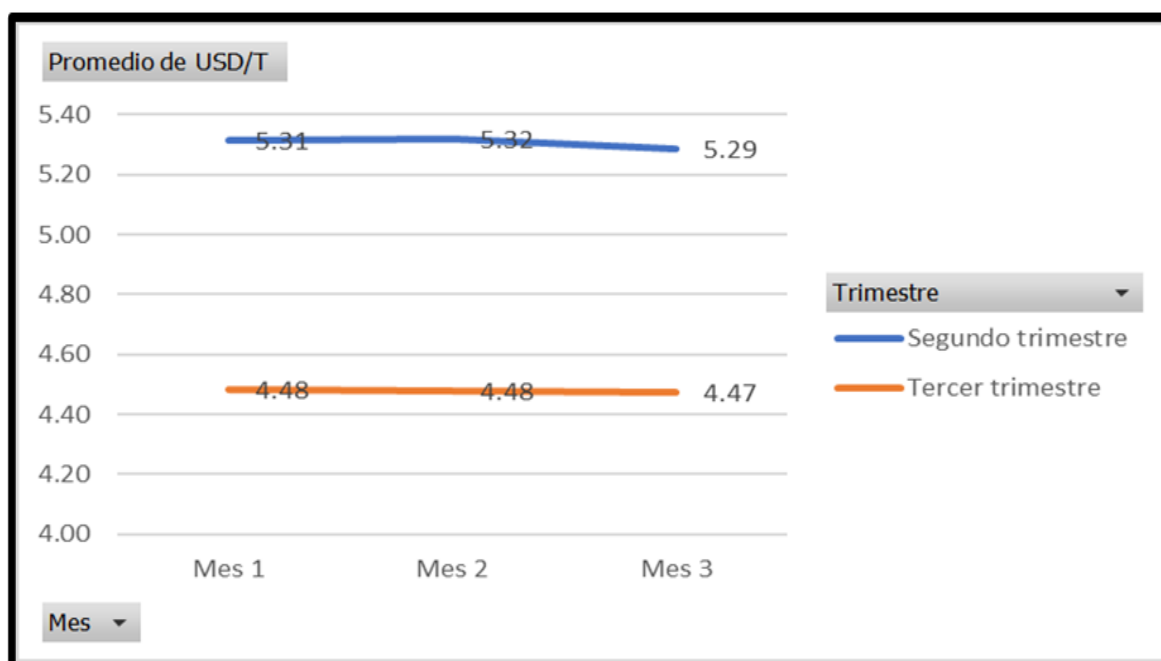
Figura 17 — Fragmentación



NOTA

Factor de carga de los meses del segundo vs tercer trimestre del 2024

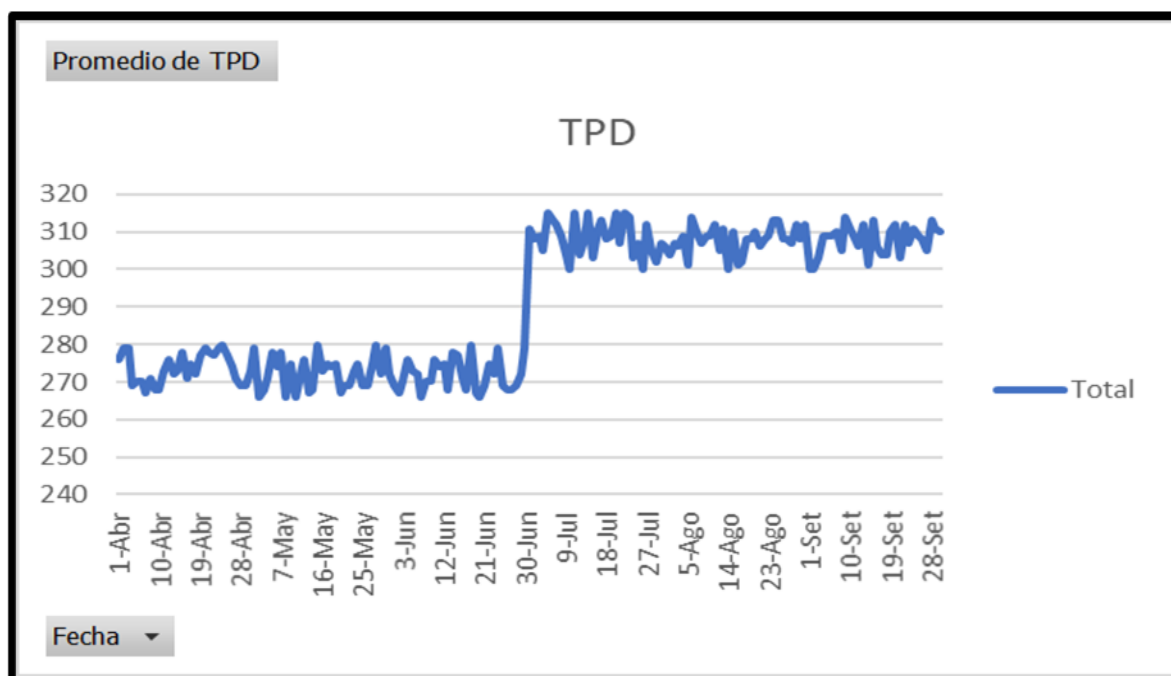
Figura 18 — Factor de carga



NOTA

Costo de trituración de los meses del segundo vs tercer trimestre del 2024

Figura 19 — Costo de trituración

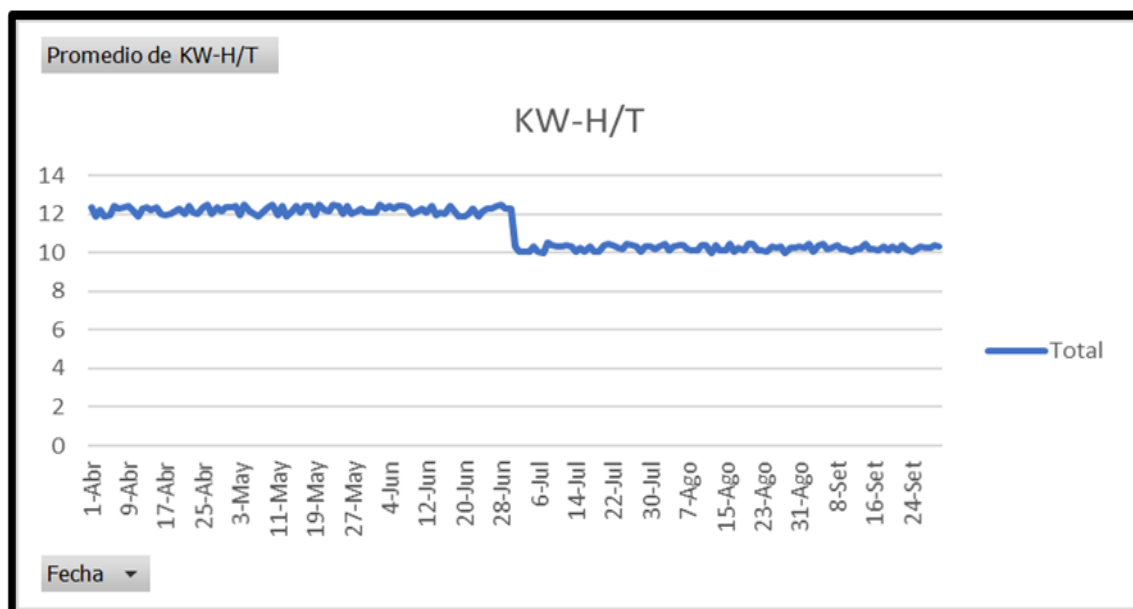


NOTA

Producción del segundo y tercer trimestre del 2024

Figura 20 — Producción

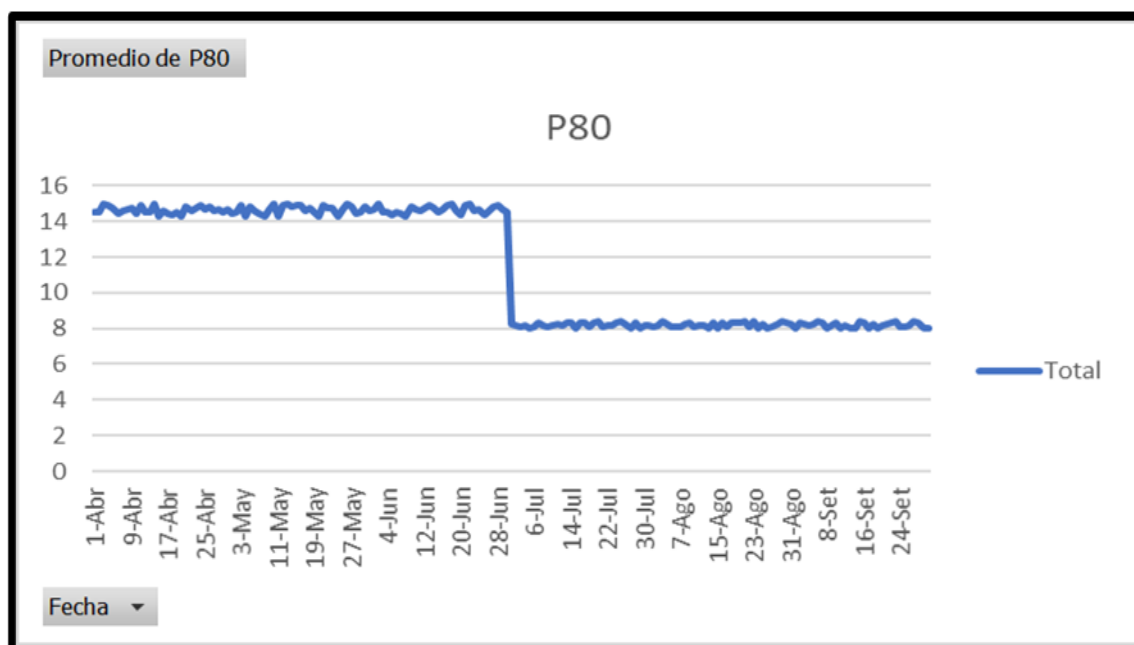
Figura 21 — Consumo de energía



NOTA

Consumo de energía del segundo y tercer trimestre del 2024

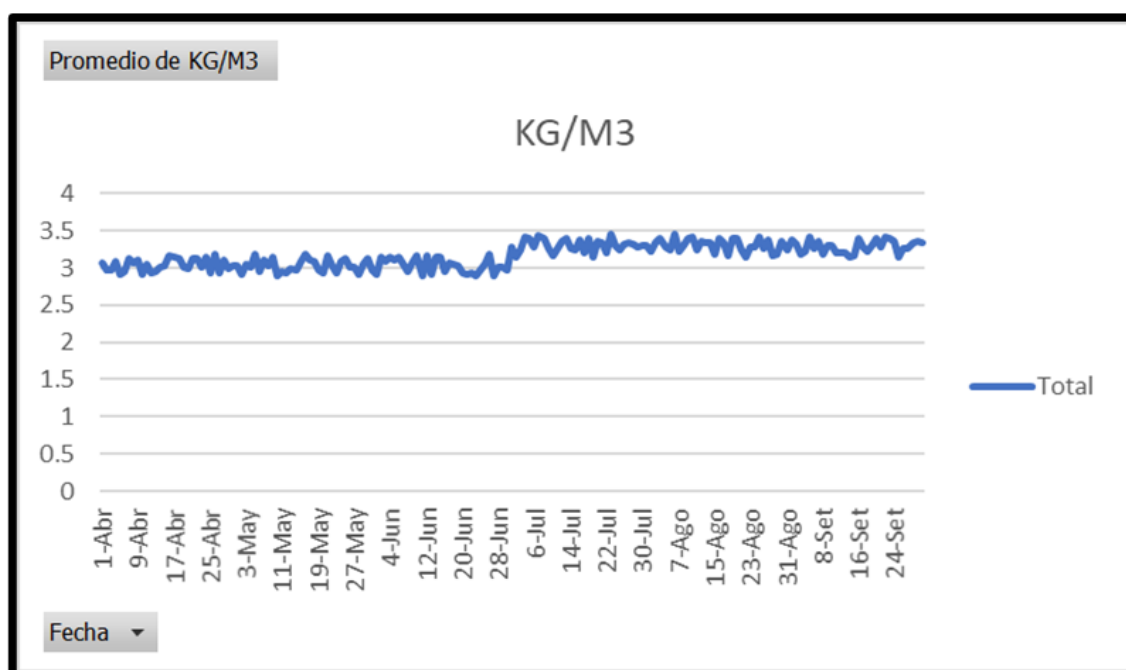
Figura 22 — Consumo de energía



NOTA

Fragmentación del segundo y tercer trimestre del 2024.

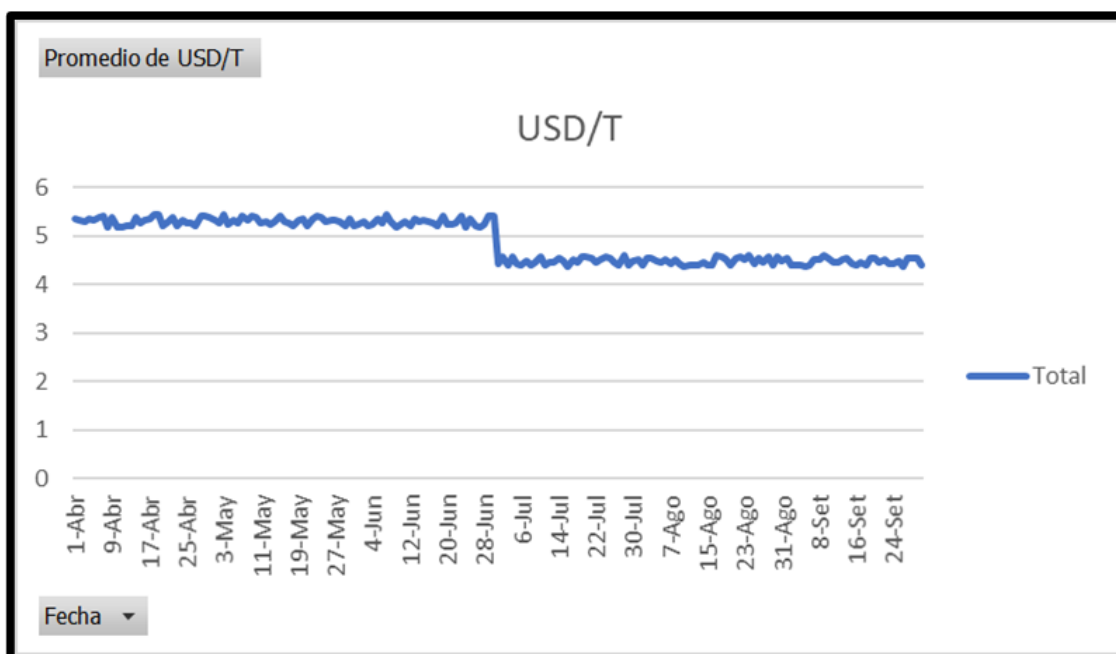
Figura 23 — Fragmentación



NOTA

Factor de carga del segundo y tercer trimestre del 2024

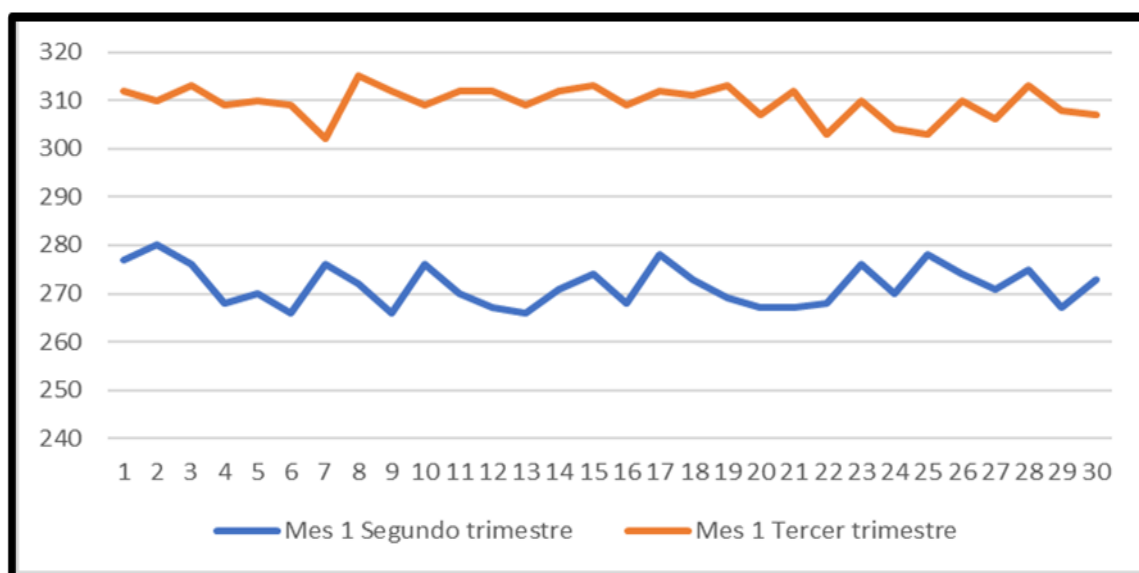
Figura 24 — Factor de carga



NOTA

Costo de trituración del segundo y tercer trimestre del 2024

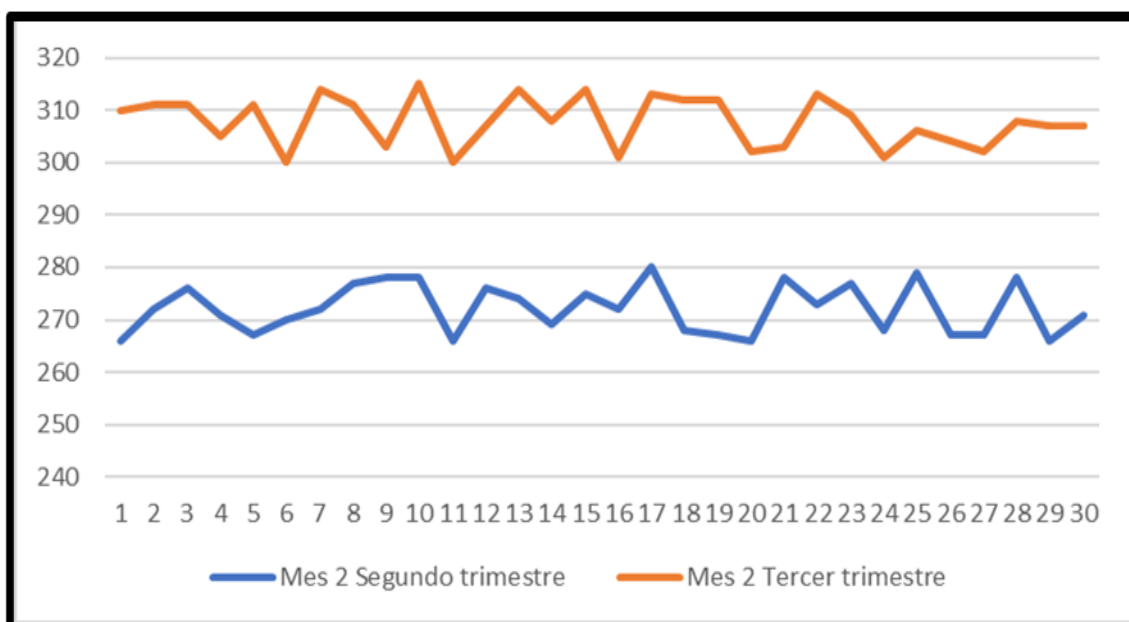
Figura 25 — Costo de trituración



NOTA

Producción mes 1 del segundo vs tercer trimestre del 2024

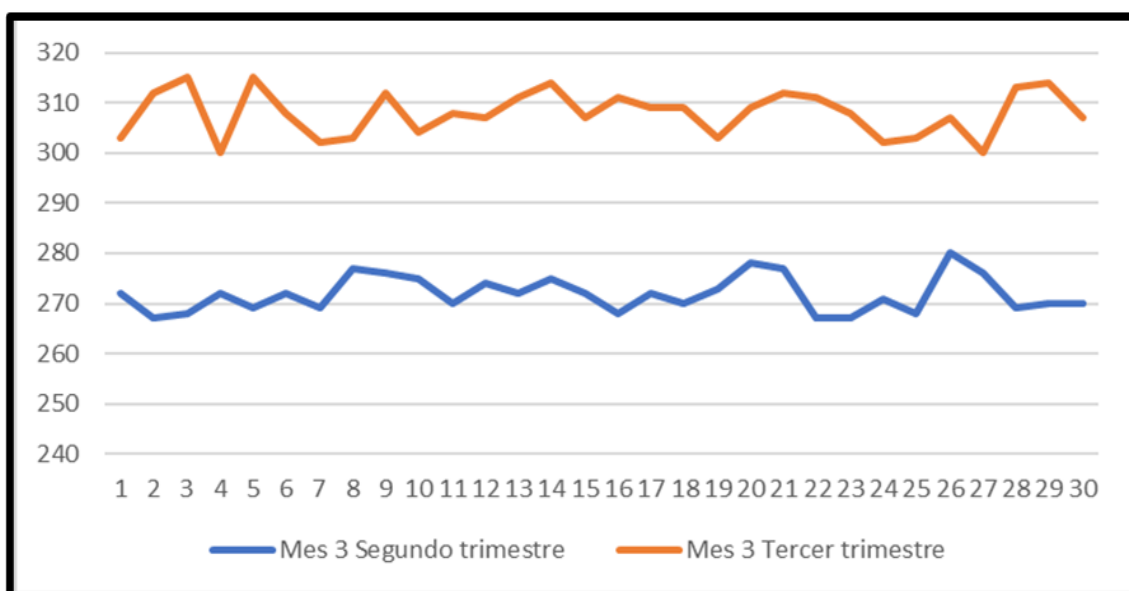
Figura 26 — Producción mes 1



NOTA

Producción mes 2 del segundo vs tercer trimestre del 2024

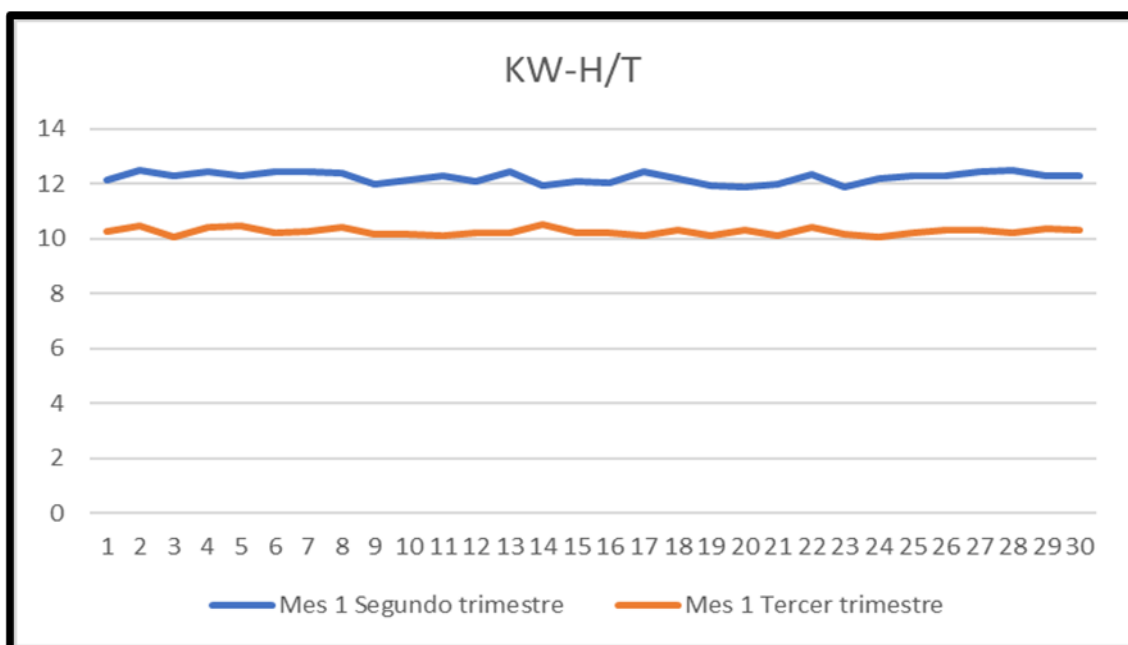
Figura 27 — Producción mes 2



NOTA

Producción mes 3 del segundo vs tercer trimestre del 2024

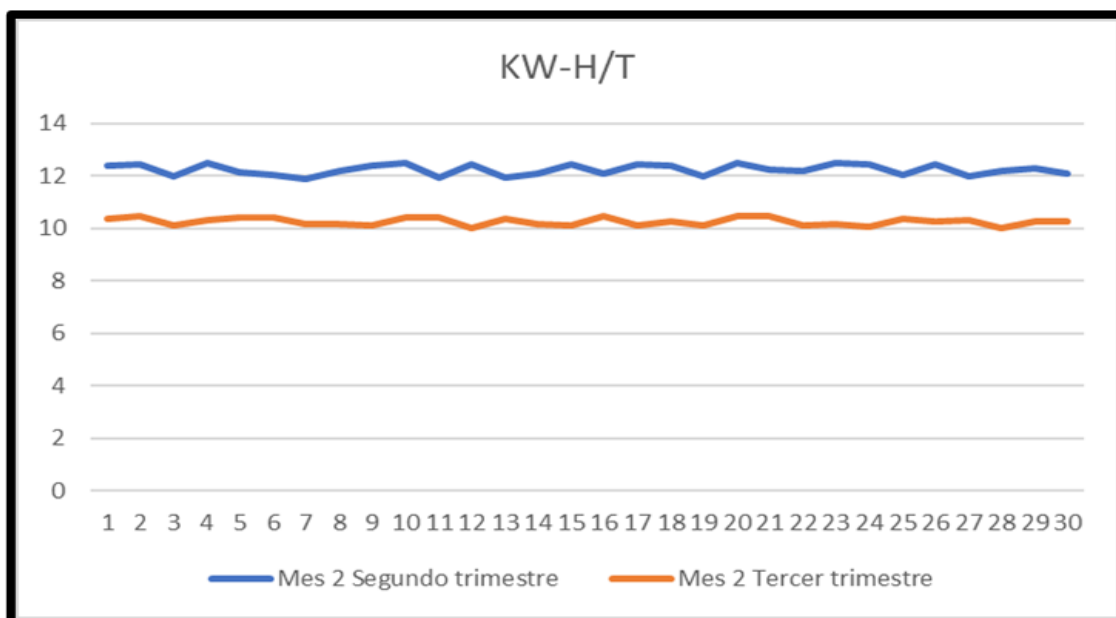
Figura 28 — Producción mes 3



NOTA

Consumo de energía mes 1 del segundo vs tercer trimestre del 2024

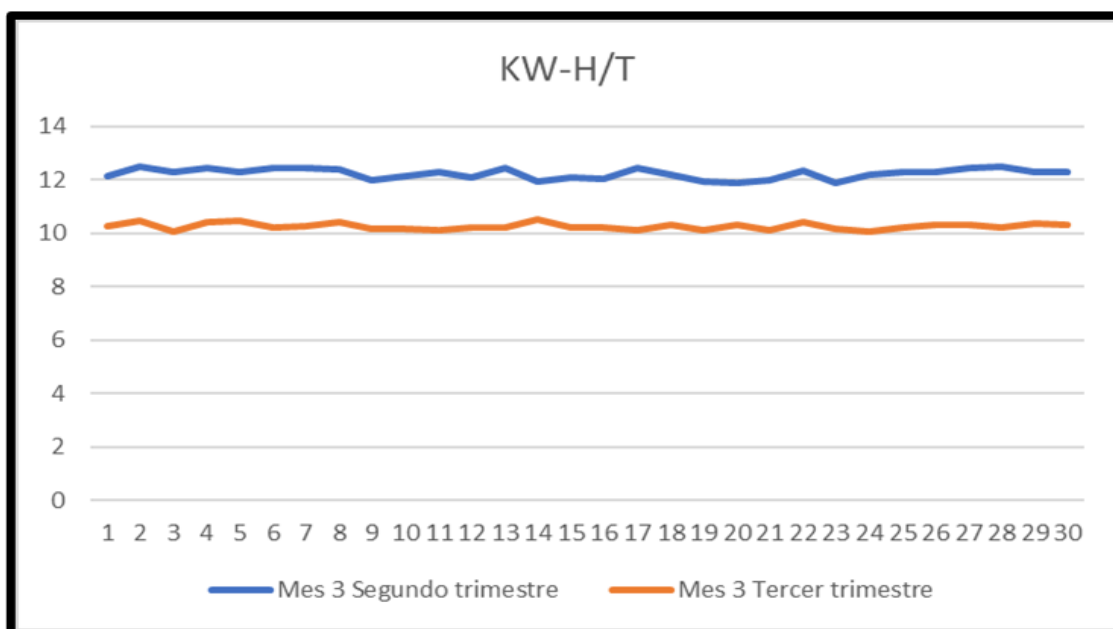
Figura 29 — Consumo de energía mes 1



NOTA

Consumo de energía mes 2 del segundo vs tercer trimestre del 2024

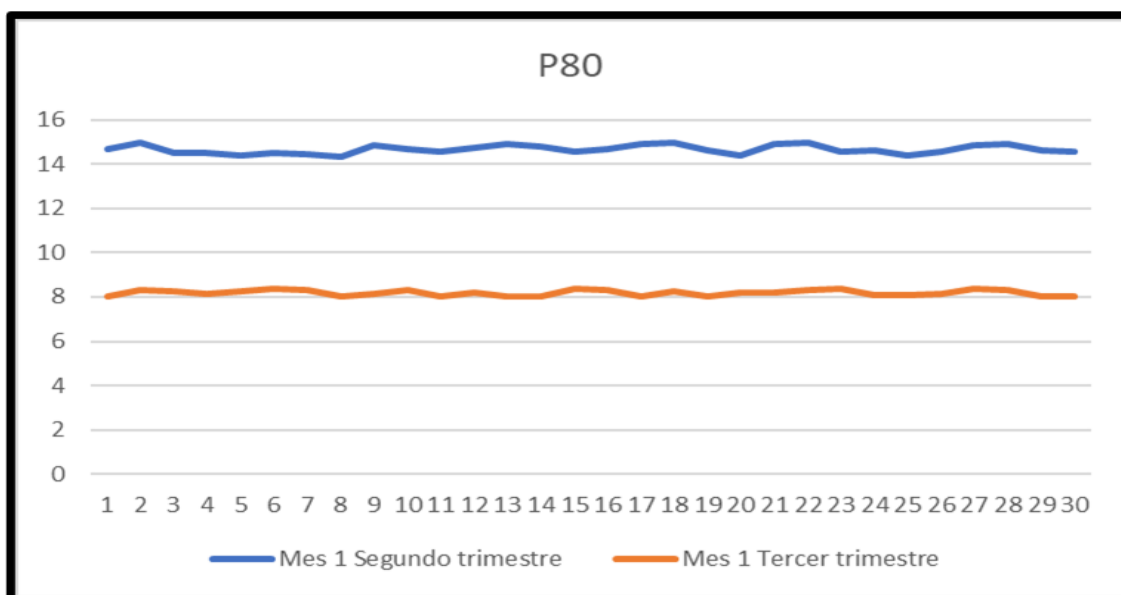
Figura 30 — Consumo de energía mes 2



NOTA

Consumo de energía mes 3 del segundo vs tercer trimestre del 2024

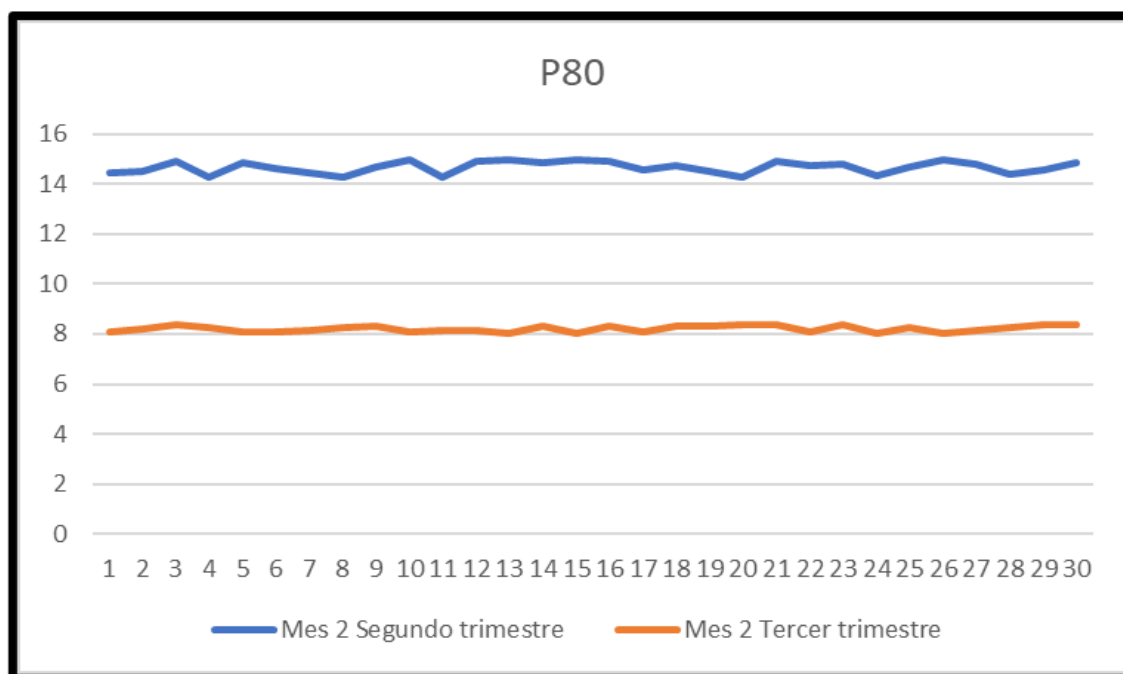
Figura 31 — Consumo de energía mes 3



NOTA

Fragmentación mes 1 del segundo vs tercer trimestre del 2024

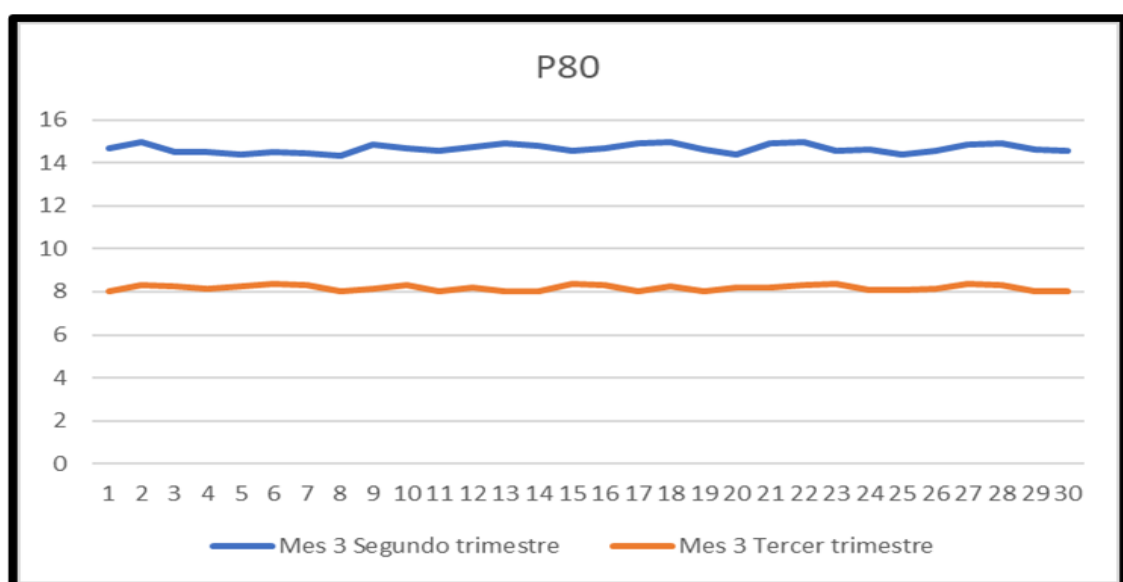
Figura 32 — Fragmentación mes 1



NOTA

Fragmentación mes 2 del segundo vs tercer trimestre del 2024.

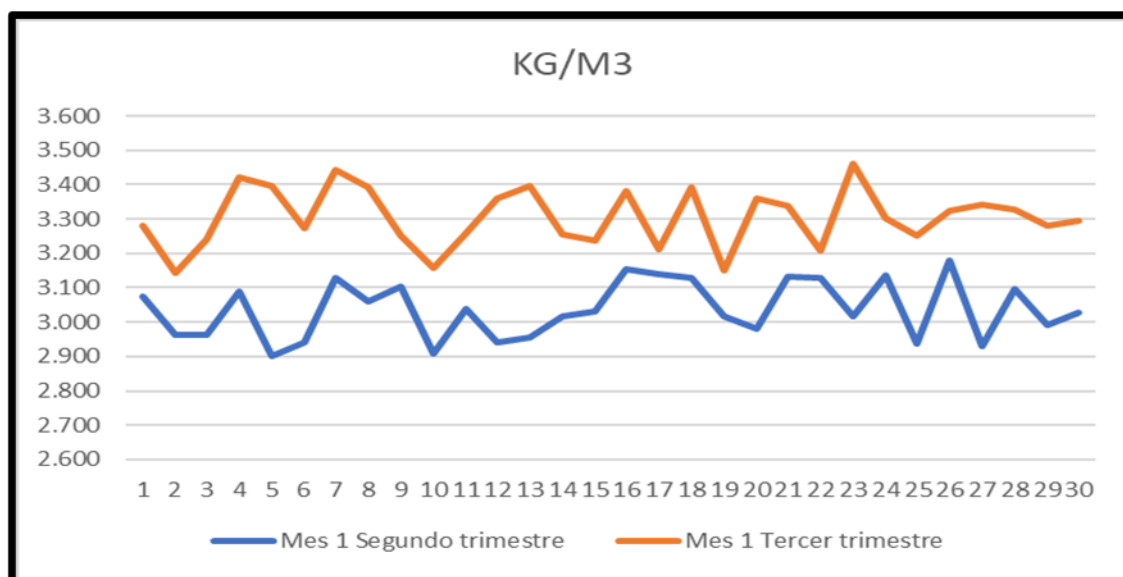
Figura 33 — Fragmentación mes 2



NOTA

Fragmentación mes 3 del segundo vs tercer trimestre del 2024.

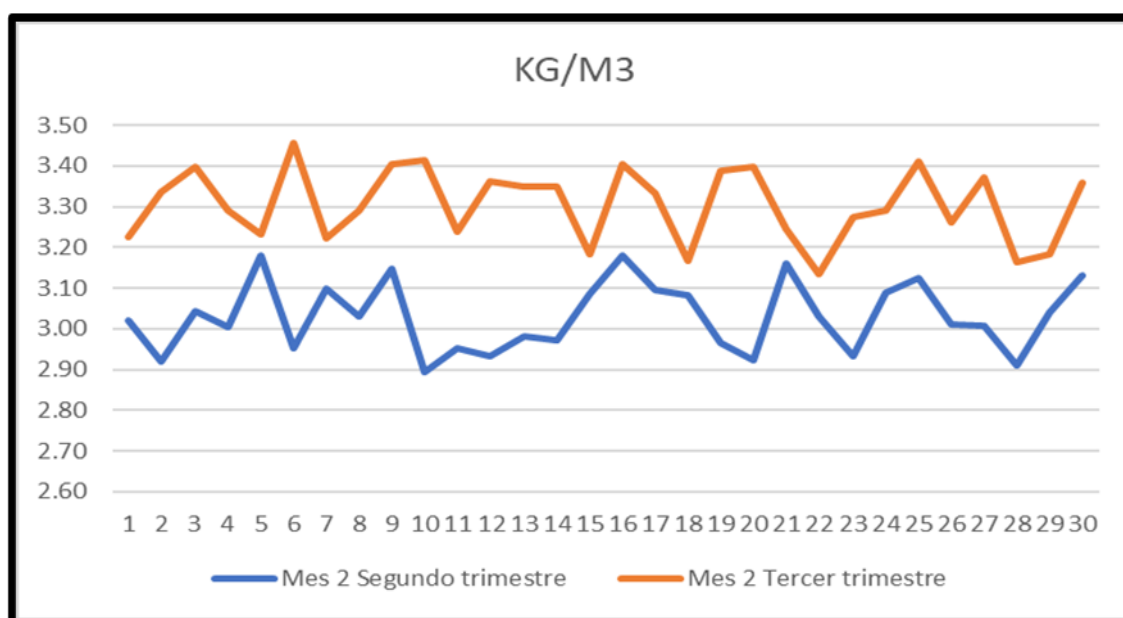
Figura 34 — Fragmentación mes 3



NOTA

Factor de carga mes 1 del segundo vs tercer trimestre del 2024.

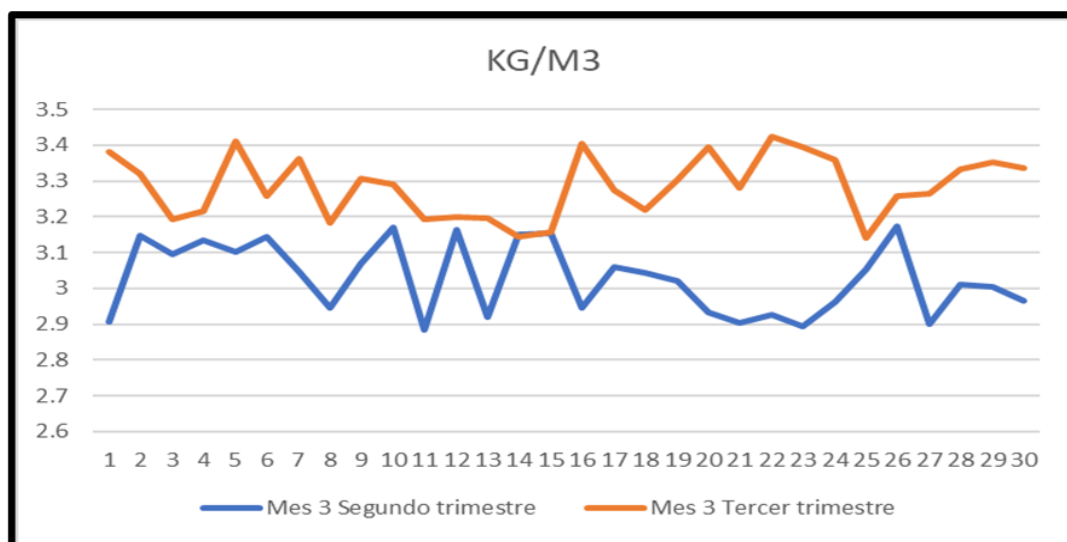
Figura 35 — Factor de carga mes 1



NOTA

Factor de carga mes 2 del segundo vs tercer trimestre del 2024.

Figura 36 — Factor de carga mes 2



NOTA

Factor de carga mes 3 del segundo vs tercer trimestre del 2024.

Figura 37 — Factor de carga mes 3

Tabla 35 — Validación del modelo experimental

	TPD	KW-H/T	P80	KG/M3	USD/T
Mes 1	291	11.2	11.4	3.173	4.88
Segundo trimestre	274	12.2	14.6	3.037	5.31
Tercer trimestre	309	10.3	8.2	3.304	4.47
Mes 2	290	11.2	11.4	3.165	4.89
Segundo trimestre	273	12.2	14.6	3.028	5.30
Tercer trimestre	308	10.3	8.2	3.302	4.48
Mes 3	290	11.3	11.4	3.156	4.91
Segundo trimestre	272	12.2	14.6	3.028	5.35
Tercer trimestre	308	10.3	8.2	3.285	4.47
Total, general	290	11.24	11.40	3.165	4.89
Variación Mes 1	12.75%	-15.50%	-43.64%	8.79%	-15.73%
Variación Mes 2	13.01%	-15.95%	-43.81%	9.06%	-15.38%
Variación Mes 3	13.27%	-15.69%	-43.86%	8.50%	-16.39%
Segundo Trimestre	273	12.2	14.6	3.031	5.32
Tercer Trimestre	308	10.3	8.2	3.297	4.48
Variación 2 vs 3 trimestre	13.01%	-15.72%	-43.77%	8.78%	-15.84%

NOTA

Resultados de las pruebas de validación del modelo experimental.

5.2 Contratación de hipótesis

La hipótesis general planteaba que la optimización de los parámetros de diseño y ejecución de voladuras en una minería subterránea mejora la fragmentación del material, lo que incrementa la productividad de la planta al reducir costos operativos, consumo energético y tiempos de procesamiento. Los resultados obtenidos respaldan esta afirmación. Se comprobó que los cambios en el diseño de voladura redujeron el tamaño de los fragmentos y mejoraron la eficiencia de los procesos posteriores, lo que incrementó la producción diaria en la planta.

En términos específicos:

Hipótesis: La modificación de parámetros como burden, espaciamiento, diámetro, profundidad y carga explosiva genera una granulometría más uniforme que reduce los atascos y mejora el rendimiento de la trituración primaria.

Tras el análisis de los resultados obtenidos, se demostró que los ajustes en los parámetros de diseño de voladura lograron una reducción significativa en la variabilidad granulométrica. El tamaño promedio de los fragmentos alcanzó un P80 de 8.2 pulgadas, lo que disminuyó notablemente los atascos en la trituradora primaria, permitiendo un aumento del rendimiento del equipo en un 13.42%. Esto confirma que la adecuada configuración de estos parámetros es clave para optimizar el proceso inicial de la cadena de trituración.

Hipótesis: Una fragmentación optimizada disminuye el consumo energético y el desgaste de los equipos de trituración, contribuyendo a una operación más eficiente y económica.

Los datos recopilados mostraron una reducción en el consumo energético del equipo de trituración primaria en un 16.10%, como resultado de la menor resistencia al procesamiento de materiales con granulometría optimizada. Además, el análisis del desgaste de componentes como las placas y mandíbulas de la trituradora evidenció un incremento en su vida útil del 15%, lo que implica un ahorro económico significativo. Por lo tanto, la hipótesis se valida al comprobar que la fragmentación optimizada no



solo mejora la eficiencia operativa, sino que también reduce los costos asociados al mantenimiento.

Hipótesis: La implementación de secuencias de detonación mejoradas y el uso de tecnologías de monitoreo permiten garantizar un flujo continuo del material hacia la planta, aumentando la eficiencia global del proceso.

La aplicación de secuencias de detonación diseñadas para minimizar el efecto de cuñas y zonas mal fragmentadas permitió un flujo más constante de material hacia la planta de procesamiento. Esto se corroboró con una disminución de interrupciones en el acarreo y tiempos muertos en el ciclo de alimentación de la trituradora primaria. Adicionalmente, el seguimiento de granulometría posibilitó un control más eficiente del proceso. La eficiencia global del sistema aumentó en un 10%, validando la hipótesis planteada.

5.3 Discusión

Los resultados obtenidos son consistentes con estudios previos que destacan la importancia de una adecuada fragmentación en las operaciones mineras. Una mejor fragmentación no solo reduce los tiempos de procesamiento, sino que también mejora la eficiencia operativa a lo largo de toda la cadena de producción. Estos hallazgos demuestran que el diseño de voladura desempeña un papel crucial en la productividad de las plantas de trituración, particularmente en operaciones de alta demanda como la de la minera Magistral.

Sin embargo, es importante mencionar que el éxito de esta optimización depende de factores externos como la naturaleza del material y las características geomecánicas del yacimiento. Además, aunque la inversión inicial para ajustar los parámetros de voladura fue significativa, los beneficios económicos obtenidos en el mediano plazo superaron ampliamente los costos.

En conclusión, este análisis refuerza la relevancia de integrar las estrategias de voladura con los objetivos de la planta de procesamiento, demostrando que una planificación adecuada puede maximizar tanto la producción como la rentabilidad en operaciones mineras modernas.



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Impacto de la optimización de la fragmentación en la producción: La implementación de prácticas optimizadas en la voladura resultó en una reducción significativa del tamaño promedio de los fragmentos (de un P80 de 14.6 pulgadas a un P80 de 8.2 pulgadas), incrementando la productividad del material triturado en planta en un 13.42%. Esto confirma que una fragmentación uniforme es clave para mejorar la eficiencia operativa en el circuito de trituración primaria.

Reducción de costos y tiempos operativos: La disminución de los atascos en la trituradora primaria y la reducción de tiempos muertos permitieron una operación más fluida, traduciéndose en una disminución de los costos operativos. Esto demuestra que una buena planificación en el diseño de voladura impacta positivamente en la sostenibilidad económica de la operación minera.

Interdependencia de procesos en la cadena productiva: Los ajustes en los parámetros de voladura evidenciaron cómo una optimización inicial puede repercutir en mejoras a lo largo de toda la cadena productiva. La integración entre voladura y procesamiento en planta es fundamental para maximizar la eficiencia global de la operación.

Viabilidad económica de las mejoras implementadas: A pesar del costo inicial de los ajustes en el diseño de voladura, el retorno de la inversión se logró en un periodo de tres meses, gracias al aumento en la producción y la reducción de los costos asociados a paradas correctivas.



6.2 Recomendaciones

Implementación de un sistema de monitoreo continuo: Se recomienda establecer un sistema de monitoreo y evaluación continua de los parámetros de voladura, para garantizar que la fragmentación obtenida cumpla con los requerimientos óptimos del circuito de trituración primaria.

Se sugiere capacitación del personal técnico, es fundamental capacitar al personal encargado del diseño de voladuras y operaciones en planta, con el objetivo de asegurar que las estrategias implementadas se mantengan alineadas con los objetivos de producción y eficiencia.

También la incorporación del uso de tecnología avanzada, como simulaciones de voladura y análisis granulométrico automatizado, permitirá mejorar la precisión en los diseños y evaluar el impacto de los cambios de manera más eficiente.

Se sugiere realizar análisis financieros periódicos para evaluar el retorno de la inversión y los costos operativos, asegurando la sostenibilidad económica de las estrategias implementadas.

Ampliar la implementación de integración del enfoque Mine to Mill permitirá optimizar no solo la voladura y trituración, sino también otras etapas del proceso productivo, maximizando la eficiencia general de la operación minera.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (ISEE), **International Society of Explosives Engineers. 2011.** *Blasters' Handbook (18th ed.)*. International Society of Explosives Engineers, Cleveland, Ohio, Estados Unidos : 2011.
- BERROSPI, Victor. 2019.** *Optimización de la perforación y voladura para mejorar la zona de profundización en la mina Andaychagua de la Cía. minera Volcan SAA*. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Pasco : 2019.
- BOND, F. C. 1952.** *The third theory of comminution*. Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers (AIME), Nueva York, Estados Unidos : 1952.
- CORTES, Samu. 2019.** *Análisis de la implementación del control computarizado en la perforación para desarrollos horizontales*. Universidad de Chile, Santiago : 2019.
- FERNANDEZ, Romina. 2020.** *Impacto del cambio de diámetro de la perforación de socavación en División Andina, Codelco*. Universidad de Chile, Santiago : 2020.
- FLORES, D. 2022.** *Optimización de la fragmentación relacionada a la precisión del iniciador electrónico con propiedades geomecánicas en mina Cuajone*. Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua : 2022.
- FLORES, Diego. 2022.** *Optimización de la fragmentación resultante para el mineral relacionado a la exactitud y precisión del iniciador electrónico con las propiedades geomecánicas en mina Cuajone*. Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua : 2022.
- GUPTA & YAN, 2006. 2006.** *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction*. Elsevier Science & Technology Books, Ámsterdam, Países Bajos : 2006.
- HARTMAN, H. L., & MUTMANSKY, J. M. 2022.** *Introductory Mining Engineering (2nd ed.)*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, Nueva Jersey, Estados Unidos : 2022.
- HOEK, E., & BROWN, E. T. 1997.** *Practical estimates of rock mass strength*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Oxford, Reino Unido (sede editorial Elsevier) : 1997.
- JIMENEZ, A, RODRIGUEZ, P. 2020.** *Relación entre el factor de potencia y la fragmentación del material en voladuras primarias en una mina de cobre a cielo abierto*. Lima : REVISTA de Minería y Energía, 2020.
- KANCHIBOTLA, S., VALERY, W., & MORREL, S. 1999.** *Modelling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding*. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM), Kalgoorlie, Australia : 1999.



- LOPEZ JIMENO, CARLOS. 1995.** *Drilling and Blasting of Rocks*. EEUU : A.A. Balkema, 1995. 9789054101994.
- MAERZ, 2004. 2004.** *Photoanalysis measurement technologies in mining*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), Denver, Estados Unidos : 2004.
- KEMENY, JOHN M. 2004.** *Using digital image analysis to measure rock fragmentation in mines*. Missouri University of Science and Technology, Rolla, Missouri, Estados Unidos : 2004.
- MCKENZIE, C. 2020.** *The importance of blast fragmentation in comminution circuits*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), Denver, Estados Unidos : 2020.
- PEREZ, 2024.** *Aplicación del modelo matemático de Pearse en el diseño de malla de perforación y voladura en la Unidad Minera San Cristóbal - Volcan Compañía Minera S.A.A.* Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo : 2024.
- SANCHEZ, 2020. 2020.** *Optimización de procesos mineros mediante análisis de indicadores clave*. Revista Peruana de Minería, Lima, Perú : 2020.
- SANCHIDRIAN, J. A., OUCHERLONY, F., SEGARRA, P., LOPEZ, L. M., & SANCHEZ, M. A. 2014.** *Performance analysis of rock fragmentation using Swebrec function: A review*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Ámsterdam : 2014.



ANEXOS



Anexo A
Matriz de consistencia

Tabla 36 — Matriz de consistencia

Optimización de la Fragmentación en Voladura para Aumentar Productividad de Material Triturado en Planta en la Minera Magistral de Huaraz, Abancay - 2024			
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable independiente
¿Cómo optimizar los parámetros de fragmentación en las voladuras para aumentar la productividad del material triturado en la planta de una minería subterránea?	Optimizar la fragmentación del material en las voladuras para incrementar la productividad del material triturado en la planta de una minería subterránea, reduciendo costos operativos y mejorando la eficiencia del proceso.	La optimización de los parámetros de diseño y ejecución de voladuras en una minería subterránea mejora la fragmentación del material, lo que incrementa la productividad de la planta al reducir costos operativos, consumo energético y tiempos de procesamiento.	Parámetros de diseño y ejecución de voladura.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable dependiente
¿Qué parámetros de diseño de voladura (burden, espaciamiento, diámetro, profundidad, y carga explosiva) deben ajustarse para obtener una granulometría más uniforme y adecuada para la trituración?	Ajustar los parámetros de diseño de voladura, como el burden, espaciamiento, diámetro, profundidad y carga explosiva, para obtener una granulometría uniforme y adecuada para la trituración primaria.	La modificación de parámetros como burden, espaciamiento, diámetro, profundidad y carga explosiva genera una granulometría más uniforme que reduce los atascos y mejora el rendimiento de la trituración primaria.	Productividad del material triturado en la planta.

• ¿Cómo impacta la optimización de la fragmentación en el consumo energético y en el desgaste de los equipos de trituración primaria y secundaria?	• Evaluar el impacto de la fragmentación optimizada en el consumo energético y el desgaste de los equipos de trituración, con el fin de mejorar su rendimiento y prolongar su vida útil.	• Una fragmentación optimizada disminuye el consumo energético y el desgaste de los equipos de trituración, contribuyendo a una operación más eficiente y económica.	
• ¿Qué mejoras en la secuencia de detonación y el uso de tecnologías de monitoreo podrían implementarse para garantizar un flujo constante y eficiente del material hacia la planta?	• Implementar mejoras en la secuencia de detonación y tecnologías de monitoreo para garantizar un flujo constante y eficiente del material desde el frente de voladura hasta la planta.	• La implementación de secuencias de detonación mejoradas y el uso de tecnologías de monitoreo permiten garantizar un flujo continuo del material hacia la planta, aumentando la eficiencia global del proceso.	

Anexo B
Panel fotográfico



Figura 38 — Post-voladura GL 599 Nv 8



Figura 39 — Post-limpieza GL 599 Nv 8



Figura 40 — Desatado para perforación GL 559 Nv 8



Figura 41 — Limpieza de carga GL 599 Nv 8



Figura 42 — Perforación de frente GL 599 Nv 8



Figura 43 — Carguío de frente GL 599 Nv 8



Figura 44 — Alimentación de carga al chancado



Figura 45 — Tolva del chancado primario



Figura 46 — Recuperación de mineral en las celdas flotación