

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

**IMPLEMENTACIÓN DE MINE TO MILL PARA AUMENTAR LA PRODUCCIÓN
EN CHANCADO PRIMARIO EN UNA MINA SUBTERRÁNEA**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

AUTOR:

BACH. CUEVA LIMAY, OMAR

ASESOR:

M. CS. ING. GONZALES YANA, ROBERTO SEVERINO

CAJAMARCA – PERÚ

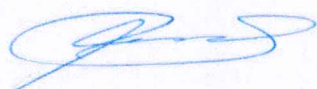
2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. **Investigador:** OMAR CUEVA LIMAY
DNI: 46935170
Escuela Profesional: ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
2. **Asesor:** M. Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino
Facultad: Ingeniería
3. **Grado académico o título profesional**
☐ Bachiller ☒ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro ☐ Doctor
4. **Tipo de Investigación:**
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
☐ Trabajo académico
5. **Título de Trabajo de Investigación:**
IMPLEMENTACIÓN DE MINE TO MILL PARA AUMENTAR LA PRODUCCIÓN EN CHANCADO
PRIMARIO EN UNA MINA SUBTERRÁNEA
Fecha de evaluación: 15/08/2025
6. **Software antiplagio:** ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINAL) (*)
7. **Porcentaje de Informe de Similitud:** 8%
8. **Código Documento:** Oide:3117:483830864
9. **Resultado de la Evaluación de Similitud:**
☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 15/08/2025



FIRMA DEL ASESOR
Roberto Severino Gonzales Yana



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258601 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 15/08/2025 18:51:21-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : IMPLEMENTACIÓN DE MINE TO MILL PARA AUMENTAR LA PRODUCCIÓN EN CHANCADO PRIMARIO EN UNA MINA SUBTERRÁNEA.

ASESOR : M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0551-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 28 de agosto de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **diez días del mes de setiembre de 2025**, siendo las nueve horas (09:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J - 210), se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Vocal : Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Secretario : M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada **IMPLEMENTACIÓN DE MINE TO MILL PARA AUMENTAR LA PRODUCCIÓN EN CHANCADO PRIMARIO EN UNA MINA SUBTERRÁNEA**, presentado por el Bachiller en Ingeniería de Minas **OMAR CUEVA LIMAY**, asesorado por el M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA :04..... PTS.

EVALUACIÓN PÚBLICA :11..... PTS.

EVALUACIÓN FINAL :15..... PTS

.....QUINCE..... (En letras)

En consecuencia, se lo declara **APROBADO** con el calificativo de **QUINCE** acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las **10.00 am** horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Presidente

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Vocal

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Asesor



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

Bachiller en Ingeniería de Minas: OMAR CUEVA LIMAY.

RUBRO	PUNTAJE
	Máximo/Calificación
2. DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA	
2.1. Capacidad de síntesis	3
2.2. Dominio del tema	3
2.3. Consistencia de las alternativas presentadas	3
2.4. Precisión y seguridad en las respuestas	2
PUNTAJE TOTAL (MÁXIMO 12 PUNTOS)	11

Cajamarca, 10 de setiembre de 2025

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Presidente

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Vocal

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Asesor



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



EVALUACIÓN FINAL DE LA SUSTENTACIÓN DE TESIS.

Bachiller en Ingeniería de Minas: OMAR CUEVA LIMAY.

RUBRO	PUNTAJE
A.- EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PRIVADA	04
B.- EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA	11
EVALUACIÓN FINAL	
EN NÚMEROS (A + B)	15
EN LETRAS (A + B)	QUINCE
- Excelente 20 - 19	BUENO
- Muy Bueno 18 - 17	
- Bueno 16 - 14	
- Regular 13 a 11	
- Desaprobado 10 a menos	

Cajamarca, 10 de setiembre de 2025

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Presidente

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Vocal

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Asesor

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la vida y cuidarme
con buena salud día a día, para así poder
cumplir mis metas trazadas.

También agradezco a mi alma mater,
Universidad Nacional de Cajamarca, a
la escuela académico profesional de
ingeniería de minas, por los
conocimientos brindados durante mi
etapa universitaria.

Agradezco a mi glorioso colegio San
Ramón de Cajamarca, por darme una
buena enseñanza educativa, así mismo a
mi institución educativa primaria 82021,
Huambocancha Alta, por darme buenos
valores desde mis inicios educativos.

O.C.L.

DEDICATORIA

A mis adorados padres José Sebastián y
Faustina, que con tanto esfuerzo
lograron apoyarme y motivarme para
salir adelante en cada momento de esta
etapa vivida y así poder ser una mejor
persona y ejemplo para mi familia y
sociedad.

A mis queridos abuelos, Manuel, Lucia
y lorenza que desde el cielo me cuida,
ellos fueron fortaleza para nunca
rendirme y siempre buscar una solución
a cada dificultad encontrada.

O.C.L.

CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTO	i
DEDICATORIA.....	ii
CONTENIDO.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN.....	1
--------------------------	----------

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS	4
2.1.1. Internacionales	4
2.1.2. Nacionales.....	5
2.2. BASES TEÓRICAS	6
2.2.1. Estrategia Mine to Mill	6
2.2.2. Fragmentación del Mineral y su Impacto en Chancado	6
2.2.3. Relación entre Voladura y Rendimiento del Chancador	6
2.2.4. Consumo Energético en Minería Subterránea	6
2.2.5. Indicadores Operativos para Evaluar la Eficiencia.....	7
2.2.6. Teoría de la Conminución	7

	Pág.
2.2.7. Factor de Potencia y Eficiencia Energética	7
2.2.8. Reducción de Costos Operativos por Mejora en Voladura.....	7
2.2.9. Modelos Matemáticos de Fragmentación	7
2.2.10. Sostenibilidad y Eficiencia Operativa en Minería	8
2.3. DEFINICIÓN DE TERMINOS	8
2.3.1. Estrategia Mine to Mill	8
2.3.2. Fragmentación del Material	8
2.3.3. Voladura	8
2.3.4. Chancado Primario	9
2.3.5. Consumo Energético.....	9
2.3.6. Eficiencia Operativa	9
2.3.7. Eficiencia del Chancado	10
2.3.8. Consumo Energético.....	10
2.3.9. Tasa de Recuperación	10
2.3.10. Costos de Producción	10
2.3.11. Análisis de Costos-Beneficios	11
2.3.12. Índice de Utilización de Recursos	11
2.3.13. Producción por Unidad de Tiempo.....	11
2.3.14. Tamaño de Fragmento	12
2.3.15. Energía Específica del Chancado	12
2.3.16. Factor de Carga.....	13
2.3.17. Factor de Potencia.....	13
2.3.18. Cálculo del Burden	14
2.3.19. Fórmula Ajustada para Condiciones Comunes en Minas Subterráneas:	14

	Pág.
2.3.20. Cálculo del Espaciamiento	15
2.3.21. Número de Barrenos	16
2.3.22. Distribución de la Malla de Perforación	16

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN Y CONTEXTUALIZACIÓN.....	18
3.1.1. Ubicación.....	18
3.1.2. Topografía.....	18
3.1.3. Geología Local.....	19
3.1.4. Geología Estructural	22
3.1.5. Geología Económica.....	24
3.1.6. Contextualización	25
3.2. TIPO, NIVEL, DISEÑO Y MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN	26
3.3. NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN	26
3.4. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	26
3.5. MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN.....	26
3.6. POBLACIÓN DE ESTUDIO	26
3.7. MUESTRA.....	27
3.8. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	27
3.8.1. Técnicas	27
3.8.2. Instrumentos y Equipos Utilizados	27
3.9. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS DE DATOS	28

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. FRAGMENTACIÓN EN EL CHANCADO PRIMARIO (P80).....	29
--	-----------

	PÁG.
4.2. PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL CHANCADO PRIMARIO	
(T/H Y KW/H).....	29
4.3. OPTIMIZACIÓN DEL CHANCADO PRIMARIO (KG/T Y \$/T).....	29
4.4. PRUEBAS DE VALIDACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL	30
4.4.1. Análisis de la Granulometría	30
4.4.2. Descripción de las Pruebas Experimentales	33
4.5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	52
4.5.1. Estadística Aplicada para la Demostración de la Optimización	52
4.6. PRUEBAS DE VALIDACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL.....	58
4.6.1. Producción (TPD).....	58
4.6.2. Consumo Energético (KW/H)	59
4.6.3. Fragmentación (P80)	59
4.6.4. Factor de Potencia (KG/T).....	59
4.6.5. Costo Unitario de Trituración (\$/T).....	60
4.6.6. Conclusión Técnica	60
4.7. DISCUSIONES	60

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES.....	63
5.2. RECOMENDACIONES.....	65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Distancias aproximadas de la ruta a la mina Magistral.	18
Tabla 2. Reservas minerales	25
Tabla 3. Parámetros del segundo trimestre	33
Tabla 4. Parámetros del tercer trimestre	34
Tabla 5. Nomenclatura.....	34
Tabla 6. Parámetros abril 2023	35
Tabla 7. Parámetros mayo 2023	36
Tabla 8. Parámetros junio 2023	37
Tabla 9. Parámetros julio 2023	38
Tabla 10. Parámetros agosto 2023	39
Tabla 11. Parámetros septiembre 2023	40
Tabla 12. Normalidad	54
Tabla 13. Prueba de normalidad	54
Tabla 14. Prueba estadística T de Wilcoxon.....	56
Tabla 15. Validación del modelo experimental	58

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Plegamiento en el flanco oriental de la quebrada Tuco.....	20
Figura 2. Material post voladura, Nv 8, escenario actual	30
Figura 3. Aplicación del Split desktop	31
Figura 4. Curva de distribución	32
Figura 5. Producción	41
Figura 6. Consumo de energía.....	42
Figura 7. Fragmentación.....	43
Figura 8. Factor de Potencia.....	44
Figura 9. Costo de trituración.....	45
Figura 10. Producción por día segundo vs tercer trimestre	46
Figura 11. Consumo de energía por día segundo vs tercer trimestre	48
Figura 12. Fragmentación por día segundo vs tercer trimestre	49
Figura 13. Factor de potencia por día segundo vs tercer trimestre.....	50
Figura 14. Costo de trituración por día segundo vs tercer trimestre	51

LISTA DE ABREVIATURAS

M2M:	Mine to Mill.
CP:	Chancado Primario.
MS:	Mina Subterránea.
IP:	Implementación del Proyecto.
MP:	Mineral Procesado.
P80:	Tamaño de partícula al 80%.
TFM:	Tamaño Final de Material.
FPV:	Factor de Potencia en Voladura.
OP:	Optimización de Procesos.
CPR:	Capacidad de Producción.
ME:	Métodos de Extracción.
PM:	Producción Minera.
EE:	Eficiencia Energética.
SRM:	Sistema de Reducción de Material.
PT:	Planta de Trituración.
UPE:	Unidad de Producción en Mina.
VE:	Voladura Eficiente.
TC:	Tasa de Chancado.
IC:	Índice de Consistencia.
PLS:	Producción Logística Sostenible.
TPD:	Toneladas por Día
T/H:	Toneladas por Hora
P80:	Tamaño de partícula que pasa en un 80%
KW/H:	Kilowatt por Hora
KG/T:	Kilogramos por Tonelada
SPSS:	Statistical Package for the Social Sciences
P.F.:	Factor de Potencia (Powder Factor)
P.L.:	Carga de Potencia (Power Load)
S.F.:	Relación Espaciamento a Burden (Spacing to Burden Ratio)

ISO: International Organization for Standardization

USD: Dólares estadounidenses

v.: Versión

RESUMEN

La presente investigación titulada “Implementación de la estrategia Mine to Mill para aumentar la producción en el chancado primario en una mina subterránea” tuvo como objetivo principal incrementar la productividad del proceso de trituración mediante la mejora de la fragmentación del mineral, integrando las etapas de voladura y chancado. El estudio responde a la problemática identificada en la operación subterránea, donde una fragmentación inadecuada del mineral volado generaba cuellos de botella, alto consumo energético y costos elevados de trituración, formulándose así la pregunta: ¿Cómo implementar la estrategia Mine to Mill para aumentar la producción en el chancado primario en una mina subterránea? Para dar respuesta, se aplicó un enfoque cuantitativo con diseño experimental y longitudinal, evaluando los indicadores operativos antes y después de la implementación, tomando como muestra las voladuras del nivel 8 de la mina Magistral durante el segundo y tercer trimestre del 2023. Se emplearon técnicas como observación directa, encuestas, entrevistas y análisis documental, y se aplicó la prueba no paramétrica T de Wilcoxon con SPSS v.26 para validar la hipótesis. Los resultados mostraron un aumento del 15.35% en la producción, una reducción del 10.67% en el consumo energético, una mejora del 29.90% en el P80, un incremento del 15.68% en el factor de potencia y una disminución del 12.54% en el costo de trituración, evidenciando que la estrategia Mine to Mill optimizó integralmente el rendimiento del chancado primario y es una solución técnica replicable en otras operaciones subterráneas.

Palabras claves: Voladura, P80, mine to mill, work index, producción

ABSTRACT

This research, titled "Implementation of the Mine to Mill Strategy to Increase Production in Primary Crushing in an Underground Mine," aimed to improve crushing plant productivity by optimizing rock fragmentation through the integration of blasting and crushing processes. The study addresses a critical problem observed in underground mining operations, where inadequate fragmentation of blasted ore resulted in processing bottlenecks, high energy consumption, and elevated crushing costs. Consequently, the research question posed was: How can the Mine to Mill strategy be implemented to increase production in primary crushing in an underground mine? A quantitative, experimental, and longitudinal approach was used to analyze operational indicators before and after implementation, focusing on blasting activities at Level 8 of the Magistral Mine during the second and third quarters of 2023. Data collection techniques included field observation, structured surveys, semi-structured interviews, and document analysis. The Wilcoxon signed-rank test was applied using SPSS v.26 to validate the hypothesis. Results showed a 15.35% increase in production, a 10.67% reduction in energy consumption, a 29.90% improvement in P80 fragmentation, a 15.68% increase in powder factor, and a 12.54% decrease in crushing costs. These findings demonstrate that the Mine to Mill strategy significantly optimized primary crushing performance and presents a technically viable and replicable solution for similar underground mining operations.

Keywords: Blasting, P80, mine to mill, work index, production.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La industria minera enfrenta constantes desafíos para optimizar sus procesos y maximizar la producción, particularmente en operaciones subterráneas donde las limitaciones físicas y operativas pueden afectar la eficiencia. En este contexto, la metodología Mine to Mill se ha convertido en una estrategia clave para integrar los procesos de voladura y chancado, con el fin de mejorar la fragmentación del mineral y, por ende, incrementar la eficiencia en etapas posteriores. Este enfoque no solo busca optimizar la productividad, sino también reducir costos operativos al minimizar el desgaste de los equipos y el consumo energético en el chancado primario.

La implementación de Mine to Mill en una mina subterránea requiere un análisis detallado de las características geológicas del yacimiento, los parámetros de diseño de voladura y su influencia en la fragmentación del mineral. Este enfoque permite establecer una correlación directa entre la calidad de la voladura y la capacidad de procesamiento en el chancado primario. En particular, la mejora en la fragmentación del mineral volado reduce la necesidad de trituración secundaria, lo que puede aumentar significativamente el rendimiento de la planta y reducir los cuellos de botella operativos.

Sin embargo, la implementación exitosa de esta metodología requiere superar ciertos desafíos, como la variabilidad geológica, la selección de parámetros adecuados de diseño de voladura y la alineación entre las áreas de mina y planta. Además, es fundamental contar con un monitoreo continuo y herramientas tecnológicas avanzadas que permitan evaluar y ajustar los parámetros operativos en tiempo real. Estos elementos son clave para garantizar que los objetivos de producción y eficiencia sean alcanzados de manera sostenible.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar la aplicación del enfoque Mine to Mill en una mina subterránea, enfocándose en la optimización del chancado primario. Se busca evaluar el impacto de esta metodología en la mejora de la fragmentación del mineral, el

aumento de la capacidad de procesamiento y la reducción de costos operativos. A través de este análisis, se espera proporcionar una solución práctica y replicable que permita a las operaciones subterráneas maximizar su productividad y competitividad en un entorno cada vez más exigente.

En el problema se plantea ¿Cómo implementar el mine to mill para aumentar la producción en chancado primario en una Mina Subterránea? Para lo cual se tiene la siguiente hipótesis: Se puede implementar la estrategia de mine to mill para aumentar la producción en chancado primario en una mina subterránea, optimizando la eficiencia y calidad del proceso, permitiendo una mayor fragmentación y reducir los costos en el proceso.

La investigación brinda grandes aportes al área de mina y planta. Así mismo, reducir los costos de extracción de mineral mediante la implementación de la estrategia de mine to mill en una mina subterránea.

La delimitación de la presente investigación se realizará en el departamento, provincia y distrito de Cajamarca. Se elaborará en los días establecidos en el cronograma de ejecución de cada mes y tendrá una duración aproximada de tres meses del año 2024.

El alcance de la investigación se basa en el presente estudio tuvo entre ellas información de indicadores de seguridad y costos. Además, no se obtuvo la data completa de todas las voladuras durante el segundo trimestre del 2023.

El objetivo general de la investigación es implementar el proceso Mine to Mill.

Los objetivos específicos son: Describir el proceso de implementar la estrategia de mine to mill en una mina subterránea y determinar la mejora en la producción en la chancadora primaria al implementar la estrategia de mine to mill en una mina subterránea.

La descripción de los contenidos de los capítulos:

Capítulo I. Se presenta la Introducción. Capítulo II. Inicia mostrando los antecedentes teóricos de la presente investigación y continúa con las bases teóricas fundamentando los principios de perforación y voladura de rocas, finalmente se presenta la definición de términos básicos. Capítulo III. Materiales y métodos donde comprende, ubicación geográfica donde se realiza la investigación, el procedimiento a seguir mediante las pruebas de voladura, tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados en las pruebas realizadas en la zona de investigación, así como la población, muestra y algunas técnicas de recolección de datos. Capítulo IV. Se realiza el análisis y discusión de resultados, mostrando los datos obtenidos con las pruebas de voladura; por consiguiente, contrastándose los resultados con la hipótesis; por último, el Capítulo V. Presenta las conclusiones y recomendaciones que se ha llegado en todo el estudio de investigación, y finalmente se encuentran las referencias bibliográficas.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1.1. Internacionales

Según FERNANDEZ (2020), en la tesis "Impacto del cambio de diámetro de la perforación de socavación en División Andina, Codelco", en la Universidad de Chile, Santiago, se evaluó el impacto de modificar el diámetro de perforación en las operaciones de socavación de la División Andina de Codelco. El objetivo principal fue analizar cómo el cambio de diámetro influye en la eficiencia operativa, costos y calidad de la fragmentación de la roca. La investigación siguió un enfoque cuantitativo con un diseño experimental, aplicando diferentes diámetros en áreas seleccionadas de la mina. Los resultados demostraron que el uso de diámetros más grandes permitió una mejora en la fragmentación, reducción en el uso de explosivos y optimización de los tiempos de perforación, lo que derivó en una disminución de los costos operativos. Las conclusiones subrayan que ajustar el diámetro de perforación puede mejorar la productividad general y reducir el impacto ambiental de las operaciones mineras.

Según CORTEZ (2019), en la tesis "Análisis de la implementación del control computarizado en la perforación para desarrollos horizontales", en la Universidad de Chile, Santiago, se evaluó el impacto de incorporar control computarizado en las operaciones de perforación para desarrollos horizontales en minería subterránea. El objetivo fue determinar cómo esta tecnología mejora la precisión, eficiencia y seguridad de las perforaciones. El estudio empleó una metodología cuantitativa con un diseño experimental, utilizando una muestra de desarrollos horizontales en diversas secciones de la mina. Los resultados mostraron que la implementación del control computarizado optimizó la precisión en la perforación, redujo los tiempos de operación y mejoró la eficiencia en el uso de los equipos, generando además un incremento en la seguridad de las operaciones. Las conclusiones resaltan que la automatización y el control digital en la perforación son esenciales para incrementar la productividad y minimizar errores humanos en el contexto minero moderno.

2.1.2. Nacionales

Según BERROSPI (2019), En la tesis titulada "Optimización de la perforación y voladura para mejorar la zona de profundización en la mina Andaychagua de la Cía. minera Volcan SAA", en la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco, se buscó optimizar los procesos de perforación y voladura para mejorar la eficiencia en la zona de profundización de la mina. Con un enfoque metodológico cuantitativo y un diseño experimental, la investigación evaluó distintas configuraciones operativas. La muestra se centró en varias secciones de la mina Andaychagua, donde se implementaron las mejoras propuestas. Los resultados mostraron un incremento en la eficiencia de la fragmentación de roca, reducción de costos operativos y un mejor control de las vibraciones. Las conclusiones subrayan que la optimización de estos procesos no solo impacta positivamente en la productividad, sino que también contribuye a una operación minera más segura y sostenible.

Según PEREZ (2024), En la tesis "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", en la Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, se busca optimizar el diseño de la malla de perforación y voladura utilizando el modelo matemático de Pearse en la mina San Cristóbal. El estudio emplea una metodología cuantitativa con un diseño experimental, en el que se evalúan diversas configuraciones de mallas de perforación basadas en dicho modelo. La muestra incluyó sectores específicos de la mina donde se aplicaron los ajustes propuestos. Los resultados reflejaron una mejora en la fragmentación de roca, reducción de costos operativos y un control más eficiente de las vibraciones. Las conclusiones señalan que el uso del modelo de Pearse permite optimizar las operaciones de perforación y voladura, incrementando la productividad y mejorando la eficiencia en las actividades mineras.

Según AQUINO (2019), en su tesis “Diseño y construcción de la rampa 440, para explorar e incrementar las reservas minables y su posterior extracción en CIA Minera Macdesa SAC” explica que para ser posible el acceso a las reservas minables existentes de la veta Nancy, en la mina Macdesa, se plantea profundizar mediante el desarrollo de la rampa 440, con pendiente negativa 12 %, que servirá de exploración, acceso a los recursos mineralizados y

como medio de transporte para la extracción del mineral de esta manera se mejorarán los indicadores de producción y de productividad.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Estrategia Mine to Mill

La estrategia Mine to Mill es un enfoque de optimización que integra las etapas de perforación, voladura, transporte y procesamiento, con el objetivo de maximizar la eficiencia global de la operación minera. Este enfoque ha demostrado mejorar la fragmentación y reducir el consumo energético en el chancado primario (Adel et al., 2006).

2.2.2. Fragmentación del Mineral y su Impacto en Chancado

Una adecuada fragmentación producto de la voladura influye directamente en la eficiencia del chancado primario, reduciendo el tamaño de partícula (P80) y el consumo energético. Fragmentaciones deficientes generan cuellos de botella en la planta (Cunningham, 1983).

2.2.3. Relación entre Voladura y Rendimiento del Chancador

El diseño de malla de perforación y la selección del explosivo determinan la calidad de la fragmentación. Mejorar estos parámetros puede reducir significativamente el Work Index en etapas posteriores, como el chancado (Hustrulid & Kuchta, 2006).

2.2.4. Consumo Energético en Minería Subterránea

El consumo energético representa uno de los costos más relevantes en minería subterránea. La estrategia Mine to Mill permite reducir la energía específica de chancado al optimizar la distribución del tamaño de partículas (Valery et al., 2001).

2.2.5. Indicadores Operativos para Evaluar la Eficiencia

Indicadores como la producción (T/H), consumo energético (KW/H), factor de potencia (KG/T) y el costo unitario (\$/T) permiten evaluar el impacto operativo de estrategias como Mine to Mill (Garcés & Castrillón, 2017).

2.2.6. Teoría de la Conminución

El modelo de Bond y otros enfoques de conminución describen cómo la energía requerida para reducir el tamaño de partícula depende del tamaño inicial, el P80 y la dureza del mineral, variables que pueden optimizarse desde la voladura (Bond, 1952).

2.2.7. Factor de Potencia y Eficiencia Energética

El factor de potencia (KG/T) es un indicador clave para evaluar la eficiencia energética de la voladura. Su incremento tras aplicar Mine to Mill refleja una mejor conversión de energía explosiva en fragmentación efectiva (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

2.2.8. Reducción de Costos Operativos por Mejora en Voladura

Una voladura correctamente diseñada permite reducir la necesidad de trituración secundaria, disminuir el desgaste de equipos y optimizar el consumo energético, contribuyendo a la reducción de costos operativos totales (Zúñiga, 2023).

2.2.9. Modelos Matemáticos de Fragmentación

Modelos como el de Kuz-Ram permiten predecir el tamaño de fragmento resultante según parámetros de voladura. Su uso combinado con software como Wipfrag o Split Desktop facilita la implementación técnica de Mine to Mill (Cunningham, 1983).

2.2.10. Sostenibilidad y Eficiencia Operativa en Minería

La mejora de la eficiencia operativa mediante metodologías como Mine to Mill contribuye a operaciones más sostenibles, al reducir el impacto ambiental asociado al consumo energético y maximizar el aprovechamiento del mineral (ISO 14001, 2004).

2.3. DEFINICIÓN DE TERMINOS

2.3.1. Estrategia Mine to Mill

La estrategia Mine to Mill es un enfoque integral que optimiza la cadena de producción minera desde la extracción hasta el procesamiento del mineral. Este enfoque busca mejorar la eficiencia y la rentabilidad al alinear todas las etapas del proceso, asegurando que las decisiones en la voladura y el chancado se tomen en función de su impacto global en la operación. Fomenta la colaboración entre diferentes disciplinas, promoviendo un trabajo multidisciplinario que resulta en operaciones más cohesivas y efectivas (Adel, Kojovic & Scott, 2006).

2.3.2. Fragmentación del Material

La fragmentación del material es el proceso mediante el cual el mineral se divide en partículas más pequeñas, lo que es esencial para el tratamiento posterior. Este proceso está directamente relacionado con la voladura, que se debe planificar cuidadosamente para lograr un tamaño de fragmento óptimo. Una fragmentación adecuada mejora la eficiencia del chancado y maximiza la recuperación del mineral, lo que a su vez influye en la rentabilidad de la operación minera (Cunningham, 1983).

2.3.3. Voladura

La voladura es una técnica clave en la minería que permite la fragmentación del material. El diseño de la voladura incluye la selección de explosivos, la malla de perforación y

la secuencia de detonación. La voladura bien planificada no solo mejora la fragmentación, sino que también minimiza los riesgos operativos y el impacto ambiental, asegurando que se logren los objetivos de producción de manera segura y eficiente (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

2.3.4. Chancado Primario

El chancado primario es la primera etapa de procesamiento del mineral, donde se reduce su tamaño para facilitar el tratamiento posterior. La eficiencia del chancado depende de varios factores, como el tipo de equipo utilizado, la configuración de los chancadores y las características del mineral. Optimizar esta etapa es crucial, ya que impacta directamente en la recuperación del mineral y el consumo de energía, siendo un componente esencial para la rentabilidad global de la mina (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

2.3.5. Consumo Energético

El consumo energético en las operaciones mineras representa una parte significativa de los costos operativos. En la minería subterránea, el consumo de energía es aún más crítico debido a las condiciones desafiantes de trabajo. Implementar tecnologías que mejoren la eficiencia energética, como equipos de alta eficiencia y sistemas de control avanzados, puede resultar en ahorros considerables y en un menor impacto ambiental (Bond, 1952).

2.3.6. Eficiencia Operativa

La eficiencia operativa se refiere a la capacidad de una mina para maximizar su producción y minimizar costos. Se evalúa a través de indicadores como la tasa de recuperación del mineral, el rendimiento del equipo y el tiempo de inactividad. Mejorar la eficiencia operativa es esencial para mantener la competitividad en el mercado, y puede lograrse mediante la implementación de mejoras continuas y la adopción de tecnologías innovadoras (Garcés & Castrillón, 2017).

2.3.7. Eficiencia del Chancado

La eficiencia del chancado se puede calcular utilizando la siguiente fórmula (Garcés & Castrillón, 2017).

$$\text{Eficiencia del Chancado} = \left(\frac{\text{Tamaño del mineral alimentado} - \text{Tamaño del mineral chancado}}{\text{Tamaño del mineral alimentado}} \right) \times 100$$

2.3.8. Consumo Energético

El consumo energético total de un proceso de chancado puede ser representado como (Garcés & Castrillón, 2017).

$$\text{Consumo Energético} = \frac{\text{Potencia del equipo (kW)} \times \text{Horas de operación}}{\text{Toneladas de mineral procesado}}$$

2.3.9. Tasa de Recuperación

La tasa de recuperación se puede calcular con la siguiente fórmula (Garcés & Castrillón, 2017).

$$\text{Tasa de Recuperación} = \left(\frac{\text{Mineral recuperado}}{\text{Mineral extraído}} \right) \times 100$$

2.3.10. Costos de Producción

Los costos de producción por tonelada pueden ser calculados usando la fórmula (Garcés & Castrillón, 2017).

$$\text{Costo por Tonelada} = \frac{\text{Costos Totales}}{\text{Toneladas producidas}}$$

2.3.11. Análisis de Costos-Beneficios

El análisis de costos y beneficios puede ser representado con la siguiente fórmula (Garcés & Castrillón, 2017).

$$\text{Relación Costo-Beneficio} = \frac{\text{Beneficios Totales}}{\text{Costos Totales}}$$

2.3.12. Índice de Utilización de Recursos

El índice de utilización de recursos se puede expresar como (Garcés & Castrillón, 2017).

$$\text{Índice de Utilización} = \frac{\text{Recursos Utilizados}}{\text{Recursos Disponibles}} \times 100$$

2.3.13. Producción por Unidad de Tiempo

La producción por unidad de tiempo puede ser calculada como (Garcés & Castrillón, 2017).

$$\text{Producción por Hora} = \frac{\text{Toneladas de mineral procesado}}{\text{Horas de operación}}$$

2.3.14. Tamaño de Fragmento

El tamaño de fragmento ideal se puede estimar usando la relación de Bond (Wills & Finch, 2016).

$$P_{80} = \frac{C \times \sqrt{d_p}}{\sqrt{d_f}}$$

donde:

P80 es el tamaño de fragmento en micrómetros.

C es una constante que depende del tipo de mineral.

dp es el tamaño del mineral alimentado.

Df es el tamaño del mineral deseado.

2.3.15. Energía Específica del Chancado

La energía específica requerida para el chancado se puede calcular con (Wills & Finch, 2016).

$$E = \frac{W}{Q}$$

donde:

E es la energía específica (kWh/tonelada).

W es el trabajo requerido (kWh).

Q es la cantidad de mineral procesado (toneladas).

2.3.16. Factor de Carga

El factor de carga (también conocido como carga específica) mide la cantidad de explosivo utilizada por volumen o tonelada de material a volar. Se calcula con la siguiente fórmula (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

$$\text{Factor de Carga} = \frac{W}{V}$$

donde:

W es el peso del explosivo (kg).

V es el volumen de material a volar (m³).

2.3.17. Factor de Potencia

El **factor de potencia** se utiliza para medir la eficiencia de un explosivo en términos de energía disponible por tonelada de material que se va a volar. Se puede calcular con la siguiente fórmula (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

$$\text{Factor de Potencia} = \frac{P_e}{T}$$

donde:

Pe es la energía total del explosivo utilizado (kJ).

T es la cantidad de material volado (toneladas).

2.3.18. Cálculo del Burden

El **burden** (B) es la distancia entre el frente de la roca y el barreno. Controla cuánto material se desplaza por cada barreno y es fundamental para optimizar la eficiencia de la voladura. Se puede calcular con la siguiente fórmula empírica (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

$$B = k \cdot D$$

donde:

B es el burden (m).

D es el diámetro de perforación (m).

k es un coeficiente que depende del tipo de roca, tipo de explosivo y condiciones de perforación. Generalmente, k varía entre 25 y 40 para roca dura.

2.3.19. Fórmula Ajustada para Condiciones Comunes en Minas Subterráneas:

Si se tiene en cuenta la densidad del explosivo, la longitud de carga y la resistencia de la roca, se puede usar una fórmula más detallada (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

$$B = D \cdot \left(\frac{\sqrt{P} \cdot E_r}{\sigma_r} \right)$$

donde:

B es el burden (m).

D es el diámetro de perforación (m).

P es la presión de detonación del explosivo (Pa).

E_r es la energía liberada por el explosivo (kJ).

σ_r es la resistencia de la roca (MPa).

2.3.20. Cálculo del Espaciamiento

El espaciamiento (S) es la distancia entre barrenos adyacentes. Un espaciado adecuado maximiza la fragmentación del material, reduce el consumo de explosivos y asegura un control efectivo de la voladura. La fórmula típica para calcular el espaciamiento es (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

$$S = 1.0 \cdot B \text{ (para una voladura normal)}$$

$$S = 1.2 \cdot B \text{ (para una voladura optimizada)}$$

Donde B es el burden calculado previamente.

Burden (B): Es la distancia entre el taladro y la cara libre de la roca en una voladura. Es un parámetro clave que influye en la fragmentación del material, la eficiencia de la explosión y el control de vibraciones.

Espaciamiento (E): Es la distancia entre dos taladros consecutivos en una misma fila de perforación. Un espaciamiento adecuado evita la sobreconsolidación de la roca entre los barrenos y mejora la fragmentación.

Diámetro de perforación (D): Es el diámetro del barreno o perforación realizada para la voladura. Se mide en milímetros o pulgadas y afecta el consumo de explosivo, la fragmentación y la estabilidad de la roca remanente.

Altura de banco (H): Es la altura de la masa rocosa que se pretende volar en una sola fila de barrenos. Depende del diseño de la mina y las características del macizo rocoso.

Profundidad de perforación (P): Es la longitud total del barreno perforado. Usualmente es mayor que la altura del banco debido a la necesidad de sobreperforación para asegurar una adecuada fragmentación en la base del banco.

2.3.21. Número de Barrenos

El número de barrenos depende del área total a volar y de las distancias entre los barrenos. La fórmula para calcular el número total de barrenos en una malla es (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

$$N = \frac{A}{B \cdot S}$$

Donde:

N es el número total de barrenos.

A es el área total del frente de voladura (m²).

B es el burden (m).

S es el espaciamiento (m).

2.3.22. Distribución de la Malla de Perforación

La malla de perforación generalmente se distribuye de manera regular y rectangular (en algunos casos, triangular) para asegurar una voladura homogénea. Las perforaciones están distribuidas en filas, y los parámetros principales son el burden y el espaciamiento.

Área cubierta por un barreno: Cada barreno cubre un área equivalente a $B \cdot S$, por lo que se puede calcular el área que cada barreno abarcará en la voladura.

$$\text{Área por barreno} = B \cdot S$$

Volumen de roca fragmentada por barreno: Si consideramos la altura de banco (H) y la profundidad del barreno (L), el volumen fragmentado por cada barreno puede ser calculado como (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

$$V_b = B \cdot S \cdot H$$

Donde:

V_b es el volumen de material volado por barreno (m^3).

B es el burden (m).

S es el espaciamiento (m).

H es la altura de banco o la profundidad del barreno (m).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN Y CONTEXTUALIZACIÓN

3.1.1. Ubicación

La mina Magistral se encuentra ubicado al NW de Chiquián y al SE de Cátac, políticamente la mina pertenece al Distrito de Aquia, Provincia de Bolognesi, Departamento de Ancash. Geográficamente, la mina Magistral está situada al NW de un valle en la región geográfica de janga o puna y próximo al nevado Tuco (naciente del río Santa), región que se conoce también como el nudo de “Conococha”, y que corresponde a las primeras estribaciones de la Cordillera Blanca, a una altitud promedio de 4,750 m.s.n.m.

Acceso: Para llegar a la mina Magistral partiendo desde la ciudad capital del Perú, Lima, se toma la ruta Lima – Pativilca - Conococha, - Casablanca – Mina.

Tabla 1. *Distancias aproximadas de la ruta a la mina Magistral.*

Origen - Destino	Distancias
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	353.0 kilómetros

Nota. Propia

3.1.2. Topografía

La superficie de la mina Magistral comprende terrenos agrestes en la parte más alta de la mina los cuales en algunas partes son inaccesibles, en la parte intermedia ya el terreno es

más llano con pendientes que van desde 15° a 20° y cerca al río Tuco el terreno es ampliamente llano ya que considera el valle del río.

3.1.3. Geología Local

En el distrito minero aflora la secuencia sedimentaria del Cretáceo medio superior, que está dada por las Lutitas negras de la Formación Carhuaz y hacia el centro del sinclinal tendremos las calizas en capas gruesas, de color gris claro de la Formación Pariahuanca, la secuencia en general sigue un rumbo de N 20-30° W y buzamiento de 30-46 al SW. El yacimiento se encuentra ubicado en un sinclinal volcado hacia el SW que es la principal manifestación de la orogenia andina, el eje de dicho plegamiento es de N 46° W y tiene un plunge de 22°.

En ambos flancos del sinclinal entre las formaciones sedimentarias Carhuaz y Pariahuanca se tiene la presencia de mineralización puesto en manifiesto como mantos, vetas y cuerpos irregulares. Los mantos y cuerpos mineralizados se ubican dentro de un estrato calcáreo el cual superficialmente tiene un relieve positivo, dicho estrato cuyo espesor es de 400.00 metros., presenta zonas de alteraciones constituidos por óxidos y carbonatos recristalizados los cuales son notorios por la coloración y la recristianización producida solamente en la proyección superficial de los mantos y cuerpos de Magistral.

A largo del estrato donde se tiene conocimiento que anteriormente se han trabajado hacia el Norte estructuras mineralizadas, hacia el sur no se observa alteración superficial por estar cubiertas por las morrenas glaciales, pero se tiene trabajando en profundidad estructuras mineralizadas producto de la tectónica que dio lugar al plegamiento que viene asociado consigo un fallamiento que se manifiesta mediante fallas transversales a la estructura, dichas fallas son de poco recorrido (al menos este no se nota en la superficie), casi verticales que han desplazado al horizonte calcáreo que es lo más notorio en superficie y que de algún modo ha controlado la mineralización a lo largo de todo el yacimiento.

También tenemos producto de la flexura fallas de rumbo o sobre escurrimientos que se han producido aprovechando los planos de estratificación, algunas de estas fallas de rumbo, presenta una mineralización incipiente como el 240, la cual por estar en capas arcillosas no ha sido favorable para la mineralización por ser un material impermeable y no presentar las características geológicas más favorables; los cuerpos mineralizados son lenticulares y concordantes con la estratificación y de carácter estrato ligado - estratiforme.

Los pliegues y sobre escurrimientos del distrito comprenden el 90% del área, el que se considera bajo esta denominación tectónica y se ubica íntegramente hacia el sector este, se caracteriza por presentar potentes secuencias sedimentarias plegadas y asociadas a grandes sobre escurrimientos, desarrollados en rocas cretácicas. Los pliegues vistos en esta zona varían tanto en forma como en tamaño y dependen de las rocas en que se han desarrollado. Hacia la margen derecha de la quebrada Tuco se halla un pliegue sinclinal volcado desarrollado sobre las lutitas Carhuaz y en el núcleo estratos masivos de caliza de la Formación Pariahuanca. Hacia la otra margen se aprecia pliegues decumbentes en las calizas de la Formación Santa las cuales son bastantes plásticas.

Figura 1. *Plegamiento en el flanco oriental de la quebrada Tuco.*



Fuente. Área de geología

Formación Carhuaz. (ki-c): Sobre yace a la Formación Santa en forma concordante y solo expone el techo de la secuencia en la quebrada Tucu en el extremo occidental del cerro Ichichira, su morfología constituye superficies suaves onduladas, deleznales y fácilmente erosionables. Litológicamente está constituido por paquetes delgados de arenisca cuarzosa, arenisca de grano medio y lutitas de grano fino gris oscuras, limoarcillitas de colores grises a gris verdosas con niveles delgados de yeso principalmente en la base de la formación, algunas veces se hace presente areniscas ferruginosas friables de grano fino intercalado con areniscas limolíticas de estratificación centimétrica.

Formación Farrat. (Ki-f): Sobreyace a la formación Carhuaz en forma concordante y subyace a la formación Pariahuanca en aparente concordancia, en parte está cubierta por depósitos lacustrinos y cuaternarios recientes, viene a constituir la unidad menos potente del Grupo Goyllarisquiza, no permitiendo en algunos casos su representación a la escala indicada. Principalmente su litología consiste de areniscas blancas friables de grano medio bien seleccionados, con algunos niveles delgados de limoarcillitas principalmente hacia la base. Al no presentar fósiles, se le asigna por su posición estratigráfica una edad correspondiente al Aptiano Superior, y se correlaciona con la parte inferior del Grupo Goyllarisquiza del sector Oriental de la zona de estudio.

Formación Pariahuanca. (Ki-ph): Se encuentra sobre yaciendo a la formación Farrat en aparente concordancia, e infra yace también en concordancia a la formación Chúlec, constituye la unidad calcárea del Cretáceo que aflora en el geosinclinal Aflora en el sector central de la mina su litología está compuesta principalmente por bancos de La geología local de la mina magistral de Huaraz nos muestra las formaciones concordantes que expone el techo de la secuencia en la quebrada tucu. calizas macizas de color gris azulado, de estratos cuyos bloques son de 1.00 a 2.00 m. de espesor, con ligera apariencia lajosa, están intercaladas con calizas margosas y delgadas capas de calizas ferruginosas, la potencia estimada es de 100 m., pero que se adelgaza a medida que se dirige hacia el Sur. Esta formación esta intruida por rocas intrusivas tipo diques sills y algunos stocks generando aureolas de skam, donde se presenta la mineralización de Zn, Pb, Ag y Cu.

Formación Pariatambo. (KI-PT): Se encuentra sobre yaciendo a la formación Chúlec en forma concordante e infra yaciendo a la formación Pariahuanca también en concordancia, se encuentra encerrada dentro de la cuenca Chavín y sobre el bloque del Marañón presentando una potencia estimada de 100 m. hacia la cordillera de Huayhuash su potencia llega hasta los 500 m. Aflora en la parte central del cerro Ichichira, presenta un moderado plegamiento interno, litológicamente consiste de calizas de color gris oscuro con intercalaciones de homfels, limó-arcillitas y lutitas calcáreas, algunas veces presenta niveles delgados de margas bituminosas de color marrón oscuras, es común las intercalaciones de calizas en estratos delgados con limoarcillitas calcáreas de color gris oscuras con restos de ammonites .

Rocas Intrusivas: Se manifiestan en forma de stocks, diques y sills que instruyen principalmente a la formación Pariahuanca, la principal geoforma es sill en la gran parte concordante a la estratificación, así como también en la mineralización.

Sill y Diques: Los floramientos de los sills son mucho mayores que los diques. Su dirección preferencial es NW-SE con potencias que varían desde los centímetros hasta 100 metros en promedio. La ocurrencia mayor está en el flanco occidental del cerro Ichichira, en general su composición es de granito porfirítico, granodiorita se debe señalar que aún falta determinar la composición de todas las rocas intrusivas que existe en la zona Los diques son de la misma composición que los sills, resaltando un sill de 800 m. con potencia promedio de 5 metros, de composición Monzonítica con fenocristales de ortosa de 2 a 5 cm y cuarzo hialino bipiramidal.

3.1.4. Geología Estructural

Plegamiento: Los ejes de plegamiento tienen tendencia NW-SE resultado de los esfuerzos de compresión en dirección NE-SW. Los pliegues y sobre-escurrimientos del distrito comprenden el 90% del área, el que se considera bajo esta denominación tectónica y se ubica íntegramente hacia el sector este, se caracteriza por presentar potentes secuencias

sedimentarias plegadas y asociadas a grandes sobre- escurrimientos, desarrolladas en rocas cretácicas. Los pliegues vistos en esta zona varían tanto en forma como en tamaño y dependen de las rocas en que se han desarrollado. Hacia la margen derecha de la quebrada Tuco se halla un pliegue sinclinal volcado desarrollado sobre las lutitas Carhuaz y en el núcleo estratos masivos de caliza de la Formación Pariahuanca. Hacia la otra margen se aprecia pliegues recumbentes en las calizas de la Formación Santa las cuales son bastantes plásticas.

Fallamiento: En el área Tuco se aprecian dos sistemas de fallamientos que son:

Sistema de fallamiento NW -SE: Coincidente con la orientación de la cordillera andina y que controla parcialmente la red de drenaje del área. De la misma manera los rumbos de los sobres escurrimientos siguen también esta dirección.

Sistema de fallamiento E-W: Estos sistemas de fallas son menores en su extensión y dislocan la secuencia estratigráfica observándose un desplazamiento del estrato grueso calcáreo, estas fallas son estériles pues no presentan mineralización al parecer son posteriores a esta. También se tiene productos de la flexura fallas de rumbo a sobre escurrimientos que se han producido aprovechando los planos de estratificación, algunas de estas fallas de rumbo, presenta una mineralización por ser un material impermeable y no presentar las características geológicas más favorables; los cuerpos mineralizados son lenticulares y concordantes con la estratificación y de carácter estratoligado – estratiforme.

Fracturamiento: Las rocas Cretáceas presentes en la zona, han sufrido fracturamientos resultado de los diferentes eventos tectónicos a lo largo de las eras Geológicas, es por ello que presentan una dirección NW-SE, que a la vez son paralelas a las direcciones del sistema de fallamiento existente.

3.1.5. Geología Económica

Origen y tipo de yacimiento: El yacimiento de Magistral es un yacimiento de remplazamiento, geométricamente un yacimiento estratoligado dentro de las calizas Pariahuanca y las lutitas de la Formación Carhuaz, del tipo Hidrotermal en forma de Mantos, que se encuentra ubicado en un sinclinal volcado hacia el SW, el eje de dicho plegamiento es N 45° W y tiene un plunge de 22°. Los mantos se emplazan en la caliza dolomítica de la Formación Pariahuanca, las cuales se hallan en forma concordante con la estratificación, dichos mantos están separados casi rítmicamente en tres estratos: Sorpresa, Manto, 240, la mineralización se ubica en el piso y/o techo de las capas, los mencionados mantos son en forma lenticular que se repite en forma discontinua en los mismos niveles estratigráficos, en una distancia de 600 mts, con potencia de 1 a 20 mts.

Mineralogía: A nivel del yacimiento se observa que los mantos mineralizados ubicados en la parte basal del Pariahuanca son piritosos mientras que los mantos de los niveles estratigráficos superiores contienen esfalerita, galena y poca pirita. A nivel de manto mineral, la galena se presenta preferentemente en el piso estratigráfico y la esfalerita en el techo. Las alteraciones observadas en los lentes minerales y en las rocas encajonantes consisten en una argilización y una débil silificación.

Minerales de mena:

Galena Argentífera-Sulfuro de plomo plata. (AgPbS).

Chalcopyrita –Sulfuro de hierro cobre. (CuFeS₂).

Esfalerita-Sulfuro de Zinc. (ZnS).

Bornita-Sulfuro de cobre fierro. (Cu₅FeS₄).

Minerales de ganga:

Calcita-Carbonato de calcio. (CaCO₃) Pirita-Sulfuro de hierro. (FeS₂).

Rodocrosita-Carbonato de Manganese. (MnCO₃) (Porta & Arteaga, 2025).

Tabla 2. *Reservas minerales*

Recursos	TM	Ag (oz/tc)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)
Recursos medidos	45000	3.15	3.25	2.6	7.8
Recursos indicados	1460000	4.6	3.7	2.5	6.5
Recursos inferidos	1170000				

Fuente: Cía. Minera Magistral de Huaraz S.A.C.

3.1.6. Contextualización

La minería subterránea es una actividad crucial para la economía de muchas regiones, incluyendo el Perú, donde operaciones como la mina Magistral en Huaraz destacan por su producción de metales valiosos. Sin embargo, este tipo de minería enfrenta múltiples desafíos, entre ellos la necesidad de mejorar la eficiencia de sus procesos operativos, especialmente en el chancado primario. La fragmentación adecuada del material, que depende de las técnicas de voladura empleadas, es esencial para asegurar un procesamiento eficaz y un uso eficiente de los recursos energéticos.

En este marco, la estrategia Mine to Mill se presenta como una solución integral para optimizar la cadena de producción en la minería subterránea. Este enfoque busca alinear las etapas de perforación, voladura y chancado, de manera que se logre una fragmentación más controlada y eficiente. Al aplicar esta metodología, se espera no solo mejorar el rendimiento del chancado, sino también reducir el consumo energético y, en última instancia, aumentar la competitividad y sostenibilidad de la operación minera en el contexto actual.

3.2. TIPO, NIVEL, DISEÑO Y MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN El tipo será una investigación no experimental, debido a que el fin general de esta investigación será la adquisición de nuevos conocimientos del entorno real.

3.3. NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN

El nivel de investigación que se usará para esta investigación será relacional, debido a que se relacionaran los datos de mineral volado del segundo y tercer trimestre del 2023.

3.4. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación realizada será de corte o diseño longitudinal, pues se va a comparar los datos de mineral volado del segundo trimestre con datos del tercer trimestre del 2023.

La investigación será experimental, debido a que se manipulará la variable dependiente al aplicar la estrategia de mine to mill en una mina subterránea y observar el comportamiento de la variable dependiente.

3.5. MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

El método de investigación que se usará en la presente investigación será el método cualitativo.

3.6. POBLACIÓN DE ESTUDIO

La conformaran todas las voladuras realizadas en la mina Magistral durante el segundo y tercer trimestre del 2023.

3.7. MUESTRA

La muestra será las voladuras realizadas en el Nv8 durante el segundo y tercer trimestre del 2023.

3.8. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.8.1. Técnicas

Para la presente investigación se aplicaron técnicas tanto cuantitativas como cualitativas con el objetivo de obtener información integral y contrastada sobre la implementación del enfoque Mine to Mill en el proceso de chancado primario en una mina subterránea. Las técnicas empleadas fueron:

Observación directa en campo: Se realizó un seguimiento presencial a las operaciones de perforación, voladura y chancado primario, permitiendo registrar de manera sistemática los cambios en la granulometría del mineral (P80), la producción (T/H), el consumo energético (KW/H) y otros indicadores de rendimiento. Esta observación permitió identificar condiciones operativas reales, validar el cumplimiento del diseño técnico y detectar desviaciones.

Análisis documental: Se revisaron reportes técnicos de voladura, registros históricos de chancado, informes de producción y documentos de gestión operativa generados por la unidad minera durante los trimestres evaluados. Este análisis permitió establecer comparaciones entre el estado previo y posterior a la implementación del modelo Mine to Mill, fortaleciendo el enfoque longitudinal del estudio.

3.8.2. Instrumentos Y Equipos Utilizados

Para la recolección de datos en la presente investigación se emplearon diversos instrumentos adecuados a las técnicas seleccionadas. Se utilizó una guía de observación

aplicada en campo con apoyo de papel y lápiz, cámara fotográfica y cámara de video, permitiendo registrar el comportamiento operativo del chancado primario y la fragmentación del mineral. Asimismo, se aplicó una guía de entrevista semiestructurada dirigida a personal técnico clave, utilizando grabadora, anotaciones manuales y material audiovisual como instrumentos de registro. Para evaluar la percepción del personal, se diseñó un cuestionario estructurado con escala de Likert, aplicado en formato impreso. Finalmente, se elaboró una ficha de revisión documental para analizar reportes técnicos, informes operativos y registros históricos relacionados con las variables de estudio, garantizando un análisis triangulado y riguroso de la información.

3.9. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS DE DATOS

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

Para poder encontrar la relación de los datos de producción de mineral triturado y P80, antes y después de implementar la estrategia de mine to mill en la mina, se ejecutarán a través del software SPSS versión 26 el cual servirá como herramienta para el respectivo análisis, como prueba estadística se usará la prueba T de Wilcoxon para muestras relacionadas.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. FRAGMENTACIÓN EN EL CHANCADO PRIMARIO (P80)

La implementación de la estrategia Mine to Mill generó una mejora sustancial en la fragmentación del mineral. El valor de P80 se redujo de 17.5 pulgadas en el segundo trimestre a 12.3 pulgadas en el tercer trimestre, representando una disminución del 29.90%. Esta mejora en la granulometría contribuyó a una mayor eficiencia del chancador primario, facilitando el flujo del mineral y reduciendo el trabajo de trituración requerido.

4.2. PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL CHANCADO PRIMARIO (T/H Y KW/H)

Las pruebas experimentales evidenciaron un aumento en la capacidad de procesamiento del chancador. La producción subió de 244 T/H en el segundo trimestre a 281 T/H en el tercer trimestre, lo que representa un incremento del 15.35%. Al mismo tiempo, el Work index (KW/H) disminuyó de 16.6 a 14.8, indicando una reducción del 10.67% en el consumo energético por tonelada tratada, resultado directo de una mejor fragmentación previa.

4.3. OPTIMIZACIÓN DEL CHANCADO PRIMARIO (KG/T Y \$/T)

Se alcanzó una optimización operacional significativa. El factor de potencia (KG/T) aumentó de 0.336 a 0.389 (+15.68%), reflejando una mayor eficiencia energética por tonelada procesada. Además, el costo de trituración (\$/T) se redujo de 6.56 a 5.74 USD, lo que equivale a una disminución del 12.54%. Esto indica una mejora integral en el rendimiento y la rentabilidad del proceso de chancado primario.

4.4. PRUEBAS DE VALIDACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

Los resultados validados del modelo experimental muestran que las mejoras observadas en los indicadores operativos son consistentes y atribuibles directamente a la implementación del enfoque Mine to Mill. Se logró mayor producción (T/H), menor consumo energético (KW/H), mejor fragmentación (P80), incremento en la eficiencia energética (KG/T) y reducción del costo unitario (\$/T). Estas evidencias respaldan la efectividad del modelo aplicado en la operación subterránea.

4.4.1. Análisis de la Granulometría

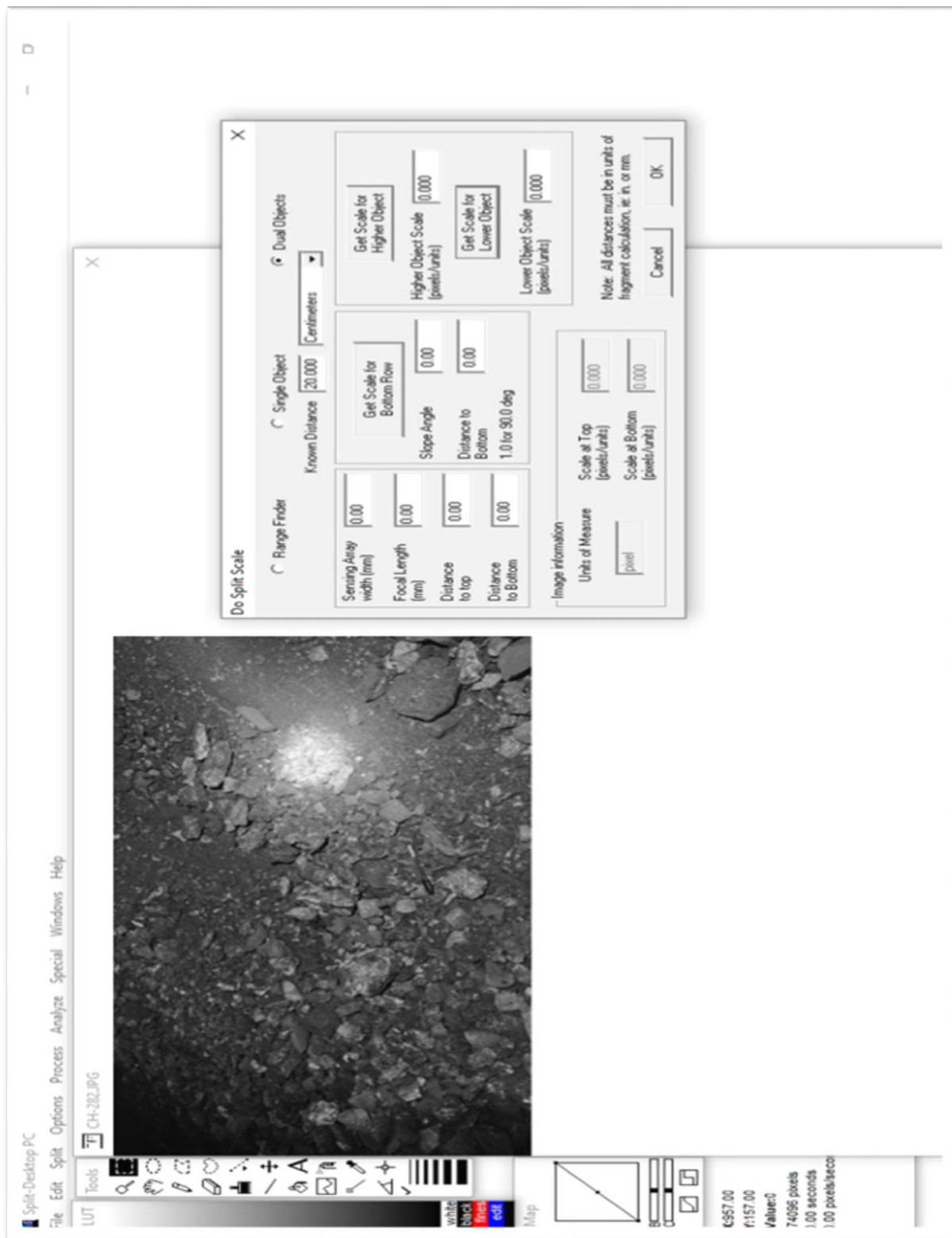
Una de las grandes ventajas de aplicar el concepto mine to mill en operaciones mineras es determinar la influencia del grado de fragmentación post voladura.

Figura 2. *Material post voladura, Nv 8, escenario actual*



Nota. Material post voladura tomada por el departamento de Planeamiento

Figura 3. *Aplicación del Split desktop*

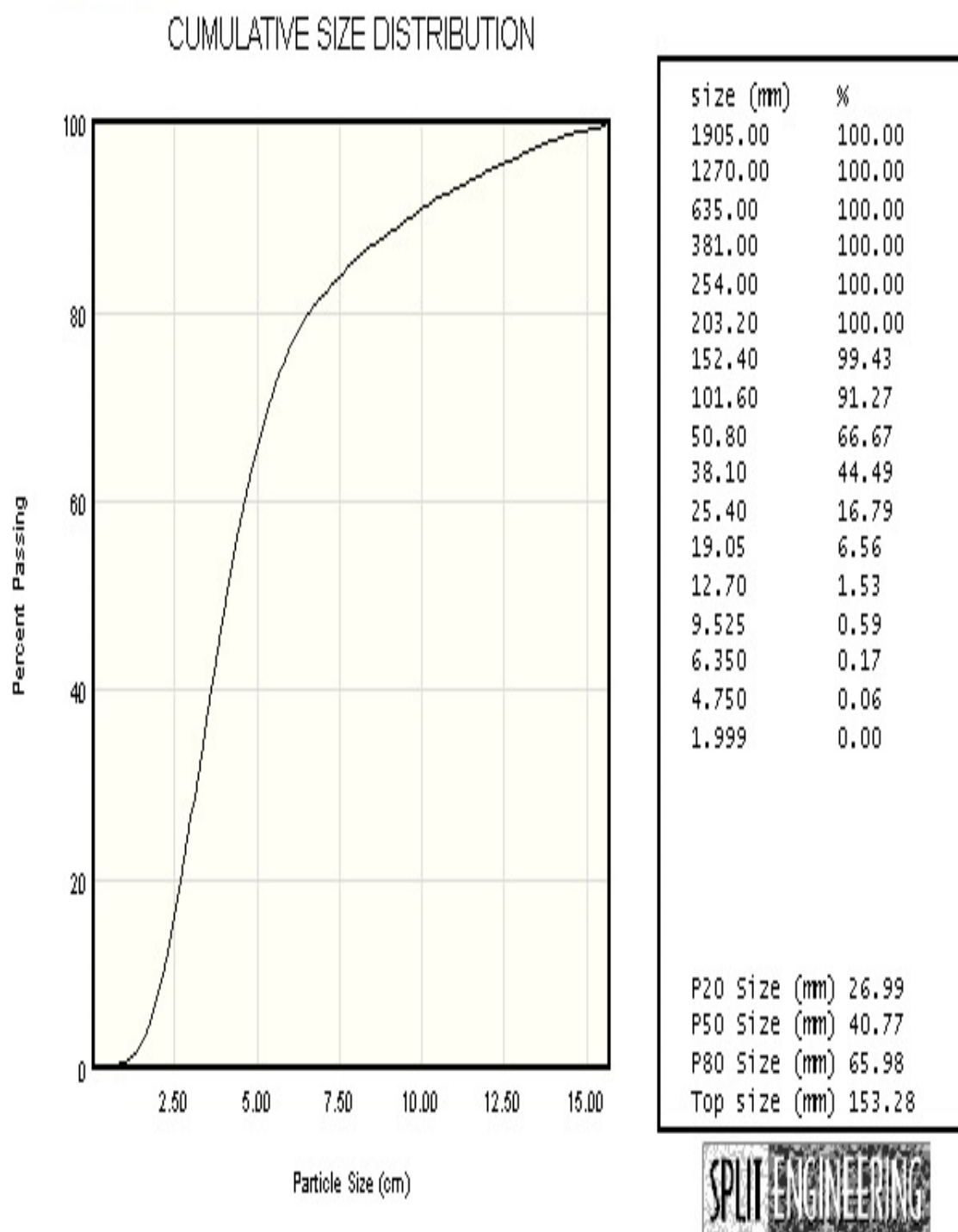


Nota. Material post voladura tomada por el departamento de Planeamiento

Figura 4. *Curva de distribución*

Size Distribution

X



Nota. Material post voladura tomada por el departamento de Planeamiento

4.4.2. Descripción de las Pruebas Experimentales

Se realizará el aumento de la carga explosiva en las voladuras del tercer trimestre, con este aumento de factor de potencia se obtendrá una mejor fragmentación la cual ayudará al aumento de del rendimiento de la trituración con una disminución de su consumo de energía por hora al tener menor esfuerzo en triturar el material voladura debido a la menor fragmentación. Ajustar los parámetros de voladura y de la chancadora basándose en los resultados obtenidos para maximizar la producción y la eficiencia.

Tabla 3. *Parámetros del segundo trimestre*

Mes	T/H	KW/H	P80	KG/T	\$/T
Mes 1	245	16.6	17.5	0.335	6.57
Mes 2	242	16.6	17.5	0.336	6.56
Mes 3	244	16.6	17.6	0.338	6.55
Total	243.87	16.59	17.53	0.336	6.56

Nota. Parámetros de consumo de energía, fragmentación, producción y costo de voladura de los meses de abril, mayo y junio del 2023.

Tabla 4. *Parámetros del tercer trimestre*

Mes	T/H	KW/H	P80	KG/T	\$/T
Mes 1	281.10	14.83	12.28	0.390	5.75
Mes 2	281.48	14.81	12.27	0.389	5.75
Mes 3	281.27	14.81	12.32	0.387	5.72
Total	281.28	14.82	12.29	0.389	5.74

Nota. Parámetros de consumo de energía, fragmentación, producción y costo de voladura de los meses de julio, agosto y septiembre del 2023.

Tabla 5. *Nomenclatura*

Item	Descripción
T/H	Toneladas por hora trituradora
KW/H	Work index
P80	Fragmentación
KG/T	Factor de potencia
\$/T	Costo de trituración

Nota: Descripción de la nomenclatura de los kpi's

Tabla 6. *Parámetros abril 2023*

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	T/H	KW/H	P80	KG/T	\$/T
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	1/04/2023	246	16.6	17.2	0.345	6.57
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	2/04/2023	242	16.8	17.7	0.340	6.48
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	3/04/2023	246	16.9	17.9	0.343	6.60
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	4/04/2023	245	16.7	17.8	0.329	6.71
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	5/04/2023	250	16.5	17.2	0.328	6.72
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	6/04/2023	239	16.8	17.3	0.330	6.72
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	7/04/2023	247	16.2	17.8	0.342	6.50
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	8/04/2023	249	16.7	17.7	0.330	6.65
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	9/04/2023	246	16.4	17.3	0.330	6.40
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	10/04/2023	249	16.6	17.7	0.334	6.60
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	11/04/2023	247	16.4	17.3	0.344	6.61
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	12/04/2023	249	16.9	17.4	0.335	6.61
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	13/04/2023	250	16.6	17.2	0.329	6.58
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	14/04/2023	239	16.3	17.9	0.333	6.46
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	15/04/2023	249	16.6	17.8	0.336	6.42
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	16/04/2023	238	16.9	17.2	0.329	6.43
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	17/04/2023	246	16.2	17.5	0.335	6.61
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	18/04/2023	250	16.7	17.9	0.338	6.58
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	19/04/2023	250	16.4	17.9	0.333	6.69
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	20/04/2023	249	16.8	17.7	0.337	6.61
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	21/04/2023	239	16.2	17.1	0.338	6.44
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	22/04/2023	239	16.6	17.4	0.334	6.55
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	23/04/2023	240	16.8	17.7	0.335	6.56
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	24/04/2023	243	16.5	17.2	0.332	6.61
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	25/04/2023	245	16.7	17.6	0.335	6.55
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	26/04/2023	243	16.2	17.4	0.335	6.43
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	27/04/2023	245	16.8	17.2	0.337	6.68
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	28/04/2023	247	16.4	17.5	0.339	6.53
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	29/04/2023	248	16.4	17.6	0.332	6.54
Segundo trimestre	Mes 1	Abril	30/04/2023	241	16.6	17.1	0.330	6.70
Promedio				245	16.6	17.5	0.33	6.57

Nota. Parámetros de consumo de energía, fragmentación, producción y costo de voladura de abril del 2023.

Tabla 7. *Parámetros mayo 2023*

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	T/H	KW/H	P80	KG/T	\$/T
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	1/05/2023	242	16.6	17.9	0.332	6.60
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	2/05/2023	245	16.9	17.5	0.333	6.45
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	3/05/2023	242	17.0	17.7	0.341	6.60
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	4/05/2023	240	16.4	17.7	0.340	6.61
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	5/05/2023	244	16.3	17.9	0.339	6.67
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	6/05/2023	238	16.7	17.2	0.345	6.46
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	7/05/2023	244	16.2	18.0	0.330	6.51
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	8/05/2023	241	16.2	17.1	0.338	6.51
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	9/05/2023	245	16.6	17.1	0.342	6.64
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	10/05/2023	249	16.9	17.9	0.337	6.42
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	11/05/2023	239	16.8	17.2	0.344	6.40
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	12/05/2023	246	17.0	17.3	0.331	6.45
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	13/05/2023	243	16.9	17.7	0.331	6.53
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	14/05/2023	245	16.6	17.2	0.337	6.72
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	15/05/2023	238	16.9	17.3	0.329	6.49
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	16/05/2023	238	16.5	17.6	0.339	6.72
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	17/05/2023	242	16.5	17.9	0.328	6.59
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	18/05/2023	242	16.4	17.7	0.331	6.54
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	19/05/2023	238	16.3	17.1	0.340	6.53
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	20/05/2023	242	16.3	17.5	0.335	6.43
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	21/05/2023	242	16.7	17.5	0.343	6.62
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	22/05/2023	242	16.2	17.8	0.337	6.59
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	23/05/2023	243	16.7	17.7	0.333	6.66
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	24/05/2023	249	16.3	17.4	0.330	6.40
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	25/05/2023	243	17.0	17.3	0.333	6.59
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	26/05/2023	238	16.5	17.5	0.333	6.71
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	27/05/2023	238	16.2	17.3	0.331	6.56
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	28/05/2023	249	17.0	17.4	0.336	6.69
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	29/05/2023	242	16.7	17.6	0.328	6.65
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	30/05/2023	243	16.7	17.6	0.339	6.66
Segundo trimestre	Mes 2	Mayo	31/05/2023	239	16.6	17.8	0.344	6.50
Promedio				242	16.6	17.5	0.336	6.56

Nota. Parámetros de consumo de energía, fragmentación, producción y costo de voladura de mayo del 2023.

Tabla 8. *Parámetros junio 2023*

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	T/H	KW/H	P80	KG/T	\$/T
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	1/06/2023	243	16.4	17.9	0.345	6.57
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	2/06/2023	246	16.5	17.8	0.336	6.53
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	3/06/2023	243	16.3	17.4	0.341	6.42
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	4/06/2023	244	16.7	18.0	0.332	6.59
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	5/06/2023	239	16.3	17.5	0.338	6.41
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	6/06/2023	238	16.8	17.9	0.329	6.62
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	7/06/2023	249	16.7	17.8	0.344	6.46
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	8/06/2023	250	16.6	17.5	0.337	6.51
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	9/06/2023	248	16.5	17.2	0.345	6.51
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	10/06/2023	245	16.9	17.4	0.341	6.48
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	11/06/2023	244	16.2	17.6	0.345	6.44
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	12/06/2023	243	16.7	17.1	0.342	6.63
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	13/06/2023	241	16.7	17.7	0.328	6.71
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	14/06/2023	239	16.2	17.4	0.342	6.58
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	15/06/2023	247	16.7	17.8	0.333	6.68
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	16/06/2023	245	16.7	17.8	0.328	6.47
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	17/06/2023	250	16.6	17.5	0.339	6.39
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	18/06/2023	249	16.9	18.0	0.341	6.65
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	19/06/2023	242	16.8	17.4	0.335	6.65
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	20/06/2023	247	16.4	18.0	0.339	6.48
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	21/06/2023	244	16.5	17.6	0.335	6.62
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	22/06/2023	242	17.0	17.2	0.332	6.61
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	23/06/2023	241	16.5	17.7	0.339	6.46
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	24/06/2023	244	16.3	17.4	0.335	6.46
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	25/06/2023	242	16.7	17.9	0.337	6.64
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	26/06/2023	240	16.6	17.9	0.342	6.69
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	27/06/2023	239	17.0	17.3	0.331	6.51
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	28/06/2023	250	16.5	17.2	0.344	6.64
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	29/06/2023	244	17.0	17.2	0.337	6.65
Segundo trimestre	Mes 3	Junio	30/06/2023	246	16.6	17.2	0.339	6.56
Promedio				244	16.6	17.6	0.34	6.55

Nota. Parámetros de consumo de energía, fragmentación, producción y costo de voladura de junio del 2023.

Tabla 9. *Parámetros julio 2023*

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	T/H	KW/H	P80	KG/T	\$/T
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	1/07/2023	283	14.9	12.0	0.390	5.75
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	2/07/2023	276	15.0	12.4	0.388	5.88
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	3/07/2023	278	14.9	12.3	0.397	5.75
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	4/07/2023	275	14.7	12.1	0.380	5.76
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	5/07/2023	281	14.6	12.3	0.390	5.60
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	6/07/2023	278	14.9	12.2	0.385	5.61
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	7/07/2023	281	14.9	12.3	0.398	5.69
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	8/07/2023	279	14.7	12.3	0.396	5.77
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	9/07/2023	283	14.8	12.6	0.396	5.77
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	10/07/2023	275	14.8	12.6	0.383	5.87
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	11/07/2023	285	14.9	12.5	0.397	5.75
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	12/07/2023	277	14.9	12.2	0.389	5.65
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	13/07/2023	287	14.6	12.4	0.394	5.88
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	14/07/2023	287	15.1	12.1	0.394	5.75
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	15/07/2023	288	14.9	12.2	0.399	5.87
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	16/07/2023	287	14.9	12.4	0.383	5.71
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	17/07/2023	285	14.9	12.5	0.385	5.66
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	18/07/2023	285	14.7	12.4	0.397	5.78
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	19/07/2023	288	14.7	12.1	0.382	5.65
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	20/07/2023	277	14.7	12.1	0.388	5.72
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	21/07/2023	281	15.1	12.4	0.380	5.71
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	22/07/2023	287	15.2	12.1	0.393	5.84
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	23/07/2023	278	14.7	12.2	0.392	5.85
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	24/07/2023	287	14.7	12.3	0.391	5.60
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	25/07/2023	277	14.5	12.3	0.395	5.77
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	26/07/2023	276	14.7	12.0	0.393	5.75
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	27/07/2023	276	15.2	12.4	0.394	5.88
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	28/07/2023	278	15.1	12.6	0.398	5.87
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	29/07/2023	276	14.6	12.1	0.381	5.75
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	30/07/2023	278	14.7	12.3	0.387	5.78
Tercer trimestre	Mes 1	Julio	31/07/2023	285	14.9	12.0	0.388	5.64
Promedio				281	14.8	12.3	0.390	5.75

Nota. Parámetros de consumo de energía, fragmentación, producción y costo de voladura de julio del 2023.

Tabla 10. *Parámetros agosto 2023*

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	T/H	KW/H	P80	KG/T	\$/T
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	1/08/2023	277	15.1	12.0	0.380	5.88
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	2/08/2023	283	14.6	12.4	0.384	5.73
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	3/08/2023	282	15.1	12.1	0.386	5.77
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	4/08/2023	280	14.5	12.5	0.397	5.83
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	5/08/2023	283	14.5	12.5	0.391	5.78
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	6/08/2023	286	14.6	12.2	0.399	5.61
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	7/08/2023	282	15.1	12.3	0.393	5.78
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	8/08/2023	287	14.8	12.1	0.386	5.65
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	9/08/2023	283	14.8	12.1	0.392	5.80
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	10/08/2023	284	14.5	12.5	0.399	5.80
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	11/08/2023	279	14.9	12.2	0.386	5.78
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	12/08/2023	285	14.7	12.0	0.399	5.69
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	13/08/2023	287	14.9	12.1	0.395	5.60
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	14/08/2023	284	15.0	12.1	0.390	5.74
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	15/08/2023	285	14.6	12.1	0.387	5.61
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	16/08/2023	279	15.2	12.1	0.383	5.81
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	17/08/2023	275	15.0	12.4	0.391	5.82
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	18/08/2023	280	15.0	12.4	0.380	5.80
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	19/08/2023	277	14.7	12.1	0.392	5.74
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	20/08/2023	278	15.1	12.4	0.383	5.80
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	21/08/2023	280	15.2	12.3	0.383	5.68
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	22/08/2023	281	14.9	12.1	0.393	5.72
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	23/08/2023	287	14.6	12.5	0.387	5.85
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	24/08/2023	287	14.5	12.6	0.384	5.63
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	25/08/2023	276	14.9	12.4	0.380	5.87
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	26/08/2023	277	14.6	12.1	0.388	5.85
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	27/08/2023	277	15.1	12.4	0.389	5.87
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	28/08/2023	277	14.6	12.5	0.395	5.65
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	29/08/2023	284	15.0	12.3	0.391	5.69
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	30/08/2023	278	14.5	12.5	0.380	5.71
Tercer trimestre	Mes 2	Agosto	31/08/2023	286	14.5	12.4	0.382	5.69
Promedio				281	14.8	12.3	0.389	5.75

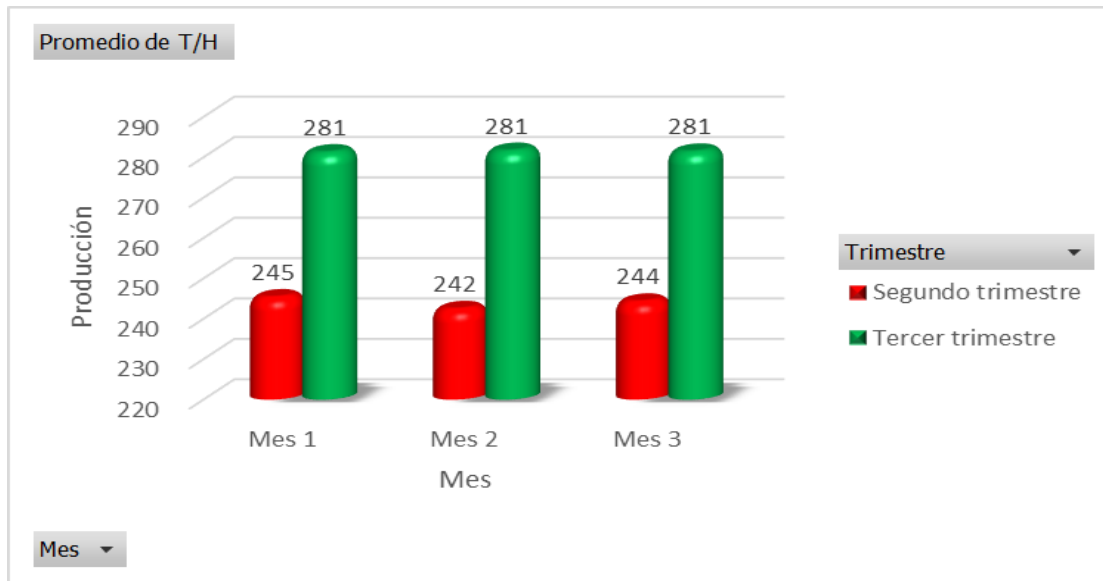
Nota. Parámetros de consumo de energía, fragmentación, producción y costo de voladura de agosto del 2023.

Tabla 11. *Parámetros septiembre 2023*

Trimestre	Mes	Mes	Fecha	T/H	KW/H	P80	KG/T	\$/T
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	1/09/2023	278	14.7	12.5	0.394	5.61
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	2/09/2023	275	15.0	12.2	0.385	5.78
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	3/09/2023	280	15.0	12.3	0.380	5.66
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	4/09/2023	276	15.2	12.5	0.387	5.61
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	5/09/2023	285	14.8	12.5	0.398	5.65
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	6/09/2023	278	14.8	12.4	0.386	5.69
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	7/09/2023	278	14.6	12.0	0.386	5.62
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	8/09/2023	283	14.9	12.5	0.387	5.67
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	9/09/2023	277	14.5	12.1	0.380	5.66
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	10/09/2023	286	14.8	12.5	0.388	5.76
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	11/09/2023	283	14.9	12.0	0.387	5.77
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	12/09/2023	284	14.8	12.0	0.384	5.68
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	13/09/2023	275	15.0	12.4	0.395	5.61
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	14/09/2023	277	14.9	12.3	0.386	5.72
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	15/09/2023	281	14.8	12.3	0.387	5.80
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	16/09/2023	285	14.7	12.3	0.392	5.66
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	17/09/2023	281	14.6	12.5	0.382	5.64
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	18/09/2023	283	14.7	12.1	0.394	5.78
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	19/09/2023	279	14.7	12.3	0.381	5.85
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	20/09/2023	282	14.9	12.5	0.396	5.81
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	21/09/2023	279	14.8	12.2	0.381	5.87
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	22/09/2023	288	15.0	12.4	0.387	5.77
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	23/09/2023	284	14.9	12.5	0.393	5.68
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	24/09/2023	288	15.2	12.4	0.384	5.73
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	25/09/2023	287	14.7	12.1	0.399	5.65
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	26/09/2023	276	14.8	12.5	0.381	5.85
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	27/09/2023	280	14.7	12.1	0.399	5.87
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	28/09/2023	286	14.7	12.4	0.380	5.64
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	29/09/2023	284	14.9	12.3	0.385	5.76
Tercer trimestre	Mes 3	Septiembre	30/09/2023	280	14.5	12.4	0.380	5.72
Promedio				281	14.8	12.3	0.39	5.72

Nota. Parámetros de consumo de energía, fragmentación, producción y costo de voladura de septiembre del 2023.

Figura 5. *Producción*



Nota. Producción de los meses del segundo vs tercer trimestre del 2023.

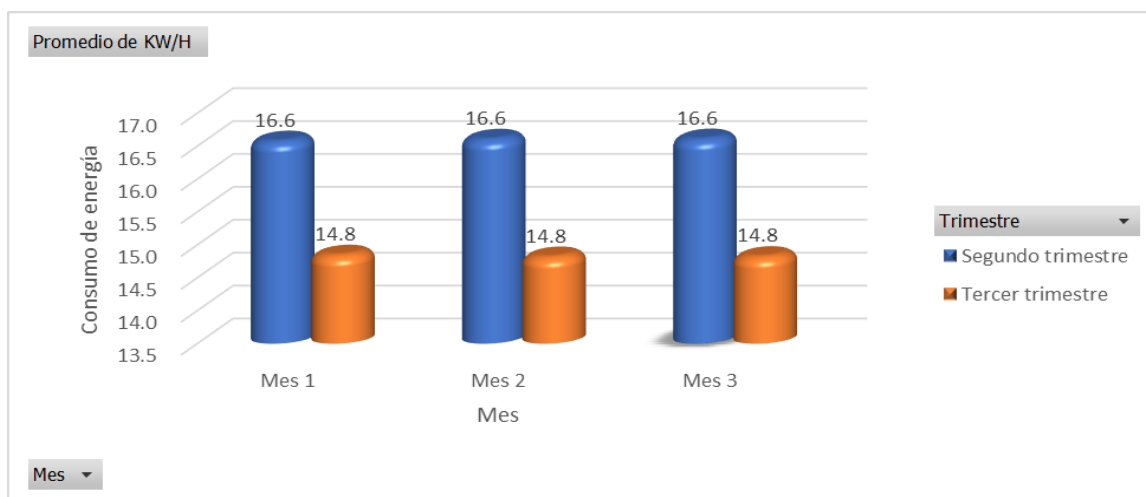
Comentario Sobre la Producción (T/H): La gráfica muestra claramente una diferencia sostenida en la producción promedio en toneladas por hora (T/H) entre el segundo y tercer trimestre del 2023. El segundo trimestre, representado por la línea azul, mantiene valores de producción más bajos y variables: 245 T/H en el mes 1, cayendo a 242 T/H en el mes 2 y recuperándose a 244 T/H en el mes 3. Esto evidencia cierta inestabilidad en el proceso de chancado durante este periodo.

En contraste, el tercer trimestre, representado por la línea naranja, muestra una producción constante y significativamente más alta en los tres meses, con un valor uniforme de 281 T/H. Esta estabilidad y aumento del 15.35% en la producción promedio indican una mejora operativa considerable atribuible a la implementación del enfoque Mine to Mill.

La consistencia en los valores del tercer trimestre refleja una operación optimizada del chancado primario, probablemente como resultado de una mejor fragmentación del mineral, un flujo de alimentación más uniforme y una menor exigencia energética del equipo. Además,

esta mejora sostenida respalda la hipótesis de que la aplicación del modelo Mine to Mill contribuye directamente al incremento de la eficiencia y productividad del proceso.

Figura 6. *Consumo de energía*



Nota. Consumo de energía de los meses del segundo vs tercer trimestre del 2023.

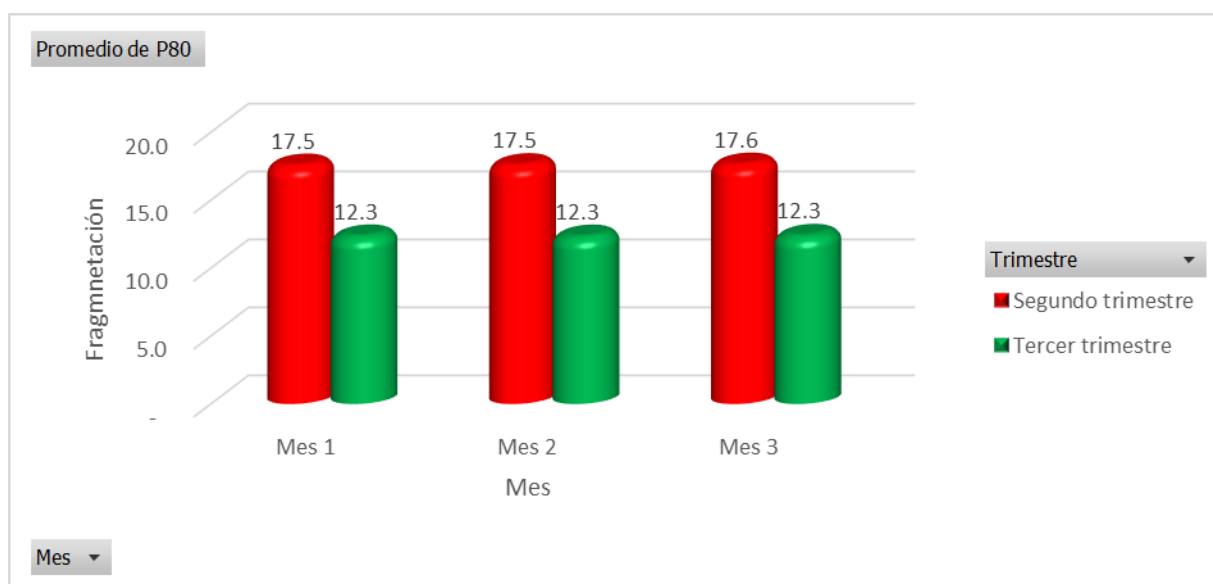
Comentario Sobre el Work Index (KW/H): El gráfico muestra una clara diferencia en el consumo energético por tonelada procesada entre los trimestres evaluados. Durante el segundo trimestre, representado por la línea azul, el Work Index se mantuvo constante en 16.6 KW/H a lo largo de los tres meses. En cambio, en el tercer trimestre, identificado con la línea naranja, el índice bajó a 14.8 KW/H, también con total estabilidad.

Este resultado representa una reducción del 10.67% en el consumo energético promedio, lo que demuestra una mejora significativa en la eficiencia energética del chancado primario.

La disminución sostenida del Work Index en el tercer trimestre refleja una menor resistencia del mineral al ser procesado, consecuencia directa de una mejor fragmentación obtenida en voladura. Esto redujo la carga de trabajo del chancador, disminuyendo el esfuerzo mecánico requerido por tonelada, y por tanto, optimizando el uso de energía en la operación.

Este indicador respalda los beneficios operacionales del modelo Mine to Mill, que no solo incrementa la productividad, sino que reduce el costo energético por unidad tratada.

Figura 7. *Fragmentación*



Nota. Fragmentación de los meses del segundo vs tercer trimestre del 2023.

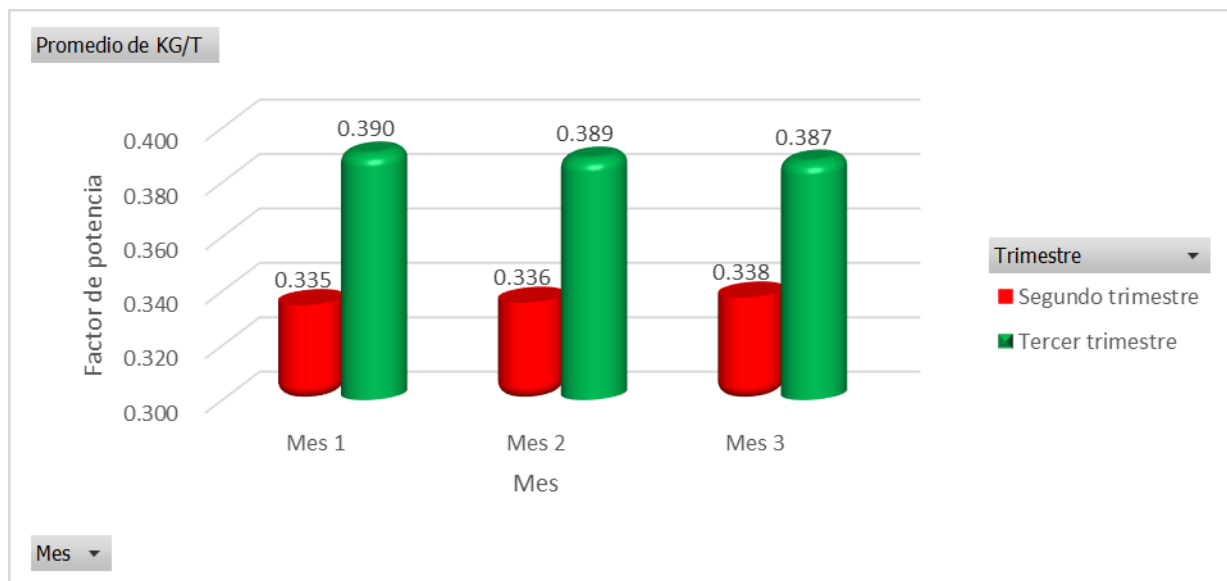
Comentario Sobre la Fragmentación del Mineral (P80): El gráfico evidencia una mejora significativa en la fragmentación del mineral tras la implementación del modelo Mine to Mill. En el segundo trimestre, representado por la línea azul, el tamaño de partícula P80 se mantuvo alrededor de 17.5 a 17.6 pulgadas, lo que indica una fragmentación más gruesa y menos eficiente para el proceso de chancado primario.

En contraste, durante el tercer trimestre, representado por la línea naranja, el P80 descendió uniformemente a 12.3 pulgadas en los tres meses, reflejando una reducción del 29.90% en el tamaño del material.

Esta disminución en el tamaño de partícula (P80) indica que la voladura fue optimizada, generando un material más fino que facilita el trabajo del chancador primario. Al reducirse la

cantidad de material sobredimensionado, se mejora la eficiencia del proceso, se disminuyen los atascos, y se incrementa el rendimiento energético. Esta fragmentación uniforme y controlada demuestra el impacto positivo de la integración operacional propuesta por la estrategia Mine to Mill.

Figura 8. *Factor de Potencia*



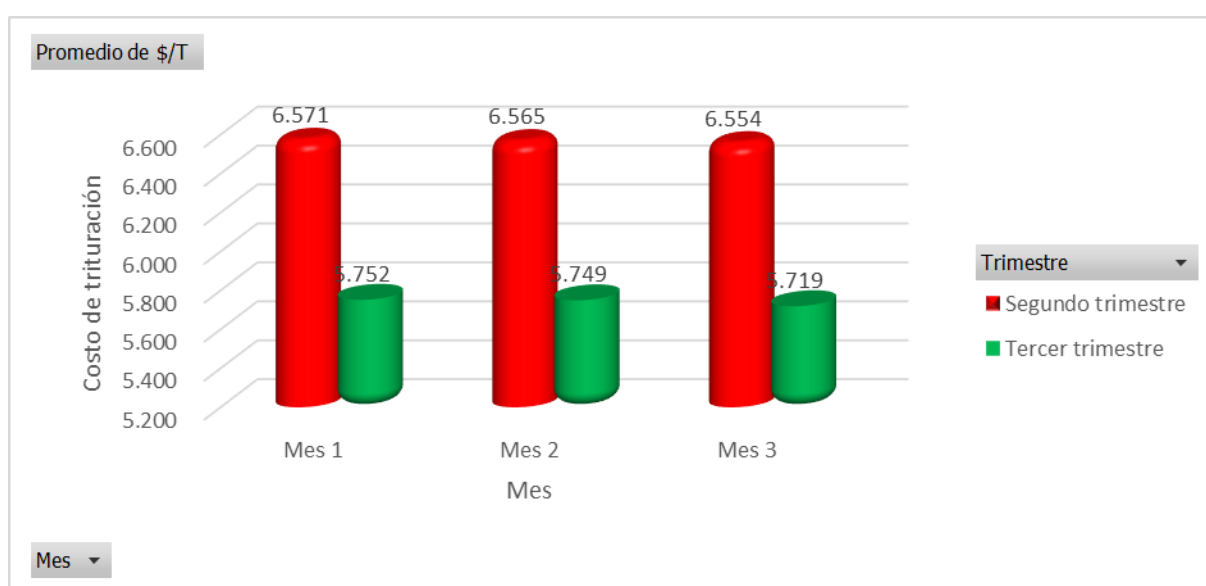
Nota. Factor de potencia de los meses del segundo vs tercer trimestre del 2023.

Comentario Sobre el Factor de Potencia (KG/T): El gráfico refleja una mejora sostenida en el factor de potencia tras la implementación del enfoque Mine to Mill. En el segundo trimestre, representado por la línea azul, los valores se encuentran entre 0.335 y 0.338 KG/T, lo que evidencia un nivel más bajo de energía aplicada por tonelada volada.

En contraste, en el tercer trimestre, representado por la línea naranja, se observan valores más elevados y estables entre 0.390 y 0.387 KG/T, lo cual representa un incremento del 15.68% en el factor de potencia promedio respecto al trimestre anterior.

Este incremento en KG/T indica una mayor carga explosiva por tonelada de mineral, lo cual genera una fragmentación más eficiente del macizo rocoso. El uso de una energía específica más alta durante la voladura facilitó el trabajo del chancador primario, disminuyendo el tamaño del material ingresado (P80) y contribuyendo a la reducción del consumo energético (KW/H). Por lo tanto, este comportamiento confirma la efectividad de ajustar el diseño de voladura como parte esencial de la estrategia Mine to Mill, mejorando la conminución desde su etapa inicial.

Figura 9. *Costo de trituración*



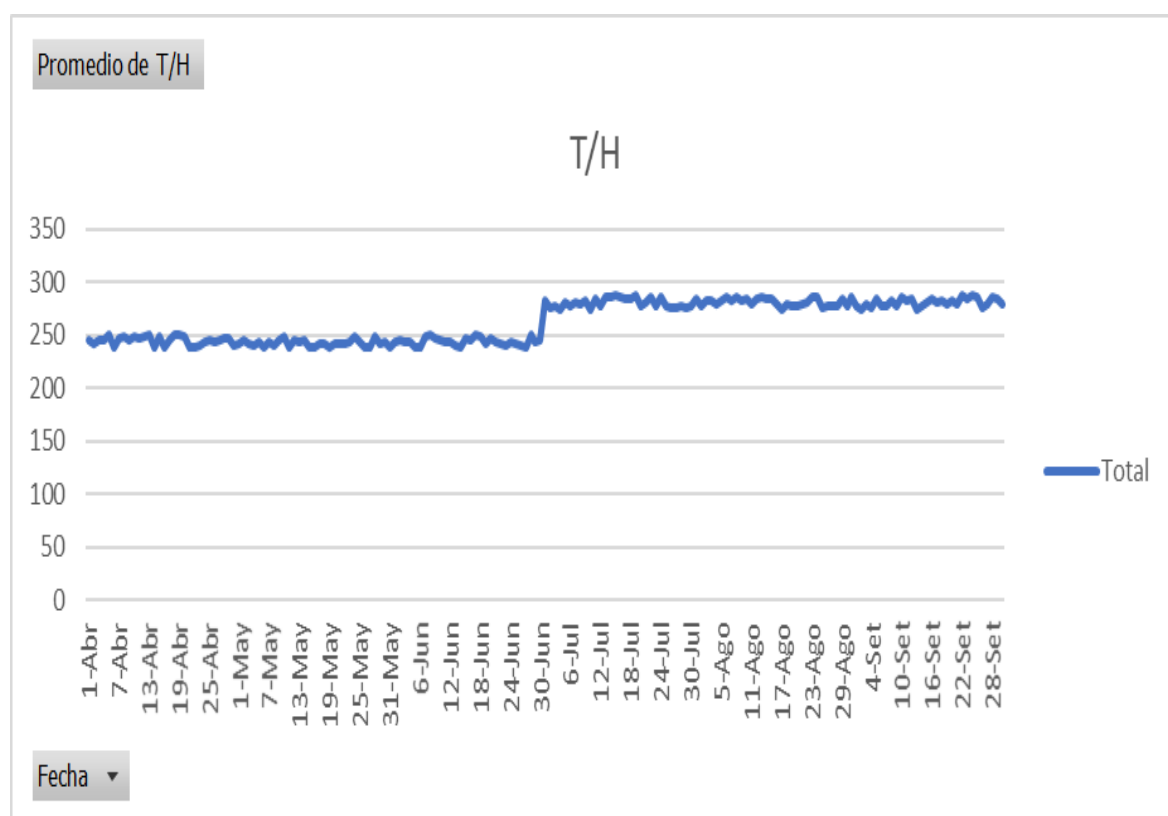
Nota. Costo de trituración de los meses del segundo vs tercer trimestre del 2023.

Comentario Sobre el Costo de Trituración (\$/T): El gráfico muestra una reducción constante en el costo unitario de trituración tras la implementación del modelo Mine to Mill. Durante el segundo trimestre (línea azul), los costos se ubicaron entre 6.57 y 6.55 USD/T, mientras que en el tercer trimestre (línea naranja), el costo disminuyó progresivamente desde 5.75 a 5.72 USD/T.

Esta variación representa una disminución del 12.54% en el costo promedio por tonelada procesada, lo cual tiene un impacto directo en la rentabilidad operativa de la planta de chancado primario.

La reducción en el costo de trituración se debe principalmente a la mejora en la fragmentación del mineral (P80) y a la mayor eficiencia energética (menor KW/H), lo que reduce el esfuerzo del equipo de trituración y prolonga su vida útil. Esta mejora está alineada con el incremento del factor de potencia (KG/T) y con la mayor producción observada (T/H). En conjunto, estos resultados validan que la estrategia Mine to Mill no solo mejora el rendimiento técnico, sino que también optimiza los costos operativos del proceso de conminución primaria.

Figura 10. Producción por día segundo vs tercer trimestre



Nota. Producción del segundo y tercer trimestre del 2023.

Comentario Sobre la Evolución de Producción (T/H) por Fecha: El gráfico muestra el comportamiento diario del promedio de producción en toneladas por hora (T/H) desde el 1 de abril hasta el 30 de septiembre. Se observa una tendencia clara de dos fases diferenciadas:

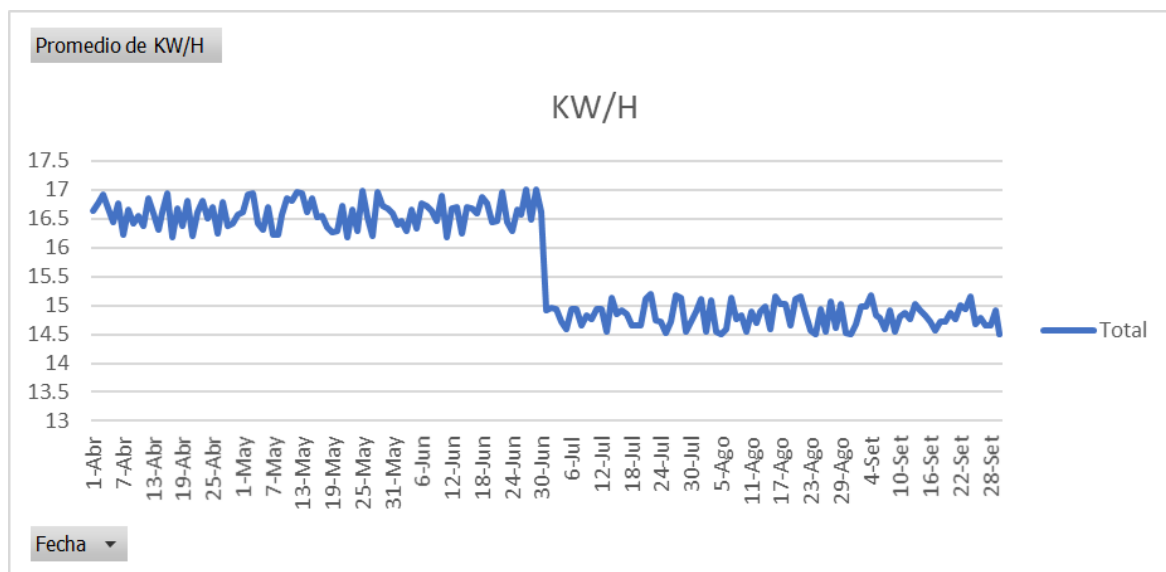
Durante abril, mayo y junio (segundo trimestre), la producción se mantuvo en niveles inferiores a 250 T/H, con pequeñas fluctuaciones que evidencian variabilidad operacional y posibles interrupciones o limitaciones en el proceso.

A partir del 1 de julio, se observa un salto brusco y sostenido en la producción, superando los 280 T/H de manera consistente a lo largo de julio, agosto y septiembre (tercer trimestre). Esta mejora se mantiene estable, lo cual indica un cambio estructural en la eficiencia del proceso.

El punto de quiebre observado a inicios de julio coincide con la implementación de la estrategia Mine to Mill, lo cual confirma su impacto directo en el incremento de la capacidad de procesamiento del chancado primario. La estabilidad observada en el tercer trimestre refleja una operación más controlada y eficiente, con menor variabilidad diaria y mayor aprovechamiento del equipo.

Este gráfico es fundamental para respaldar visualmente el efecto positivo del cambio en el modelo operativo, al evidenciar una mejora sostenida y cuantificable en la producción.

Figura 11. Consumo de energía por día segundo vs tercer trimestre



Nota. Consumo de energía del segundo y tercer trimestre del 2023.

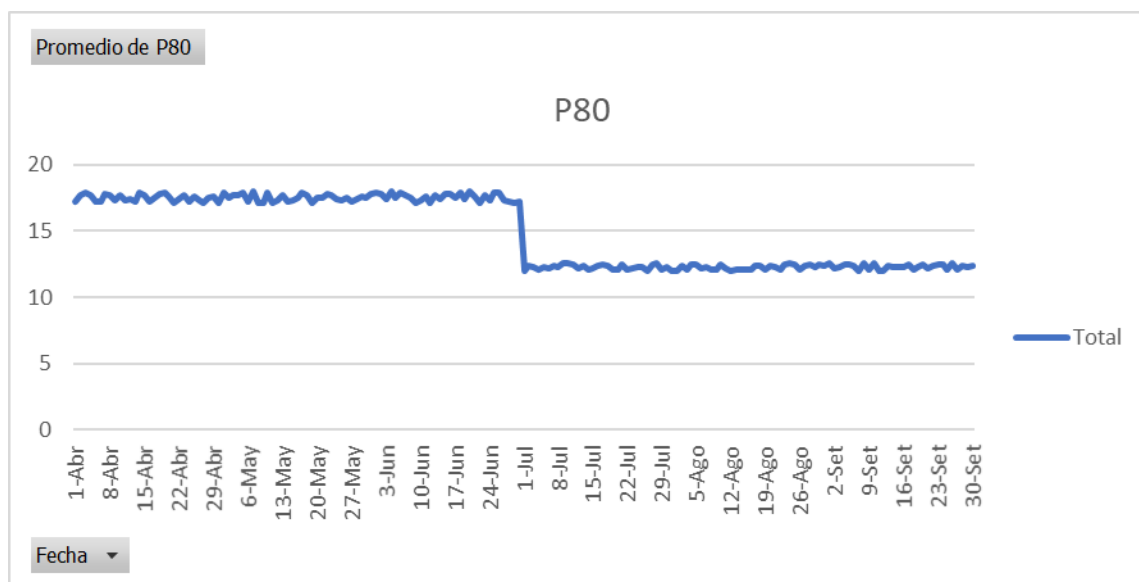
Comentario Sobre la Evolución del Work Index (KW/H) por Fecha: El gráfico evidencia claramente una variación significativa en el Work Index (KW/H) a lo largo del tiempo. Desde el 1 de abril hasta el 30 de junio (segundo trimestre), el consumo energético por tonelada se mantuvo alrededor de 16.5 a 16.7 KW/H, con ligeras oscilaciones diarias, reflejo de la variabilidad operativa y posiblemente de una fragmentación deficiente del mineral.

A partir del 1 de julio, se produce una disminución abrupta del KW/H, estabilizándose en valores entre 14.5 y 14.8 KW/H durante julio, agosto y septiembre. Este cambio marca una reducción promedio del 10.67% en el consumo energético, manteniéndose con baja dispersión y mayor eficiencia en el tercer trimestre.

La reducción repentina y sostenida del Work Index coincide con la implementación de la estrategia Mine to Mill, lo que evidencia una fragmentación más eficiente del mineral desde la voladura. Esto disminuye el esfuerzo requerido por el chancador primario, optimizando el consumo de energía por tonelada tratada. La estabilidad posterior sugiere un control

operacional mejorado y la efectividad de los ajustes aplicados al diseño de voladura y a la coordinación entre mina y planta.

Figura 12. *Fragmentación por día segundo vs tercer trimestre*



Nota. Fragmentación del segundo y tercer trimestre del 2023.

Comentario Sobre la Evolución de la Fragmentación del Mineral (P80) por Fecha:

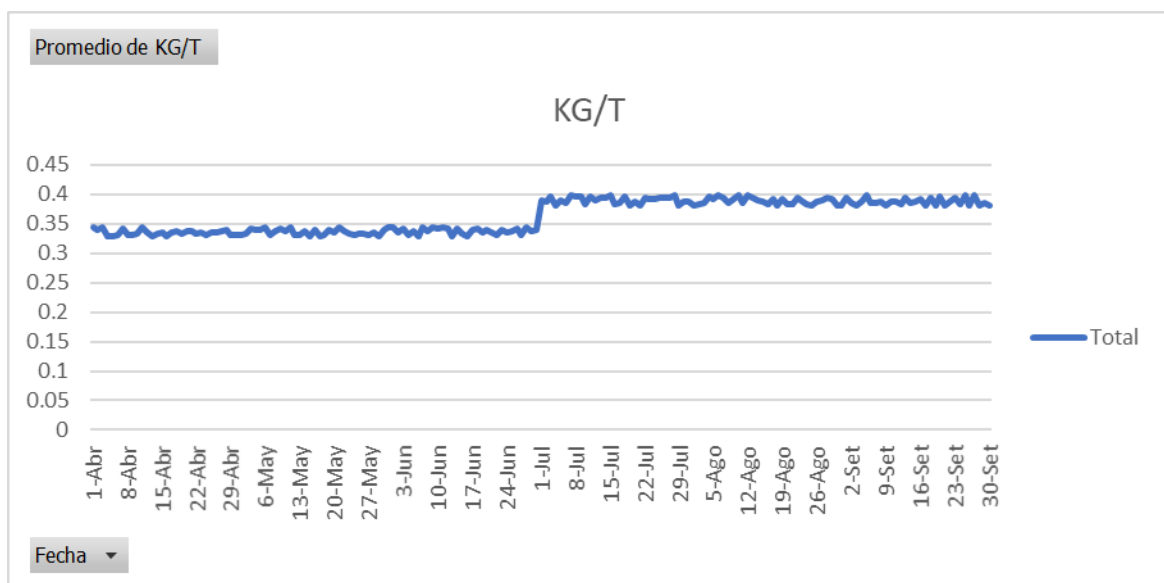
El gráfico muestra con claridad el comportamiento del valor P80 (tamaño de partícula al 80%) durante el periodo del 1 de abril al 30 de septiembre. En el segundo trimestre (abril-junio), los valores se mantuvieron elevados, en torno a 17.5 pulgadas, con leves fluctuaciones, lo cual evidencia una fragmentación deficiente o heterogénea del mineral producto de una voladura subóptima.

A partir del 1 de julio, tras la aplicación de la estrategia Mine to Mill, se observa un descenso abrupto del P80 hasta aproximadamente 12.3 pulgadas, nivel que se mantiene de forma estable y controlada durante los tres meses siguientes.

Este cambio repentino y sostenido en el tamaño del material demuestra una mejora significativa en la eficiencia del proceso de voladura, alcanzando un grado de fragmentación mucho más adecuado para el chancado primario. Esta condición redujo la presencia de partículas sobredimensionadas, mejoró el rendimiento del chancador, y facilitó la reducción del consumo energético (KW/H).

La estabilidad observada en el tercer trimestre también evidencia que los parámetros de perforación y voladura fueron correctamente ajustados y estandarizados, cumpliendo los objetivos del enfoque Mine to Mill.

Figura 13. *Factor de potencia por día segundo vs tercer trimestre*



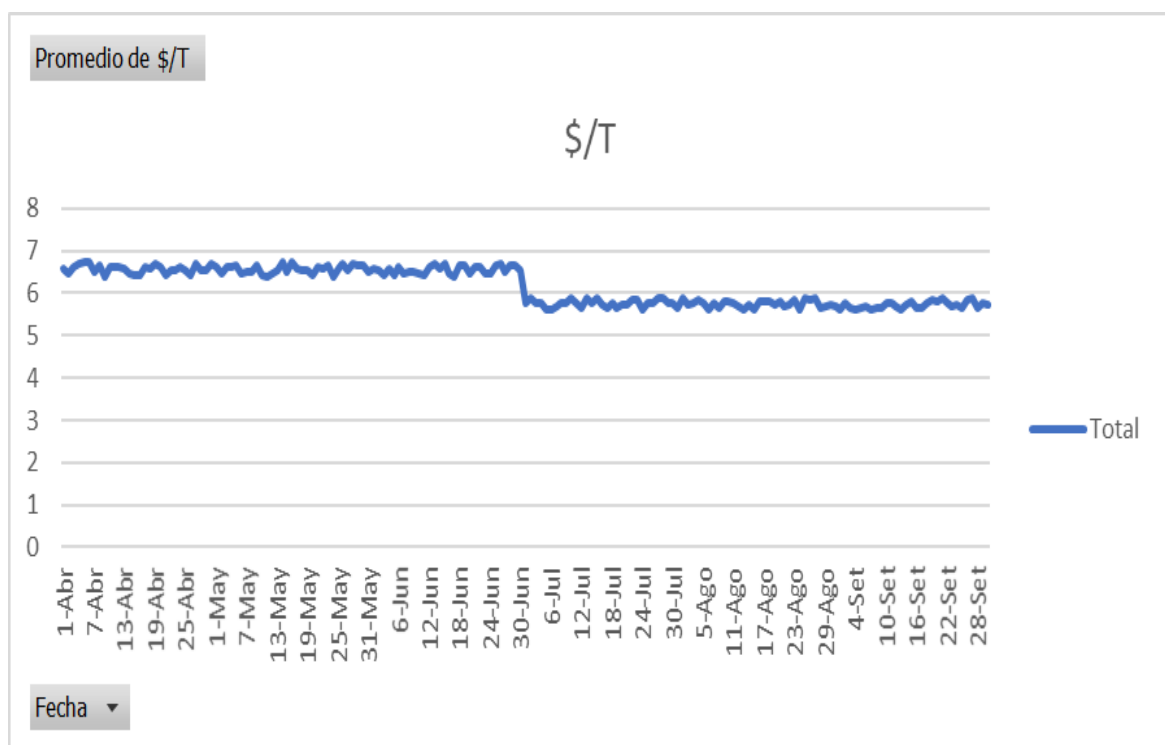
Nota. Factor de potencia del segundo y tercer trimestre del 2023.

Comentario Sobre la Evolución del Factor de Potencia (KG/T) por Fecha: El gráfico muestra una evolución clara del factor de potencia (KG/T), el cual representa la relación entre la cantidad de explosivo utilizada y el tonelaje de roca volada. Durante el segundo trimestre (abril-junio), los valores de KG/T se mantuvieron bajos, en torno a 0.335, lo que indica una energía específica limitada aplicada al macizo rocoso durante la voladura.

A partir del 1 de julio, se observa un incremento abrupto del KG/T, alcanzando un promedio de 0.389, que se mantiene estable durante los meses de julio, agosto y septiembre. Este aumento coincide con la implementación de la estrategia Mine to Mill, orientada a optimizar la energía aplicada en la voladura.

El incremento en el factor de potencia evidencia que se aplicó una mayor cantidad de explosivo por tonelada, generando una mejor fragmentación del mineral (menor P80). Esta mejora permitió disminuir el consumo energético (KW/H) y aumentar la producción (T/H) en el chancado primario. Además, la estabilidad del nuevo valor de KG/T refleja una adecuada estandarización del diseño de voladura, lo cual respalda la sostenibilidad operativa del modelo aplicado.

Figura 14. Costo de trituración por día segundo vs tercer trimestre



Nota. Costo de trituración del segundo y tercer trimestre del 2023.

Comentario Sobre la Evolución del Costo de Trituración (\$/T) por Fecha: El gráfico muestra el comportamiento del costo de trituración por tonelada (\$/T) a lo largo del periodo analizado. Durante el segundo trimestre (abril-junio), los costos se mantuvieron relativamente estables en torno a los 6.56 a 6.57 USD/T, evidenciando un proceso con altos requerimientos energéticos y posiblemente una fragmentación deficiente.

A partir del 1 de julio, se observa una reducción abrupta en el costo unitario, alcanzando valores promedio de 5.74 USD/T, los cuales se mantienen constantes hasta finales de septiembre. Esta caída coincide con la implementación de la estrategia Mine to Mill.

La disminución del 12.54% en el costo por tonelada procesada refleja directamente los beneficios operativos alcanzados mediante la mejor fragmentación (menor P80), la reducción del Work Index (KW/H) y el incremento del factor de potencia (KG/T). El menor esfuerzo requerido por el chancador primario, junto con un flujo de mineral más eficiente, permite reducir tanto el consumo de energía como el desgaste de equipos, generando un ahorro económico sostenible.

Este gráfico valida que el enfoque Mine to Mill no solo optimizó la producción y la eficiencia técnica, sino que también impactó positivamente en la rentabilidad del proceso.

4.5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.5.1. Estadística Aplicada para la Demostración de la Optimización

- **Análisis Inferencial**

Para el análisis inferencial de la producción del segundo y tercer trimestre del 2023, se aplicó los supuestos de continuidad y normalidad. Al respecto Kerlinger y Lee (2002) indican que los supuestos de continuidad y normalidad son aquellos que determinan el uso de datos

estadísticos paramétricos y no paramétricos. Posteriormente se efectuó la contrastación de las hipótesis planteadas.

- **Supuesto de Continuidad**

Los datos recolectados para la variable producción del segundo y tercer trimestre del 2023, son de naturaleza cuantitativa, la naturaleza de medición propia de las variables no se vio afectada, por tal motivo, se optó por el empleo de la estadística no paramétrica debido a que no se cumple con el supuesto de continuidad.

- **Supuesto de Normalidad**

La prueba de normalidad se realizó con la aplicación del método de Kolmogorov Smirnov, el cual se aplica siempre y cuando el tamaño de las muestras sea mayor o igual a 30 unidades (Kerlinger, Lee, 2002), teniendo el presente estudio una muestra mayor a 30 datos. La prueba de normalidad se realizó introduciendo los datos de cada variable en el software estadístico SPSS 26.0, se halló la diferencia entre los resultados de las variables para poder ejecutar la prueba de kolmogorov Smirnov con un nivel de confiabilidad del 95%, bajo las siguientes condiciones:

Si:

-Sig. < 0.05 Adopta una distribución no normal

-Sig. ≥ 0.05 Adopta una distribución normal

Donde:

-Sig. P-valor o nivel crítico del contraste

Los resultados de la prueba de normalidad fueron los siguientes:

Tabla 12. *Normalidad*

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
G	,073	91	,200 [*]	,981	91	,222
*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.						
a. Corrección de significación de Lilliefors						

Nota. Propia

Tabla 13. *Prueba de normalidad*

Kolmogorov-Smirnov			
	Estadístico	gl	Sig.
Diferencia	,073	9	,000

Nota. Resultados de la prueba de normalidad.

En la tabla se puede observar el resultado de la prueba de normalidad para la diferencia de la producción del segundo y tercer trimestre del 2023, los cuales indican que la significación para los valores de producción del segundo y tercer trimestre del 2023 fue de 0.000, cuyo valor es menor que el error asumido de 0.05, lo que indica que los datos de ambas variables no tienen un comportamiento normal; por lo cual se optó por el empleo de pruebas no paramétricas.

Prueba de hipótesis

Uso de la prueba de hipótesis para la presente investigación

La prueba de hipótesis es una regla que especifica cuando se puede aceptar o rechazar una afirmación sobre una población dependiendo de la evidencia proporcionada por una muestra de datos. La prueba de hipótesis examina dos hipótesis opuestas sobre una población: la hipótesis nula y la hipótesis alternativa.

Pasos para la prueba de hipótesis

- Paso 1 redacción de hipótesis

H_0 = No existe diferencia significativa en las medias de resultados de la producción de guardia del segundo y tercer trimestre del 2023.

H_1 = Existe una diferencia significativa en las medias de la producción del segundo y tercer trimestre del 2023.

- Paso 2 definición del nivel alfa

Nivel alfa del 5 %

En notación decimal: 0.05

- Paso 3 elección de la prueba

La prueba de t de Wilcoxon es una prueba no paramétrica para muestras relacionadas, es decir, se le aplican dos medidas en momentos diferentes d la producción del segundo y tercer trimestre del 2023; como es un estudio longitudinal, entonces las posibilidades de la prueba a utilizar se restringen a dos medidas, una medida antes y una medida después, es decir, la

variable de comparación. En este sentido, la prueba a utilizar es t de Wilcoxon para muestras relacionadas.

- Paso 4 de la prueba de hipótesis calcular el p valor

Tabla 14. *Prueba estadística T de Wilcoxon*

Segundo – Tercer Trimestre 2023	
Z	-8,258 ^b
Sig. asintótica (bilateral)	,000

Nota. Prueba

a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon

b. Se basa en rangos positivos.

Nota. Resultados de la prueba de T de wilcoxon.

P Valor = 0.000	<	$\alpha = 0.05$
-----------------	---	-----------------

Si la probabilidad obtenida P Valor $\leq \alpha$, se rechaza H0 (se acepta H1)

Si la probabilidad obtenida P Valor $> \alpha$, no se rechaza H0 (se acepta H0)

- Paso 5 decisión estadística

Existe diferencia significativa en las medias de la producción del segundo y tercer trimestre del 2023; es decir, la implementación del mine to mill sí tuvo un efecto significativo

sobre la producción, por lo cual se puede concluir que existe diferencia estadísticamente significativa entre la producción a del segundo y tercer trimestre del 2023 antes y después de implementar el mine to mill; por lo que se logró mejorar la producción con la implementación del mine to mill.

Se puede definir lo siguiente:

Análisis comparativo de la producción antes y después de la implementación del mine to mill. En los siguientes cuadros se hace una comparación del total de producción en la trituradora primaria de las diferencias entre el segundo y tercer trimestre del 2023 de los días y 30 días al mes para poder comparar el primer, segundo y tercer mes de los segundo y tercer trimestre, que se presenta en equipos de mina como volquetes y palas.

En los resultados encontrados en la presente investigación se observó que la implementación de la estrategia del mine to mill es un 15.35% de aumento de producción en el tercer trimestre respecto del segundo trimestre, esta mejora en la fragmentación puede ser aprovechado por la operación para el aumento de su producción.

4.6. PRUEBAS DE VALIDACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

Tabla 15. *Validación del modelo experimental*

	TPD	KW/H	P80	KG/T	\$/T
Mes 1	263	15.7	14.8	0.363	6.15
Segundo trimestre	245	16.6	17.5	0.335	6.57
Tercer trimestre	281	14.8	12.3	0.390	5.75
Mes 2	262	15.7	14.9	0.362	6.16
Segundo trimestre	242	16.6	17.5	0.336	6.56
Tercer trimestre	281	14.8	12.3	0.389	5.75
Mes 3	263	15.7	14.9	0.363	6.14
Segundo trimestre	244	16.6	17.6	0.338	6.55
Tercer trimestre	281	14.8	12.3	0.387	5.72
Total general	1,602	3,145.28	187,977.61	0.036	10.72
Variación Mes 1	14.64%	-10.46%	-29.81%	16.58%	-12.47%
Variación Mes 2	16.18%	-10.78%	-29.98%	15.72%	-12.42%
Variación Mes 3	15.21%	-10.77%	-29.88%	14.74%	-12.74%
Segundo Trimestre	244	16.6	17.5	0.336	6.56
Tercer Trimestre	281	14.8	12.3	0.389	5.74
Variación 2 vs 3 trime	15.35%	-10.67%	-29.90%	15.68%	-12.54%

Nota. Resultados de las pruebas de validación del modelo experimental.

La implementación de la estrategia Mine to Mill ha demostrado tener un impacto positivo y significativo sobre los principales indicadores operativos del chancado primario en una mina subterránea. Al comparar el segundo y tercer trimestre del año 2023, se evidencian mejoras sustanciales en la producción, fragmentación, eficiencia energética y costos de trituración.

4.6.1. Producción (TPD)

La producción promedio aumentó de 244 TPD en el segundo trimestre a 281 TPD en el tercer trimestre, con una mejora del 15.35%.

Este incremento constante en los tres meses posteriores a la implementación (variaciones mensuales de 14.64%, 16.18% y 15.21%) refleja la efectividad de la estrategia para mejorar el rendimiento del chancador primario.

4.6.2. Consumo Energético (KW/H)

Se observa una reducción del consumo energético por tonelada, pasando de 16.6 KW/H a 14.8 KW/H, representando una disminución del -10.67%.

Este descenso indica una mejor fragmentación del mineral, lo que requiere menos esfuerzo mecánico para su procesamiento, y por ende, menos energía.

4.6.3. Fragmentación (P80)

El valor de P80 se redujo de 17.5 pulgadas a 12.3 pulgadas, lo que representa una mejora del 29.90% en la fragmentación.

Esta variable es clave en la eficiencia del proceso, ya que una reducción del tamaño del fragmento facilita la conminución y reduce cuellos de botella operativos.

4.6.4. Factor de Potencia (KG/T)

El factor de potencia pasó de 0.336 KG/T a 0.389 KG/T, incrementándose en 15.68%, reflejando un mayor aprovechamiento de la energía explosiva.

Esta mejora se alinea con una fragmentación más eficiente, producto de ajustes en los parámetros de voladura durante el tercer trimestre.

4.6.5. Costo Unitario de Trituración (\$/T)

El costo unitario disminuyó de 6.56 USD/T a 5.74 USD/T, logrando una reducción del 12.54%.

Este ahorro económico por tonelada procesada implica un retorno directo sobre la inversión en optimización de voladura, favoreciendo la rentabilidad del proceso.

4.6.6. Conclusión Técnica

Los resultados reflejan una optimización integral del proceso de conminución primaria tras la implementación de Mine to Mill. Las mejoras son consistentes en los tres meses del tercer trimestre, confirmando que la estrategia permitió no solo incrementar la producción, sino también reducir el consumo energético y disminuir los costos operativos, todo ello sustentado por una mejor fragmentación del mineral.

4.7. DISCUSIONES

Los resultados obtenidos en la presente investigación demuestran que la implementación de la estrategia Mine to Mill generó mejoras sustanciales en la productividad, eficiencia energética y costos unitarios del chancado primario en una mina subterránea. Estos hallazgos coinciden con diversas investigaciones previas tanto a nivel nacional como internacional.

En primer lugar, la mejora del P80 en un 29.90% valida la premisa de que una adecuada fragmentación post-voladura es determinante para la eficiencia del chancado. Esta afirmación se respalda en el estudio de Fernández (2020), quien evidenció que el cambio de diámetro en perforación influyó positivamente en la fragmentación de la roca, reduciendo así el esfuerzo mecánico requerido en el procesamiento primario en la División Andina de Codelco. De manera similar, Berrospi (2019) documentó una mejora significativa en la eficiencia del

proceso al optimizar los parámetros de perforación y voladura en la mina Andaychagua, resaltando la importancia del diseño técnico como base de la productividad.

Respecto al incremento del 15.35% en la producción (TPD), los resultados concuerdan con lo expuesto por Pérez (2024), quien al aplicar el modelo matemático de Pearse en la unidad minera San Cristóbal reportó mejoras operativas en la tasa de alimentación a planta, resultado directo de una voladura más eficiente. La correlación positiva entre la mejora de la fragmentación y el aumento de tonelaje procesado es coherente con los fundamentos expuestos por Adel, Kojovic y Scott (2006), quienes señalaron que el enfoque Mine to Mill puede aumentar la capacidad de la planta sin necesidad de ampliaciones físicas, simplemente optimizando la secuencia mina-planta.

En cuanto al consumo energético, la reducción del 10.67% en el Work Index (KW/H) representa una mejora significativa en la eficiencia energética. Este resultado guarda estrecha relación con el planteamiento de Hustrulid y Kuchta (2006), quienes sostienen que la fragmentación inicial del mineral tiene un efecto directo sobre la energía requerida para conminución. De igual manera, los estudios de Valery et al. (2001) en operaciones australianas confirman que mejoras en la voladura pueden traducirse en ahorros energéticos superiores al 10%, lo cual coincide con los hallazgos de este estudio.

En relación con el factor de potencia (KG/T), el incremento del 15.68% indica una mejor conversión de la energía explosiva en fragmentación efectiva, validando las afirmaciones de Jimeno, Jimeno y Carcedo (1995), quienes destacan que una relación adecuada entre carga explosiva y tonelada fragmentada mejora directamente la eficiencia del proceso posterior de chancado.

Por último, la reducción del costo unitario de trituración en un 12.54% respalda lo planteado por Zúñiga (2023) en la Compañía Minera Cerro Negro, donde demostró que un diseño eficiente de tronadura tiene efectos tangibles en la economía del proceso mina-planta. El análisis costo-beneficio en la presente investigación muestra que la inversión en ajustes de

voladura generó ahorros económicos sostenibles, en línea con el modelo de análisis planteado por Wills y Finch (2016).

En resumen, los resultados de esta tesis no solo confirman los beneficios operativos del enfoque Mine to Mill, sino que también se alinean con la evidencia empírica previa desarrollada en diferentes contextos mineros, reafirmando la replicabilidad y aplicabilidad del modelo tanto en minas subterráneas como superficiales.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Granulometría en el chancado primario: Se concluye que la implementación de la estrategia Mine to Mill generó una mejora significativa en la granulometría del mineral alimentado al chancador primario. El valor del P80 se redujo de 0.69 a 0.48 pulgadas, lo que representa una disminución del 29.90%. Esta reducción permitió una mejor eficiencia en el proceso de trituración, al minimizar la cantidad de partículas sobredimensionadas y mejorar el rendimiento del equipo.

Pruebas experimentales del chancado primario: Las pruebas experimentales confirmaron que la capacidad de tratamiento del chancador primario mejoró notablemente tras la aplicación de la estrategia Mine to Mill. La producción, medida en toneladas por hora trituradora (T/H), pasó de 244 a 281 T/H, lo cual representa un incremento del 15.35%. Asimismo, el consumo energético por tonelada (Work Index - KW/H) disminuyó en 10.67%, evidenciando una mejora en la eficiencia energética del proceso.

Optimización del chancado primario: El proceso de chancado primario fue optimizado no solo en términos operativos, sino también económicos. Se logró un incremento del factor de potencia (KG/T) de 0.336 a 0.389, equivalente a una mejora del 15.68%, y una reducción del costo unitario de trituración (\$/T) de 6.56 a 5.74 USD, es decir, un ahorro del 12.54%. Estos resultados reflejan una mayor eficiencia del sistema global de conminución y un mejor aprovechamiento de la energía utilizada en voladura y chancado.

Pruebas de validación del modelo experimental: Las pruebas de validación confirmaron la eficacia del modelo experimental basado en la estrategia Mine to Mill. Las mejoras observadas en los indicadores operativos fueron sostenidas y consistentes, permitiendo demostrar que el modelo propuesto tiene un impacto positivo directo sobre la productividad y eficiencia del chancado primario. Los resultados obtenidos validan la aplicabilidad técnica del

modelo en condiciones subterráneas, y sugieren su potencial para ser replicado en otras unidades operativas.

5.2. RECOMENDACIONES

Granulometría en el chancado primario: Se recomienda mantener un control constante sobre los parámetros de perforación y voladura para asegurar una fragmentación óptima (P80 en pulgadas) que facilite el procesamiento en el chancador primario. Asimismo, se sugiere incorporar tecnologías de monitoreo granulométrico en línea (como Split Online) para realizar ajustes operativos en tiempo real y asegurar que el tamaño de partícula se mantenga dentro del rango eficiente para el chancado.

Pruebas experimentales del chancado primario: Es recomendable continuar con la implementación sistemática de pruebas experimentales, ajustando periódicamente los parámetros del proceso de chancado en función del tipo de material y la respuesta del sistema. Estas pruebas deben incluir el seguimiento de la producción en T/H y el Work Index (KW/H) para identificar oportunidades de mejora operativa. Además, se sugiere registrar estos datos en una base digital para facilitar el análisis y la trazabilidad.

Optimización del chancado primario: Se recomienda realizar auditorías técnicas regulares al sistema de chancado primario para asegurar que el factor de potencia (KG/T) se mantenga en niveles óptimos. Asimismo, debe buscarse la reducción progresiva del costo de trituración (\$/T) mediante la mejora continua del diseño de voladura y el uso eficiente de recursos energéticos. Es importante también capacitar al personal en el análisis integral del sistema Mine to Mill, fomentando decisiones coordinadas entre las áreas de perforación, voladura y chancado.

Pruebas de validación del modelo experimental: Se sugiere institucionalizar un proceso de validación continua del modelo experimental mediante ciclos de mejora continua (PDCA), donde los resultados obtenidos en campo se contrasten con las proyecciones del modelo. Además, se recomienda documentar las lecciones aprendidas y buenas prácticas para replicar el modelo en otras zonas de la mina o en diferentes operaciones subterráneas, evaluando previamente las condiciones geológicas y operativas específicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adel, T., Kojovic, T., & Scott, A. 2006. Mine-to-mill optimization: effect of feed size on mill throughput. JKTech Pty Ltd.
- Baldeón Quispe. 2011. Gestión en las Operaciones de Transporte y Acarreo para el Incremento de la Productividad en Cía. Minera Condestable S.A. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Bieniawski, Z. 1978. Determining Rock Mass Deformability: Experience from Case Histories. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.
- Bond, F. C. 1952. The third theory of comminution. Mining Engineering, 193, 484–494.
- Champi Guzman, M. 2015. Reducción de las demoras operativas y optimización de tiempos por abastecimiento de combustible con el sistema VR-300 GPM en los volquetes de mina - Unidad Operativa Cuajone. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Chura Valdivia, M. P. 2018. Reducción de demoras operativas por cambio de turno con la implementación de módulo de cambio de guardia en la unidad minera Cuajone. Moquegua.
- Cunningham, C. 1983. The Kuz-Ram Model for production of fragmentation from blasting. In Proc. 1st Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea.
- Cunningham, C. V. B. 1983. The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. In First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting.
- Garcés, D. A., & Castrillón, O. D. 2017. Diseño de una técnica inteligente para identificar y reducir los tiempos muertos en un sistema de producción. Información tecnológica, 28(3), 157-170.

- Garcés, Diego A., & Castrillón, Omar D. 2017. Diseño de una Técnica Inteligente para Identificar y Reducir los Tiempos Muertos en un Sistema de Producción. *Información tecnológica*, 28(3), 157-170. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000300017>
- Hernández Sampieri, R. 2014. *Metodología de la Investigación* (Sexta edición). McGraw-Hill.
- Hustrulid, W. A., & Kuchta, M. 2006. *Open Pit Mine Planning and Design*. CRC Press.
- Instituto Geológico y Minero de España. 1991. *Manual de arranque, carga y transporte en minería a cielo abierto*. España.
- ISO 14001. 2004. Norma internacional sobre gestión ambiental. Ginebra: Organización Internacional de Normalización.
- ISO 14001. 2004. Norma ISO 14001. Geneva, Suiza.
- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A. 1995. *Drilling and blasting of rocks*. Taylor & Francis.
- Julca, D. 2019. Optimización del ciclo de carguío y acarreo del tajo al PAD de lixiviación para evitar tiempos muertos y reducir costos en una empresa minera de la mediana minería. Cajamarca: (Tesis de licenciatura).
- Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo, Ley 29783. 2011. Congreso de la República del Perú. Lima: Diario Oficial El Peruano.
- Martí, P., Lin, C., Brandt, S. A., Velasco, M., Ayza, J., & Fuertes, J. 2006. Asignación dinámica de recursos en sistemas de control de tiempo real. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 50-60.
- Montoya Villalta, F. 2018. Optimización de procesos en la perforación mediante un estudio comparativo de brocas tricónicas en la unidad minera.

Nextech. 2020. ¿Qué es SAP ABAP? <https://nextech.pe/que-es-sap-abap-2/>

OHSAS 18001. 2007. Norma OHSAS 18001.

Paz Benavente, & Solano Romaní. 2018. Aumento de Producción en Mina Toquepala a través de la Automatización de la Asignación del Personal a sus respectivos equipos en el cambio de guardia y visualización de actividades del turno.

Paz Benavente, A. 2007. Propuesta de asignación automática de personal (AAP) en operaciones mina.

Paz Benavente, A., & Solano Romaní, W. 2019. Automatización de la asignación de personal en los equipos de mina y visualización de actividades para el cambio de turno. <http://www.mineriaonline.com.pe/tecnico-cientifico/automatizacion-de-la-asignacion-de-personal-en-los-equipos-de-mina-y-visualizacion-de-actividades-para-el-cambio-de-turno-en-to>

Porta Alarcón, J. A., & Arteaga Coronado, L. A. 2025. Aplicación de la mejora continua en la extracción minera de la U.E.A - S.M.R.L. Magistral de Huaraz S.A.C. - 2023 [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional San Luis Gonzaga]. Repositorio UNICA. <https://repositorio.unica.edu.pe/collections/04d8d9ce-abe9-405a-bb82-2a48049f52b6> (Revisión: 23 de abril de 2025)

Sáez Muñoz. 2014. Simulación On-Line para el Despacho de Camiones Mineros en Operaciones a Cielo Abierto. Santiago de Chile.

Softer. 2021. Minerales no metálicos: qué tipos les pertenecen. <https://2cad.ru/blog/minerals/nemetallicheskie-poleznye-iskopaemye-kakie-vidy-k-nim-otnosyatsya/>

Valery, W., Jankovic, A., & Morrell, S. 2001. Grinding circuit design principles. AusIMM Mill Operators' Conference.

Vargas Ticona, C. 2019. Optimización en las operaciones de carguío y transporte para el mejoramiento de la productividad. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.

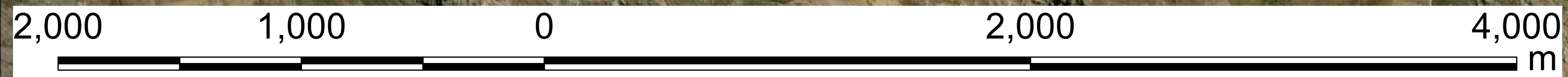
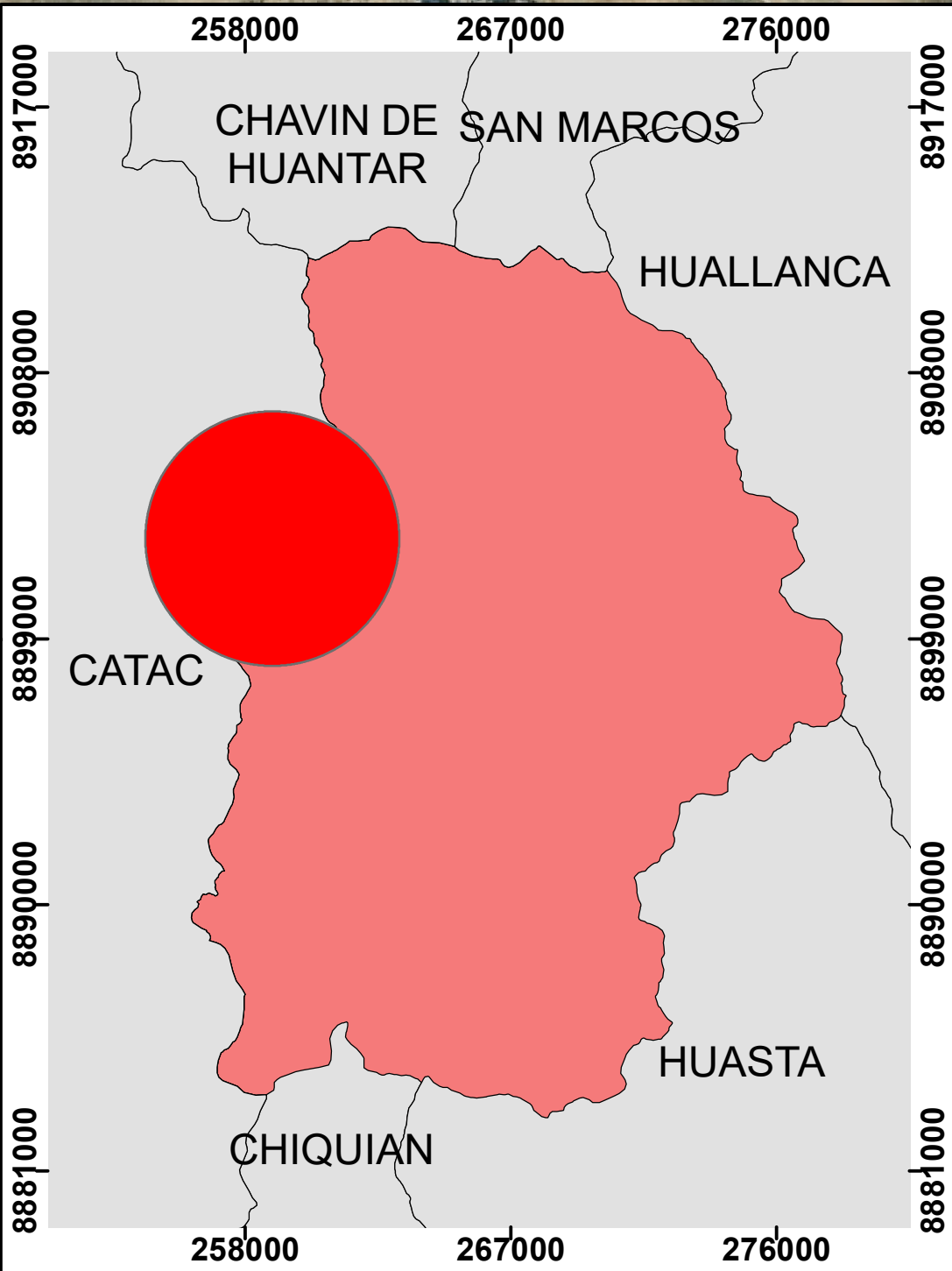
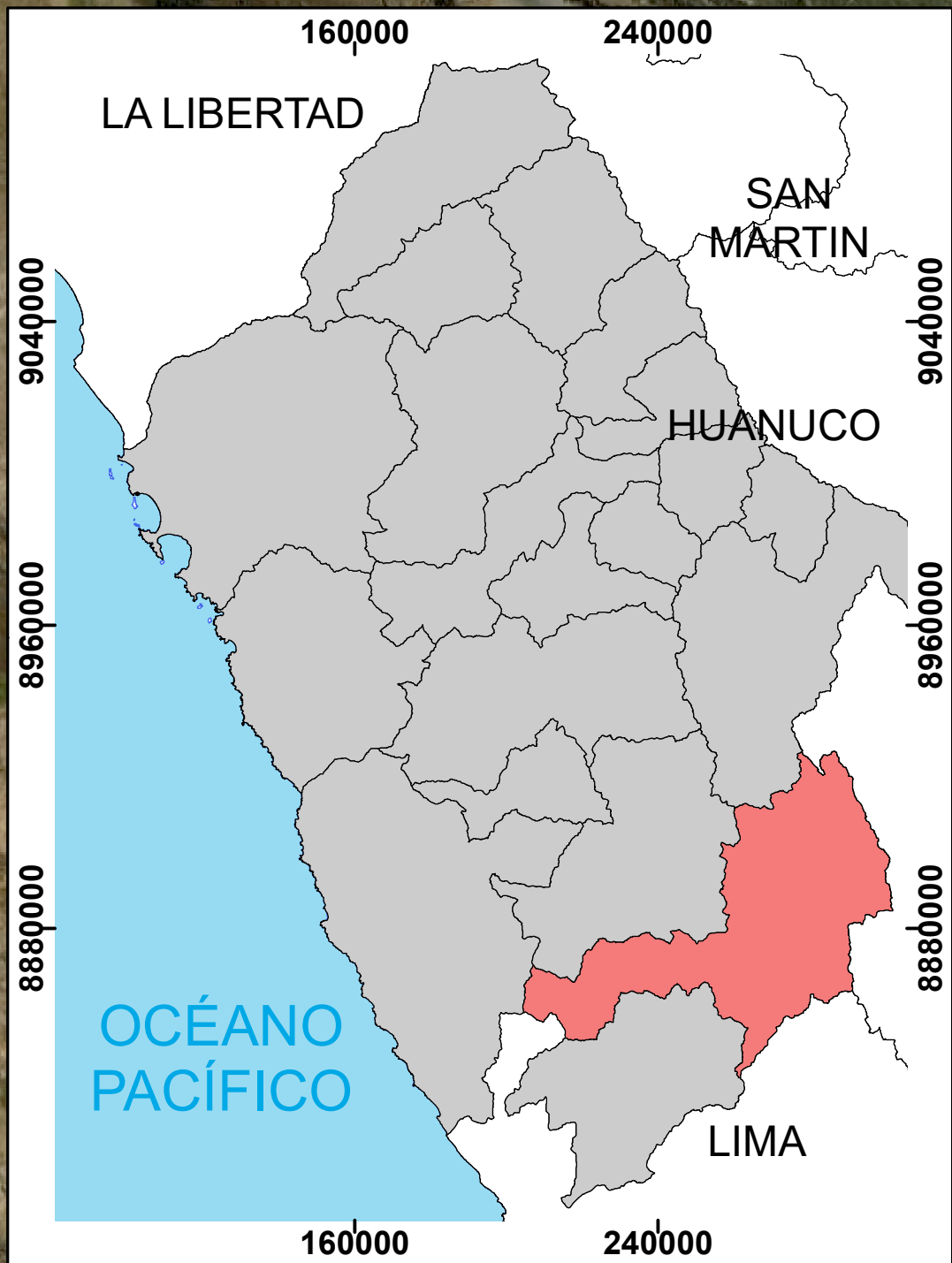
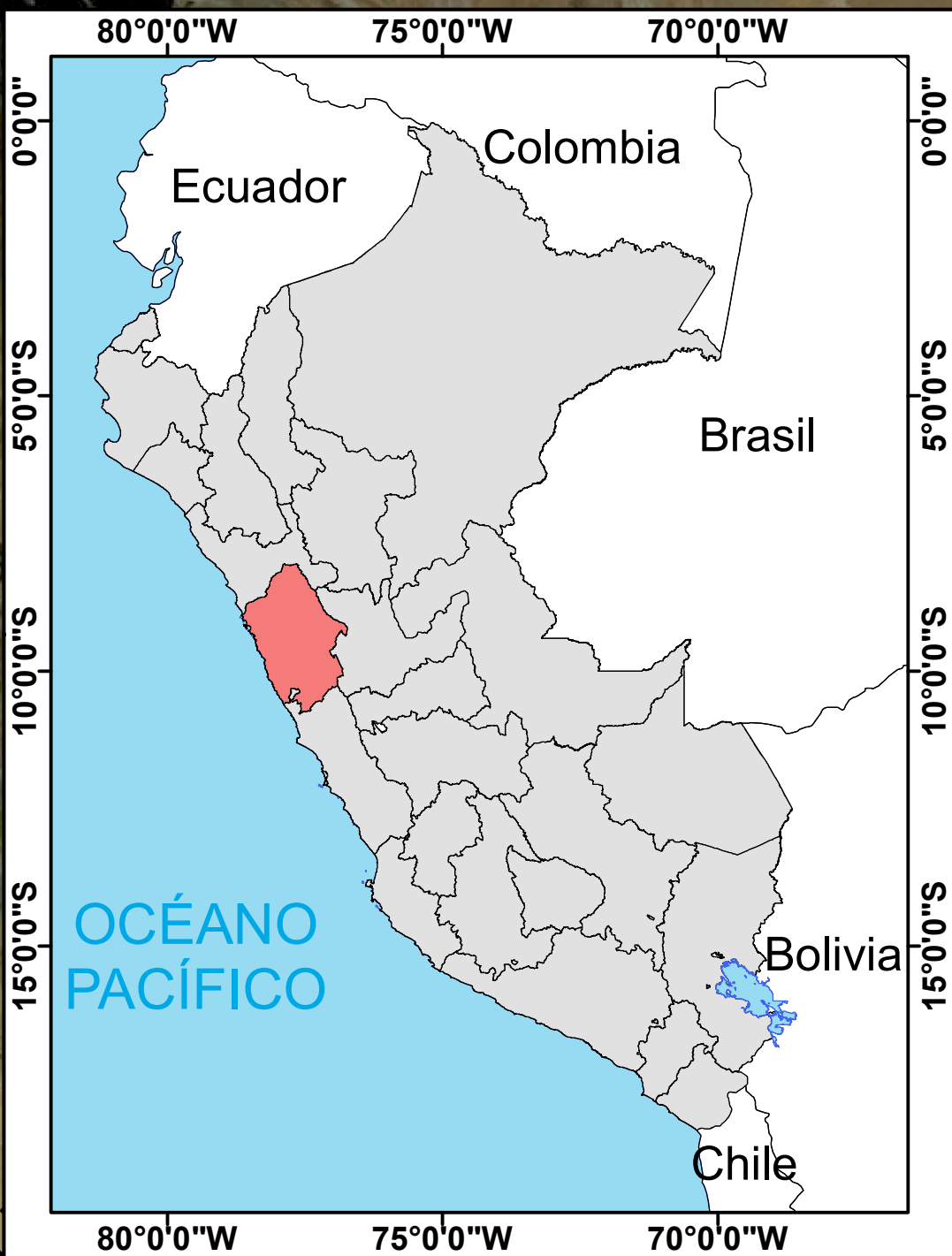
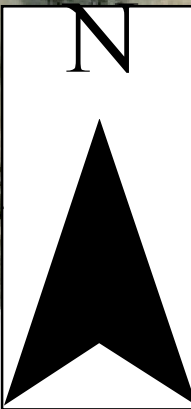
Vidal Loli. 2010. Estudio del Cálculo de Flota de Camiones para una Operación Minera a Cielo Abierto. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

ZUÑIGA, P. 2023. Diseño de Tronaduras y su Impacto en el Costo Mina de Compañía Minera Cerro Negro. Universidad de Chile, Santiago.

Zúñiga, P. 2023. Diseño de tronaduras y su impacto en el costo mina de Compañía Minera Cerro Negro [Tesis de licenciatura, Universidad de Chile].

254000 256000 258000 260000 262000 264000

PLANO DE UBICACION UNIDAD MINERA MAGISTRAL



254000 256000 258000 260000 262000 264000

8900000

8898000

8896000

8894000

8900000

8898000

8896000

8894000

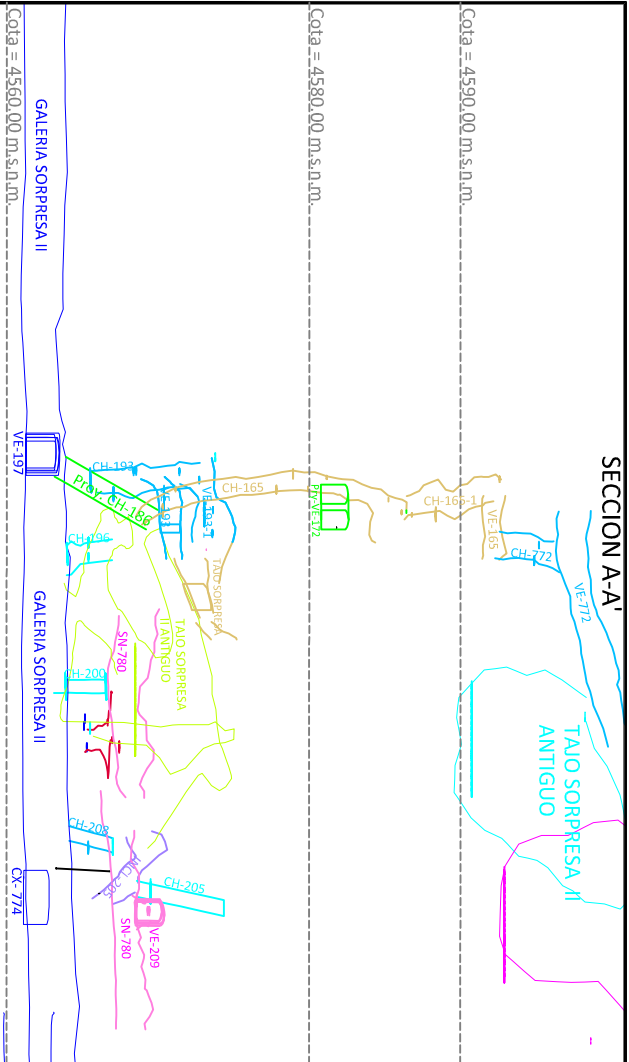


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS



TESIS: IMPLEMENTACIÓN DE MINE TO MILL PARA AUMENTAR LA PRODUCCIÓN EN CHANCADO PRIMARIO EN UNA MINA SUBTERRÁNEA		
PLANO:	PLANO DE UBICACIÓN	PLANO N°: 1
TESISTA:	Bach. Omar Cueva Limay	
ASESOR:	M. Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana	
ESCALA:	1/2000	
FECHA:		MARZO, 2025

SECCION A-A'



SECCION B-B'

