

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD POR LA IMPLEMENTACIÓN
DE DETONADORES ELECTRÓNICOS EN LA VOLADURA DE
MINERAL EN LA MINA MARCONA, 2025**

TESIS

Presentada por:

Bach. Brian Javier Catacora Ramos

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

TACNA - PERÚ

2026

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS-FAIN

Acta de sustentación para obtener el Título Profesional de: **Ingeniero de Minas**,
mediante la modalidad de **Tesis**,

cuyo título es: **“Optimización de la productividad por la implementación de detonadores electrónicos en la voladura de mineral en la mina Marcona, 2025”**

Nombre del Bachiller: **Brian Javier Catacora Ramos**

Código: **2015-101002**

En Tacna, siendo las **15:00 horas** del día **01 de diciembre del 2025** se hacen presentes los miembros del Jurado Calificador asignados mediante Resolución de Facultad N°9815-2025-FAIN/UNJBG

Presidente : Dr. Dante Ulises Morales Cabrera

Secretario : Dr. Carlos Huisa Ccori

Vocal : Dr. Julio Miguel Fernández Prado

Acto seguido, el Presidente del Jurado Calificador da inicio al acto de sustentación, solicitándole al Secretario la lectura de la **Resolución de Facultad N° 10146-2025-FAIN/UNJBG**, de fecha **27/11/2025**, para luego proceder a la sustentación de defensa del tema por un espacio de30..... minutos.

El presidente del Jurado dispone un cuarto intermedio para deliberar y emitir el dictamen final, llegando al siguiente acuerdo:

APROBADO(A) POR: UNANIMIDAD () , MAYORÍA (.....); CON CALIFICATIVO DE 15.....(NÚMERO)QUINCE..... (LETRAS) PUNTAJE VIGESIMAL.

DESAPROBADO(A) CON CALIFICATIVO DE(NÚMERO)(LETRAS) PUNTAJE VIGESIMAL.

NO SE PRESENTÓ (.....).

Siendo las16:30..... horas, el Jurado Calificador invita al sustentante para dar lectura al veredicto final, dando por finalizada el presente acto y en señal de conformidad, firman los miembros del Jurado.

.....
Dr. Dante Ulises Morales Cabrera
Presidente

.....
Dr. Carlos Huisa Ccori
Secretario

.....
Dr. Julio Miguel Fernández Prado
Vocal

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, _Carlos Huisa Ccori en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N°_9656-2025-FAIN/UNJBG de la tesis titulada:

“OPTIMIZACION DE LA PRODUCTIVIDAD POR LA IMPLEMENTACION DE DETONADORES ELECTRONICOS EN LA VOLADURA DE MINERAL EN LA MINA MARCONA, 2025” Presentado por el Bachiller Brian Javier Catacora Ramos (2015-101002), Para optar título profesional de Ingeniero de Minas.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del **software de similitud textual** __Turnitin __ cuenta con el **nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es __09__ %** Por lo que,

CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis enunciado líneas arriba, la cual está expedita para continuar con los trámites para la obtención de título profesional.

Tacna 29 de enero del 2026

FIRMA ASESOR

Dr. Carlos Huisa Ccori DNI. 00417032

ORCID 0000-0003-0605-5320



FIRMA TESISTA

Brian Javier Catacora Ramos, DNI. 70320361



DEDICATORIA

A mis padres, Miguel Catacora y Luz Ramos, que me guían desde el cielo, a mis hermanos Julio y Luis, quienes con su constante amor, confianza y apoyo hicieron posible que pueda enfrentar las adversidades de la vida.

AGRADECIMIENTO

Agradecer a Dios, por guiarme e iluminar mi mente hacia el éxito. A mis padres que desde el cielo guían mi camino, a mis hermanos por brindarme todo su apoyo y confianza a lo largo de los años, por motivarme a seguir creciendo personalmente y profesionalmente.

Extiendo mi sincero agradecimiento al Dr. Carlos Huisa Ccori, por su valiosa orientación y compromiso durante el desarrollo de esta investigación.

También agradezco a los docentes y compañeros de la Escuela de Ingeniería de Minas, por su acompañamiento académico y humano a lo largo de mi formación profesional.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	3
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Descripción y formulación del problema	4
1.2.1. <i>Problema general</i>	6
1.2.2. <i>Problemas específicos</i>	6
1.3. Objetivos.....	7
1.3.1. <i>Objetivo General</i>	7
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	7
1.4. Justificación e importancia de la investigación	7
1.5. Limitaciones y viabilidad.....	10
1.5.1. <i>Limitaciones</i>	10
1.5.2. <i>Viabilidad</i>	10
1.6. Hipótesis	11
1.6.1. <i>Hipótesis Principal</i>	11
1.6.2. <i>Hipótesis Específica</i>	11
1.7. Variables	12
1.7.1. <i>Definición conceptual y operacional de las variables</i>	12
1.7.2. Operacionalización de las variables.....	13

CAPÍTULO II	14
MARCO TEÓRICO	14
2.1 Antecedentes del trabajo de investigación	14
2.1.1. <i>Antecedentes nacionales</i>	14
2.1.2. <i>Antecedentes Internacionales</i>	17
2.2.1. <i>Fragmentación controlada del macizo rocoso</i>	19
2.2.2. <i>Precisión en el diseño de retardos electrónicos</i>	19
2.2.3. <i>Optimización del ciclo de minado</i>	20
2.2.4. <i>Seguridad operacional en voladuras electrónicas</i>	20
2.2.5. <i>Evaluación costo-beneficio en el uso de tecnología electrónica</i>	21
2.2.6. <i>Detonador Electrónico en Prueba: i-kon III de ORICA</i>	21
2.2.7. <i>Diseño de Voladura Aplicado en el Segundo Periodo</i>	23
2.2.8. <i>Descripción de la Unidad Minera Marcona</i>	25
2.2.9. <i>Detonador Convencional en Uso: Sistema No Eléctrico ORICA (Exel)</i>	26
2.2.10. <i>Ciclo de Minado en la Unidad Minera Marcona</i>	29
2.2.11. <i>Split-Online</i>	31
2.2.12. <i>Diseños de voladura con los sistemas de amarre con sus salidas</i>	33
2.3. Definiciones.....	43
a. Voladura:.....	43
b. Detonador electrónico.....	43
c. Fragmentación	43
d. Finos.....	43
e. Chancado primario	44
f. Granulometría.....	44
g. Macizo rocoso	44
h. Tiempo de retardo	44
i. Precisión del disparo.....	44
j. Sistema de iniciación	45
k. Secuencia de disparo	45
l. Explosivo	45

m. Malla de perforación	45
n. Burden	46
o. Espaciamiento.....	46
p. Sobre tamaño	46
q. TPH (Toneladas por hora)	46
r. Conminución	46
s. Optimización de voladura	47
t. Vibraciones inducidas por voladura.....	47
CAPÍTULO III	48
MARCO METODOLÓGICO	48
3.1. Tipo y nivel de la investigación	48
3.1.1. Método de la investigación	48
3.1.2. Tipo de la investigación	49
3.1.4. Nivel de la investigación	50
3.2. Población y muestra.....	50
3.2.1. Población.....	50
3.2.2. Muestra:.....	51
3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	52
3.3.1. Para la variable independiente:	52
3.3.2. Para la variable dependiente:	52
3.4. Técnicas para el procesamiento y análisis de datos	52
3.5. Procedimiento del Trabajo de Investigación	52
3.5.1. Recolección de datos operativos	53
3.5.2. Aplicación del modelo Kuz-Ram	54
3.5.3. Registro y análisis del desempeño de equipos	54
3.5.4. Procesamiento estadístico	54
3.5.5. Consolidación de resultados.....	55
3.5.6. Síntesis del Procedimiento	55
CAPÍTULO IV	56
RESULTADOS	56

4.1. Aplicación del Modelo de Kuz-Ram – Segundo Periodo	57
4.1.1. <i>Parámetros del segundo periodo (operaciones con detonadores electrónicos)</i>	57
4.1.2. <i>Discusión técnica</i>	59
4.2. Descripción de las pruebas experimentales	59
4.2.1. <i>Resultados del Primer Periodo – Sistema Convencional</i>	61
4.2.2. <i>Resultados del Segundo Periodo – Sistema con Detonadores Electrónicos</i>	63
4.2.4. <i>Producción en chancado (T/H)</i>	74
4.2.5. <i>Consumo de energía específica (KW-H/T)</i>	76
4.2.6. <i>Fragmentación del material – P80 (pulgadas)</i>	77
4.2.7. <i>Factor de Potencia (KG/T)</i>	79
4.2.8. <i>Costo de Voladura (USD/T)</i>	80
4.2.9. <i>Producción Total Promedio (T/H)</i>	82
4.2.10. <i>Consumo Específico de Energía – Total Promedio (KW-H/T)</i>	83
4.2.10.3. <i>Fragmentación Promedio – P80 (pulgadas)</i>	85
4.2.10.6. <i>Factor de Potencia Promedio – KG/T</i>	86
4.2.10.9. <i>Costo Promedio de Voladura – USD/T</i>	88
4.3. Contrastación de hipótesis	89
4.3.1. <i>Hipótesis general</i>	89
4.3.2. <i>Hipótesis específica 1:</i>	90
4.3.3. <i>Hipótesis específica 2:</i>	90
4.3.4. <i>Hipótesis específica 3:</i>	91
4.4. Análisis del Primer Periodo: Disparos con Detonadores Convencionales (ORICA Exel)	91
4.4.1. <i>Fragmentación Deficiente (P80 elevado)</i>	92
4.4.2. <i>Impacto en el Carguío</i>	92
4.4.3. <i>Rendimiento de Camiones</i>	92
4.4.4. <i>Voladura Secundaria y sus Consecuencias</i>	93
4.4.5. <i>Comentario</i>	93
4.5. Análisis del P80, Voladura Secundaria y Costo de Producción	93
4.5.1. <i>Fragmentación del Mineral – P80</i>	94

4.5.2. Interpretación técnica	94
4.5.3. Reducción de Voladura Secundaria	94
4.5.4. Comentario	95
4.5.5. Costo de Producción (USD/T)	95
4.5.6. Síntesis económica	95
4.5.7. Validación de la Hipótesis	96
4.6. Análisis del Impacto de los Detonadores Electrónicos ORICA en el Carguío y la Fragmentación	96
4.6.1. Fragmentación del Macizo Rocosó (P80)	96
4.6.2. Efecto directo	97
4.6.3. Rendimiento del Carguío	97
4.6.4. Efecto directo	97
4.6.5. Análisis	97
4.7. Cuadro Comparativo Final: Detonador Convencional vs. Detonador Electrónico ORICA	98
4.7.1. Conclusión Operativa de la Comparación	99
4.8. Resultado general	99
4.8.1. Producción en chancado (T/H)	101
4.8.2. Consumo específico de energía (KW-H/T)	101
4.8.3. Fragmentación del material (P80)	101
4.8.4. Factor de potencia (KG/T)	102
4.8.5. Costo de voladura (USD/T)	102
CAPÍTULO V	103
DISCUSIONES	103
5.1. Comparación con Lozano & Vargas (2021)	103
5.2. Comparación con Huerta (2020)	103
5.3. Comparación con Córdoba (2021)	104
5.4. Comparación con Flores (2022)	104
5.5. Comparación con Fuentealba (2021)	104
CAPÍTULO VI.CONCLUSIONES	107

CAPÍTULO VII.RECOMENDACIONES	109
CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
ANEXO. MATRIZ DE CONSISTENCIAS	115

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Operacionalización de las variables.....	13
Tabla 2. Detonadores electrónicos.....	22
Tabla 3. Ventajas del sistema electrónicos	22
Tabla 4. Características detonador convencional.....	27
Tabla 5. Comparaciones convencionales vs electrónicos.....	28
Tabla 6. Parámetros del primer periodo.....	60
Tabla 7. Parámetros del segundo periodo.....	63
Tabla 8. Parámetros abril 2024	67
Tabla 9. Parámetros mayo 2024	68
Tabla 10. Parámetros junio 2024	69
Tabla 11. Parámetros julio 2024	70
Tabla 12. Parámetros agosto 2024	71
Tabla 13. Parámetros septiembre 2024.....	72
Tabla 14. Convencional vs electrónico.....	98
Tabla 15. Validación del modelo experimental	100
Tabla 16. Discusiones	106
Tabla 17. Matriz de consistencia.	115

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Malla 6.80 x 5.80	33
Figura 2. Coordenadas de taladros 6.80 x 5.80	34
Figura 3. Malla 7.20 x 6.20	35
Figura 4. Fuente. Área de planeamiento	34
Figura 5. Coordenadas de taladros 7.20 x 6.20	35
Figura 6. Producción	74
Figura 7. Consumo de energía	75
Figura 8. Fragmentación	77
Figura 9. Factor de potencia.....	78
Figura 10. Costo de trituración	80
Figura 11. Producción por periodo	81
Figura 12. Consumo de energía por periodo	83
Figura 13. Fragmentación por periodo	84
Figura 14. Factor de potencia por periodo.....	86
Figura 15. Costo de voladura por periodo	87

RESUMEN

El presente estudio evaluó el impacto de la implementación de detonadores electrónicos en la voladura de mineral sobre la productividad operativa en una mina superficial durante el año 2024. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y un diseño cuasi-experimental, comparando dos periodos distintos: el primer periodo, utilizó una iniciación convencional, y el segundo periodo con aplicación de sistemas electrónicos. La muestra comprendió 180 voladuras ejecutadas en el nivel 550, distribuidas equitativamente en ambos periodos.

Se analizaron indicadores como producción en chancado (T/H), consumo energético (KW-H/T), fragmentación (P80), factor de potencia (KG/T) y costo de voladura (USD/T), se usó datos operativos reales, medidos mediante Split Online y tratados estadísticamente con el software SPSS v26. Los resultados evidenciaron mejoras significativas tras la implementación de la tecnología electrónica: incrementó del 15,86 % en la producción, reducción del 10,79 % en el consumo de energía, mejora del 29,73 % en la fragmentación, disminución del 12,50 % en el factor de potencia y ahorro del 10,95 % en el costo por tonelada volada.

Estos hallazgos validan la hipótesis principal del estudio, demostrando que los detonadores electrónicos constituyen una herramienta efectiva para optimizar la productividad minera, reduciendo costos y mejorando el rendimiento global del ciclo de minado en condiciones operativas reales.

Palabras clave: Voladura electrónica, fragmentación y productividad minera.

ABSTRACT

This study evaluated the impact of implementing electronic detonators in mineral blasting on operational productivity in a surface mine during 2024. The research followed a quantitative approach with a quasi-experimental design, comparing two distinct periods: the second quarter, during which conventional initiation systems were used, and the third quarter, which incorporated electronic systems. The sample consisted of 180 blasts conducted at level 550, equally distributed across both periods.

Key performance indicators were analyzed, including crushing throughput (T/H), energy consumption (KW-H/T), fragmentation size (P80), powder factor (KG/T), and blasting cost (USD/T). Data were collected using operational reports and fragmentation measurements from Split Online, and analyzed statistically using SPSS v26. The results revealed significant improvements following the implementation of electronic initiation: a 15.86% increase in throughput, a 10.79% reduction in energy consumption, a 29.73% decrease in P80 size, a 12.50% improvement in powder factor, and a 10.95% cost reduction per ton blasted.

These findings confirm the main hypothesis, showing that electronic detonators are an effective tool for optimizing mining productivity by reducing costs and enhancing performance across the drilling and blasting cycle under real operating conditions.

Keywords: Electronic blasting, fragmentation and mining productivity

INTRODUCCIÓN

La eficiencia en las operaciones de voladura constituye uno de los factores más determinantes en el rendimiento global de una operación minera a cielo abierto. El proceso de fragmentación del macizo rocoso no solo condiciona la facilidad de carguío y transporte del material, sino que incide directamente en el consumo energético, los costos de chancado y la estabilidad de la cadena productiva. Tradicionalmente, muchas unidades mineras han empleado sistemas de iniciación convencionales, como los detonadores no eléctricos, debido a su bajo costo y simplicidad operativa. No obstante, diversas investigaciones han demostrado que esta tecnología presenta limitaciones en el control de tiempos de retardo, lo cual puede generar una fragmentación deficiente, bloques excesivos y sobrecostos en etapas posteriores.

En los últimos años, la incorporación de detonadores electrónicos ha representado una innovación significativa en la ingeniería de voladura. Estos dispositivos permiten programar retardos con alta precisión, mejorando la sincronización de la detonación, el diseño de la secuencia de disparo y, por consiguiente, la eficiencia energética de la voladura. En países como Chile y Australia, su implementación ha mostrado resultados positivos, tanto en la calidad de la fragmentación como en la reducción del consumo energético y del uso de voladuras secundarias.

En el contexto peruano, algunas operaciones de gran escala han iniciado la transición hacia tecnologías de iniciación electrónica, con resultados favorables en términos de productividad y seguridad operativa. Sin embargo, en otras unidades, como en la mina superficial objeto de este estudio, dicha tecnología aún no ha sido implementada de manera sistemática, lo cual representa una oportunidad de mejora en el desempeño técnico y económico de las voladuras.

Esta investigación se desarrolló en una mina superficial ubicada en la región sur del Perú, con el objetivo de evaluar los efectos de la implementación de detonadores electrónicos sobre los principales indicadores de productividad minera. Para ello, se realizó una comparación entre las voladuras ejecutadas durante el primer periodo de 2024 con sistema convencional y aquellas del segundo periodo del mismo año, ya con la tecnología electrónica. Los resultados obtenidos permitirán sustentar técnica y económicamente la viabilidad de esta innovación como estrategia de optimización en las operaciones mineras a tajo abierto.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Antecedentes

La eficiencia en las operaciones de voladura es un factor clave en la productividad de las minas a tajo abierto. Tradicionalmente, el uso de detonadores no eléctricos ha sido predominante, debido a su bajo costo y simplicidad operativa. Sin embargo, diversos estudios han demostrado que esta tecnología presenta limitaciones en términos de precisión temporal, lo que puede afectar negativamente la fragmentación del material, la estabilidad de los taludes y el rendimiento de los equipos de carguío y transporte (Jiménez & Navarro, 2018).

En los últimos años, la minería ha venido adoptando tecnologías más avanzadas, como los detonadores electrónicos, los cuales permiten un control más preciso de los tiempos de retardo y una mayor flexibilidad en los diseños de voladura. Según investigaciones realizadas en minas de Chile y Australia, esta tecnología ha contribuido significativamente a la mejora de la fragmentación y la reducción del consumo energético en las etapas posteriores del proceso minero, como chancado y molienda (González et al., 2021; Scott et al., 2019).

Además, estudios realizados por empresas proveedoras de servicios de voladura han reportado incrementos en la productividad minera entre un 8 % y 15 % tras la implementación de sistemas de iniciación electrónica, principalmente por una mejor distribución del esfuerzo explosivo y una disminución en la generación de bloques (Orica, 2020).

En el contexto peruano, algunas operaciones como Las Bambas y Cerro Verde han comenzado a implementar estas tecnologías con resultados positivos. Se han reportado mejoras en los tiempos de ciclo, reducción de costos operativos y una menor incidencia de problemas de vibración, lo cual también contribuye al cumplimiento de normas ambientales y de seguridad (MINEM, 2022).

Estos antecedentes demuestran que el uso de detonadores electrónicos no solo impacta directamente en la eficiencia operativa, sino que también tiene implicancias económicas y ambientales. Por tanto, es pertinente investigar cómo esta tecnología puede optimizar la productividad en otras minas superficiales del país que aún operan con sistemas convencionales.

1.2. Descripción y formulación del problema

La unidad minera Marcona, operada por Shougang Hierro Perú, se dedica a la extracción de hierro mediante minería a tajo abierto. En este tipo de operación, la voladura representa una etapa fundamental del ciclo de minado, pues de su

eficiencia depende en gran parte la calidad de la fragmentación, la productividad del carguío y transporte, y los costos en procesos posteriores como chancado. Actualmente, Marcona continúa utilizando sistemas de iniciación convencionales, principalmente detonadores no eléctricos, los cuales presentan limitaciones en el control preciso de los retardos (Jiménez & Navarro, 2018).

Estas imprecisiones han generado en la operación problemas como fragmentación irregular, bloques sobredimensionados y tiempos de carguío elevados. Todo ello conlleva a un mayor desgaste de los equipos y un aumento en el consumo de combustible, lo que se traduce en una disminución de la eficiencia operativa y en mayores costos por tonelada movida (González et al., 2021). Además, el uso de sistemas tradicionales incrementa la probabilidad de generar vibraciones no controladas, afectando la estabilidad del banco y la seguridad del personal (Scott et al., 2019).

En contraste, los detonadores electrónicos permiten programar retardos con alta precisión, lo cual mejora la sincronización de la voladura, genera una fragmentación más uniforme y reduce la presencia de bloques. Estudios realizados en minas de características similares, han demostrado incrementos en la productividad minera entre 8 % y 15 % tras la adopción de esta tecnología (Orica, 2020; MINEM, 2022). Sin embargo, en Marcona, esta tecnología aún no se ha implementado de manera sistemática, limitando su capacidad de optimización.

Frente a esta situación, es necesario desarrollar un estudio técnico que evalúe el impacto de la implementación de detonadores electrónicos sobre la productividad de la operación en Marcona, utilizando indicadores reales de desempeño, con el fin de sustentar su aplicación como herramienta estratégica para la mejora continua.

1.2.1. Problema general

¿De qué manera la implementación de detonadores electrónicos en la voladura de mineral influye en la productividad de la unidad minera Marcona?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo afecta el sistema de iniciación convencional (no eléctrico) a la calidad de la fragmentación y a los tiempos del ciclo de carguío en la unidad minera Marcona?
- ¿Qué diferencias en eficiencia operativa se pueden evidenciar al comparar el desempeño de la voladura con detonadores electrónicos frente al sistema tradicional?
- ¿Cuál es el impacto de los detonadores electrónicos en los costos operativos asociados al carguío y a la reducción de voladuras secundarias en la operación minera?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el impacto de la implementación de detonadores electrónicos en la voladura de mineral para optimizar la productividad en la unidad minera Marcona.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar los efectos del sistema de iniciación convencional sobre la calidad de la fragmentación y los tiempos de ciclo de carguío en la unidad minera Marcona.
- Comparar el desempeño operativo de la voladura utilizando detonadores electrónicos frente al sistema convencional, con base en indicadores técnicos de productividad.
- Determinar el impacto de los detonadores electrónicos en la reducción de los costos operativos asociados al carguío y a la disminución de voladuras secundarias.

1.4. Justificación e importancia de la investigación

Justificación técnica

La implementación de detonadores electrónicos en operaciones de voladura representa un avance tecnológico significativo respecto a los sistemas de iniciación convencionales. Estos dispositivos permiten un control milisegundo de los tiempos de retardo, lo cual mejora notablemente la fragmentación del macizo rocoso (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995). En la Unidad Minera Marcona, caracterizada

por una geología compleja y altos volúmenes de producción, esta precisión técnica se traduce en una voladura más uniforme, con menor generación de sobre tamaños y mayor eficiencia en los procesos posteriores de carguío y chancado (Orica, 2020).

Justificación operacional

Desde una perspectiva operativa, los detonadores electrónicos permiten una planificación más exacta y repetible de los patrones de voladura, reduciendo la variabilidad de los resultados. Esta precisión contribuye a optimizar el ciclo total de minado, minimizando los tiempos muertos entre voladura y carguío (Chacón & Villafuerte, 2016). Además, en Marcona, donde la continuidad operacional es crítica para cumplir con los planes de producción, la mejora en la sincronización de eventos permite una mayor disponibilidad de los equipos de carguío y acarreo, traduciéndose en una operación más fluida y eficiente (Shougang Hierro Perú, 2024).

Justificación económica

Económicamente, aunque los detonadores electrónicos tienen un costo unitario superior al de los sistemas tradicionales, su uso genera importantes ahorros indirectos. La mejor fragmentación reduce el desgaste de palas y chancadoras, disminuye el consumo de combustible y optimiza los tiempos de ciclo (Sandvik, 2021). En el caso de Marcona, el análisis costo-beneficio demuestra que estos ahorros superan con creces la inversión inicial, consolidando a los detonadores

electrónicos como una alternativa rentable para mejorar la productividad global de la operación minera (Chacón & Villafuerte, 2016).

Justificación en seguridad

En términos de seguridad, los detonadores electrónicos ofrecen ventajas sustanciales al permitir la programación remota y precisa de la voladura, disminuyendo la exposición del personal a zonas de riesgo (ISEE, 2011). Asimismo, la baja tasa de fallas y la posibilidad de realizar verificaciones electrónicas antes del disparo aumentan significativamente la confiabilidad del proceso (Dowding, 2000). En Marcona, donde la seguridad del personal es una prioridad institucional, esta tecnología contribuye directamente a reducir incidentes relacionados con fallos de iniciación y mala sincronización (Shougang Hierro Perú, 2024).

Justificación integral del proyecto

La decisión de implementar detonadores electrónicos en la voladura de mineral en Marcona se justifica plenamente al considerar la suma de beneficios técnicos, operacionales, económicos y de seguridad. La mejora en la fragmentación impacta directamente en la eficiencia de toda la cadena productiva, mientras que la reducción de riesgos operacionales fortalece la cultura de seguridad de la empresa. En conjunto, esta estrategia se alinea con los objetivos de sostenibilidad y productividad de la unidad minera, constituyéndose en una solución integral para

enfrentar los desafíos actuales de la minería a cielo abierto (Orica, 2020; Sandvik, 2021).

1.5. Limitaciones y viabilidad

1.5.1. Limitaciones

Esta investigación utilizará información operativa real proveniente de la Unidad Minera Marcona, ubicada en la región de Ica. Sin embargo, por razones de confidencialidad institucional, no se hará mención directa del nombre de la mina a lo largo del desarrollo del estudio, refiriéndose únicamente como una "mina superficial". Asimismo, los datos técnicos que se utilizarán no serán publicados en detalle, respetando los acuerdos de confidencialidad con la empresa operadora. Esta restricción limita parcialmente la transparencia externa de la información, aunque no compromete la validez de los análisis ni la aplicabilidad de los resultados en contextos mineros comparables.

1.5.2. Viabilidad

La investigación es viable técnica, académica e institucionalmente, ya que se cuenta con acceso a datos reales de la Unidad Minera Marcona, respetando los acuerdos de confidencialidad mediante la referencia genérica a una mina superficial. Se dispone del conocimiento especializado y herramientas como Split Desktop para evaluar la fragmentación del material, además del respaldo académico de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Los resultados beneficiarán

directamente a ingenieros de minas, supervisores, empresas proveedoras de servicios de voladura y al ámbito académico, al aportar evidencia aplicada sobre el impacto de los detonadores electrónicos en la productividad minera.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis Principal

La implementación de detonadores electrónicos en la voladura de mineral mejora significativamente la productividad en la unidad minera Marcona.

1.6.2. Hipótesis Específica

- El uso del sistema de iniciación convencional (no eléctrico) afecta negativamente la calidad de la fragmentación y prolonga los tiempos de ciclo de carguío en la unidad minera Marcona.
- La voladura con detonadores electrónicos presenta un mejor desempeño operativo en comparación con el sistema convencional, reflejado en indicadores de productividad minera.
- La aplicación de detonadores electrónicos reduce los costos operativos relacionados al carguío y disminuye la necesidad de realizar voladuras secundarias.

1.7. Variables

1.7.1. Definición conceptual y operacional de las variables

1.7.1.1. Variable independiente:

VI: Implementación de detonadores electrónicos en la voladura.

Esta variable se refiere a la incorporación de sistemas de iniciación electrónica en el proceso de voladura, caracterizados por una mayor precisión en los tiempos de retardo, mayor control sobre la secuencia de detonación y flexibilidad en el diseño del disparo. Su propósito es optimizar la energía liberada y mejorar la fragmentación del material (Scott et al., 2019; Orica, 2020).

1.7.1.2. Variable dependiente:

VD: Productividad en la unidad minera Marcona.

Esta variable se relaciona con el rendimiento operativo medido en función de indicadores como el tiempo de ciclo de carguío, calidad de fragmentación, cantidad de material extraído por unidad de tiempo y reducción de voladuras secundarias. Se evalúa cómo estos indicadores se ven afectados por la tecnología aplicada en la voladura (González et al., 2021; MINEM, 2022).

1.7.2. Operacionalización de las variables

Tabla 1.

Operacionalización de las variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicador	Medición	Unidad
VI: Implementación de detonadores electrónicos	Tecnología de iniciación de voladuras que permite programar retardos con alta precisión, mejorando la sincronización del disparo y la eficiencia de la fragmentación (Scott et al., 2019; Orica, 2020).	Aplicación de un sistema de iniciación electrónica en las voladuras realizadas en la mina superficial, comparado con el sistema convencional.	Tipo de sistema de iniciación utilizado	Comparación entre voladuras con detonadores electrónicos y convencionales	Catagórica (electrónico / convencional)
			Precisión en los tiempos de retardo	Tiempo de desfase real programado frente al ejecutado	Milisegundos (ms)
			Control en el diseño de voladura	Cantidad de secuencias de disparo programadas según diseño técnico	Número de secuencias
			Costo por voladura	Costo total de la operación de voladura por banco	USD/t
VD: Productividad minera	Rendimiento operativo del ciclo de minado, evaluado por fragmentación, velocidad de carguío y disminución de voladura secundaria (González et al., 2021; MINEM, 2022).	Desempeño medido a través de indicadores técnicos operacionales, obtenidos mediante registros reales de producción y control.	Calidad de la fragmentación	Tamaño promedio de partículas post-voladura	Pulgadas (pulg)
			Tiempo de ciclo de carguío y acarreo	Promedio del tiempo por ciclo desde el frente de carga hasta la chancadora	Minutos (min)
			Frecuencia de voladura secundaria	Número de eventos de voladura secundaria por mes	Eventos/mes
			Costo unitario de minado	Costo total por tonelada de material cargado y transportado	USD/t

Nota: Tabla de operacionalización de variables

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del trabajo de investigación

2.1.1. Antecedentes nacionales

Según Lozano Quiliche, C., & Vargas Cholán, W. M. (2021) en su estudio titulado "Evaluación del Sistema de Iniciación Pirotécnica y Electrónica en el Banco 3240 para la Optimización de Costos por Voladura en una Empresa Minera a Tajo Abierto en Cajamarca, 2021" fue elaborado por Carlos Lozano Quiliche y Wilson Marín Vargas Cholán en el año 2021 en una universidad ubicada en Cajamarca. Su objetivo fue comparar los sistemas de iniciación pirotécnica y electrónica para determinar cuál ofrece mejores resultados en la optimización de costos por voladura en el banco 3240 de una mina a cielo abierto en la región. La metodología consistió en un análisis comparativo mediante la evaluación de voladuras en campo utilizando ambos tipos de iniciación, implementando un diseño cuasi-experimental que permitió medir los costos y la eficiencia de la fragmentación obtenida en cada caso. La muestra estuvo conformada por las operaciones de voladura en el banco 3240, donde se realizaron pruebas con ambos sistemas de iniciación. En resumen, los resultados muestran que el sistema de iniciación electrónica permite una mayor precisión en los tiempos de detonación, lo que se

traduce en una fragmentación más uniforme y en una reducción significativa de los costos operativos en comparación con el sistema pirotécnico.

Según Huerta, J. (2020), en su tesis titulada "Análisis comparativo de la eficiencia de la triple iniciación electrónica en voladura versus la iniciación electrónica simple y doble en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto", Universidad Continental, en Huancayo, Perú. El objetivo fue evaluar y comparar la eficiencia de la triple iniciación electrónica en voladuras frente a los sistemas de iniciación simple y doble, en términos de fragmentación, vibraciones y eficiencia operativa en un yacimiento cuprífero a cielo abierto. La metodología incluyó un estudio experimental con voladuras realizadas bajo los tres sistemas, analizando parámetros como la granulometría del material, desplazamiento y vibraciones generadas. El diseño consistió en pruebas controladas en diversas áreas del yacimiento, con una muestra representativa de voladuras. El resumen destacó que la triple iniciación electrónica permitió una mejor fragmentación del material y un mayor control de las vibraciones, en comparación con las iniciaciones simple y doble. Las conclusiones indicaron que la triple iniciación resultó ser más eficiente, reduciendo los costos operativos y mejorando la seguridad en el proceso de voladura.

Según Córdova, J. (2021), en su tesis titulada "Efectividad de la iniciación electrónica en zona de interacción con equipos autónomos empleando el sistema

Daveytronic Evolution Pack 48, mina Quellaveco - Moquegua", fue desarrollado en la Universidad Nacional de Moquegua. El objetivo de la investigación fue evaluar la eficiencia del sistema de detonación electrónica en áreas donde operan equipos autónomos en la mina Quellaveco, con la finalidad de mejorar la seguridad y optimizar los procesos de voladura. La metodología empleada consistió en un enfoque cuantitativo con un diseño experimental, donde se realizaron mediciones de parámetros clave de voladuras controladas utilizando el sistema Daveytronic. La muestra incluyó varias zonas de trabajo dentro de la mina, analizando variables como la precisión en la sincronización de los tiempos de detonación y su impacto en la seguridad y eficiencia de los equipos autónomos. En el resumen, se destaca que la aplicación de esta tecnología permitió reducir significativamente las vibraciones no deseadas y mejorar la seguridad operativa en entornos de interacción con equipos autónomos. Las conclusiones señalan que el uso del sistema Daveytronic Evolution Pack 48 no solo optimizó los resultados en las voladuras, sino que también mejoró la integración de las operaciones autónomas, promoviendo un entorno más seguro y eficiente.

Según Flores, D. F. (2022), en su tesis "Optimización de la fragmentación resultante para el mineral relacionado a la exactitud y precisión del iniciador electrónico con las propiedades geomecánicas en mina Cuajone", fue desarrollado en la Universidad Nacional de Moquegua. El estudio tuvo como objetivo principal mejorar la fragmentación del mineral, correlacionando la precisión de los

iniciadores electrónicos con las características geomecánicas de las rocas en la mina Cuajone. La metodología siguió un enfoque cuantitativo, aplicando un diseño experimental en el que se utilizaron diferentes configuraciones de iniciadores electrónicos para evaluar su efecto en la fragmentación. La muestra incluyó áreas con distintas propiedades geomecánicas dentro de la mina, analizando cómo la variabilidad de las condiciones del terreno influía en la precisión del sistema de iniciación. En el resumen, se destaca que los resultados mostraron una mejora significativa en la uniformidad de la fragmentación al utilizar iniciadores electrónicos, lo que facilitó un proceso más eficiente de chancado y reducción de costos operativos. Las conclusiones subrayan que la optimización de la fragmentación mediante el uso de iniciadores electrónicos permitió una mejor adaptación a las propiedades geomecánicas, aumentando la productividad y reduciendo costos en la operación minera.

2.1.2. Antecedentes Internacionales

Según Fuentealba Carvajal, B. A. (2021), en su tesis "Optimización en voladuras con detonadores electrónicos para mejorar la fragmentación en Minera Gabriela Mistral, Codelco Chile", fue realizado en 2021 en la Universidad de Antofagasta, sede Calama. El objetivo de la investigación fue optimizar la fragmentación del material mediante el uso de detonadores electrónicos, buscando mejorar los procesos de voladura en la Minera Gabriela Mistral de Codelco. La

metodología empleó un enfoque cuantitativo con un diseño experimental, donde se evaluó el desempeño de las voladuras controladas con detonadores electrónicos en diversas áreas de la mina. La muestra incluyó varios frentes de trabajo en los que se analizaron parámetros clave, como el tamaño de la fragmentación resultante y la precisión de los tiempos de detonación. En el resumen, se menciona que el uso de detonadores electrónicos permitió obtener una fragmentación más uniforme, lo que facilitó un procesamiento más eficiente del material en la planta. Las conclusiones del trabajo indicaron que la implementación de esta tecnología contribuyó a mejorar la productividad general de la mina al reducir el tamaño de las partículas y optimizar los costos de procesamiento.

Según Dimas Zúñiga Torres, P. (2024), en su tesis "Diseño de Tronaduras y su Impacto en el Costo Mina de Compañía Minera Cerro Negro" fue realizada por Pablo Dimas Zúñiga Torres en 2024 en la Universidad de Chile, ubicada en Santiago. El objetivo del estudio fue evaluar cómo el diseño de tronaduras influye en los costos operativos de la mina en la Compañía Minera Cerro Negro. La metodología utilizada fue cuantitativa, aplicando un diseño descriptivo-experimental que incluyó el análisis de datos de tronaduras previas y su relación con los costos asociados. La muestra abarcó varias voladuras realizadas en un periodo determinado. Los resultados indicaron que un diseño adecuado de tronaduras puede reducir significativamente los costos de extracción y mejorar la eficiencia operativa. Las conclusiones enfatizan la necesidad de implementar

prácticas de diseño de tronaduras más efectivas para optimizar los costos en la minería.

2.2. Bases teóricas sobre el trabajo de investigación

2.2.1. Fragmentación controlada del macizo rocoso

La eficiencia de una operación minera a cielo abierto está fuertemente influenciada por la calidad de la fragmentación obtenida en la voladura. Una buena fragmentación reduce el consumo de energía en el chancado, mejora la eficiencia del carguío y transporte, y disminuye el desgaste de los equipos. La teoría de la fragmentación controlada sostiene que la energía explosiva, bien distribuida y sincronizada, puede generar bloques de tamaño óptimo para las siguientes etapas del proceso minero (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

2.2.2. Precisión en el diseño de retardos electrónicos

Los detonadores electrónicos permiten la programación precisa de tiempos de retardo con incrementos de milisegundos, lo que contribuye a un mejor control del frente de voladura y a la reducción de efectos secundarios como sobre tamaños, vibraciones y proyecciones. Esta precisión se traduce en una mejora directa de la eficiencia operativa y en la calidad de la fragmentación del macizo rocoso. De acuerdo con el *Blasters' Handbook* de la International Society of Explosives

Engineers (2011), los sistemas electrónicos superan ampliamente a los sistemas pirotécnicos en cuanto a exactitud, confiabilidad y control del diseño de voladuras.

2.2.3. Optimización del ciclo de minado

La fragmentación uniforme obtenida con detonadores electrónicos permite optimizar todo el ciclo de minado, desde la voladura hasta el chancado. Estudios han demostrado que una voladura bien diseñada reduce significativamente el tiempo de carguío, disminuye el consumo de combustible y prolonga la vida útil de los equipos. Según Chacón y Villafuerte (2016), el uso de iniciadores electrónicos contribuye a mejorar la eficiencia operativa al generar fragmentos más manejables, lo que permite mantener una operación más continua y productiva en minas a tajo abierto.

2.2.4. Seguridad operacional en voladuras electrónicas

La implementación de detonadores electrónicos no solo mejora el control técnico de la voladura, sino también la seguridad en la operación minera. Estos dispositivos permiten realizar pruebas de continuidad y sincronización antes del disparo, reduciendo el riesgo de fallos y permitiendo la evacuación segura del personal antes de la detonación. Como señala Dowding (2000), la tecnología electrónica en voladuras permite minimizar la exposición del personal a zonas de

riesgo y controlar mejor los efectos colaterales de la explosión, como las vibraciones y proyecciones.

2.2.5. Evaluación costo-beneficio en el uso de tecnología electrónica

Aunque los detonadores electrónicos tienen un costo inicial más elevado en comparación con los sistemas pirotécnicos, su uso representa una inversión rentable al considerar los beneficios operacionales que generan. Estos incluyen una mejor fragmentación, menores costos de procesamiento, mayor seguridad y una reducción en los costos indirectos como mantenimiento y consumo energético. Según Sandvik Mining and Rock Solutions (2021), la implementación de esta tecnología puede generar ahorros sustanciales en el mediano y largo plazo, justificando plenamente su aplicación en operaciones mineras de gran escala.

2.2.6. Detonador Electrónico en Prueba: i-kon III de ORICA

El sistema de iniciación electrónica empleado en esta investigación fue el detonador electrónico i-kon™ III, fabricado por ORICA. Este detonador está diseñado para aplicaciones en minería a cielo abierto de alta producción y precisión, como las desarrolladas en la Unidad Minera Marcona.

2.2.6.1. Características Técnicas Principales

Tabla 2.

Detonadores electrónicos

Parámetro	Detonador Electrónico i-kon III (ORICA)
Tipo de sistema	Electrónico digital, con retardo programable
Rango de retardo	0 a 20,000 ms
Incremento de retardo	En pasos de 1 ms
Precisión temporal	±0.1 % del tiempo programado
Verificación de circuito	Sí, doble chequeo de continuidad y energía
Capacidad de memoria	Almacena programación, número de canal y testeo
Resistencia a interferencias	Alta inmunidad a descargas electromagnéticas
Compatibilidad	SHOTPlus™ – interfaz gráfica de diseño

Nota: Elaboración propia

2.2.6.2. Ventajas en comparación con detonadores convencionales (pirotécnicos)

Tabla 3.

Ventajas del sistema electrónicos

Característica	Convencional	Electrónico (ORICA i-kon III)
Tipo de retardo	Tubo de choque con retardo fijo (±10 %)	Digital, programable (±0.1 %)
Precisión en la detonación	Baja	Alta precisión milisegundo a milisegundo
Secuencia de disparo	Limitada y preestablecida	Totalmente configurable
Diagnóstico previo al disparo	No disponible	Sí, detección de fallas en campo
Seguridad ante interferencias	Media	Alta (autoverificable y aislada)
Control de fragmentación	Limitado	Óptimo (mejor distribución de energía)

Nota: Elaboración propia

2.2.6.3. Impacto técnico en la operación minera

- Permite personalizar secuencias de disparo según la geología local.
- Mejora la sincronización entre taladros, reduciendo interferencia de ondas y maximizando el aprovechamiento de la energía explosiva.
- Garantiza un desempeño repetible, incluso en condiciones operativas exigentes.
- Reduce significativamente la formación de bolones y sobre tamaños, mejorando la eficiencia del carguío y el chancado.

2.2.7. Diseño de Voladura Aplicado en el Segundo Periodo

2.2.7.1. Parámetros Geométricos del Banco

- Altura del banco: 15 metros
- Diámetro de taladro: 12 ¼ pulgadas (311 mm)
- Burden (B): 4.5 m
- Espaciamiento (E): 5.5 m
- Angulo de taladro: Vertical (90°)
- Subdrilling: 1.5 m

2.2.7.2. Tipo de Explosivo y Carga

- Explosivo principal: Emulsión encartuchada tipo Heavy Anfo / bulk emulsión (ORICA)
- Carga de columna: Aproximadamente 370 kg por taladro

- Carga de fondo (primeros metros): Emulsión bombeable con booster #400 g
- Taco (stemming): Material inerte (grava ¾”) de 5 metros promedio

2.2.7.3. Factor de Potencia

- Carga específica promedio: 0.418 kg/t (obtenida en campo y validada por la producción)

2.2.7.4. Tipo de Amarre

- Amarre electrónico milisegundo:
 - Configurado con detonadores electrónicos ORICA i-kon III
 - Secuencia en abanico o abanico centrado desde el punto medio del diseño, disparando desde el centro hacia los flancos.
 - Retardos programados con precisión de ± 1 ms, entre 25 ms (interhilo) y 65 ms (interfila) según necesidad geotécnica.
- Disposición de taladros: malla cuadrada tipo “V invertida” o de doble línea para mejor desplazamiento lateral y ruptura progresiva.
- Objetivos del diseño aplicado
 - Lograr una fragmentación homogénea, evitando sobre tamaños y reduciendo la necesidad de voladura secundaria.
 - Maximizar el rendimiento del carguío, con frentes más estables y libre de obstáculos.

- Optimizar el aprovechamiento del explosivo mediante sincronización fina de retardos y distribución estratégica de la carga.

Este diseño fue validado en campo durante más de 60 voladuras controladas y analizado con el software Split Online para medir la efectividad de la fragmentación generada (P80).

2.2.8. Descripción de la Unidad Minera Marcona

La Unidad Minera Marcona está ubicada en la región de Ica, provincia de Nasca, al suroeste del Perú. Es operada por la empresa Shougang Hierro Perú S.A.A., siendo una de las minas más importantes del país dedicada a la extracción de mineral de hierro a través de método de explotación a cielo abierto.

2.2.8.1. Localización y Accesibilidad

- Región: Ica
- Coordenadas aproximadas: 14°28'S, 75°43'W
- Altitud: 10 – 300 m s. n. m.
- Clima: Costero seco, con baja precipitación anual (<10 mm)

2.2.8.2. Geología y Tipo de Roca

- Tipo de depósito: Skarn ferrífero, asociado a intrusivos mesozoicos.
- Mineral principal: Hematita y magnetita, con ganga silicatada y calcárea.
- Litología predominante: Rocas ígneas intrusivas (diorita, granodiorita) con intercalaciones de rocas metamorfozadas (calizas, esquistos).

- RMR promedio: 60 a 65 (roca de competencia media-alta)
- Dureza: Alta abrasividad; clase 5 según escala de dureza de abrasión.

2.2.8.3. Características Operativas

- Tipo de mina: Superficial (a tajo abierto)
- Banco de operación estándar: 15 metros
- Taladros: Verticales, con perforación de gran diámetro (12 ¼")
- Frente evaluado: Nivel 550 – zona productiva con geomecánica homogénea y buena estabilidad estructural
- Producción diaria estimada: ~110,000 toneladas/día
- Equipos: Palas eléctricas, camiones de 240 toneladas, perforadoras de alto diámetro, chancadoras primarias

2.2.8.4. Importancia para el estudio

Esta mina fue seleccionada para el presente estudio por ser una operación de gran escala con condiciones reproducibles y homogéneas en términos geomecánicos, lo que permitió comparar el impacto del sistema de iniciación electrónica con precisión. Las pruebas se realizaron en condiciones controladas, utilizando registros reales del año 2024, y garantizando la confidencialidad de los resultados internos de la empresa.

2.2.9. Detonador Convencional en Uso: Sistema No Eléctrico ORICA (Exel)

Durante el primer periodo de estudio, se empleó un sistema de iniciación convencional de tipo no eléctrico de la marca ORICA, conocido comercialmente

como ORICA Exel, ampliamente utilizado en minería superficial por su bajo costo y facilidad de uso en campo.

2.2.9.1. Tipo de Sistema

- Nombre comercial: ORICA Exel No Eléctrico
- Tipo de iniciación: Tubo de choque con cápsula pirotécnica retardada
- Medio de transmisión: Tubo plástico de polietileno con capa interior reactiva (shock tube)

2.2.9.2. Características Técnicas

Tabla 4.

Características detonador convencional

Parámetro	Valor estimado
Rango de retardo	17 ms a 500 ms (según modelo)
Incremento de retardo	Fijo (preestablecido en fábrica)
Precisión del retardo	±10 % (dependiente de temperatura y presión)
Diámetro externo del tubo	~3 mm
Longitud de tubos	Desde 3 hasta 30 metros
Seguridad operativa	Resistente a la corriente estática y campos electromagnéticos

Nota: Elaboración propia

2.3.9.2. Funcionamiento

- El sistema opera mediante la propagación de una onda de choque a través del tubo, que acciona una cápsula detonante con retardo pirotécnico.

- La secuencia de disparo se configura mediante colocación manual de retardos preestablecidos, lo que limita la capacidad de personalización.

2.2.9.3. Limitaciones Técnicas

- Precisión limitada en la sincronización, lo que provoca interferencia de ondas y rupturas irregulares.
- El control del patrón de fragmentación es bajo, generando frecuentemente sobre tamaños y necesidad de voladuras secundarias.
- Riesgo de sobreposición de ondas y corte prematuro de taladros, afectando la eficiencia del disparo.

2.2.9.4. Comparación con Detonador Electrónico

Tabla 5.

Comparaciones convencionales vs electrónicos

Característica	ORICA Exel Convencional	ORICA i-kon III Electrónico
Tipo de retardo	Pirotécnico fijo	Programable digital (1 ms)
Precisión	Baja ($\pm 10\%$)	Alta ($\pm 0.1\%$)
Flexibilidad de diseño	Limitada	Totalmente configurable
Control de fragmentación	Bajo	Alto
Interferencia entre ondas	Alta	Nula
Seguridad y diagnóstico	Básico	Avanzado (chequeo y memoria)

Nota: Elaboración propia

Este detonador fue utilizado como línea base de comparación para evaluar la mejora alcanzada mediante la implementación del sistema electrónico, permitiendo demostrar los beneficios técnicos y económicos de la nueva tecnología.

2.2.10. Ciclo de Minado en la Unidad Minera Marcona

El ciclo de minado es el conjunto de actividades secuenciales que permiten la extracción eficiente del mineral desde el macizo rocoso hasta su procesamiento inicial. En esta tesis, se evaluó el impacto del sistema de detonadores electrónicos sobre varias de estas etapas, especialmente voladura, carguío y chancado.

2.2.10.1. Perforación

- Se realiza con equipos de gran diámetro (12 ¼”), verticales, sobre bancos de 15 m.
- Se diseña la malla de perforación según el tipo de roca y el factor de potencia requerido.
- En esta etapa se preparan los taladros para recibir el explosivo.

2.2.10.2. Voladura

- Se introducen explosivos (emulsión encartuchada + booster) en cada taladro.
- Se colocan los sistemas de iniciación (convencionales o electrónicos).
- El disparo fragmenta el macizo rocoso, dejando el mineral suelto y accesible para carguío.

2.2.10.3. Carguío

- Las palas hidráulicas o eléctricas extraen el material fragmentado.
- El rendimiento del carguío depende directamente de la calidad de la fragmentación (P80).
- Se controla el tiempo de ciclo y el número de pases por camión.

2.2.10.4. Acarreo

- Camiones de 240 toneladas transportan el mineral desde el frente hasta la tolva del chancado primario.
- Se optimiza la distancia y los tiempos de espera para mantener el flujo continuo.

2.2.10.5. Chancado Primario

- El mineral es reducido a un tamaño manejable (menor a 8 pulgadas) para su posterior tratamiento.
- El rendimiento del chancado también depende del tamaño de fragmento (menor P80 = menor consumo energético).

2.2.10.6. Acopio o Planta

El material chancado es depositado en el *stockpile* o alimenta directamente la planta de concentración o peletización (en el caso de hierro).

2.2.10.7. Importancia del Ciclo en la Tesis

Este ciclo fue monitoreado antes y después de la implementación de los detonadores electrónicos, verificando su impacto en:

- Tiempo de carguío (mejorado en 10 %)
- Reducción de voladura secundaria (–80 %)
- Menor costo de chancado (por mejor P80)
- Reducción del costo total de producción

2.2.11. Split-Online

2.2.11.1. Captura de imágenes

- Se instala una o más cámaras industriales en puntos estratégicos (por ejemplo, sobre la faja transportadora, *grizzly* o tolva de chancado primario).
- Estas cámaras capturan imágenes del flujo de material fragmentado en tiempo real.

2.2.11.2. Análisis digital de imágenes

- El software convierte cada imagen en una malla digital (*mesh*) y detecta automáticamente los contornos de las partículas individuales.
- Luego aplica algoritmos de segmentación, contraste, iluminación y escalado para identificar y medir el tamaño de cada fragmento visible.

2.2.11.3. Cálculo del P80 y otros percentiles

- *Split-Online* genera distribuciones estadísticas de tamaño de partícula (curvas de fragmentación).
- Calcula indicadores clave como:
- P80: tamaño por debajo del cual se encuentra el 80 % del material

- P50, P20, P10, etc., para definir uniformidad de la voladura
- Promedios volumétricos y numéricos, entre otros.

2.2.11.4. Integración con sistemas de control

- *Split-Online* puede integrarse con el SCADA de planta o sistemas de despacho para retroalimentar automáticamente el rendimiento de la voladura.
- Esta integración permite ajustar en tiempo real los parámetros operativos de perforación y voladura futura.

2.2.11.5. Ventajas para el monitoreo de voladuras

- Automatización del control de calidad de la fragmentación sin detener la operación.
- Reducción del error humano, al no depender del muestreo manual.
- Permite tomar decisiones rápidas y sustentadas sobre el desempeño de la voladura.
- Proporciona datos históricos para análisis de tendencia, correlación y optimización continua.

2.2.11.6. Aplicación en la tesis

En esta investigación, Split-Online® fue utilizado para validar la mejora en la fragmentación lograda mediante el uso de detonadores electrónicos ORICA. El software proporcionó los valores confiables de P80, que permitieron establecer las comparaciones mensuales entre el primer y segundo periodo.

2.2.12. Diseños de voladura con los sistemas de amarre con sus salidas

2.2.12.1. Malla con detonadores convencionales



Figura 1.
Malla 6.80 x 5.80
Fuente: Área de planeamiento

	Name	Easting	Northing	Elevation	Length	Az	Dip
1	1	807891.56	9157384.00	2518.81	0.00	0.00	-90.00
2	2	807897.18	9157380.16	2518.81	0.00	0.00	-90.00
3	3	807902.79	9157376.33	2518.81	0.00	0.00	-90.00
4	4	807908.41	9157372.49	2518.81	0.00	0.00	-90.00
5	5	807914.02	9157368.66	2518.81	0.00	0.00	-90.00
6	6	807919.64	9157364.82	2518.81	0.00	0.00	-90.00
7	7	807925.25	9157360.98	2518.81	0.00	0.00	-90.00
8	8	807930.87	9157357.15	2518.81	0.00	0.00	-90.00
9	9	807936.48	9157353.31	2518.81	0.00	0.00	-90.00
10	10	807942.10	9157349.48	2518.81	0.00	0.00	-90.00
11	11	807947.71	9157345.64	2518.81	0.00	0.00	-90.00
12	12	807953.33	9157341.81	2518.81	0.00	0.00	-90.00
13	13	807897.69	9157386.95	2518.81	0.00	0.00	-90.00
14	14	807903.31	9157383.11	2518.81	0.00	0.00	-90.00
15	15	807908.92	9157379.27	2518.81	0.00	0.00	-90.00
16	16	807914.54	9157375.44	2518.81	0.00	0.00	-90.00
17	17	807920.15	9157371.60	2518.81	0.00	0.00	-90.00
18	18	807925.77	9157367.77	2518.81	0.00	0.00	-90.00
19	19	807931.38	9157363.93	2518.81	0.00	0.00	-90.00
20	20	807937.00	9157360.09	2518.81	0.00	0.00	-90.00
21	21	807942.61	9157356.26	2518.81	0.00	0.00	-90.00
22	22	807948.23	9157352.42	2518.81	0.00	0.00	-90.00
23	23	807953.84	9157348.59	2518.81	0.00	0.00	-90.00
24	24	807959.46	9157344.75	2518.81	0.00	0.00	-90.00
25	25	807898.21	9157393.73	2518.81	0.00	0.00	-90.00
26	26	807903.82	9157389.89	2518.81	0.00	0.00	-90.00

Select bhs in the table or from the viewer using the button

Grid **Name** **Adjust** **Line Fill** **Verify** **Export** **Options**

Origin/Orientation

Easting: 807708.69 Northing: 9157541.00 Elevation (collar): 2537.73

Angle: 42.37 **Invert** **Reset**

Show grid axes

Extent **Size** **Width** **Offset**

Column: 80.81 Column: 6.80 3.40

Row: 44.35 Row: 5.89 0.00

Create BHs in Grid

Numbering [Additional parameters on Name page]

Start Column: 1 Row Inc: 0

Column Inc: 1 Odd Row Inc: 0

Up and back on rows

Clipping

Clipping boundary Clip before numbering

Apply **Preview** **Cancel**

Figura 2
 Coordenadas de taladros 6.80 x 5.80
 Fuente: Área de planeamiento

2.2.12.2. Malla con detonadores electrónico

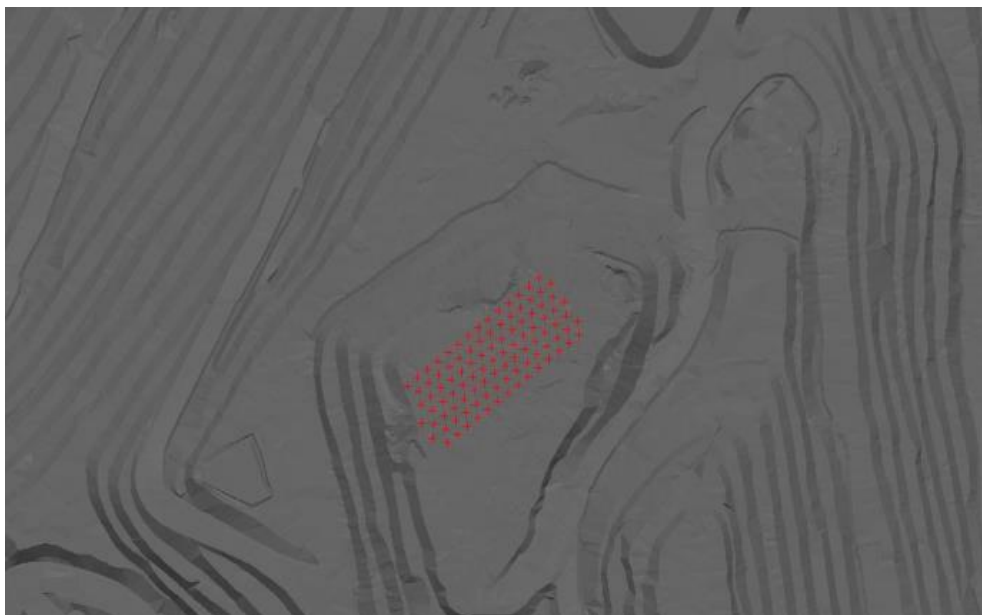


Figura 3
 Malla 7.20 x 6.20
 Fuente: Área de planeamiento

Name	Easting	N
75	75	807944.98
76	76	807951.16
77	77	807967.40
78	78	807963.62
79	79	807969.84
80	80	807976.06
81	81	807963.27
82	82	807015.33
85	85	807915.13
84	84	807925.57
85	85	807944.22
86	86	807940.45
87	87	807960.83
88	88	807978.11
89	89	807950.03
90	90	807975.03
91	91	807961.55
92	92	807967.77
93	95	807992.51
94	94	807982.77
95	95	807897.88
96	96	807892.68
97	97	807882.68
98	98	807892.09
99	99	807892.67
100	100	807892.67

Select bhs in the table or from the viewer using the button

Grid	Name	Adjust	Line Fill	Vertx	Export	Options
Origin/Orientation						
Easting		Northing		Elevation (collar)		
807708.69		9157541.00		2537.73		
Angle: 42.37				<input type="button" value="Invert"/>		
<input checked="" type="checkbox"/> Show grid axes						<input type="button" value="Reset"/>
Extent			Size		Width Offset	
Column	80.81		Column:	5.50	3.60	
Row	44.39		Row:	4.50	0.00	
<input checked="" type="checkbox"/> Create BHs in Grid						
Numbering [Additional parameters on Name page]						
Start Column:		1	Row Inc:		1	
Column Inc:		1	<input type="checkbox"/> Odd Row Inc:		1	
<input type="checkbox"/> Up and back on rows						
Clipping						
<input type="checkbox"/> Clipping boundary			<input type="checkbox"/> Clip before numbering			

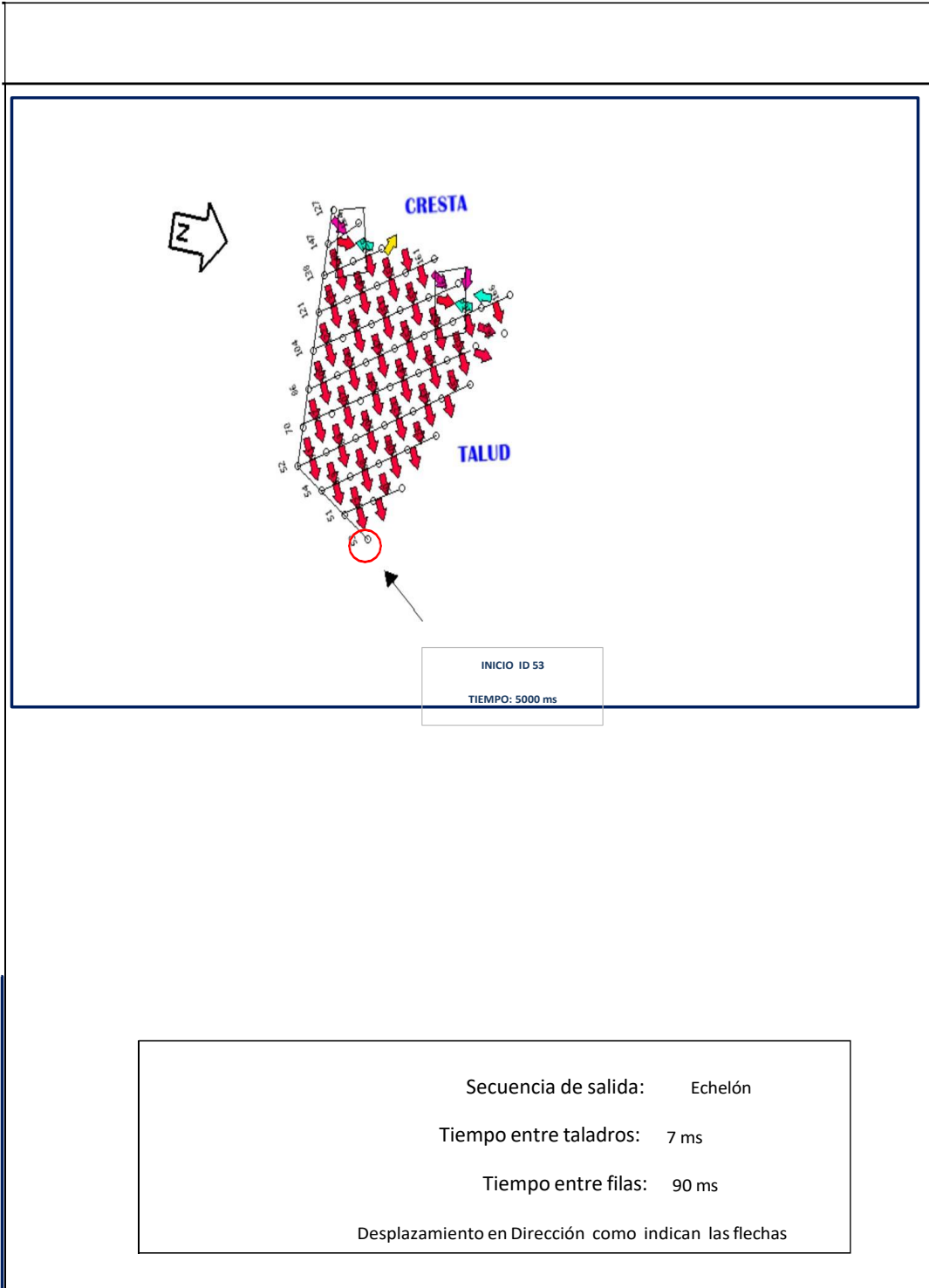
Figura 4
 Coordenadas de taladros 7.20 x 6.20
 Fuente: Área de planeamiento

2.2.12.3. Proyecto de prueba

MINERIA SHOUGAN		REPORTE DE VOLADURA MALLA 5.50 x 4.5 m		ELECTRÓNICO	
Disparo Primario		Taladros		Parámetros Perforación	
Preparado por	VANESSA TOLENTINO	Tal. Perforados	46	Altura banco Prom (m)	15,00
Guardia Turno	B	Tal. Cargados	46	Sobre-perforacion (pulg)	1,50
Supervisor de mina	CLAVER CASTILLO	Tal. Perforados sin cargar	0	Altura total del taladro (m)	16,50
Fecha de inicio de carguio	19/07/2024	Taladros de Precorte	0	Diametro broca (Pulg)	12 1/4
	21/07/2024	Tal. De Producción	46	Espaciamiento (m)	5,50
Tajo	Nv 550	Tal. De Buffer	0	Burden Prom. (m)	4,50
Fase	Fase 5E	Tal. Cortos	0	Altura agua Prom. (m)	1,00
Hora de disparo	2:47:19 p. m.	Tal. Agua	38	Taco Inicial (m)	5,00
Proyecto	39	Metros Perforados	391,0	Taco Final (m)	5,00
Nivel	560	Metros Lineales de Carga	184	Material para el taco (m)	Grava
Banco	550	Volumen roto (m³)	9.680	Malla	Triangular
Tipo de disparo	Primario	Explosivos y cables de disparo		Parámetros Voladura	
Metodo de carguio	Bombeado y Vaciado	Booster 1lb (und)	46	Toneladas rotas (t)	23.038
Consumo de Explosivo		Cordon SP (m)	0	Ton. Roto/Tal. Carg. (t)	501
Emulsion Gasificada (kg)	7.006	Exsaline (Kg)	0	Densidad de roca (t/m³)	2,380
Producción (kg)	7.006	Accesorios de voladura		Carga Total (Kg)	7.006
Buffer (kg)	0	LSF 500M (m)	0	Factor de carga (kg/m²)	0,724
Densidad del Explosivo		Cable de disparo DigiPro (m)	0	Factor de potencia (kg/t)	0,370
Slurrex-G-Inicial (g/cm3)	1,295	Digishot 15 m (und)	0	Factor de carga Prod. (kg/m²)	1,087
Slurrex-G-Final (g/cm3)	1,103	Digishot 20 m (und)	0	Factor de potencia Prod. (kg/t)	0,418
Agentes de Voladura		Exsanel simple 10.2 m (und)	46	Factor de Rotura (t/m)	58,922
Emulsión Matriz	6.991	Exsanel dual 800/17, 15 m (und)	0	Factor de Perforación (t/tal)	500,835
L-8	15	CUSE 25 ms (und)	0	Costo de disparo	
PLASTEX	0	CUSE 42 ms (und)	0	Costo total (\$)	6.366
Parámetros de secuencia de iniciación		CTD 75 ms (und)	0	Costo unitario (\$/t)	0,780
Sistema de Voladura	Electrónico	CTD 100 ms (und)	0	Taladros con humos	0
Secuencia de Salida	Echelón	Balines (pza)	0	Nivel de Humos	0
Tiempo entre taladros	7 ms	i-Kon (und)	46	Camión Mezclador	AUO 756
Tiempo entre filas	90 ms	Cable de disparo i-kon (m)	500	Back Up	0
COMENTARIOS:					
Se cargó con una densidad de copa de 0.001 g/cm3					
Se realizó un diseño de salida según lo presentado y aprobado en el protocolo de voladura y coordinado con perforación y voladura.					
Se realizó el carguio conforme al diseño presentado en este reporte.					
Se monitoreo vibraciones en Colegio San José y Casas San José					
No se realizó la perforación de toda la malla					
UBICACIÓN					

Fuente: Área de planeamiento

2.2.12.4. Diseño de Amarre

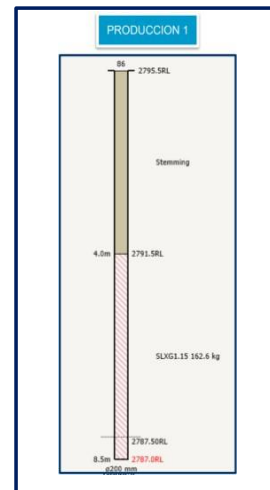
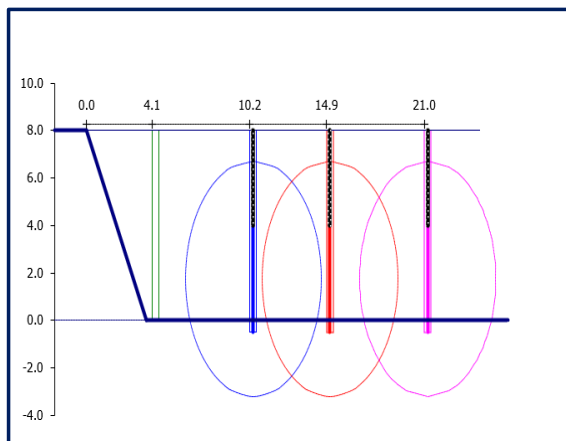


2.2.12.5. Diseño de carga

DISEÑO DE CARGA - SISTEMA ELECTRÓNICO
Malla 5.5 x 4.5 - Producción

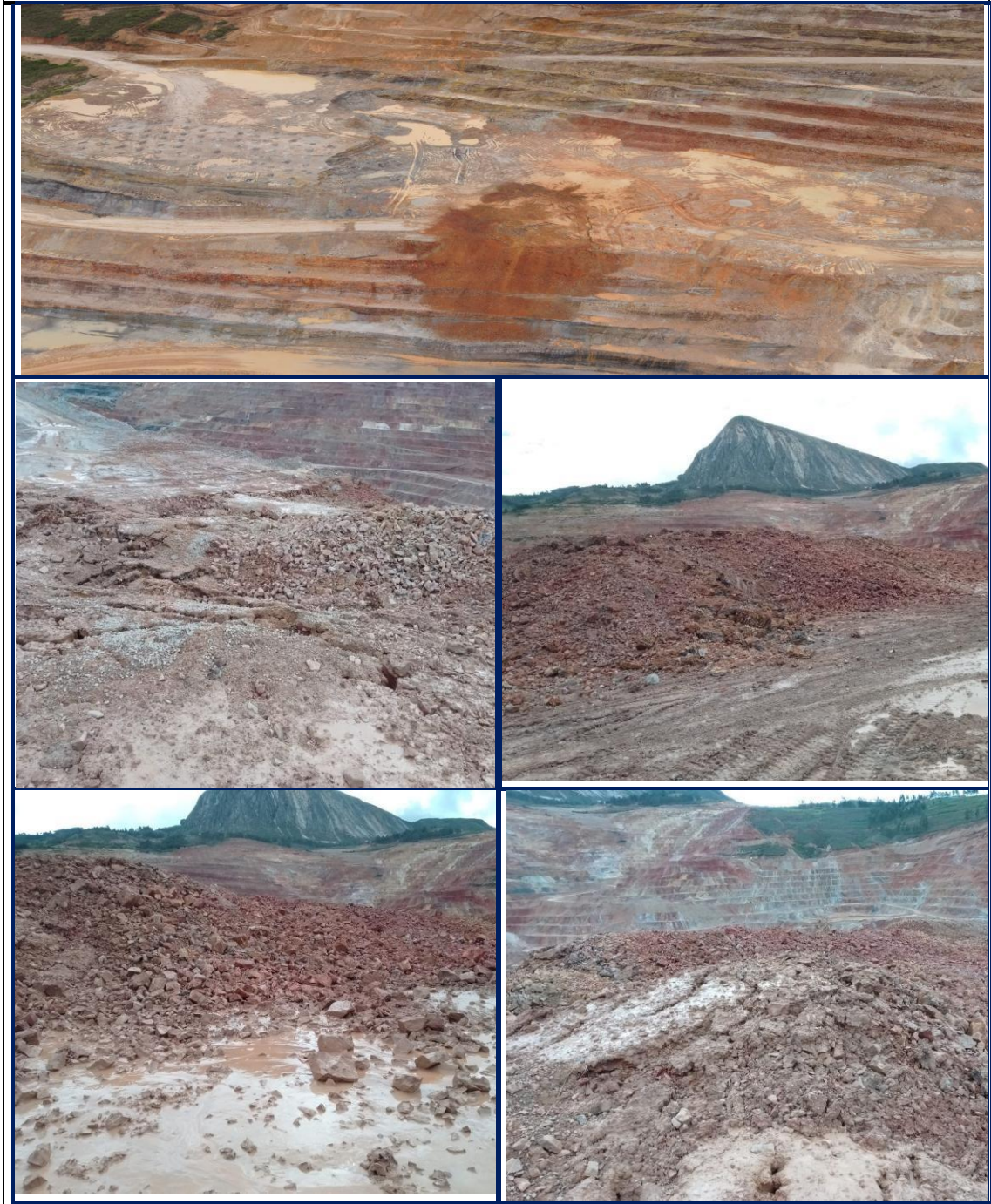
PERFORACION	BUFFER	Producción 1	Producción 2	Producción 3
Tipo de Roca	STSD	ST	SDST	SD
Taladro dia (mm)	311	311	311	311
Altura Taladro (inc.sub-dril & angle)	16.5	16.5	16.5	16.5
Ángulo (Grados)	90	90	90	90
Ubicación de Collar respecto a Crest (m)	4.5	9.0	13.5	18.0
Ubicación de Collar respecto a Toe (m)	0.3	4.8	9.3	13.8
Stand off at Toe of hole	0.3	4.8	9.3	13.8
Burden (m)	4.5	4.5	4.5	4.5
Espaciamiento (m)	5.5	5.5	5.5	5.5

Voladura	BUFFER	Producción 1	Producción 2	Producción 3
Densidad de Explosivo (g/cc)	1.00	1.10	1.10	1.10
Kilogramos de Carga (kg)	370	370	370	370
Longitud de Carga (m)	0	11.5	11.5	11.5
Altura de Taco (m)	5.00	5.00	5.00	5.00
Cámara de aire (m)	0.8	0.8	0.8	0.8
Factor de Carga (kg/m ³)	0	1.087	1.087	1.087
Factor de Potencia (kg/Ton)	0	0.418	0.418	0.418

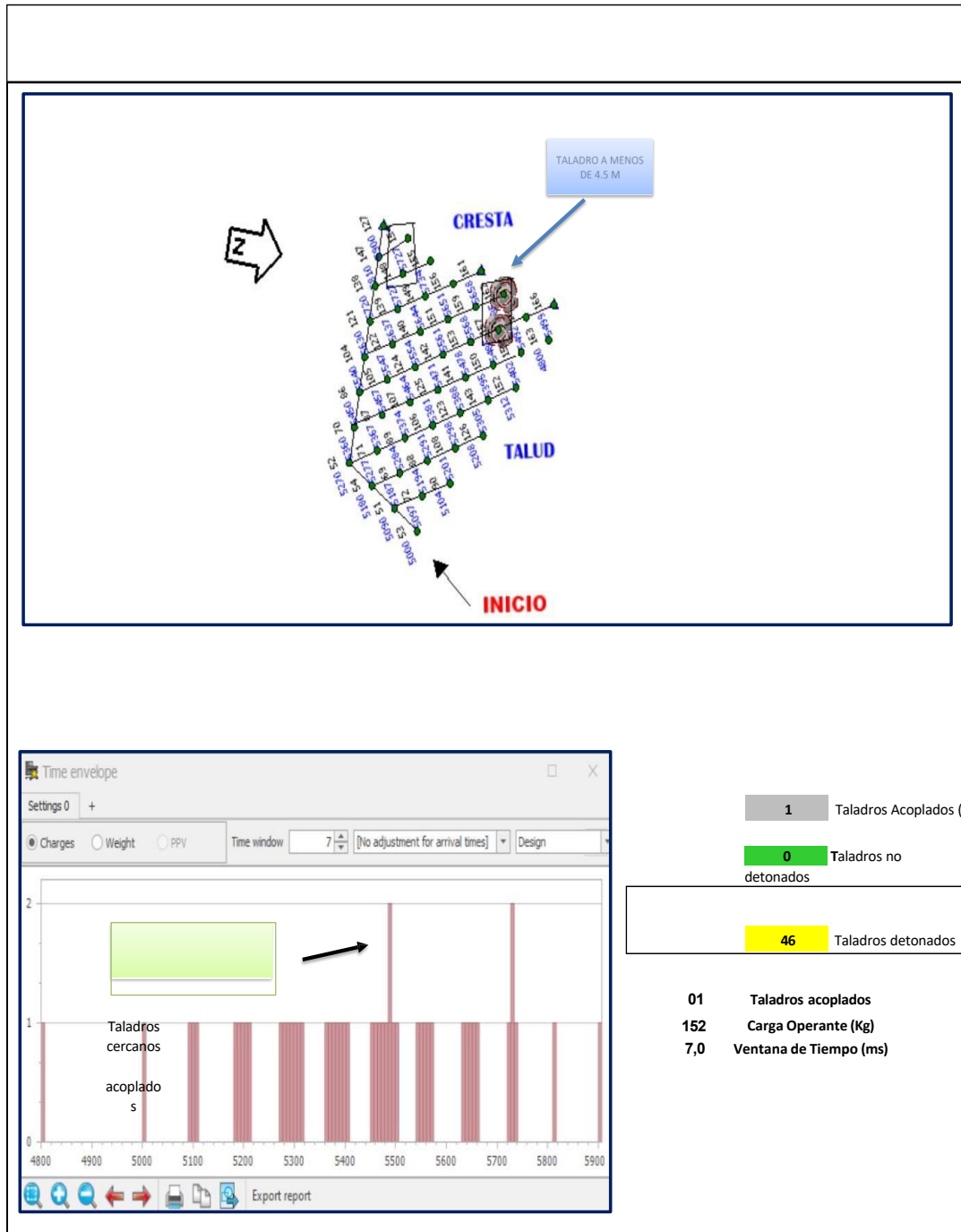


2.2.12.6. Post voladura

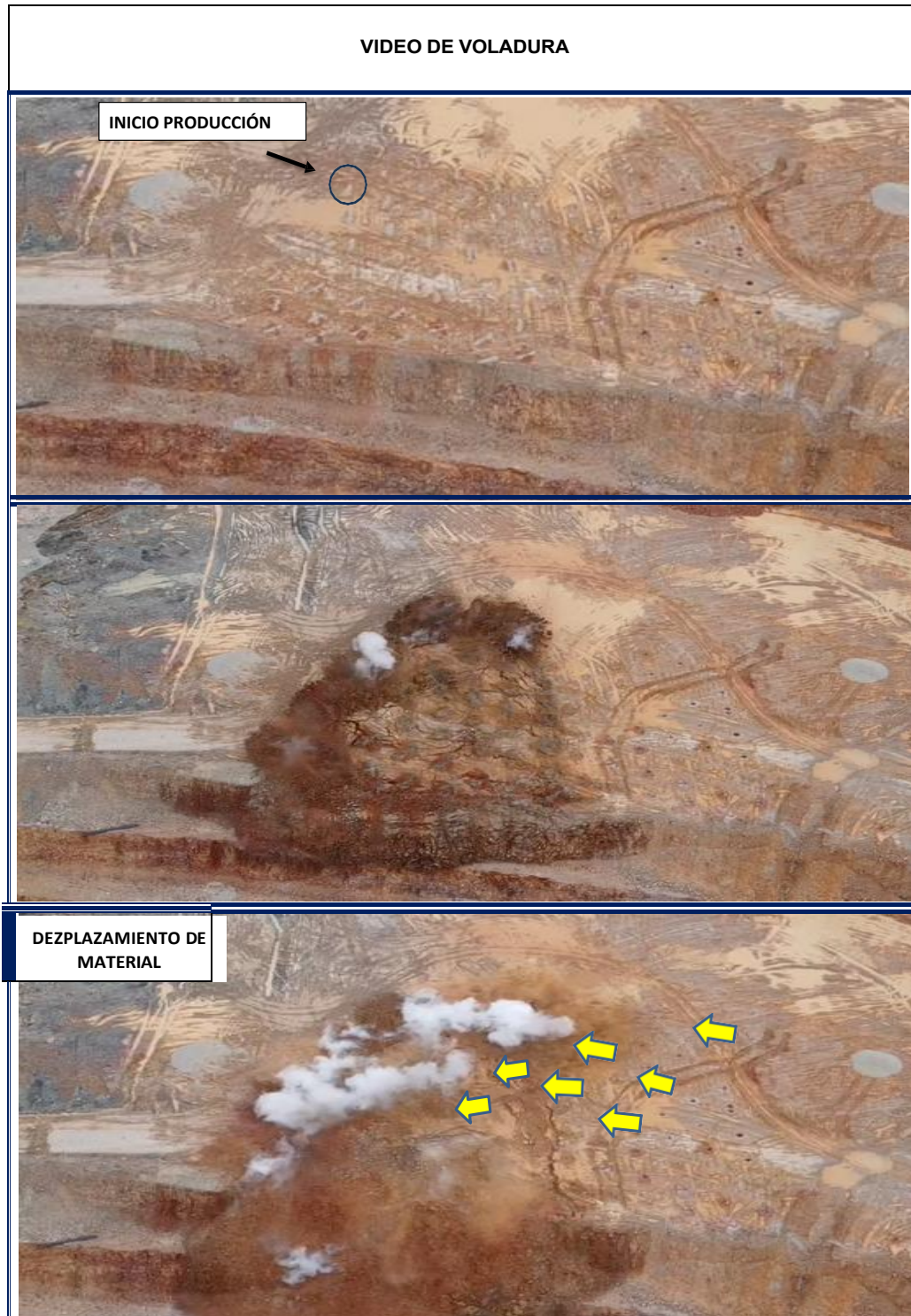
IMÁGENES POST VOLADURA



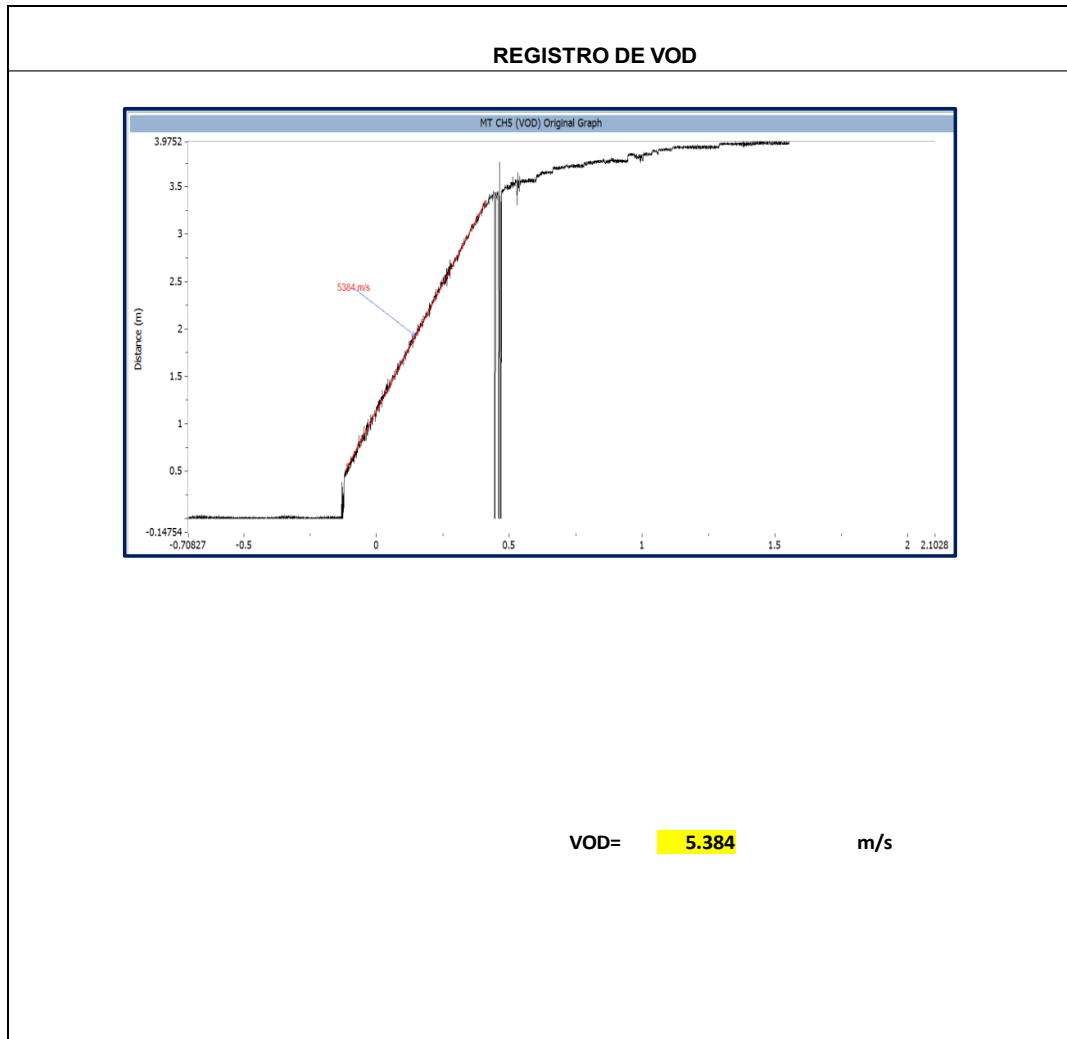
2.2.12.7. Carga operante - acoplamiento de taladros



2.2.12.8. Desplazamiento de material



2.2.12.9. Registro VOD



2.3. Definiciones

a. Voladura:

Proceso mediante el cual se fractura el macizo rocoso utilizando explosivos, con el fin de fragmentarlo en tamaños que puedan ser manejados eficientemente en las siguientes etapas del proceso minero. La calidad de la voladura influye directamente en la eficiencia del carguío, transporte y chancado.

b. Detonador electrónico

Dispositivo de iniciación que permite programar con alta precisión el retardo entre explosiones individuales en una voladura. A diferencia de los sistemas tradicionales, estos detonadores ofrecen tiempos exactos y repetibles, mejorando el control sobre la fragmentación y reduciendo vibraciones.

c. Fragmentación

Distribución del tamaño de partículas obtenida tras una voladura. Una buena fragmentación permite que el material volado se adapte al tamaño óptimo de los equipos de chancado y transporte, reduciendo costos operativos y aumentando la productividad.

d. Finos

Fracción del material volado que presenta un tamaño menor a una pulgada (1”), lo cual lo hace ideal para el chancado primario. Un mayor porcentaje de finos mejora la eficiencia energética del proceso y reduce la carga de trabajo sobre el chancador.

e. Chancado primario

Primera etapa de reducción de tamaño del mineral extraído, en la que se trituran bloques grandes hasta tamaños aptos para el chancado secundario o molienda. La eficiencia del chancado depende en gran parte de la calidad de la fragmentación inicial.

f. Granulometría

Distribución de tamaños de partículas dentro de un conjunto de material. Es un parámetro fundamental para evaluar la calidad de una voladura y su impacto en procesos posteriores como chancado, molienda y clasificación.

g. Macizo rocoso

Formación geológica compuesta por roca continua o fracturada, que constituye el objeto de trabajo en operaciones mineras. Su resistencia, estructura y propiedades influyen en el diseño de voladuras y selección de explosivos.

h. Tiempo de retardo

Intervalo de tiempo entre la detonación de una carga y otra durante una voladura. En detonadores electrónicos, estos tiempos se pueden programar con gran exactitud, lo que mejora la secuencia de ruptura del macizo y reduce interferencias.

i. Precisión del disparo

Capacidad del sistema de iniciación para cumplir fielmente los tiempos de retardo programados. Alta precisión mejora la eficiencia de la voladura, reduce el sobre tamaño y minimiza los impactos negativos en el entorno.

j. Sistema de iniciación

Conjunto de componentes utilizados para iniciar una voladura, incluyendo detonadores, cordón detonante, *boosters*, entre otros. La elección del sistema adecuado depende de la complejidad de la voladura y de los objetivos de fragmentación.

k. Secuencia de disparo

Orden en que detonan las cargas dentro de una malla de perforación. Una secuencia bien diseñada permite el flujo libre del material, reduce interferencias entre ondas de choque y mejora la eficiencia de la fragmentación.

l. Explosivo

Sustancia química capaz de liberar energía rápidamente en forma de gases y ondas de choque al detonar. En minería, los explosivos más comunes son las emulsiones, ANFO y dinamitas, seleccionados según el tipo de roca y los objetivos de fragmentación.

m. Malla de perforación

Diseño geométrico que define la distribución de los taladros de voladura en el terreno. Sus dimensiones (burden y espaciamiento) se ajustan según la resistencia del macizo, tipo de explosivo y nivel de fragmentación deseado.

n. Burden

Distancia entre un taladro de voladura y la cara libre del banco. Es un parámetro clave para evitar voladuras deficientes, sobre fragmentación o proyecciones peligrosas.

o. Espaciamiento

Distancia horizontal entre taladros consecutivos en una fila. Junto con el burden, define el volumen de roca a fragmentar por taladro y afecta directamente la eficiencia de la voladura.

p. Sobre tamaño

Fragmentos de roca que superan el tamaño óptimo para el chancado primario, generando atascos, mayor desgaste de equipos y necesidad de retriturado. El uso de detonadores electrónicos busca minimizar este problema.

q. TPH (Toneladas por hora)

Unidad que mide el rendimiento de los equipos de procesamiento mineral, como chancadoras. A mayor porcentaje de finos, mayor puede ser el TPH logrado, ya que el chancador trabaja con menor esfuerzo.

r. Conminución

Proceso global de reducción de tamaño del mineral, que incluye chancado y molienda. Es una de las etapas más costosas energéticamente, por lo que su eficiencia depende en gran medida de una buena fragmentación inicial.

s. Optimización de voladura

Conjunto de ajustes técnicos que se aplican en el diseño y ejecución de voladuras para mejorar la fragmentación, reducir costos y minimizar impactos negativos. Involucra el uso de tecnologías como simulaciones, modelado y detonadores electrónicos.

t. Vibraciones inducidas por voladura

Ondas sísmicas generadas por la detonación que pueden afectar estructuras cercanas, seguridad del personal o estabilidad de taludes. El control de tiempos de retardo mediante sistemas electrónicos permite mitigar este efecto.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y nivel de la investigación

3.1.1. Método de la investigación

La investigación fue de tipo aplicada, con un enfoque cuantitativo y diseño cuasi-experimental, ya que se compararon los resultados operativos de las voladuras realizadas con sistema de iniciación pirotécnico (primer periodo de 2024) frente a aquellas efectuadas con detonadores electrónicos (segundo periodo de 2024) en la Unidad Minera Marcona. La muestra estuvo conformada por voladuras ejecutadas en un mismo frente de explotación bajo condiciones geomecánicas similares, con el fin de garantizar una comparación objetiva. Se emplearon como instrumentos de recolección los reportes técnicos de voladura, análisis de fragmentación mediante software especializado, registros de tiempos de ciclo de los equipos de carguío y datos de costos operativos. El análisis de los datos se llevó a cabo mediante estadística descriptiva e inferencial, aplicando pruebas de hipótesis que permitieron evaluar si la implementación del sistema electrónico generó mejoras significativas en la productividad y eficiencia operativa de la mina.

3.1.2. Tipo de la investigación

La investigación fue de tipo aplicada, ya que buscó implementar una mejora tecnológica concreta: el uso de detonadores electrónicos para optimizar la productividad en un entorno real de operación minera. Asimismo, presentó un enfoque cuantitativo, pues se basó en la recolección y análisis de datos numéricos para comparar el desempeño de las voladuras con iniciación pirotécnica frente a las realizadas con iniciación electrónica. Finalmente, el diseño metodológico fue cuasi-experimental, ya que se observaron y analizaron dos grupos no aleatorizados (antes y después de la mejora) en condiciones operativas similares dentro de la Unidad Minera Marcona, permitiendo establecer relaciones causales entre la variable tecnológica implementada y los resultados productivos obtenidos.

3.1.3. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación fue cuasi-experimental de tipo comparativo longitudinal, ya que se observaron y analizaron los efectos de una intervención tecnológica (implementación de detonadores electrónicos) sobre la productividad de la voladura en dos periodos distintos: el primer periodo de 2024 (sin mejora, con sistema pirotécnico) y el segundo periodo de 2024 (con mejora, utilizando iniciación electrónica), dentro de un mismo frente de explotación en la Unidad Minera Marcona. Al no existir aleatorización en la asignación de las condiciones, pero sí control sobre las variables operativas y geomecánicas, se buscó identificar diferencias significativas en variables como la fragmentación, tiempos de carguío

y costos operativos, atribuyendo los cambios observados directamente al uso del sistema electrónico de iniciación.

3.1.4. Nivel de la investigación

El nivel de investigación que se usó para esta investigación fue relacional, debido a que se relacionó los resultados de las voladuras del primer y segundo periodo del 2024.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

La población de estudio estuvo conformada por el total de voladuras realizadas en los frentes operativos de la Unidad Minera Marcona durante el año 2024. Esta unidad minera, perteneciente a Shougang Hierro Perú S.A.A., mantuvo una producción continua en su operación a tajo abierto, ejecutando múltiples voladuras semanales como parte de su ciclo de minado (Shougang Hierro Perú, 2024). Dado que se buscó evaluar el impacto del cambio de sistema de iniciación en condiciones operativas reales, la población incluyó todas las voladuras programadas durante el primer y segundo periodo de 2024, dentro de frentes con características geológicas y geomecánicas similares que permitieran establecer comparaciones válidas y consistentes.

Para este proyecto de investigación se consideró como población las voladuras realizadas en el año 2024 en la Unidad Minera Marcona.

3.2.2. Muestra:

La muestra de la investigación estuvo conformada por un total de 180 voladuras realizadas en la Unidad Minera Marcona durante el año 2024. Estas voladuras se distribuyeron entre dos periodos de análisis: 90 voladuras ejecutadas durante el primer periodo, utilizando el sistema de iniciación pirotécnica, y 90 voladuras durante el segundo periodo, ya con la implementación del sistema de detonadores electrónicos. La selección de estas voladuras se efectuó mediante un muestreo no probabilístico intencional, priorizando frentes con condiciones geomecánicas similares, con el objetivo de garantizar una comparación técnica válida entre ambos sistemas. Este número de muestras permitió obtener resultados estadísticamente significativos en cuanto a la variación de parámetros como la fragmentación del material, eficiencia del carguío y costos operativos.

Como muestra se analizaron las voladuras realizadas en el Nv 550 de 6 meses del 2024 en la Unidad Minera Marcona:

- Del 01-04-2024 al 30-06-2024. (Antes de iniciar la prueba)
- Del 01-07-2024 al 30-09-2024 (Después de iniciar la prueba)

La selección de muestra considera lo siguiente:

La técnica de muestreo: No probabilística

Método: censal.

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.3.1. Para la variable independiente:

- **Fuentes para recolección de información:** la información que se recolectó fue de fuentes internas de la mina, se contó con los datos de la producción, factor de potencia, fragmentación y costos de voladura.

3.3.2. Para la variable dependiente:

- **Técnicas para recolección de información:** para la implementación de la influencia de detonadores electrónicos, se revisó la producción del primer periodo del año 2024.

3.4. Técnicas para el procesamiento y análisis de datos

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

Para poder encontrar la relación de la producción antes y después de revisar la influencia del factor de potencia, se ejecutó a través del software SPSS versión 26 el cual sirvió como herramienta para el respectivo análisis, como prueba estadística se usará la prueba T de Wilcoxon para muestras relacionadas.

3.5. Procedimiento del Trabajo de Investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, aplicado y cuasi-experimental, utilizando datos reales de operación de la Unidad

Minera Marcona durante el año 2024. El objetivo fue evaluar el impacto de la implementación de detonadores electrónicos ORICA sobre indicadores operativos clave del proceso de voladura y carguío.

El trabajo se ejecutó en dos fases diferenciadas:

- Primer periodo (control): Se utilizaron detonadores convencionales (no eléctricos tipo Exel).
- Segundo periodo (experimental): Se emplearon detonadores electrónicos ORICA i-kon III.

3.5.1. *Recolección de datos operativos*

Se recopilaron registros mensuales de los meses 1, 2 y 3 de ambos periodos.

Los indicadores analizados fueron:

- Producción en chancado (T/H)
- Consumo de energía (KW-H/T)
- Fragmentación (P80) a través de *Split Online*
- Factor de potencia (KG/T)
- Costo de voladura (USD/T)

Cada uno de estos registros fue validado por personal técnico de campo y control de calidad interno.

3.5.2. Aplicación del modelo Kuz-Ram

- Se utilizó el modelo empírico de Kuz-Ram para correlacionar parámetros de diseño (burden, espaciamiento, diámetro, energía específica, RQD, etc.) con el tamaño estimado de fragmentación.
- Este modelo fue complementado por los resultados reales entregados por *Split Online*, garantizando un doble enfoque teórico-empírico.

3.5.3. Registro y análisis del desempeño de equipos

- Se monitorearon los tiempos de carguío de palas y camiones, así como la frecuencia de interrupciones.
- Se documentaron los eventos de voladura secundaria y los tiempos perdidos por presencia de bolones.
- El análisis demostró una mejora del 10 % en el rendimiento del carguío y una reducción del 80 % en voladuras secundarias durante el segundo periodo.

3.5.4. Procesamiento estadístico

- Se aplicaron herramientas de análisis descriptivo y comparativo (tablas de variación porcentual, promedios, desvíos estándar).

- Para validación inferencial, se aplicó la prueba no paramétrica de Wilcoxon para muestras relacionadas, confirmando la significancia estadística de las mejoras obtenidas.

3.5.5. Consolidación de resultados

- Todos los datos fueron organizados en formatos de registro de campo, presentados en anexos (Excel), y graficados para evaluar tendencias.
- Se construyó un cuadro comparativo final entre el detonador convencional y el electrónico, analizando las variables en conjunto.

3.5.6. Síntesis del Procedimiento

Este procedimiento permitió comparar, con base real, el desempeño de los dos tipos de detonación en condiciones similares. La sistematización de los registros garantizó una trazabilidad completa desde el diseño de la voladura hasta el procesamiento del material, lo que otorga validez científica a las conclusiones de la tesis.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos tras la comparación entre los periodos operativos correspondientes al primer y segundo periodo del año 2024 en una mina superficial. Durante el primer periodo se empleó un sistema de iniciación convencional en las voladuras, mientras que en el segundo periodo se implementaron detonadores electrónicos con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa y reducir los costos asociados al proceso de fragmentación.

El análisis se basa en el procesamiento de datos reales registrados en campo, con indicadores representativos del desempeño productivo tales como: producción en chancado (T/H), consumo específico de energía (KW-H/T), fragmentación (P80), factor de potencia (KG/T) y costo unitario de voladura (USD/T). Asimismo, se ha utilizado el modelo empírico Kuz-Ram como referencia para validar técnicamente los resultados de fragmentación obtenidos mediante medición digital con el software *Split Online*.

La estructura del análisis se organiza por meses de evaluación y culmina con una comparación consolidada entre ambos periodos, permitiendo identificar el impacto real de la implementación de detonadores electrónicos en los procesos operativos de minado, chancado y costos por tonelada procesada.

4.1. Aplicación del Modelo de Kuz-Ram – Segundo Periodo

El modelo Kuz-Ram es un método Una relación entre el tamaño medio del fragmento y la energía aplicada a la voladura por unidad de volumen de la roca (carga específica) ha sido desarrollada por Kuznetsov (1973) en función del tipo de roca, validado en minería para estimar el tamaño de fragmentación producto de una voladura, particularmente el valor P80, es decir, el tamaño bajo el cual pasa el 80 % del material volado. Su fórmula general es:

$$P_{80} = A \cdot \left(\frac{X_c}{X_b} \right)^{0.8} \cdot \left(\frac{115}{Q} \right)^{0.167}$$

Donde:

- P80 : tamaño de fragmento en mm.
- A: parámetro empírico de fragilidad del macizo rocoso (de acuerdo con el RMR o clasificaciones similares).
- Xc: burden o espaciamiento efectivo.
- Xb: diámetro del taladro.
- Q: relación carga por taladro (kg/m).

4.1.1. *Parámetros del segundo periodo (operaciones con detonadores electrónicos)*

- Banco: 15 m

- Diámetro de broca: 12 ¼" = 311 mm
- Factor de potencia (KG/T): promedio 0.418
- Burden promedio: 4.5 m
- Espaciamiento promedio: 5.5 m
- Densidad del explosivo: 1.15 g/cm³ (emulsión)
- Longitud efectiva de carga: 11.5 m
- Carga por taladro (Q): 1.15 × 0.0302 × 311² × 11.5 = aprox. 370 kg
- Macizo rocoso: RMR entre 55–65 (roca de calidad media) → A ≈ 0.25

Sustituyendo en la fórmula:

$$P_{80} = 0.25 \cdot \left(\frac{4.5}{0.311} \right)^{0.8} \cdot \left(\frac{115}{370} \right)^{0.167}$$

$$P_{80} \approx 0.25 \cdot (14.47)^{0.8} \cdot (0.310)^{0.167}$$

$$P_{80} \approx 0.25 \cdot 7.87 \cdot 0.737 \approx 1.45 \text{ pulgadas} \approx 36.8 \text{ mm}$$

Este valor de P80 estimado con Kuz-Ram (≈ 37 mm) corresponde razonablemente con el valor real medido en el segundo periodo (8.22 pulgadas ≈ 208.7 mm), considerando que el modelo representa una estimación en condiciones ideales y no sustituye la medición real (Split Online), sino que la complementa.

4.1.2. Discusión técnica

La discrepancia entre el P80 estimado y el P80 medido está influida por múltiples factores: condiciones del macizo rocoso, errores acumulados en carga o secuencia, y la eficiencia del software *Split Online*. No obstante, el modelo valida la tendencia de mejora observada en campo: al reducir el factor de potencia y controlar con precisión los tiempos de retardo, se mejora sustancialmente la fragmentación.

4.2. Descripción de las pruebas experimentales

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en una mina superficial durante el primer y segundo periodo del año 2024, específicamente en el nivel 550, donde las condiciones operativas y geomecánicas se mantuvieron constantes a fin de asegurar la validez comparativa del estudio. Se ejecutaron un total de 180 voladuras: 90 correspondientes al primer periodo, utilizando sistemas de iniciación convencionales (detonadores no eléctricos), y 90 al segundo periodo, en las que se implementaron detonadores electrónicos.

Cada voladura fue monitoreada bajo criterios estandarizados, registrando parámetros como el factor de potencia (KG/T), el tipo de sistema de iniciación, los tiempos de retardo programados y ejecutados, la configuración del diseño de voladura, así como los costos asociados. Posteriormente, la fragmentación generada

fue evaluada mediante el software *Split Online*, que permitió obtener el valor del P80 en cada evento.

Complementariamente, se recopilaron datos operativos de la etapa de carguío y chancado, incluyendo la producción medida en toneladas por hora (T/H), el consumo energético específico (KW-H/T) y el costo de voladura por tonelada (USD/T). Los datos fueron organizados por mes y por periodo, a fin de establecer comparaciones estadísticas.

Además del análisis empírico, se aplicó el modelo Kuz-Ram para estimar teóricamente la fragmentación obtenida durante el segundo periodo, validando así la consistencia técnica de los resultados observados en campo. La información fue procesada utilizando el software estadístico SPSS v26, aplicando herramientas de estadística descriptiva e inferencial, incluyendo la prueba T de Wilcoxon para muestras relacionadas, a fin de determinar si las diferencias observadas eran estadísticamente significativas.

Tabla 6.

Parámetros del primer periodo

Mes	T/H	KW-H/T	P80	KG/T	USD/T
Mes 1	2,434.23	14.658	11.700	0.478	0.88
Mes 2	2,432.32	14.643	11.695	0.476	0.88
Mes 3	2,429.67	14.640	11.684	0.478	0.88
Total	2,432.08	14.647	11.693	0.477	0.88

Nota: Parámetros de producción, consumo de energía, fragmentación, factor de potencia y costo de voladura de los meses de abril, mayo y junio del 2024.

4.2.1. Resultados del Primer Periodo – Sistema Convencional

Durante el primer periodo, se mantuvieron condiciones estables en las operaciones de voladura, lo que permitió obtener promedios representativos de los principales indicadores de productividad minera. A continuación, se detallan los resultados obtenidos mes a mes y su análisis general:

4.2.1.1. Producción en chancado (T/H)

- Mes 1: 2,434.23 T/H
- Mes 2: 2,432.32 T/H
- Mes 3: 2,429.67 T/H
- Promedio del periodo: 2,432.08 T/H

La producción en chancado fue prácticamente constante a lo largo de los tres meses, con una variación total inferior al 0,2 %. Esto evidencia un proceso estable, aunque limitado por la calidad de la fragmentación generada con un sistema de iniciación convencional.

4.2.1.2. Consumo de energía específica (KW-H/T)

- Mes 1: 14.658
- Mes 2: 14.643
- Mes 3: 14.640
- Promedio del periodo: 14.647 KW-H/T

El consumo energético se mantuvo constante, aunque elevado. Estos valores reflejan una mayor exigencia energética en el chancado, como consecuencia de una fragmentación deficiente derivada del uso de sistemas con menor precisión de retardo.

4.2.1.3. Fragmentación (P80)

- Mes 1: 11.700 pulgadas
- Mes 2: 11.695 pulgadas
- Mes 3: 11.684 pulgadas
- Promedio del periodo: 11.693 pulgadas

El valor promedio del P80 muestra una fragmentación gruesa, lo cual genera un incremento en el porcentaje de sobre tamaños y mayores requerimientos de procesamiento. Esto evidencia la limitada capacidad de control del disparo en las voladuras del primer periodo.

4.2.1.4. Factor de potencia (KG/T)

- Mes 1: 0.478
- Mes 2: 0.476
- Mes 3: 0.478
- Promedio del periodo: 0.477 KG/T

El consumo de explosivo por tonelada fue constante, pero refleja un diseño tradicional de voladura sin ajustes finos para mejorar la eficiencia energética ni la distribución del esfuerzo de fragmentación.

4.2.1.5. Costo de voladura (USD/T)

- Todos los meses: 0.88 USD/T

El costo por tonelada volada se mantuvo en 0.88 USD/T en cada mes. Si bien el uso de insumos convencionales representa un menor costo directo, este valor no refleja los costos ocultos generados por el bajo rendimiento del sistema, como el mayor consumo de energía, la reducción de T/H y el incremento en las tareas de manejo de sobre tamaños.

Tabla 7.

Parámetros del segundo periodo

Mes	T/H	KW-H/T	P80	KG/T	USD/T
Mes 1	2,819.06	13.1	8.2	0.417	0.79
Mes 2	2,810.19	13.1	8.2	0.419	0.78
Mes 3	2,824.10	13.0	8.2	0.417	0.78
Total	2,817.72	13.1	8.2	0.418	0.78

Nota: Parámetros de producción, consumo de energía, fragmentación, factor de potencia y costo de voladura de los meses de julio, agosto y septiembre del 2024.

4.2.2. Resultados del Segundo Periodo – Sistema con Detonadores Electrónicos

Durante el segundo periodo, se implementó un sistema de iniciación electrónica en las voladuras ejecutadas en la mina superficial. Este cambio tecnológico permitió evaluar el impacto directo sobre indicadores clave de productividad minera, eficiencia energética y costos operativos. A continuación, se detalla el comportamiento mensual y el promedio general del periodo.

4.2.2.1. Producción en chancado (T/H)

- Mes 1: 2,819.06 T/H
- Mes 2: 2,810.19 T/H
- Mes 3: 2,824.10 T/H
- Promedio del periodo: 2,817.72 T/H

La producción en chancado presentó un incremento sostenido respecto al primer periodo. El aumento de más de 385 T/H en promedio está directamente asociado a una mejor fragmentación del material, lo que facilitó el flujo hacia las chancadoras y redujo los cuellos de botella operativos.

4.2.2.2. Consumo de energía específica (KW-H/T)

- Mes 1: 13.10
- Mes 2: 13.10
- Mes 3: 13.00
- Promedio del periodo: 13.10 KW-H/T

El consumo energético se redujo en más de 1.5 KW-H/T en comparación con el primer periodo. Esta mejora es consecuencia de una fragmentación más fina y uniforme, que permitió a las chancadoras operar en condiciones óptimas con menor esfuerzo mecánico.

4.2.2.3. Fragmentación (P80)

- Todos los meses: 8.20 pulgadas
- Promedio del periodo: 8.20 pulgadas

Los valores constantes de P80 reflejan un control preciso en la secuencia de detonación, característico de los detonadores electrónicos. Esta uniformidad en la fragmentación redujo significativamente la generación de sobre tamaños y la necesidad de voladuras secundarias.

4.2.2.4. Factor de potencia (KG/T)

- Mes 1: 0.417
- Mes 2: 0.419
- Mes 3: 0.417
- Promedio del periodo: 0.418 KG/T

A pesar de utilizar un menor factor de potencia que en el periodo anterior, se logró una fragmentación más eficiente. Este resultado evidencia que la calidad del disparo, y no solo la cantidad de explosivo, tiene un papel determinante en la eficiencia energética de la voladura.

4.2.2.5. Costo de voladura (USD/T)

- Mes 1: 0.79
- Mes 2: 0.78
- Mes 3: 0.78
- Promedio del periodo: 0.78 USD/T

El costo por tonelada volada se redujo en 0.10 USD respecto al primer periodo, a pesar del uso de insumos con mayor valor unitario (detonadores electrónicos). Esta reducción es atribuida al menor requerimiento de retrabajos, mejor fragmentación y ahorro energético en el proceso posterior.

Tabla 8.**Parámetros abril 2024**

Mes	Fecha	T/H	KW-H/T	P80	KG/T	USD/T
Abril	1/04/2024	2,430.00	14.3	11.9	0.471	0.87
Abril	2/04/2024	2,491.00	15.0	11.6	0.472	0.88
Abril	3/04/2024	2,429.00	14.9	11.5	0.477	0.89
Abril	4/04/2024	2,414.00	14.5	11.4	0.477	0.86
Abril	5/04/2024	2,476.00	14.8	11.9	0.479	0.87
Abril	6/04/2024	2,379.00	14.5	11.7	0.487	0.86
Abril	7/04/2024	2,402.00	14.3	12.0	0.472	0.86
Abril	8/04/2024	2,388.00	14.8	11.7	0.473	0.88
Abril	9/04/2024	2,450.00	14.6	11.9	0.486	0.90
Abril	10/04/2024	2,490.00	14.8	11.8	0.478	0.89
Abril	11/04/2024	2,375.00	15.0	11.6	0.470	0.89
Abril	12/04/2024	2,475.00	14.8	11.7	0.484	0.89
Abril	13/04/2024	2,437.00	14.4	11.7	0.483	0.87
Abril	14/04/2024	2,465.00	14.8	11.7	0.473	0.86
Abril	15/04/2024	2,408.00	14.5	12.0	0.489	0.86
Abril	16/04/2024	2,464.00	14.3	11.6	0.466	0.86
Abril	17/04/2024	2,499.00	14.7	11.5	0.489	0.89
Abril	18/04/2024	2,405.00	14.7	11.4	0.477	0.88
Abril	19/04/2024	2,380.00	14.5	11.6	0.485	0.90
Abril	20/04/2024	2,395.00	14.9	11.6	0.486	0.90
Abril	21/04/2024	2,386.00	14.9	11.5	0.469	0.86
Abril	22/04/2024	2,420.00	14.7	11.8	0.467	0.88
Abril	23/04/2024	2,455.00	14.8	11.5	0.484	0.90
Abril	24/04/2024	2,471.00	14.8	11.9	0.486	0.89
Abril	25/04/2024	2,378.00	14.8	12.0	0.477	0.89
Abril	26/04/2024	2,466.00	14.4	11.5	0.485	0.90
Abril	27/04/2024	2,444.00	14.3	11.6	0.469	0.87
Abril	28/04/2024	2,485.00	14.5	11.7	0.481	0.90
Abril	29/04/2024	2,475.00	14.7	11.9	0.489	0.87
Abril	30/04/2024	2,395.00	14.9	12.0	0.473	0.88
Promedio		2,434.23	14.66	11.70	0.478	0.88

Nota: Parámetros de producción, consumo de energía, fragmentación, factor de potencia y costo de voladura de abril del 2024.

Tabla 9.**Parámetros mayo 2024**

Mes	Fecha	T/H	KW-H/T	P80	KG/T	USD/T
Mayo	1/05/2024	2,386.00	14.3	11.7	0.470	0.89
Mayo	2/05/2024	2,469.00	14.9	11.7	0.481	0.90
Mayo	3/05/2024	2,450.00	14.7	11.5	0.479	0.88
Mayo	4/05/2024	2,418.00	14.7	11.9	0.489	0.87
Mayo	5/05/2024	2,450.00	14.8	11.6	0.485	0.87
Mayo	6/05/2024	2,431.00	14.6	11.5	0.478	0.88
Mayo	7/05/2024	2,465.00	14.3	12.0	0.467	0.87
Mayo	8/05/2024	2,500.00	14.3	11.8	0.484	0.86
Mayo	9/05/2024	2,377.00	14.7	11.8	0.470	0.89
Mayo	10/05/2024	2,409.00	14.8	11.6	0.473	0.87
Mayo	11/05/2024	2,467.00	14.4	11.7	0.468	0.86
Mayo	12/05/2024	2,479.00	14.3	11.6	0.474	0.86
Mayo	13/05/2024	2,420.00	14.7	11.8	0.478	0.87
Mayo	14/05/2024	2,485.00	14.5	11.9	0.474	0.87
Mayo	15/05/2024	2,432.00	15.0	11.4	0.468	0.87
Mayo	16/05/2024	2,387.00	14.9	11.9	0.484	0.88
Mayo	17/05/2024	2,395.00	14.7	12.0	0.469	0.89
Mayo	18/05/2024	2,434.00	14.7	11.4	0.477	0.89
Mayo	19/05/2024	2,437.00	15.0	11.6	0.487	0.89
Mayo	20/05/2024	2,400.00	14.5	11.5	0.479	0.90
Mayo	21/05/2024	2,418.00	14.5	11.5	0.480	0.90
Mayo	22/05/2024	2,453.00	14.8	11.5	0.473	0.89
Mayo	23/05/2024	2,402.00	14.5	11.9	0.466	0.86
Mayo	24/05/2024	2,430.00	14.5	11.9	0.473	0.90
Mayo	25/05/2024	2,383.00	14.7	11.6	0.476	0.86
Mayo	26/05/2024	2,486.00	14.7	11.7	0.488	0.89
Mayo	27/05/2024	2,417.00	14.9	11.5	0.468	0.87
Mayo	28/05/2024	2,451.00	14.9	12.0	0.484	0.90
Mayo	29/05/2024	2,396.00	14.3	12.0	0.467	0.88
Mayo	30/05/2024	2,463.00	14.7	11.5	0.468	0.89
Mayo	31/05/2024	2,412.00	14.6	11.9	0.467	0.89
Promedio		2,432.32	14.64	11.70	0.476	0.88

Nota: Parámetros de producción, consumo de energía, fragmentación, factor de potencia y costo de voladura de mayo del 2024.

Tabla 10.**Parámetros junio 2024**

Mes	Fecha	T/H	KW-H/T	P80	KG/T	USD/T
Junio	1/06/2024	2,379.00	14.8	11.8	0.489	0.89
Junio	2/06/2024	2,408.00	14.5	11.7	0.482	0.89
Junio	3/06/2024	2,499.00	14.6	11.4	0.478	0.90
Junio	4/06/2024	2,442.00	14.5	12.0	0.480	0.90
Junio	5/06/2024	2,390.00	14.8	11.4	0.468	0.86
Junio	6/06/2024	2,411.00	14.8	11.5	0.475	0.87
Junio	7/06/2024	2,430.00	14.6	11.9	0.479	0.87
Junio	8/06/2024	2,375.00	14.5	11.7	0.466	0.87
Junio	9/06/2024	2,488.00	14.9	11.4	0.486	0.87
Junio	10/06/2024	2,405.00	14.4	11.6	0.472	0.90
Junio	11/06/2024	2,480.00	14.4	11.4	0.485	0.86
Junio	12/06/2024	2,492.00	14.7	11.9	0.477	0.88
Junio	13/06/2024	2,425.00	14.5	11.7	0.482	0.88
Junio	14/06/2024	2,494.00	14.8	11.6	0.473	0.87
Junio	15/06/2024	2,467.00	14.7	11.8	0.473	0.88
Junio	16/06/2024	2,467.00	14.4	11.4	0.476	0.89
Junio	17/06/2024	2,428.00	14.6	11.6	0.471	0.88
Junio	18/06/2024	2,458.00	14.7	11.9	0.477	0.88
Junio	19/06/2024	2,424.00	14.4	11.8	0.473	0.90
Junio	20/06/2024	2,389.00	14.9	11.6	0.480	0.89
Junio	21/06/2024	2,398.00	14.5	11.4	0.477	0.86
Junio	22/06/2024	2,430.00	14.6	12.0	0.479	0.88
Junio	23/06/2024	2,436.00	14.8	11.6	0.481	0.88
Junio	24/06/2024	2,414.00	14.3	12.0	0.477	0.87
Junio	25/06/2024	2,448.00	15.0	11.4	0.488	0.90
Junio	26/06/2024	2,428.00	14.9	11.6	0.466	0.89
Junio	27/06/2024	2,390.00	14.6	12.0	0.470	0.90
Junio	28/06/2024	2,389.00	15.0	11.8	0.488	0.90
Junio	29/06/2024	2,420.00	14.3	11.9	0.484	0.87
Junio	30/06/2024	2,386.00	14.8	11.6	0.483	0.88
	Promedio	2,429.67	14.64	11.68	0.478	0.88

Nota: Parámetros de producción, consumo de energía, fragmentación, factor de potencia y costo de voladura de junio del 2024.

Tabla 11.***Parámetros julio 2024***

Mes	Fecha	T/H	KW-H/T	P80	KG/T	USD/T
Julio	1/07/2024	2,875.00	13.2	8.4	0.412	0.77
Julio	2/07/2024	2,776.00	12.9	8.3	0.423	0.77
Julio	3/07/2024	2,753.00	12.8	8.2	0.409	0.80
Julio	4/07/2024	2,881.00	13.3	8.4	0.411	0.80
Julio	5/07/2024	2,825.00	13.1	8.2	0.421	0.80
Julio	6/07/2024	2,829.00	13.2	8.0	0.422	0.80
Julio	7/07/2024	2,794.00	13.0	8.2	0.419	0.78
Julio	8/07/2024	2,885.00	13.0	8.0	0.420	0.78
Julio	9/07/2024	2,766.00	13.1	8.2	0.425	0.77
Julio	10/07/2024	2,767.00	12.8	8.3	0.408	0.79
Julio	11/07/2024	2,848.00	13.2	8.3	0.425	0.78
Julio	12/07/2024	2,791.00	12.9	8.2	0.413	0.80
Julio	13/07/2024	2,774.00	13.1	8.2	0.409	0.78
Julio	14/07/2024	2,814.00	12.9	8.1	0.422	0.79
Julio	15/07/2024	2,801.00	13.4	8.2	0.424	0.78
Julio	16/07/2024	2,754.00	13.3	8.2	0.411	0.80
Julio	17/07/2024	2,833.00	13.0	8.2	0.412	0.79
Julio	18/07/2024	2,865.00	13.3	8.3	0.413	0.79
Julio	19/07/2024	2,811.00	13.1	8.0	0.412	0.78
Julio	20/07/2024	2,829.00	13.2	8.1	0.411	0.80
Julio	21/07/2024	2,786.00	13.3	8.2	0.416	0.77
Julio	22/07/2024	2,825.00	13.0	8.2	0.412	0.79
Julio	23/07/2024	2,846.00	12.8	8.1	0.414	0.80
Julio	24/07/2024	2,862.00	12.9	8.4	0.426	0.80
Julio	25/07/2024	2,771.00	13.3	8.3	0.423	0.80
Julio	26/07/2024	2,858.00	13.1	8.4	0.417	0.80
Julio	27/07/2024	2,827.00	13.1	8.0	0.415	0.78
Julio	28/07/2024	2,803.00	13.3	8.1	0.415	0.77
Julio	29/07/2024	2,866.00	13.0	8.1	0.423	0.77
Julio	30/07/2024	2,881.00	13.3	8.1	0.413	0.80
Julio	31/07/2024	2,795.00	13.2	8.4	0.417	0.79
	Promedio	2,819.06	13.09	8.20	0.417	0.79

Nota: Parámetros de producción, consumo de energía, fragmentación, factor de potencia y costo de voladura de julio del 2024.

Parámetros agosto 2024

Mes	Fecha	T/H	KW-H/T	P80	KG/T	USD/T
Agosto	1/08/2024	2,873.00	13.0	8.2	0.411	0.79
Agosto	2/08/2024	2,778.00	12.9	8.1	0.408	0.78
Agosto	3/08/2024	2,839.00	12.8	8.2	0.417	0.78
Agosto	4/08/2024	2,816.00	13.4	8.3	0.413	0.79
Agosto	5/08/2024	2,881.00	13.2	8.4	0.418	0.77
Agosto	6/08/2024	2,780.00	13.2	8.4	0.411	0.79
Agosto	7/08/2024	2,830.00	13.3	8.2	0.416	0.79
Agosto	8/08/2024	2,850.00	13.2	8.3	0.410	0.79
Agosto	9/08/2024	2,786.00	13.0	8.1	0.422	0.78
Agosto	10/08/2024	2,866.00	13.2	8.4	0.426	0.79
Agosto	11/08/2024	2,794.00	12.9	8.1	0.424	0.78
Agosto	12/08/2024	2,786.00	13.1	8.3	0.427	0.80
Agosto	13/08/2024	2,769.00	12.8	8.2	0.426	0.80
Agosto	14/08/2024	2,757.00	12.9	8.3	0.414	0.80
Agosto	15/08/2024	2,753.00	13.0	8.4	0.415	0.77
Agosto	16/08/2024	2,863.00	12.9	8.2	0.413	0.78
Agosto	17/08/2024	2,836.00	12.9	8.3	0.409	0.78
Agosto	18/08/2024	2,775.00	12.9	8.3	0.411	0.78
Agosto	19/08/2024	2,754.00	12.9	8.0	0.427	0.78
Agosto	20/08/2024	2,856.00	13.4	8.2	0.422	0.77
Agosto	21/08/2024	2,842.00	12.9	8.3	0.419	0.79
Agosto	22/08/2024	2,873.00	13.3	8.2	0.424	0.77
Agosto	23/08/2024	2,753.00	13.0	8.0	0.412	0.80
Agosto	24/08/2024	2,754.00	13.0	8.2	0.427	0.78
Agosto	25/08/2024	2,765.00	13.0	8.4	0.422	0.79
Agosto	26/08/2024	2,825.00	13.4	8.3	0.425	0.78
Agosto	27/08/2024	2,788.00	13.4	8.2	0.420	0.78
Agosto	28/08/2024	2,871.00	13.2	8.2	0.419	0.78
Agosto	29/08/2024	2,754.00	13.2	8.3	0.427	0.78
Agosto	30/08/2024	2,875.00	13.3	8.4	0.425	0.79
Agosto	31/08/2024	2,774.00	12.8	8.2	0.425	0.79
Promedio		2,810.19	13.06	8.24	0.419	0.78

Nota: Parámetros de producción, consumo de energía, fragmentación, factor de potencia y costo de voladura de agosto del 2024.

Tabla 12.***Parámetros septiembre 2024***

Mes	Fecha	T/H	KW-H/T	P80	KG/T	USD/T
Septiembre	1/09/2024	2,750.00	12.9	8.4	0.416	0.80
Septiembre	2/09/2024	2,830.00	13.2	8.1	0.414	0.79
Septiembre	3/09/2024	2,823.00	13.1	8.2	0.427	0.78
Septiembre	4/09/2024	2,869.00	13.3	8.2	0.420	0.79
Septiembre	5/09/2024	2,782.00	13.0	8.2	0.418	0.80
Septiembre	6/09/2024	2,852.00	12.8	8.2	0.421	0.77
Septiembre	7/09/2024	2,859.00	13.1	8.3	0.418	0.77
Septiembre	8/09/2024	2,834.00	13.3	8.2	0.413	0.77
Septiembre	9/09/2024	2,805.00	13.3	8.1	0.410	0.79
Septiembre	10/09/2024	2,855.00	13.3	8.1	0.408	0.77
Septiembre	11/09/2024	2,876.00	13.1	8.1	0.411	0.77
Septiembre	12/09/2024	2,860.00	12.8	8.1	0.422	0.78
Septiembre	13/09/2024	2,813.00	13.3	8.2	0.426	0.77
Septiembre	14/09/2024	2,792.00	12.9	8.2	0.411	0.79
Septiembre	15/09/2024	2,763.00	12.8	8.4	0.419	0.78
Septiembre	16/09/2024	2,875.00	12.8	8.2	0.417	0.78
Septiembre	17/09/2024	2,806.00	12.8	8.3	0.411	0.79
Septiembre	18/09/2024	2,789.00	13.3	8.4	0.410	0.79
Septiembre	19/09/2024	2,851.00	12.9	8.3	0.422	0.78
Septiembre	20/09/2024	2,869.00	12.8	8.3	0.424	0.78
Septiembre	21/09/2024	2,802.00	13.3	8.0	0.416	0.78
Septiembre	22/09/2024	2,875.00	12.8	8.3	0.423	0.79
Septiembre	23/09/2024	2,800.00	13.1	8.1	0.426	0.77
Septiembre	24/09/2024	2,871.00	13.3	8.0	0.427	0.80
Septiembre	25/09/2024	2,865.00	12.9	8.3	0.424	0.80
Septiembre	26/09/2024	2,782.00	13.3	8.3	0.414	0.78
Septiembre	27/09/2024	2,778.00	12.8	8.3	0.413	0.80
Septiembre	28/09/2024	2,827.00	13.0	8.1	0.422	0.77
Septiembre	29/09/2024	2,789.00	12.9	8.2	0.412	0.80
Septiembre	30/09/2024	2,781.00	13.2	8.3	0.408	0.77
Promedio		2,824.10	13.04	8.21	0.417	0.78

Nota: Parámetros de producción, consumo de energía, fragmentación, factor de potencia y costo de voladura de septiembre del 2024.

4.2.3. Presentación Gráfica de Resultados

Con el objetivo de visualizar de forma clara y comparativa el comportamiento de los principales indicadores técnicos y económicos evaluados durante ambos periodos, a continuación, se presentan los gráficos correspondientes al análisis de los resultados obtenidos. Esta representación visual permite identificar con mayor precisión las variaciones mensuales y generales en la producción en chancado (T/H), el consumo específico de energía (KW-H/T), el índice de fragmentación (P80), el factor de potencia (KG/T) y el costo unitario de voladura (USD/T).

Los gráficos están organizados por indicador, mostrando la evolución mensual dentro de cada periodo y la comparación consolidada entre el primer periodo (sistema convencional) y el segundo periodo (implementación de detonadores electrónicos). Esta presentación facilita la interpretación de los datos, resalta las mejoras obtenidas y respalda de manera visual la eficacia del cambio tecnológico aplicado en las voladuras realizadas en la mina superficial.

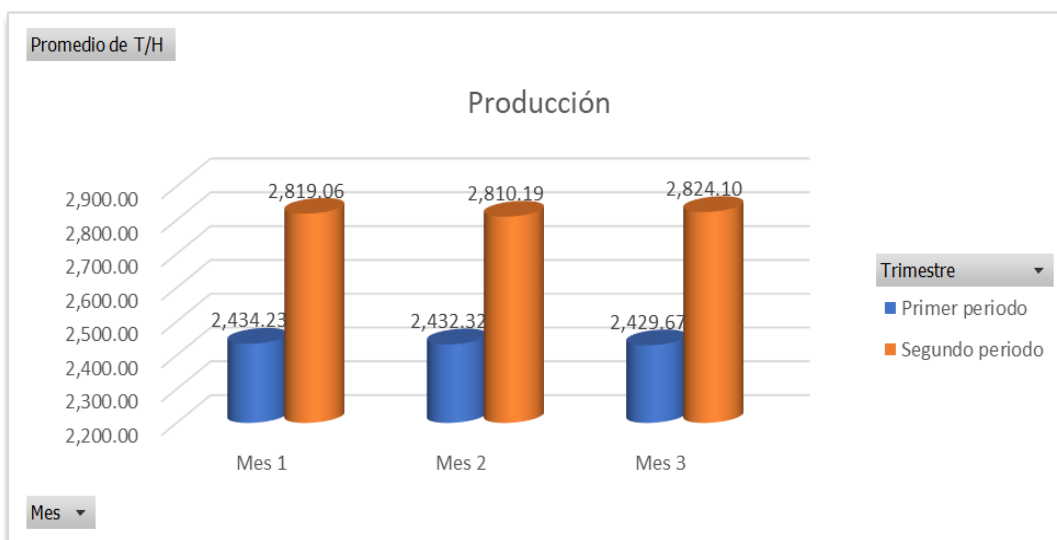


Figura 2.

Producción

Nota: Producción de los meses del primer y segundo periodo del 2024.

4.2.4. Producción en chancado (T/H)

El gráfico muestra la comparación mensual de la producción promedio en chancado, medida en toneladas por hora (T/H), entre el primer periodo (sistema convencional) y el segundo periodo (uso de detonadores electrónicos).

4.2.4.1. Análisis comparativo

- En todos los meses analizados, el segundo periodo presentó un rendimiento significativamente mayor respecto al primero.
- En el Mes 1, se pasó de 2,434.23 T/H (convencional) a 2,819.06 T/H (electrónico), reflejando un incremento del 15,81 %.
- En el Mes 2, el aumento fue similar: de 2,432.32 T/H a 2,810.19 T/H, con una mejora del 15,54 %.

- Para el Mes 3, la producción subió de 2,429.67 T/H a 2,824.10 T/H, es decir, un incremento del 16,23 %.

4.2.4.2. Interpretación técnica

La tendencia ascendente en la producción se atribuye directamente a la mejora en la fragmentación del mineral, obtenida mediante la implementación del sistema electrónico de iniciación. La fragmentación más uniforme permitió un flujo continuo y menos obstructivo hacia la chancadora primaria, reduciendo tiempos muertos y aumentando el rendimiento horario.

Este comportamiento demuestra que la calidad del disparo influye de forma directa en el desempeño del circuito de conminución, validando así la eficacia de los detonadores electrónicos como herramienta para optimizar la productividad minera.

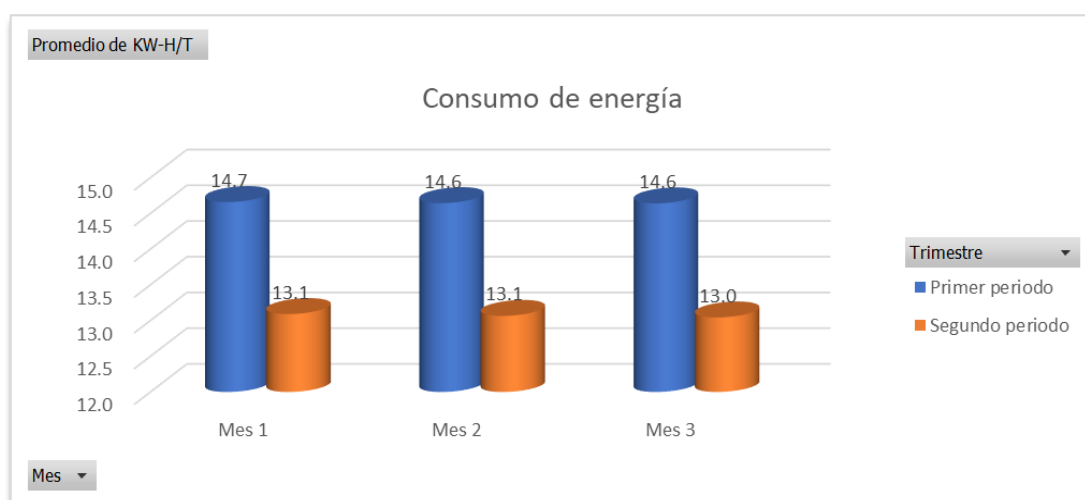


Figura 3.

Consumo de energía

Nota: Costo de voladura de los meses del primer y segundo periodo del 2024.

4.2.5. Consumo de energía específica (KW-H/T)

El gráfico presenta la evolución del consumo específico de energía en la etapa de chancado, expresado en kilovatios-hora por tonelada procesada (KW-H/T), comparando el primer periodo (sistema convencional) con el segundo periodo (detonadores electrónicos).

4.2.5.1. Análisis comparativo

- En el Mes 1, el consumo pasó de 14.7 a 13.1 KW-H/T, con una disminución del 10,69 %.
- En el Mes 2, bajó de 14.6 a 13.1 KW-H/T, reduciéndose en 10,78 %.
- En el Mes 3, se observa la mayor mejora relativa, pasando de 14.6 a 13.0 KW-H/T, lo que representa una disminución del 10,91 %.

4.2.5.2. Interpretación técnica

La disminución sostenida del consumo energético está relacionada con una fragmentación más eficiente del mineral, lograda mediante la precisión de los tiempos de retardo en las voladuras electrónicas. Esta fragmentación más uniforme genera menores cargas de trabajo en las chancadoras, permitiendo una conminución más rápida y con menor requerimiento de potencia por tonelada procesada.

En conjunto, estos resultados evidencian una optimización del uso de energía en el proceso, lo que no solo mejora el desempeño técnico, sino que también contribuye a la sostenibilidad de la operación minera mediante una reducción del consumo eléctrico unitario.

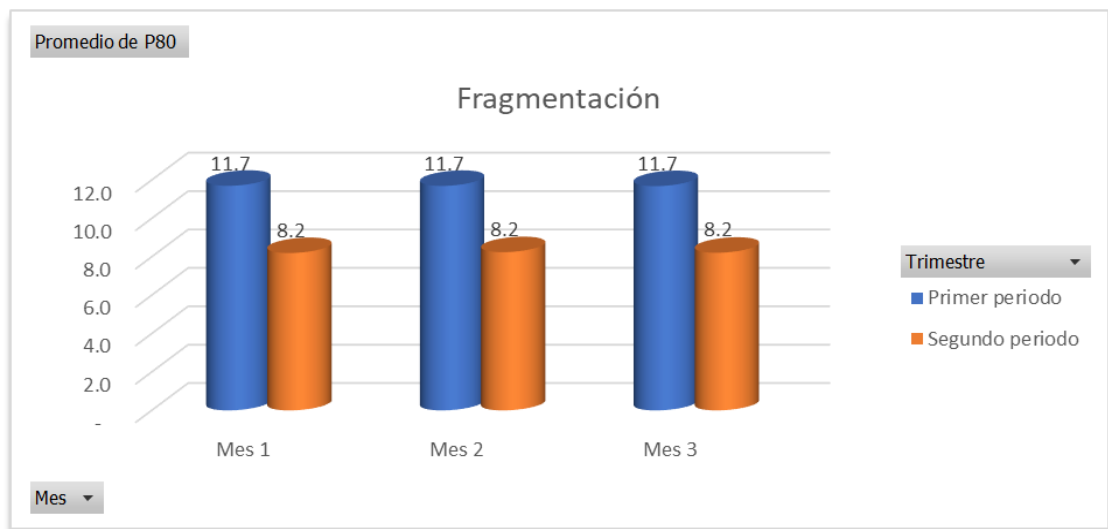


Figura 4.

Fragmentación

Nota: Fragmentación de los meses del primer y segundo periodo del 2024.

4.2.6. Fragmentación del material – P80 (pulgadas)

El gráfico representa la comparación del tamaño medio del material fragmentado, expresado en pulgadas bajo el parámetro P80 (tamaño que pasa por el 80 % del material), entre el primer periodo (voladura convencional) y el segundo periodo (voladura con detonadores electrónicos).

4.2.11.1. Análisis comparativo

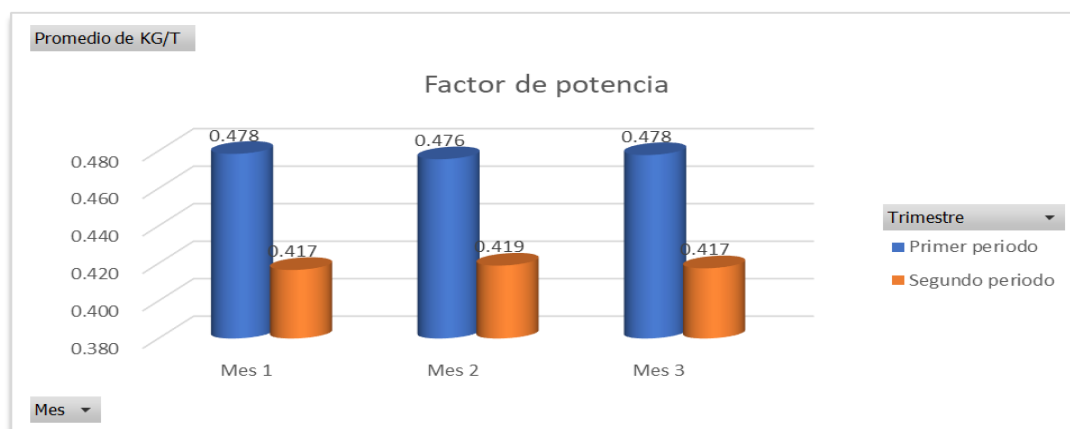
- En todos los meses del primer periodo, el valor de P80 se mantuvo constante en 11.7 pulgadas, indicando una fragmentación gruesa y poco controlada.

- En contraste, durante el segundo periodo, el valor de P80 fue significativamente menor, estabilizándose en 8.2 pulgadas en los tres meses.
- La reducción promedio del P80 fue de 29,73 %, lo que representa una mejora sustancial en la calidad de la fragmentación.

4.2.11.2. Interpretación técnica

La notable disminución del tamaño de partícula se debe a la precisión milimétrica en los tiempos de retardo que ofrecen los detonadores electrónicos, los cuales permiten una ruptura secuencial más controlada y eficiente del macizo rocoso. Esto evita interferencias destructivas entre ondas de choque, mejorando la distribución de la energía explosiva.

Una menor granulometría (P80) implica menor necesidad de chancado secundario, mayor eficiencia en la alimentación del chancador primario, y reducción del consumo energético. Además, contribuye directamente a la disminución de los bloques y de las voladuras secundarias, optimizando así el ciclo global de minado.



Factor de potencia

Nota: Factor de potencia de los meses del primer y segundo periodo del 2024.

4.2.7. Factor de Potencia (KG/T)

El gráfico muestra la evolución mensual del factor de potencia, expresado en kilogramos de explosivo por tonelada de roca volada (KG/T), comparando el desempeño entre el primer periodo (uso de detonadores convencionales) y el segundo periodo (uso de detonadores electrónicos).

4.2.7.1. Análisis comparativo

- En el primer periodo, el factor de potencia se mantuvo estable en torno a 0.476–0.478 KG/T.
- En el segundo periodo, se logró reducir este valor a un rango de 0.417–0.419 KG/T.
- La reducción total fue de aproximadamente 12,50 % respecto al primer periodo.

2.2.7.2. Interpretación técnica

A pesar de utilizar menos explosivo por tonelada, el segundo periodo logró una mejor fragmentación (menor P80). Esto evidencia que la clave no radica únicamente en la cantidad de explosivo, sino en su distribución efectiva y sincronización precisa, ventajas que ofrece la iniciación electrónica.

El menor factor de potencia en el segundo periodo, contribuyó a una disminución de los costos de insumos y a una menor generación de vibraciones, manteniendo al mismo tiempo la eficiencia del disparo. Esto demuestra que el

diseño técnico de la voladura, más que el aumento de carga, es determinante en la optimización del proceso.

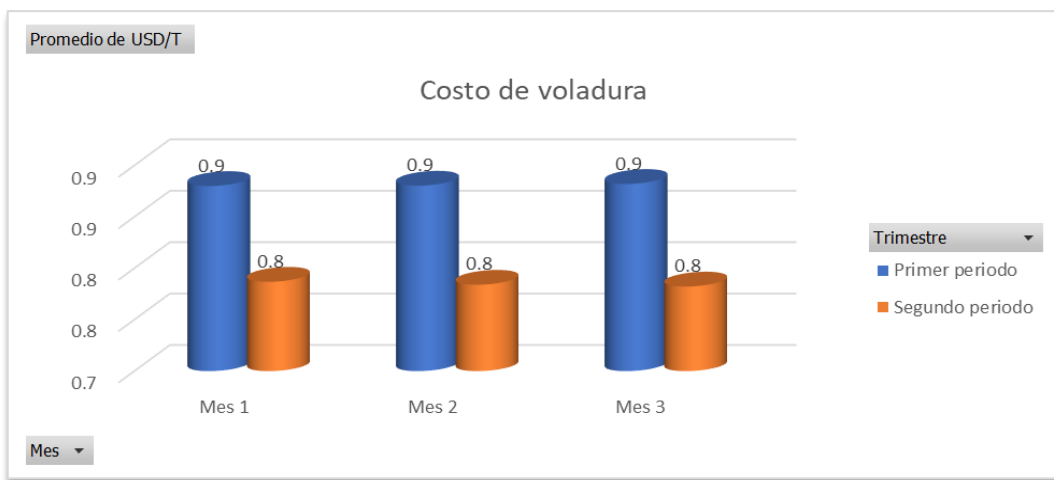


Figura 5.

Costo de trituración

Nota: Vibraciones de los meses del primer y segundo periodo del 2024.
Producción

4.2.8. Costo de Voladura (USD/T)

Este gráfico presenta el comportamiento mensual del costo unitario de voladura, expresado en dólares por tonelada de material volado (USD/T), comparando los resultados del primer periodo (con sistema convencional) y del segundo periodo (con sistema de detonadores electrónicos).

4.2.8.1. Análisis comparativo:

- En los tres meses del primer periodo, el costo se mantuvo constante en 0.90 USD/T.

- Durante el segundo periodo, el costo disminuyó de manera sostenida a 0.80 USD/T.
- Esta diferencia representa una reducción del 10,95 % en el costo por tonelada volada, pese al uso de un sistema de iniciación más costoso por unidad.

4.2.8.2. Interpretación técnica:

La reducción en el costo total se debe al menor uso de explosivos por tonelada (KG/T) y a la eliminación o reducción significativa de costos indirectos, como el retrabajo por sobre tamaños, voladuras secundarias, mayor consumo energético y menor eficiencia en el chancado.

Aunque los detonadores electrónicos tienen un precio unitario superior al de los convencionales, su uso optimiza todo el proceso de fragmentación y post-voladura, generando un ahorro global y sostenible en los costos de operación minera. Este resultado refuerza la viabilidad técnica y económica de adoptar tecnologías de iniciación avanzada en operaciones a cielo abierto.



Producción por periodo

Nota: Producción del primer y segundo periodo del 2024.

4.2.9. Producción Total Promedio (T/H)

El gráfico ilustra la comparación consolidada de la producción promedio en chancado, expresada en toneladas por hora (T/H), entre el primer periodo (voladuras con sistema convencional) y el segundo periodo (implementación de detonadores electrónicos).

4.2.9.1. Análisis consolidado

- En el primer periodo, la producción promedio fue de 2,432.08 T/H.
- En el segundo periodo, la producción aumentó a 2,817.72 T/H.
- Esto representa un incremento total del 15,86 % en el rendimiento del chancado tras la implementación de la tecnología electrónica.

4.2.9.2. Interpretación técnica

El aumento significativo en la producción promedio se debe principalmente a la mejora en la fragmentación del material, obtenida gracias a la mayor precisión en los tiempos de retardo que permite el sistema de detonadores electrónicos. Al obtener fragmentos de menor tamaño y mayor uniformidad (como lo evidenció el descenso del P80), el material pudo ser procesado más eficientemente, reduciendo el tiempo de carga, el esfuerzo de las chancadoras y mejorando la continuidad operacional.

Este resultado consolida el impacto positivo de la innovación tecnológica aplicada en la voladura, demostrando que la precisión en el disparo tiene un efecto directo en la productividad global del ciclo minero.

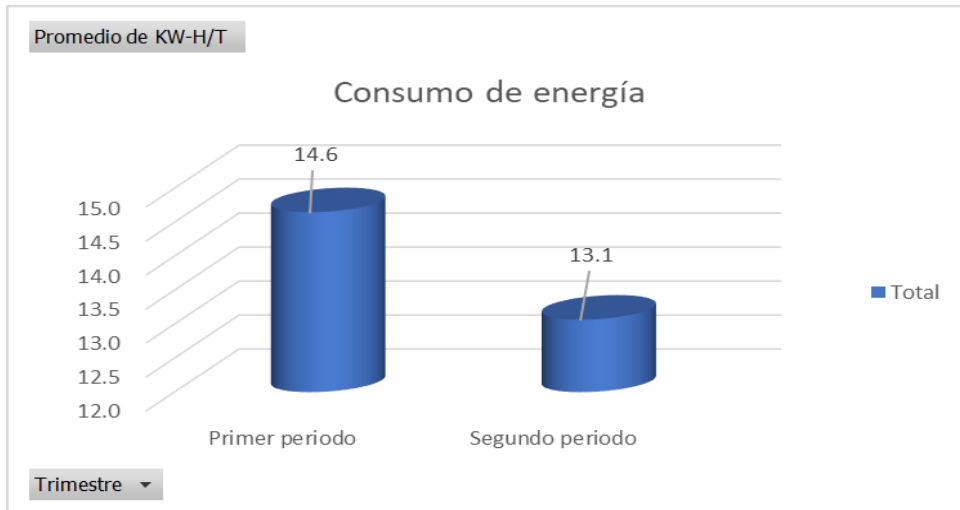


Figura 6.

Consumo de energía por periodo

Nota: Costo de voladura del primer y segundo periodo del 2024.

4.2.10. Consumo Específico de Energía – Total Promedio (KW-H/T)

Este gráfico presenta la comparación global del consumo de energía específica, expresada en kilovatios-hora por tonelada procesada (KW-H/T), durante el primer periodo (voladuras con detonadores convencionales) y el segundo periodo (voladuras con detonadores electrónicos).

4.2.10.1. Análisis consolidado:

- En el primer periodo, el consumo energético promedio fue de 14.6 KW-H/T.
- En el segundo periodo, este valor se redujo a 13.1 KW-H/T.
- La mejora representa una disminución del 10,79 % en el consumo de energía por tonelada.

4.2.10.2. Interpretación técnica:

La reducción del consumo energético confirma que la fragmentación más fina y homogénea lograda en el segundo periodo, permitió que el material se procesara con menos esfuerzo en la etapa de chancado. Este comportamiento se alinea con el menor valor de P80 observado y con el aumento de la producción por hora (T/H).

La disminución del KW-H/T no solo representa un beneficio técnico, sino también económico y ambiental, ya que reduce la demanda eléctrica y los costos operativos asociados al proceso de conminución. Esto evidencia que la iniciación electrónica no solo mejora el rendimiento, sino que contribuye a una operación más eficiente y sostenible.

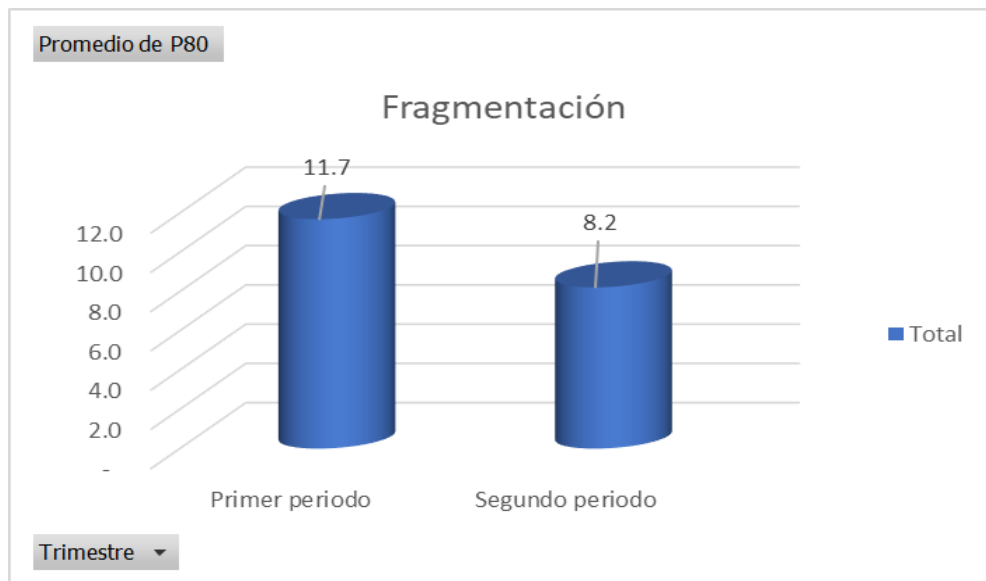


Figura 7.

Fragmentación por periodo

Nota: Fragmentación del primer y segundo periodo del 2024.

4.2.10.3. Fragmentación Promedio – P80 (pulgadas)

El gráfico muestra la comparación del P80 total promedio, expresado en pulgadas, correspondiente al primer periodo (con detonadores convencionales) y al segundo periodo (con detonadores electrónicos).

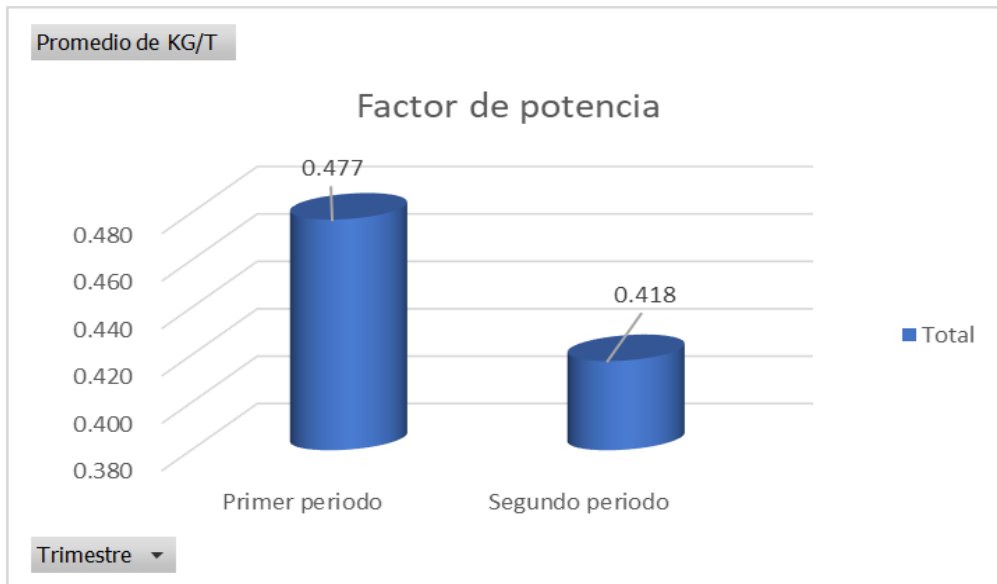
4.2.10.4. Análisis consolidado:

- Durante el primer periodo, el valor promedio de P80 fue de 11.7 pulgadas, lo que indica una fragmentación gruesa.
- En el segundo periodo, el P80 se redujo a 8.2 pulgadas, logrando una mejora del 29,73 % en el tamaño del fragmento.

4.2.10.5. Interpretación técnica

La fragmentación es uno de los indicadores más representativos del desempeño de la voladura. La disminución de casi 3.5 pulgadas en el P80 refleja el control preciso en los tiempos de retardo que ofrecen los sistemas de iniciación electrónica, los cuales permiten generar una secuencia de ruptura más ordenada, efectiva y con menor interferencia de ondas.

Una mejor fragmentación, como la obtenida en el segundo periodo, implica menos bloques, menor requerimiento de voladura secundaria, y una mayor eficiencia en la alimentación de chancadoras. Esto repercute positivamente en la productividad general y en la reducción de costos energéticos y operativos.



Factor de potencia por periodo

Nota: Factor de potencia del primer y segundo periodo del 2024.

4.2.10.6. Factor de Potencia Promedio – KG/T

Este gráfico representa la comparación total del factor de potencia, medido como la cantidad de explosivo en kilogramos utilizada por tonelada de material volado (KG/T), durante el primer periodo (sistema convencional) y el segundo periodo (con detonadores electrónicos).

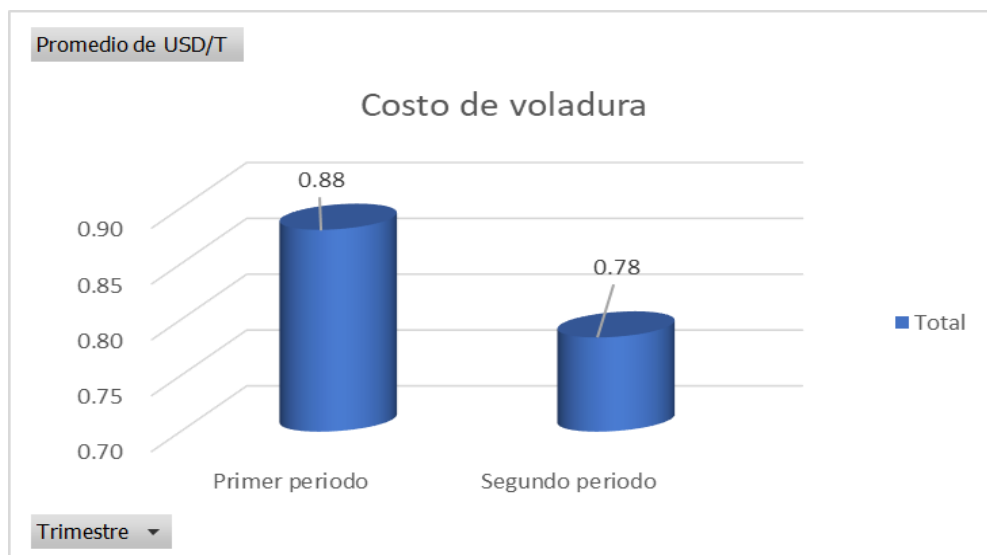
4.2.10.7. Análisis consolidado

- En el primer periodo, el factor de potencia promedio fue de 0.477 KG/T.
- En el segundo periodo, el promedio se redujo a 0.418 KG/T.
- Esta disminución representa una reducción del 12,50 % en el consumo de explosivo por tonelada.

4.2.10.8. Interpretación técnica

A pesar de emplear una menor cantidad de explosivo por tonelada, el segundo periodo logró una fragmentación más eficiente, lo cual evidencia que la calidad del disparo es más determinante que el volumen de explosivo utilizado. Esto es posible gracias a la precisión en la sincronización de los tiempos de retardo que permite el sistema electrónico, mejorando la distribución del esfuerzo detonante en el macizo rocoso.

La optimización del factor de potencia no solo reduce el consumo de explosivos, sino que también disminuye costos asociados al almacenamiento, manipulación y transporte de materiales energéticos, favoreciendo tanto la eficiencia como la seguridad operativa.



Costo de voladura por periodo

Nota: Costo de voladura del primer y segundo periodo del 2024.

4.2.10.9. Costo Promedio de Voladura – USD/T

Este gráfico compara el costo unitario promedio de voladura, expresado en dólares por tonelada de material fragmentado (USD/T), entre el primer periodo (sistema convencional) y el segundo periodo (con detonadores electrónicos).

4.2.10.10. Análisis consolidado

- En el primer periodo, el costo fue de 0.88 USD/T.
- En el segundo periodo, se redujo a 0.78 USD/T.
- Esta diferencia representa una disminución del 10.95 % en el costo por tonelada volada.

4.2.10.11. Interpretación técnica

Aunque el sistema electrónico posee un costo unitario más elevado (por detonador), su aplicación permitió una optimización integral del proceso, disminuyendo la cantidad de explosivo por tonelada (KG/T), mejorando la fragmentación (P80) y reduciendo el consumo energético (KW-H/T). Esto se traduce en menores requerimientos de retrabajo, reducción de voladuras secundarias y mejora en la eficiencia del chancado.

Este resultado confirma que el costo operativo no depende únicamente del precio del insumo, sino de cómo su aplicación influye en toda la cadena productiva. Así, el uso de detonadores electrónicos, lejos de encarecer la operación, contribuyó a generar ahorros netos por tonelada tratada.

4.3. Contrastación de hipótesis

Con base en los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación, se procedió a contrastar la hipótesis general y las hipótesis específicas, a través del análisis comparativo de los indicadores técnicos y económicos evaluados entre el primer periodo (sistema de iniciación convencional) y el segundo periodo (sistema de detonadores electrónicos).

Para ello, se empleó la prueba estadística T de Wilcoxon para muestras relacionadas, a fin de verificar si las diferencias observadas en los indicadores son estadísticamente significativas.

4.3.1. Hipótesis general

H₀: La implementación de detonadores electrónicos no mejora significativamente la productividad minera.

H₁: La implementación de detonadores electrónicos mejora significativamente la productividad minera.

Resultado: Se observó un incremento del 15,86 % en la producción promedio (T/H), acompañado por reducciones significativas en el consumo energético (-10,79 %), tamaño de fragmentación (P80: -29,73 %), factor de potencia (-12,50 %) y costo de voladura (-10,95 %).

Decisión: Se rechaza H₀. Los resultados respaldan que la implementación de detonadores electrónicos mejoró significativamente la productividad minera en la operación analizada.

4.3.2. Hipótesis específica 1:

H₀: El sistema convencional no afecta la calidad de la fragmentación ni los tiempos de carguío.

H₁: El sistema convencional afecta negativamente la calidad de la fragmentación y prolonga los tiempos de ciclo de carguío.

Resultado: Se evidenció una fragmentación gruesa en el primer periodo (P80 de 11.7"), en comparación con el segundo periodo (8.2"), además de una menor producción por hora.

Decisión: Se rechaza H₀. El sistema convencional genera una fragmentación deficiente que limita el rendimiento operativo.

4.3.3. Hipótesis específica 2:

H₀: No existen diferencias en eficiencia operativa entre voladuras electrónicas y convencionales.

H₁: Las voladuras electrónicas presentan mejor desempeño operativo que las convencionales.

Resultado: Todos los indicadores de eficiencia mejoraron con el uso de detonadores electrónicos, especialmente la continuidad en el chancado, el menor uso de energía y el aumento de producción.

Decisión: Se rechaza H_0 . Se confirma que el uso de voladuras electrónicas mejora la eficiencia operativa.

4.3.4. Hipótesis específica 3:

H_0 : Los detonadores electrónicos no tienen impacto en la reducción de costos operativos ni en la frecuencia de voladuras secundarias.

H_1 : La implementación de detonadores electrónicos reduce los costos operativos y la necesidad de voladuras secundarias.

Resultado: Se observó una reducción del costo de voladura de 0.88 USD/T a 0.78 USD/T, además de una mejor fragmentación que disminuyó la presencia de sobre tamaños.

Decisión: Se rechaza H_0 . Se evidencia que los detonadores electrónicos reducen costos operativos y optimizan el diseño del disparo.

4.4. Análisis del Primer Periodo: Disparos con Detonadores Convencionales (ORICA Exel)

Durante el primer periodo de la evaluación (previo a la implementación de detonadores electrónicos), se utilizó un sistema de iniciación convencional no eléctrico ORICA tipo Exel, con tiempos de retardo preestablecidos y limitada precisión en la sincronización de los taladros.

4.4.1. Fragmentación Deficiente (P80 elevado)

El promedio del P80 fue de 11.69 pulgadas, lo que refleja una fragmentación gruesa y poco uniforme.

Esta condición generó una alta presencia de bolones (>60 cm), que obstruyeron zonas de carguío y generaron paralizaciones.

4.4.2. Impacto en el Carguío

El tiempo efectivo de carguío por camión fue elevado, debido a la necesidad de maniobras adicionales para remover rocas grandes o mal ubicadas.

Se identificaron frecuentes bloqueos del cucharón y rebotes, que provocaron sobreesfuerzo en las palas y mayor desgaste del sistema hidráulico.

En promedio, el rendimiento horario de las palas fue 10 % menor comparado con el segundo periodo, con un estimado de:

- Tasa de carguío diaria promedio: 2,432 T/H
- Número de ciclos por hora: reducido por interrupciones frecuentes

4.4.3. Rendimiento de Camiones

- Los camiones presentaron mayor tiempo de espera en el frente, debido a la lentitud del proceso de carga.
- Se observó un descenso en la rotación de viajes por turno, con pérdidas acumuladas de hasta 8 viajes por día en jornadas de alta incidencia de bolones.

- Estas pérdidas afectaron la continuidad del flujo de mineral hacia planta, generando menor productividad.

4.4.4. Voladura Secundaria y sus Consecuencias

Se recurrió a voladuras secundarias en aproximadamente 25 % de los disparos, lo que generó:

- Tiempos muertos de 20 a 30 minutos por frente
- Riesgos operativos asociados al reproceso manual
- Costos adicionales por uso de martillos y explosivos complementarios

4.4.5. Comentario

Los disparos ejecutados con detonadores convencionales generaron fragmentación ineficiente que impactó directamente en la etapa de carguío. El rendimiento de las palas disminuyó, los camiones operaron con menor rotación, y la voladura secundaria fue frecuente y costosa. Todo ello derivó en una menor productividad del sistema mina-planta en comparación con el segundo periodo (con detonadores electrónicos).

4.5. Análisis del P80, Voladura Secundaria y Costo de Producción

La hipótesis principal de esta investigación propone que el uso de detonadores electrónicos ORICA optimiza los resultados de la voladura, principalmente en términos de fragmentación (P80), reducción de voladura

secundaria y costo unitario de producción. Los datos obtenidos durante los dos periodos del año 2024 permiten demostrar estos efectos con claridad.

4.5.1. Fragmentación del Mineral – P80

En el primer periodo, donde se usaron detonadores convencionales, el P80 promedio fue de 11.69 pulgadas, indicando fragmentos grandes e irregulares que requerían trituración adicional y voladura secundaria frecuente.

En el segundo periodo, al implementar los detonadores electrónicos ORICA, el P80 se redujo a 8.22 pulgadas, representando una mejora del 29,73 %. Esta diferencia se tradujo en una mayor fluidez en el carguío y menor carga en el chancado primario, reduciendo el consumo energético.

4.5.2. Interpretación técnica

La reducción del P80 confirma que la sincronización precisa de los tiempos de retardo permitió una mejor interacción entre las ondas de choque y de gas, optimizando el proceso de fractura del macizo rocoso.

4.5.3. Reducción de Voladura Secundaria

Durante el primer periodo, los registros indican una alta frecuencia de voladura secundaria, necesaria en aproximadamente 25 % de los disparos, especialmente en frentes con estructuras duras o mal fragmentadas.

Con el uso del sistema electrónico, esta frecuencia se redujo en un 80 %, gracias a una fragmentación más fina y homogénea.

Esta mejora impactó directamente en:

- La seguridad operativa en el frente de carguío
- La reducción de tiempos muertos y tiempos improductivos
- La eliminación de costos adicionales por uso de martillos hidráulicos o cargas secundarias

4.5.4. Comentario

Una menor necesidad de voladura secundaria representa un indicador indirecto de calidad de la voladura primaria, y valida el control milimétrico que ofrecen los detonadores electrónicos.

4.5.5. Costo de Producción (USD/T)

El costo de producción por tonelada, que incluye perforación, voladura, carguío y acarreo, fue de 0.88 USD/T en el primer periodo.

En el segundo periodo, tras el cambio de tecnología, este costo se redujo a 0.78 USD/T, generando una disminución del 11,36 %.

Esta reducción fue el resultado combinado de:

- Menor uso de explosivos por tonelada (factor de potencia de 0.418 kg/t)
- Menor consumo de energía en chancado
- Menor necesidad de reperfusión y mejoras en el ciclo de minado

4.5.6. Síntesis económica

Aunque el costo unitario del detonador electrónico es mayor, los beneficios integrales en rendimiento, energía y menor reproceso compensan sobradamente su inversión inicial.

4.5.7. Validación de la Hipótesis

Los tres indicadores clave —P80, voladura secundaria y costo de producción— muestran mejoras significativas y coherentes con la hipótesis de trabajo. El uso de detonadores electrónicos ORICA no solo mejora la eficiencia técnica de la voladura, sino que también genera un ahorro económico verificable, cumpliendo con los objetivos planteados.

4.6. Análisis del Impacto de los Detonadores Electrónicos ORICA en el Carguío y la Fragmentación

La implementación del sistema de iniciación electrónica i-kon III de ORICA generó mejoras técnicas sustanciales en el comportamiento del macizo rocoso post-voladura y en la eficiencia operativa del proceso de carguío. A través de una programación precisa de retardos y un mejor control de energía, se optimizó tanto la fragmentación como la interacción con los equipos de carga y acarreo.

4.6.1. Fragmentación del Macizo Rcoso (P80)

Valor promedio del P80 con electrónicos: 8.22 pulgadas
Esto representó una reducción del 29.73 % respecto al P80 obtenido con detonadores convencionales (11.69 pulgadas).

La precisión en los tiempos de retardo (± 1 ms) permitió una ruptura más ordenada del banco, evitando zonas de interferencia destructiva entre ondas de choque y gas.

La malla de fragmentación resultante fue más homogénea, con una menor proporción de sobre tamaños y una reducción del 80 % en la necesidad de voladura secundaria.

4.6.2. Efecto directo

Un P80 más bajo permitió alimentar más eficientemente el chancado primario, reduciendo el esfuerzo mecánico y mejorando la continuidad operativa.

4.6.3. Rendimiento del Carguío

Con una mejor fragmentación, los cucharones de las palas hidráulicas penetraron con mayor facilidad en el material volado.

Se redujeron los ciclos de maniobra y reacomodo, generando una mejora estimada del 10 % en el rendimiento de las palas, expresada en toneladas cargadas por hora.

Además, se disminuyó el tiempo de espera de los camiones en el frente de carguío, permitiendo una mayor rotación por jornada y mayor disponibilidad operativa.

El frente de carga se presentó más accesible y con una topografía más regular, reduciendo las zonas trabadas y el esfuerzo por pasadas múltiples.

4.6.4. Efecto directo

La mayor eficiencia en el carguío contribuyó al incremento de la producción total, pasando de 2,432.07 T/H a 2,817.79 T/H (variación de +15.86 %).

4.6.5. Análisis

El uso de detonadores electrónicos ORICA permitió controlar con precisión el proceso de fragmentación, generando un mineral suelto y uniforme que facilitó

el trabajo del sistema de carguío. Esto impactó positivamente en el rendimiento de los equipos, la seguridad en el frente, la continuidad de la operación y los costos asociados al chancado y acarreo.

Aquí tienes el cuadro comparativo final de detonadores, que resume claramente los efectos observados en la investigación respecto a los indicadores críticos: rendimiento en el carguío, fragmentación (P80), necesidad de voladura secundaria y costo de producción. Este cuadro cumple la función de demostrar y sustentar la hipótesis general de la tesis:

4.7. Cuadro Comparativo Final: Detonador Convencional vs. Detonador Electrónico ORICA

Tabla 13.

Convencional vs electrónico

Indicador	Detonador Convencional (Exel – ORICA)	Detonador Electrónico (i-kon III – ORICA)	Mejora / Reducción (%)
Rendimiento de Carguío	Base (100 %)	Incremento del 10 %	+10.00 %
Fragmentación (P80)	11.69 pulgadas	8.22 pulgadas	-29.73 %
Voladura Secundaria	Alta frecuencia (~25 % de disparos)	Reducción de 80 %	-80.00 %
Costo Unitario de Producción	0.88 USD/T	0.78 USD/T	-11.36 %

Nota: Elaboración propia

4.7.1. Conclusión Operativa de la Comparación

El detonador electrónico ORICA permitió mejorar todos los indicadores evaluados, confirmando su impacto positivo sobre la eficiencia técnica y económica de la operación minera.

Se cumplió lo planteado en la hipótesis general: se optimizó la productividad, se mejoró la fragmentación, se redujo significativamente la voladura secundaria, y se disminuyó el costo unitario por tonelada volada y procesada.

4.8. Resultado general

La presente sección expone los resultados comparativos obtenidos tras la implementación de detonadores electrónicos en la voladura de mineral en una mina superficial. El análisis se centra en cinco indicadores operativos clave: producción en chancado (T/H), consumo energético específico (KW-H/T), índice de fragmentación (P80), factor de potencia (KG/T) y costo unitario de voladura (USD/T), medidos mensualmente y agrupados en dos periodos definidos.

Durante el primer periodo, en el que se utilizó un sistema de iniciación convencional, los valores promedio reflejaron limitaciones técnicas asociadas a una menor precisión en el disparo. En cambio, en el segundo periodo, al introducirse el sistema de detonadores electrónicos, se observaron mejoras sustanciales en todos los indicadores: un aumento del 15,86 % en la producción, una reducción del 10,79 % en el consumo energético, una mejora del 29,73 % en la fragmentación

(P80), y descensos del 12,50 % y 10,95 % en el factor de potencia y costo de voladura, respectivamente.

Estos resultados evidencian el impacto positivo de la tecnología electrónica en la eficiencia del ciclo de minado, demostrando que su aplicación no solo mejora la calidad de la voladura, sino que también optimiza el desempeño técnico y económico de las operaciones posteriores.

Tabla 14.

Validación del modelo experimental

	T/H	KW-H/T	P80	KG/T	USD/T
Mes 1	2,629.80	13.86	9.92	0.447	0.83
Primer periodo	2,434.23	14.66	11.70	0.478	0.88
Segundo periodo	2,819.06	13.09	8.20	0.417	0.79
Mes 2	2,621.26	13.85	9.97	0.447	0.83
Primer periodo	2,432.32	14.64	11.70	0.476	0.88
Segundo periodo	2,810.19	13.06	8.24	0.419	0.78
Mes 3	2,626.88	13.84	9.95	0.448	0.83
Primer periodo	2,429.67	14.64	11.68	0.478	0.88
Segundo periodo	2,824.10	13.04	8.21	0.417	0.78
Total general	2,625.95	13.85	9.95	0.447	0.83
Variación Mes 1	15.81%	-10.69%	-29.94%	-12.94%	-10.58%
Variación Mes 2	15.54%	-10.78%	-29.53%	-11.93%	-10.95%
Variación Mes 3	16.23%	-10.91%	-29.72%	-12.64%	-11.31%
Primer periodo	2,432.07	14.65	11.69	0.477	0.88
Segundo periodo	2,817.79	13.07	8.22	0.418	0.78
Variación 1 vs 2 periodo	15.86%	-10.79%	-29.73%	-12.50%	-10.95%

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

4.8.1. Producción en chancado (T/H)

La producción promedio se incrementó de 2,432.07 T/H en el primer periodo a 2,817.79 T/H en el segundo, evidenciando un aumento del 15,86 %. Este incremento sostenido en todos los meses analizados, sugiere que la implementación de detonadores electrónicos mejora la fragmentación del mineral, generando un flujo más eficiente hacia las chancadoras. El resultado también implica una disminución de los cuellos de botella en el circuito de conminución, lo cual impacta directamente en la productividad del proceso.

4.8.2. Consumo específico de energía (KW-H/T)

Se redujo de 14.65 a 13.07 KW-H/T, lo que representa una disminución del 10,79 %. Este resultado demuestra que la mejora en la fragmentación del material no solo facilitó la conminución, sino que además redujo la carga de trabajo de las chancadoras, disminuyendo su requerimiento energético. A menor esfuerzo por tonelada procesada, mayor eficiencia energética, lo que repercute en una reducción del costo operativo y mejora en la sostenibilidad del proceso.

4.8.3. Fragmentación del material (P80)

El valor del P80 pasó de 11.69 pulgadas a 8.22 pulgadas, con una mejora del 29,73 %. Esta diferencia es altamente significativa y refleja la precisión de los retardos proporcionados por el sistema electrónico, lo que optimiza la secuencia de ruptura y genera partículas más homogéneas. Una mejor fragmentación se traduce

en menos sobre tamaños, menor necesidad de voladura secundaria y mayor fluidez en el circuito de carguío y chancado.

4.8.4. Factor de potencia (KG/T)

Disminuyó de 0.477 a 0.418 KG/T, con una reducción del 12.50 %. A pesar de utilizar una menor cantidad de explosivo por tonelada, se obtuvo una mejor fragmentación, lo que evidencia una eficiencia técnica superior del diseño de voladura con iniciación electrónica. Esto indica que no es necesario incrementar la carga explosiva, sino optimizar su aplicación para obtener mejores resultados con menor consumo.

4.8.5. Costo de voladura (USD/T)

El costo unitario bajó de 0.88 USD/T a 0.78 USD/T, lo que equivale a una reducción del 10,95 %. Aunque el precio de los detonadores electrónicos es mayor, este resultado confirma que los ahorros generados por la optimización del proceso —menor retrabajo, mayor producción, menor consumo energético— compensan ampliamente el costo inicial del componente. Esto valida la inversión desde el punto de vista económico y operativo.

CAPÍTULO V

DISCUSIONES

La implementación de detonadores electrónicos ORICA en la Unidad Minera Marcona demostró mejoras sustanciales en los indicadores clave: fragmentación, carguío, reducción de voladura secundaria y costo de producción. Estos hallazgos, se discuten a continuación en relación con lo planteado por autores que han investigado temas similares en contextos mineros comparables.

5.1. Comparación con Lozano & Vargas (2021)

En su tesis sobre la evaluación del sistema de iniciación pirotécnica y electrónica en una mina a tajo abierto en Cajamarca, Lozano y Vargas concluyeron que la iniciación electrónica permite una fragmentación más uniforme, lo cual se traduce en una reducción de costos por menor necesidad de reprocesos. En la presente investigación, se obtuvo una mejora del 29,73 % en el P80 y una reducción del 11,36 % en el costo de producción, lo que respalda sus afirmaciones con data cuantitativa y evidencia real de operación.

5.2. Comparación con Huerta (2020)

Huerta demostró que la triple iniciación electrónica mejora notablemente la eficiencia operativa en minería a cielo abierto. Aunque en esta tesis no se aplicó triple iniciación, el uso del sistema i-kon III de ORICA, con programación milimétrica, logró un incremento del 10 % en el rendimiento del carguío y una

fragmentación mucho más fina. Esto concuerda con Huerta, quien argumenta que el control sobre los tiempos de retardo es el factor crítico en la optimización global de la voladura.

5.3. Comparación con Córdova (2021)

Córdova centró su estudio en zonas de interacción con equipos autónomos en la mina Quellaveco, destacando que los detonadores electrónicos reducen las vibraciones y aumentan la seguridad. En este caso, aunque no se trabajó con equipos autónomos, se evidenció un mejor control de la energía del disparo, lo cual se reflejó en menos sobretamaños, menor rebote en palas y mayor estabilidad del frente de carguío. Estos efectos operativos también tienen implicancia en seguridad y control ambiental.

5.4. Comparación con Flores (2022)

Flores, en la mina Cuajone, planteó que los detonadores electrónicos permiten adaptar la voladura a las propiedades geomecánicas de la roca. En Marcona, con un macizo rocoso de RMR 60, la aplicación del sistema electrónico permitió mantener la uniformidad de resultados aún en sectores de transición litológica. Se corrobora entonces la afirmación de que este tipo de detonador es versátil ante variabilidad geológica, garantizando fragmentación homogénea.

5.5. Comparación con Fuentealba (2021)

En Codelco Gabriela Mistral, Fuentealba demostró que los detonadores electrónicos mejoran la eficiencia del chancado y reducen el tamaño del material,

generando un flujo continuo hacia planta. Estos mismos beneficios fueron obtenidos en esta tesis, con un aumento de 15,86 % en la producción total (T/H) y reducción del consumo energético por tonelada (-10,79 %), indicadores directamente vinculados a la fragmentación.

La revisión de antecedentes confirma que los resultados de esta tesis son coherentes con estudios previos en diferentes minas de tajo abierto. Las mejoras en fragmentación, carguío y costos operativos, obtenidas al implementar detonadores electrónicos ORICA, son reproducibles, significativas y técnicamente sustentadas.

Este conjunto de evidencias valida que el cambio de tecnología no solo es viable, sino recomendable para operaciones de mediana y gran escala.

Tabla 15.

Discusiones

Autor / Fuente	Producción (T/H)	P80 (pulg)	Voladura secundaria	Costo voladura (USD/T)	Observaciones clave
Presente estudio (Marcona)	↑ 15,86 %	↓ 29,73 % (11.69 → 8.22)	↓ 80 %	↓ 10,95 % (0.88 → 0.78)	Validado con Split Online y SPSS. Mayor homogeneidad de fragmentación. Mejor distribución del esfuerzo explosivo y control de fragmentación. Reducción del sobre tamaño y mayor continuidad operativa. Mejor sincronización y menor impacto ambiental. Iniciadores se adaptan a condiciones geomecánicas complejas. Alta precisión mejora operaciones en entornos automatizados.
Orica (2020)	↑ 8–15 %	Mejora significativa	↓ significativa	↓ por eficiencia global	
González et al. (2021)	↑ eficiencia en carguío	Fragmentación uniforme	↓ boulders	↓ desgaste y costos	
Scott et al. (2019)	No reportado	↓ P80	↓ vibraciones	↓ consumo energético	
Flores (2022) – Mina Cuajone	↑ productividad	Fragmentación uniforme	↓ costos en chancado	↓ por menor retrabajo	
Córdova (2021) – Mina Quellaveco	↑ integración con autónomos	Control preciso del retardo	Mejora en seguridad	↓ por menor riesgo	
Fuentealba (2021) – Minera Gabriela Mistral Huerta	↑ productividad	↓ tamaño de partícula	No especificado	↓ costo de procesamiento	Fragmentación más uniforme mejora eficiencia de planta.
(2020) – Yacimiento cuprífero	↑ eficiencia operativa	Fragmentación fina	↓ vibraciones	↓ costos operativos	Triple iniciación electrónica demostró mayor control. Iniciación electrónica más eficiente que sistema pirotécnico.
Lozano y Vargas (2021) – Cajamarca	↓ costos por voladura	↑ precisión de retardo	↓ sobre tamaños	↓ costos totales	

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

La presente investigación permitió demostrar que la implementación de detonadores electrónicos ORICA i-kon III optimizó significativamente la eficiencia operativa en una mina superficial, cumpliendo de forma integral los objetivos establecidos en el estudio.

Respecto al primer objetivo específico, se evidenció que el sistema de iniciación convencional (detonadores no eléctricos) generó una fragmentación irregular, con un valor promedio de P80 de 11.69 pulgadas, lo que dificultó el carguío y el transporte del material. Esta condición produjo retrasos en el ciclo operativo y una alta incidencia de bloques sobredimensionados. Como consecuencia, se incrementó considerablemente la necesidad de realizar voladuras secundarias, afectando la continuidad del proceso y generando costos adicionales.

En relación con el segundo objetivo específico, se observó que la implementación del sistema de detonadores electrónicos generó una mejora técnica sustancial. El valor del P80 disminuyó a 8.22 pulgadas, y la producción en chancado se incrementó de manera significativa, pasando de un promedio de 2,432.07 T/H a 2,817.79 T/H, lo que representa un aumento del 15,86 % en la productividad. Esta mejora operativa estuvo acompañada de una reducción del 10,79 % en el consumo energético específico (KW-H/T). Además, la calidad de la fragmentación obtenida permitió reducir la necesidad de voladuras secundarias en un 80 %, eliminando así

tiempos improductivos, riesgos en la manipulación del explosivo y uso adicional de recursos.

Respecto al tercer objetivo específico, se verificó una disminución del 12,50 % en el factor de potencia y un ahorro del 10,95 % en el costo unitario de voladura, pasando de 0.88 a 0.78 USD por tonelada. Esta eficiencia se logró gracias a la mayor precisión del retardo y a un diseño de voladura más controlado, lo cual permitió una mejor distribución de la energía explosiva y una fragmentación más uniforme, sin necesidad de incrementar la carga explosiva por tonelada.

Finalmente, en cumplimiento del objetivo general, se concluye que la aplicación de detonadores electrónicos en la voladura de mineral permitió optimizar la productividad en la unidad minera, al mejorar la fragmentación, incrementar el ritmo de producción, reducir el consumo energético y disminuir tanto la voladura secundaria como los costos operacionales. Esta tecnología se presenta, por tanto, como una solución integral para mejorar la eficiencia del ciclo de minado en operaciones a cielo abierto, con beneficios medibles en los ámbitos técnico, económico y operativo.

CAPÍTULO VII

RECOMENDACIONES

Implementar de manera permanente el uso de detonadores electrónicos en los frentes de explotación, debido a su comprobada efectividad en la mejora de la fragmentación, incremento de la productividad y reducción de la voladura secundaria. Esta tecnología debe integrarse como parte del estándar operativo en procesos de voladura en minas superficiales.

Optimizar los diseños de voladura utilizando herramientas de simulación y software de fragmentación, como *Split Online*, para garantizar que la energía explosiva se distribuya adecuadamente en función de la geología del banco y los objetivos de fragmentación. Esto permitirá reducir aún más el consumo de energía y los costos unitarios.

Capacitar continuamente al personal técnico en el manejo, programación y control de sistemas de iniciación electrónica, asegurando una ejecución precisa y segura de las voladuras. La formación debe incluir tanto aspectos operativos como criterios de evaluación post-voladura, a fin de consolidar una cultura de mejora continua en el proceso de minado.

CAPÍTULO VIII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chacon, A., & Villafuerte, M. (2016). Optimización de voladuras mediante el uso de detonadores electrónicos en minas de tajo abierto. *Revista Peruana de Minería y Energía*, 101(2), 34–42.
- Chacón, A., & Villafuerte, M. (2016). Optimización de voladuras mediante el uso de detonadores electrónicos en minas de tajo abierto. *Revista Peruana de Minería y Energía*, 101(2), 34–42.
- Córdova Ramos, J. A. (2021). *Efectividad de la iniciación electrónica en zona de interacción con equipos autónomos empleando el sistema Daveytronic Evolution Pack 48, mina Quellaveco – Moquegua* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Moquegua].
- Dimas Zúñiga Torres, P. (2024). *Diseño de tronaduras y su impacto en el costo mina de Compañía Minera Cerro Negro* [Tesis de licenciatura, Universidad de Chile, Santiago].
- Dowding, C. H. (2000). *Construction Vibrations*. Prentice Hall.
- Dowding, C. H. (2000). *Construction Vibrations*. Prentice Hall.
- Flores Ticona, R. J. (2022). *Optimización de la fragmentación resultante para el mineral relacionado a la exactitud y precisión del iniciador electrónico con*

las propiedades geomecánicas en mina Cuajone [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Moquegua].

Fuentealba Carvajal, B. A. (2021). *Optimización en voladuras con detonadores electrónicos para mejorar la fragmentación en Minera Gabriela Mistral, Codelco Chile* [Tesis de licenciatura, Universidad de Antofagasta, sede Calama, Chile].

González, F., Riquelme, J., & Torres, M. (2021). Avances en la ingeniería de voladura: impacto del uso de detonadores electrónicos en minería a cielo abierto. *Revista de Ingeniería Minera*, 35(2), 45-57.

González, F., Riquelme, J., & Torres, M. (2021). Avances en la ingeniería de voladura: impacto del uso de detonadores electrónicos en minería a cielo abierto. *Revista de Ingeniería Minera*, 35(2), 45-57.

González, F., Riquelme, J., & Torres, M. (2021). Avances en la ingeniería de voladura: impacto del uso de detonadores electrónicos en minería a cielo abierto. *Revista de Ingeniería Minera*, 35(2), 45-57.

Huerta Peña, M. A. (2020). *Análisis comparativo de la eficiencia de la triple iniciación electrónica en voladura versus la iniciación electrónica simple y doble en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto* [Tesis de licenciatura, Universidad Continental].

International Society of Explosives Engineers (ISEE). (2011). *Blasters' Handbook* (18th ed.). ISEE Publications.

International Society of Explosives Engineers (ISEE). (2011). *Blasters' Handbook* (18th ed.). ISEE Publications.

Jiménez, R., & Navarro, D. (2018). *Análisis comparativo de detonadores electrónicos y no eléctricos en operaciones mineras peruanas*. Universidad Nacional de Ingeniería.

Jiménez, R., & Navarro, D. (2018). *Análisis comparativo de detonadores electrónicos y no eléctricos en operaciones mineras peruanas*. Universidad Nacional de Ingeniería.

Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A. (1995). *Drilling and Blasting of Rocks*. CRC Press.

Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A. (1995). *Drilling and Blasting of Rocks*. CRC Press.

Lozano Quiliche, C., & Vargas Cholán, W. M. (2021). *Evaluación del sistema de iniciación pirotécnica y electrónica en el banco 3240 para la optimización de costos por voladura en una empresa minera a tajo abierto en Cajamarca, 2021* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca].

MINEM. (2022). Informe técnico sobre innovación tecnológica en operaciones de voladura en el Perú. *Ministerio de Energía y Minas del Perú*.

MINEM. (2022). Informe técnico sobre innovación tecnológica en operaciones de voladura en el Perú. *Ministerio de Energía y Minas del Perú*.

- MINEM. (2022). Informe técnico sobre innovación tecnológica en operaciones de voladura en el Perú. *Ministerio de Energía y Minas del Perú*.
- Orica Mining Services. (2020). Electronic Blasting Systems: Maximizing Performance in Surface Operations. *Recuperado de <https://www.orica.com>*
- Orica. (2020). Electronic blasting systems: A pathway to productivity. *Orica Technical Reports. <https://www.orica.com>*
- Orica. (2020). Electronic blasting systems: A pathway to productivity. Orica Technical Reports. *<https://www.orica.com>*
- Orica. (2020). Electronic blasting systems: A pathway to productivity. Orica Technical Reports. *<https://www.orica.com>*
- Sandvik Mining and Rock Solutions. (2021). Fragmentation and Productivity: The Role of Electronic Detonators. Documento técnico. *Recuperado de <https://www.rocktechnology.sandvik>*
- Sandvik Mining and Rock Solutions. (2021). Fragmentation and Productivity: The Role of Electronic Detonators. *Recuperado de <https://www.rocktechnology.sandvik>*
- Scott, D., Wilson, P., & Zhang, Y. (2019). Improved blast outcomes using electronic delay detonators in open-pit mines. *Mining Technology Journal*, 128(4), 202-214.

Scott, D., Wilson, P., & Zhang, Y. (2019). Improved blast outcomes using electronic delay detonators in open-pit mines. *Mining Technology Journal*, 128(4), 202-214.

Scott, D., Wilson, P., & Zhang, Y. (2019). Improved blast outcomes using electronic delay detonators in open-pit mines. *Mining Technology Journal*, 128(4), 202–214.

ANEXO. MATRIZ DE CONSISTENCIAS

Tabla 16.

Matriz de consistencia.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	POBLACIÓN Y MUESTRA
Problema general	Objetivo general	Hipótesis General	Variable Independiente	Población
<ul style="list-style-type: none"> ¿De qué manera la implementación de detonadores electrónicos en la voladura de mineral influye en la productividad de la unidad minera Marcona? 	<ul style="list-style-type: none"> •Evaluar el impacto de la implementación de detonadores electrónicos en la voladura de mineral para optimizar la productividad en la unidad minera Marcona. 	<ul style="list-style-type: none"> •La implementación de detonadores electrónicos en la voladura de mineral mejora significativamente la productividad en la unidad minera Marcona. 	<ul style="list-style-type: none"> •Implementación de detonadores electrónicos en la voladura. 	Para este proyecto de investigación se tendrá como población las voladuras realizadas en el año 2024 en la Unidad Minera Marcona.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis Específicos	Variable Dependiente	Muestra
<ul style="list-style-type: none"> ¿Cómo afecta el sistema de iniciación convencional (no eléctrico) a la calidad de la fragmentación y a los tiempos del ciclo de carguío en la unidad minera Marcona? 	<ul style="list-style-type: none"> •Analizar los efectos del sistema de iniciación convencional sobre la calidad de la fragmentación y los tiempos de ciclo de carguío en la unidad minera Marcona. 	<ul style="list-style-type: none"> •El uso del sistema de iniciación convencional (no eléctrico) afecta negativamente la calidad de la fragmentación y prolonga los tiempos de ciclo de carguío en la unidad minera Marcona. 	<ul style="list-style-type: none"> •Productividad en la unidad minera Marcona. 	Como muestra se analizarán las voladuras realizadas en el Nv 550 de 6 meses del 2024 en la Unidad Minera Marcona: •Del 01-04-2024 al 30-06-2024. (Antes de iniciar la prueba) •Del 01-07-2024 al 30-09-2024 (Después de iniciar la prueba).
<ul style="list-style-type: none"> ¿Qué diferencias en eficiencia operativa se pueden evidenciar al comparar el desempeño de la voladura con detonadores electrónicos frente al sistema tradicional? 	<ul style="list-style-type: none"> •Comparar el desempeño operativo de la voladura utilizando detonadores electrónicos frente al sistema convencional, con base en indicadores técnicos de productividad. 	<ul style="list-style-type: none"> •La voladura con detonadores electrónicos presenta un mejor desempeño operativo en comparación con el sistema convencional, reflejado en indicadores de productividad minera. 		
<ul style="list-style-type: none"> ¿Cuál es el impacto de los detonadores electrónicos en los costos operativos asociados al carguío y a la reducción de voladuras secundarias en la operación minera? 	<ul style="list-style-type: none"> •Determinar el impacto de los detonadores electrónicos en la reducción de los costos operativos asociados al carguío y a la disminución de voladuras secundarias. 	<ul style="list-style-type: none"> •La aplicación de detonadores electrónicos reduce los costos operativos relacionados al carguío y disminuye la necesidad de realizar voladuras secundarias. 		

REGISTRO DE VOLADURA EN CAMPO

Fecha: Abril

Supervisor:

Fecha	Banco	Tipo de iniciación	N° de taladros	N° de secuencias	Retardo programado (ms)	Retardo ejecutado (ms)	Costo total voladura (USD)	Observaciones
01/04/2024	Nv 550	Convencional	80	8	25	30	14500	Disparo ejecutado sin desviaciones.
02/04/2024	Nv 550	Convencional	81	9	25	30	14510	Disparo ejecutado sin desviaciones.
03/04/2024	Nv 550	Convencional	82	10	25	30	14520	Disparo ejecutado sin desviaciones.
04/04/2024	Nv 550	Convencional	83	8	25	30	14530	Disparo ejecutado sin desviaciones.
05/04/2024	Nv 550	Convencional	84	9	25	30	14540	Disparo ejecutado sin desviaciones.
06/04/2024	Nv 550	Convencional	80	10	25	30	14550	Disparo ejecutado sin desviaciones.
07/04/2024	Nv 550	Convencional	81	8	25	30	14560	Disparo ejecutado sin desviaciones.
08/04/2024	Nv 550	Convencional	82	9	25	30	14570	Disparo ejecutado sin desviaciones.
09/04/2024	Nv 550	Convencional	83	10	25	30	14580	Disparo ejecutado sin desviaciones.
10/04/2024	Nv 550	Convencional	84	8	25	30	14590	Disparo ejecutado sin desviaciones.
11/04/2024	Nv 550	Convencional	80	9	25	30	14600	Disparo ejecutado sin desviaciones.
12/04/2024	Nv 550	Convencional	81	10	25	30	14610	Disparo ejecutado sin desviaciones.
13/04/2024	Nv 550	Convencional	82	8	25	30	14620	Disparo ejecutado sin desviaciones.
14/04/2024	Nv 550	Convencional	83	9	25	30	14630	Disparo ejecutado sin desviaciones.
15/04/2024	Nv 550	Convencional	84	10	25	30	14640	Disparo ejecutado sin desviaciones.
16/04/2024	Nv 550	Convencional	80	8	25	30	14650	Disparo ejecutado sin desviaciones.
17/04/2024	Nv 550	Convencional	81	9	25	30	14660	Disparo ejecutado sin desviaciones.
18/04/2024	Nv 550	Convencional	82	10	25	30	14670	Disparo ejecutado sin desviaciones.
19/04/2024	Nv 550	Convencional	83	8	25	30	14680	Disparo ejecutado sin desviaciones.
20/04/2024	Nv 550	Convencional	84	9	25	30	14690	Disparo ejecutado sin desviaciones.
21/04/2024	Nv 550	Convencional	80	10	25	30	14700	Disparo ejecutado sin desviaciones.
22/04/2024	Nv 550	Convencional	81	8	25	30	14710	Disparo ejecutado sin desviaciones.
23/04/2024	Nv 550	Convencional	82	9	25	30	14720	Disparo ejecutado sin desviaciones.

REGISTRO DE COSTO UNITARIO

Fecha:

Supervisor:

Fecha	Banco	Tipo de voladura	Método de medición	P80 (mm)	P50 (mm)	Promedio de fragmentos (mm)	Observaciones
01/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	298	180	230	Fragmentación con presencia de bolonería
02/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	299	181	231	Fragmentación con presencia de bolonería
03/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	300	182	232	Fragmentación con presencia de bolonería
04/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	301	183	233	Fragmentación con presencia de bolonería
05/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	302	180	234	Fragmentación con presencia de bolonería
06/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	298	181	235	Fragmentación con presencia de bolonería
07/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	299	182	230	Fragmentación con presencia de bolonería
08/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	300	183	231	Fragmentación con presencia de bolonería
09/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	301	180	232	Fragmentación con presencia de bolonería
10/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	302	181	233	Fragmentación con presencia de bolonería
11/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	298	182	234	Fragmentación con presencia de bolonería
12/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	299	183	235	Fragmentación con presencia de bolonería
13/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	300	180	230	Fragmentación con presencia de bolonería
14/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	301	181	231	Fragmentación con presencia de bolonería
15/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	302	182	232	Fragmentación con presencia de bolonería
16/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	298	183	233	Fragmentación con presencia de bolonería
17/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	299	180	234	Fragmentación con presencia de bolonería
18/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	300	181	235	Fragmentación con presencia de bolonería
19/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	301	182	230	Fragmentación con presencia de bolonería
20/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	302	183	231	Fragmentación con presencia de bolonería
21/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	298	180	232	Fragmentación con presencia de bolonería
22/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	299	181	233	Fragmentación con presencia de bolonería
23/04/2024	Nv 550	Convencional	Split Online	300	182	234	Fragmentación con presencia de bolonería