



Universidad Nacional
SAN LUIS GONZAGA



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Esta licencia es la más restrictiva de las seis licencias principales Creative Commons, permitiendo a otras solo descargar sus obras y compartirlas con otras siempre y cuando den crédito, pero no pueden cambiarlas de forma alguna ni usarlas de forma comercial.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>



CONSTANCIA

N° 096-DI-FIMM-2025

El que suscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud de **TESIS** cuyo título es:

**“MEJORAMIENTO DE LOS KPI DE PERFORACION Y
VOLADURA MEDIANTE EL CAMBIO DE EXPLOSIVOS EN
LABORES MECANIZADAS - MINERA MARSAS 2023”**

Presentado por:

QUINTANA BONIFAZ BRAULIO

Que, se ha recibido del operador del programa informático evaluador de originalidad de la Facultad de Ingeniería de Minas y Metalurgia de la UNICA, el informe automatizado de originalidad, el mismo que concluye de la siguiente manera:

El documento de investigación APRUEBA los criterios de originalidad con un porcentaje de similitud de 15%.

Para dar fe, se adjunta al presente el reporte de similitud de las bases de datos de iThenticate. **En Ica 10 de noviembre de 2025.**

Atentamente,

.....
DR. VICTOR MANUEL FLORES MARCHAN
DIRECTOR DE INVESTIGACION DE LA FIMM

**UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUIS GONZAGA”
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS Y METALURGIA**



**MEJORAMIENTO DE LOS KPI DE PERFORACIÓN Y
VOLADURA MEDIANTE EL CAMBIO DE EXPLOSIVOS
EN LABORES MECANIZADAS – MINERA MARSA 2023**

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Desarrollo en ciencias puras, ciencias de la tierra e ingeniería de procesos

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE MINAS**

PRESENTADO POR

BACH. BRAULIO QUINTANA BONIFAZ

ICA – PERÚ

2025



Dedicatoria

A Dios, fuente inagotable de sabiduría y fortaleza, por haber iluminado cada etapa de este recorrido académico, sosteniéndome con su gracia en los momentos de esfuerzo y brindándome la claridad necesaria para culminar esta meta.

A mis queridos padres, cuya entrega, constancia y amor incondicional han sido el fundamento de mis aspiraciones. Gracias por ser ejemplo de perseverancia, por alentarme con firmeza en cada desafío y por enseñarme que la fe, el trabajo honesto y la dedicación pueden hacer posible cualquier sueño.

Agradecimiento

Expreso mi más profundo agradecimiento a la Unidad Minera MARSA y a su equipo, por haberme brindado acceso a sus instalaciones, compartir información técnica de alto valor y facilitar el soporte logístico necesario para la ejecución de esta investigación. Su generosa colaboración fue determinante para fortalecer la calidad y solidez de este estudio.

A mi familia, gracias por su constante aliento y apoyo emocional durante los momentos más exigentes de este proceso. A mis demás seres queridos, les agradezco profundamente por su comprensión, ternura y por celebrar conmigo cada logro.

Finalmente, extendiendo mi gratitud a todas aquellas personas que, de una forma u otra, aportaron con su tiempo, conocimiento o amistad para hacer posible este proyecto. Gracias por formar parte de este importante logro personal y académico.

Índice de contenidos

Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de tablas	viii
Índice de figuras	ix
Resumen	x
Abstract	xi
I. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Realidad problemática	12
1.2. Antecedentes	15
1.2.1. Internacionales	15
1.2.2. Nacionales	18
1.2.3. Locales	22
1.3. Bases teóricas	23
1.3.1. Perforación de rocas	23
1.3.1.1. Definición	23
1.3.1.2. Tipos	25
1.3.1.3. Convencional vs mecanizada	28
1.3.2. Voladura de rocas	34
1.3.3. Los explosivos	36
1.3.3.1. Definición	36

1.3.3.2.	<i>Clasificación</i>	39
1.3.3.3.	<i>Características</i>	44
1.3.3.4.	<i>Factores considerados para la selección del explosivo</i>	54
1.3.4.	<i>Emulsión encartuchada</i>	59
1.3.4.1.	<i>Definición</i>	59
1.3.4.2.	<i>Características</i>	60
1.4.	Formulación de los problemas	63
1.4.1.	<i>Problema general</i>	63
1.4.2.	<i>Problemas específicos</i>	63
1.5.	Justificación	63
1.6.	Objetivos	65
1.6.1.	<i>Objetivo general</i>	65
1.6.2.	<i>Objetivos específicos</i>	65
1.7.	Hipótesis	65
1.7.1.	<i>Hipótesis específica</i>	65
1.7.2.	<i>Hipótesis específica</i>	65
II.	ESTRATEGIA METODOLÓGICA	67
2.1.	Lugar de estudio	67
2.2.	Tipo de investigación	68
2.3.	Nivel de investigación	68
2.4.	Diseño de investigación	69
2.5.	Población y muestra	69

2.5.1.	<i>Población</i>	69
2.5.2.	<i>Muestra</i>	69
2.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	70
2.7.	Técnicas de análisis e interpretación de datos	70
III.	RESULTADOS	72
3.1.	Datos técnicos del explosivo	72
3.2.	Preliminares	73
3.3.	Cantidad de disparos monitoreados	74
3.3.1.	<i>Primer control</i>	75
3.3.2.	<i>Segundo control</i>	77
3.4.	Trabajos de campo	78
3.4.1.	<i>Malla con 28 taladros cargados GL9143 2.4x2.7 – 8 pies</i>	78
3.4.2.	<i>Malla con 30 taladros cargados GL10445S 2.4x2.7 – 10.1 pies</i>	81
3.4.3.	<i>Malla con 29 taladros cargados GL 10455-S 2.4 x 2.7 – 8 pies</i>	84
3.4.4.	<i>Malla con 32 taladros cargados XC 10362 SE 3.5m x 3.0m</i>	87
3.5.	Pruebas de campo de VOD.....	89
3.6.	Capacitación	90
IV.	DISCUSIÓN	91
V.	CONCLUSIONES	95
VI.	RECOMENDACIONES	97
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
VIII.	ANEXOS	105

Anexo N°1: Operacionalización de variables.....	106
Anexo N° 2: Matriz de consistencia.....	107
Anexo N° 3: Fragmentación.....	109
Anexo N° 4: VOD.....	110
Anexo N° 5: Evidencia fotográfica.....	111



Índice de tablas

Tabla 1. <i>Datos técnicos de los explosivos</i>	73
Tabla 2. <i>Avance por disparo en labores mecanizadas 8"x9"</i>	75
Tabla 3. <i>Avance por disparo primer control</i>	77
Tabla 4. <i>Avance por disparo segundo control</i>	78
Tabla 5. <i>Carguío de explosivos de malla GL9143 2.4x2.7 – 8 pies</i>	80
Tabla 6. <i>Carguío de explosivos de malla GL10445S 2.4x2.7 – 10.1 pies</i>	83
Tabla 7. <i>Carguío de explosivos de malla GL 10455-S 2.4 x 2.7 – 8 pies</i>	86
Tabla 8. <i>Carguío de explosivos de malla XC 10362 SE 3.5m x 3.0m</i>	88
Tabla 9. <i>Cantidad de personal capacitado</i>	90



Índice de figuras

Figura 1. Malla de perforación GL9143 2.4x2.7 – 8 pies.....	79
Figura 2. Carguío y amarre de explosivos GL9143 2.4x2.7 – 8 pies.....	80
Figura 3. Resultados de voladura GL9143 2.4x2.7 – 8 pies.....	81
Figura 4. Malla de perforación GL10445S 2.4x2.7 – 10.1 pies.....	82
Figura 5. Trazado de malla GL10445S 2.4x2.7 – 10.1 pies.....	83
Figura 6. Resultados de voladura GL10445S 2.4x2.7 – 10.1 pies.....	84
Figura 7. Malla de perforación GL 10455-S 2.4 x 2.7 – 8 pies.....	85
Figura 8. Perforación de malla GL 10455-S 2.4 x 2.7 – 8 pies.....	86
Figura 9. Resultados de voladura GL 10455-S 2.4 x 2.7 – 8 pies.....	86
Figura 10. Malla de perforación XC 10362 SE 3.5m x 3.0m.....	87
Figura 11. Marcado y perforación de malla XC 10362 SE 3.5m x 3.0m.....	88
Figura 12. Resultados de malla XC 10362 SE 3.5m x 3.0m.....	88
Figura 13. Velocidad de detonación.....	89
Figura 14. Cantidad de personal capacitado.....	90
Figura 15. Eficiencia de avance (%).....	92
Figura 16. Sobrerotura (%).....	94

Resumen

La investigación tiene como objetivo general determinar que el cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en el mejoramiento de los KPI de perforación y voladura – Minera Marsa 2023. Es un estudio de tipo aplicada, descriptivo, explicativo, comparativo, transversal, la muestra se constituye por 18 voladuras de prueba realizadas en las labores mecanizadas de la Minera Marza, en el año 2023. El estudio demostró que el cambio de explosivo en labores mecanizadas en Minera Marsa durante 2023 mejoró significativamente los KPI de perforación y voladura. Se incrementó la eficiencia de avance del 90% al 92% y el avance por disparo de 2.1 m a 3.1 m. Asimismo, la sobrerotura se redujo de 22% a 14%, optimizando la estabilidad del macizo y reduciendo costos operativos. Finalmente, la velocidad de detonación del explosivo EMULNOR 5000 alcanzó valores entre 4292 y 4449 m/s, evidenciando una mejor transmisión de energía y mayor eficiencia en la fragmentación. Estos resultados confirman mejoras técnicas y operativas comprobables.

Palabras Claves: emulsión, explosivos, perforación y voladura.

Abstract

The general objective of the research is to determine that the change of explosive in mechanized workings influences the improvement of drilling and blasting KPIs - Minera Marsa 2023. It is an applied, descriptive, explanatory, comparative, cross-sectional study, the sample is constituted by 18 test blasts carried out in the mechanized workings of Minera Marza, in the year 2023. The study showed that the change of explosive in mechanized workings at Minera Marsa during 2023 significantly improved the drilling and blasting KPIs. The feed efficiency increased from 90% to 92% and the feed per shot from 2.1 m to 3.1 m. Also, overburden was reduced from 22% to 14%, optimizing rock mass stability and reducing operating costs. Finally, the detonation velocity of the EMULNOR 5000 explosive reached values between 4292 and 4449 m/s, showing better energy transmission and greater fragmentation efficiency. These results confirm verifiable technical and operational improvements.

Keywords: *emulsion, explosives, drilling and blasting.*

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

La minería constituye uno de los pilares fundamentales de la economía peruana, aportando más del 9,7 % al Producto Bruto Interno (PBI) y generando el 63,9 % del valor total de las exportaciones nacionales durante el año 2021. Este desempeño se tradujo en un ingreso récord de US\$ 40 313 millones, impulsado por un incremento interanual del 51,6%, resultado de la mejora en los precios internacionales de los metales y del aumento en los volúmenes exportados de cobre, oro y otros minerales estratégicos. Asimismo, la actividad minera generó importantes recursos fiscales a través del canon, regalías y transferencias, alcanzando un total de S/ 6 630,5 millones, lo que representó un incremento del 12,5% en comparación con el año anterior. Estos recursos permitieron fortalecer el financiamiento de proyectos regionales y municipales, promoviendo el desarrollo territorial descentralizado [1].

La extracción y exportación de oro constituye uno de los pilares estratégicos del auge minero peruano. En el año 2021, las exportaciones auríferas alcanzaron un volumen de 5 627 000 onzas troy, lo que representó un crecimiento del 26,6% en términos de cantidad y del 28,6% en valor respecto al periodo anterior. Estos envíos generaron US\$ 10 121 millones, equivalentes al 16,0% del total de exportaciones del país, consolidando al oro como uno de los principales productos de exportación. Este desempeño fue impulsado por una demanda internacional sostenida, con mercados clave como India, Canadá y Suiza, así como por una cotización promedio de US\$ 1 869,7 por onza troy, lo cual favoreció la continuidad y expansión de los proyectos auríferos en operación. Este escenario resalta no solo la importancia económica del oro dentro del

portafolio exportador del país, sino también su dimensión geopolítica y estratégica, debido a su impacto positivo en la balanza de pagos y en la estabilidad macroeconómica del Perú [1].

A escala internacional, investigaciones destacan que la velocidad de detonación (VOD) constituye un parámetro determinante para optimizar la fragmentación de la roca y la transmisión eficiente de la onda de choque. La VOD está influenciada principalmente por la densidad del explosivo, el diámetro de carga y el grado de confinamiento, y se recomienda el uso de emulsiones de alta velocidad en contextos de macizos duros donde se requiera mayor poder rompedor [2].

En el contexto nacional, diversos estudios refuerzan la efectividad operativa de las emulsiones encartuchadas y a granel. En la Unidad Minera San Vicente (SIMSA), un análisis comparativo evidenció que los disparos con emulsión encartuchada alcanzaron eficiencias de avance de 92,7%, mientras que las emulsiones a granel lograron un 95,1%, generando además ahorros operativos significativos. Estos datos respaldan la superioridad técnica de las emulsiones en términos de rendimiento lineal y eficiencia energética [3].

De igual forma, en Minera Yanaquihua, la transición hacia el uso de emulsiones derivó en mejoras sustanciales: el factor de carga se incrementó en un 15% (de 2,735 a 3,138 kg/m³), el factor de potencia también mejoró un 15% (de 1,028 a 1,180 kg/tm), y el factor de avance se elevó en un 10% (de 15,043 a 16,600 kg/ml). Estos resultados evidencian la adaptabilidad de las emulsiones encartuchadas en entornos subterráneos, así como su capacidad para mejorar la eficiencia técnica del ciclo de voladura [4].

El principal desafío identificado radica en que la continuidad del uso de explosivos convencionales, como la dinamita, limita la optimización de los

indicadores clave de desempeño (KPI) del ciclo de perforación y voladura, tales como el avance por disparo, la eficiencia del avance, el control de la sobrerotura y la velocidad de detonación. Estos explosivos no se adaptan adecuadamente a las condiciones geomecánicas particulares del macizo rocoso, caracterizado por alta fracturación y presencia de humedad, propias del entorno subterráneo.

Las causas técnicas de esta problemática están vinculadas al confinamiento deficiente de la carga explosiva, la velocidad de detonación insuficiente para ambientes con presión de confinamiento elevada, y la baja resistencia al agua de la dinamita, lo que reduce considerablemente la eficiencia de la detonación y deteriora la calidad de la fragmentación. Como consecuencia, se produce un desperdicio de energía útil, afectando la regularidad del perfil de avance y elevando los costos operativos indirectos.

Estas limitaciones impactan de forma directa en la productividad diaria, al generar menores avances por jornada, mayores tiempos de perforación y carguío, e incrementos en el factor de potencia requerido. A su vez, esta situación repercute negativamente en la seguridad operativa, al aumentar el riesgo de inestabilidad estructural, y en la sostenibilidad ambiental, por el incremento en residuos y retrabajos. Desde una perspectiva estratégica, la persistencia de estos problemas reduce la competitividad de la minería subterránea peruana, afectando la rentabilidad de Minera MARSA y su capacidad de generar beneficios económicos sostenibles.

Como medida correctiva ante las limitaciones operativas identificadas, se plantea la sustitución progresiva de la dinamita convencional por emulsiones encartuchadas del tipo EMULNOR® 5000, adaptando los parámetros de carga

especialmente en cuanto a densidad y longitud de columna para garantizar un confinamiento más eficiente y una mayor velocidad de detonación.

Paralelamente, se considera esencial la capacitación técnica del personal operativo involucrado en las fases de perforación y voladura, con énfasis en técnicas adecuadas de carga y cebado de emulsiones. Este enfoque formativo busca fomentar buenas prácticas operativas, estandarizar procedimientos y reducir la variabilidad de los resultados entre frentes o turnos, lo que incide directamente en la calidad del disparo y en la estabilidad del macizo intervenido. Como complemento estratégico, se propone la implementación de un sistema de monitoreo continuo, que incluya levantamientos topográficos post-voladura y análisis granulométricos sistemáticos. Esta herramienta permitirá evaluar de forma objetiva los efectos reales de cada disparo, facilitar el ajuste fino de los diseños de malla y parámetros de carga, y establecer un ciclo de mejora continua orientado al fortalecimiento de los indicadores clave de desempeño (KPI) del proceso. Asimismo, contribuirá a reforzar los estándares de seguridad operativa y a promover una gestión más sostenible y eficiente de las labores mecanizadas en Minera MARSA.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Internacionales

En Chile, **Báez Á.** [5], **en 2021**, en su investigación, el cual planteó como **objetivo**: “Estudiar la variación del burden y espaciamiento y su impacto en la granulometría resultante del proceso de tronadura en las Fases 7 y 10”. Fue una investigación cuantitativa, descriptiva, de campo mediante técnicas de la observación. Al término se **concluyó** que:

- Las mallas de 5 m × 11 m y 7 m × 8 m muestran una variación en P80 inferior a 1 in y, comparadas con la malla de 7 m × 7 m tomada como referencia, presentan un incremento de superficie del 12,2 % y 12,7 %, respectivamente. Para la Fase 10 se proponen tres alternativas de malla —12 m × 16 m, 13 m × 15 m y 13 m × 16 m— de las cuales las dos primeras evidencian la menor desviación en P80 frente a la malla de referencia. El crecimiento en tamaño de malla implica taladrar y cargar menos pozos, lo que reduce los costos de tronadura.
- Al evaluar el efecto del cambio de explosivo, se constata que uno de menor densidad y con RWS equivalente produce una granulometría más gruesa, ello debido a que se emplea menos cantidad de explosivo por pozo, lo que eleva el P80 obtenido. Por otro lado, un explosivo con densidad comparable, pero RWS superior mejora la fragmentación, pues, al introducirse un volumen similar de material más energético en cada pozo, se logra disminuir el P80.

En Ecuador, **Espinosa N. y Hormaechea R.** [6], en 2021, en su investigación el cual plantearon como **objetivo**: “Optimizar el proceso de perforación y voladura en los frentes de trabajo en la Sociedad Minera Santa Clara”. Fue una investigación, transversal, observacional, de campo y descriptivo. Al término los autores **concluyeron** que:

- Se comprobó que la distribución de los barrenos carece de un diseño planificado: al revisar en detalle los

procedimientos actuales de perforación y voladura, se halló que el operario ubica los barrenos de forma aleatoria, sin basarse en ningún estudio previo. Esta práctica arroja resultados por debajo de los estándares requeridos, con un avance de perforación de 1,33 m, un volumen extraído de 3,06 m³ y un consumo específico de explosivo de 1,35 kg/m³.

- Para corregirlo, se propone emplear barrenos de 2 pulgadas de diámetro organizados según el método sueco de minería subterránea. Al recalcular la nueva malla de perforación y voladura para los tres frentes de trabajo, se obtiene un avance de 2,04 m, un volumen de arranque de 5,43 m³ y un consumo específico de 4,78 kg/cm³, parámetros que mejoran significativamente la eficiencia y reducen costos de la tronadura.

En Ecuador, **Montalvo B.** [2], en 2022, en su investigación el cual planteó como **objetivo**: “Diseñar una malla de perforación y voladura que permita controlar la dilución en el Subnivel de producción “Gemelos”, en la mina “Pique”, compañía Oroconcent S.A, Portovelo-Ecuador”. Asimismo, fue una investigación aplicada, cuantitativa, técnicas de la observación. Al término el autor **concluyó** que:

- A partir de un registro cronológico pormenorizado del ciclo de extracción en el subnivel de preparación-explotación “Gemelos”, se determinó una productividad de 0,16 toneladas por hombre-hora. Al valorar una ley operativa de 1,4 g/t y un precio de 1 859,03 USD por onza troy –

incorporando un impuesto bruto del 3 %, una recuperación por cianuración del 85 % y una penalización del 90 % por pureza–, el resultado es un valor de 62,1 USD por tonelada, equivalente a un rendimiento económico de 9,94 USD por hora de producción.

- Mediante un análisis de Pareto de las operaciones unitarias del ciclo minero, se identificó que el desalojo de material (27,7 %), la ventilación (22,1 %) y el transporte (11,8 %) concentran la mayor incidencia sobre la rentabilidad. Por lo tanto, para aumentar el rendimiento económico es imprescindible perfeccionar la selectividad del minado y reducir la dilución durante la extracción.

1.2.2. Nacionales

En Trujillo, **Solórzano C.** [3], en el año 2019, en su investigación el cual planteó como **objetivo**: “Determinar el aumento de la eficiencia de avance por disparo en los frentes de sección 3.5m x 3.0m cambiando el tipo de explosivo de emulsión encartuchada por emulsión a granel (Emulfrag MS) en la Unidad Minera San Vicente – SIMSA”. Asimismo, fue una investigación de tipo aplicada, método científico, diseño comparativo, técnica de la observación. Al término **concluyó** que:

- Al sustituir la emulsión encartuchada (Emulnor) por emulsión a granel (Emulfrag MS) en los frentes de 3,5 m × 3,0 m de la Unidad Minera San Vicente – SIMSA, la eficacia del avance por disparo mejoró un 2,6 %. Con Emulnor se lograba perforar efectivamente 3,19 m y avanzar 2,95 m; al emplear

Emulfrag MS, manteniendo la misma sección, el avance sube a 3,03 m.

- Aunque la fabricación de ANFO a granel resulta aproximadamente un 40 % más económica que las emulsiones a granel al momento de la entrega en faena, al considerar los ahorros asociados al rendimiento y al costo total de carga y disparo, el uso de emulsiones a granel demuestra ser más rentable. Estas pueden reducir el gasto en explosivos hasta en un 8 % y abaratar el conjunto de operaciones de perforación y voladura en un 14 %. En una operación subterránea típica tanto para la empresa contratista como para la minera que ejecute 280 m l con sección 3,5 m × 3,0 m en galería horizontal y 300 m l con esa misma sección en galería con gradiente -15 %, se estima un ahorro superior a 6 500 USD mensuales, lo que equivale a más de 80 000 USD anuales en costos de perforación y voladura.

En Puno, **Tito M.** [4], en el 2020, en su investigación el cual planteó como **objetivo**: “Demostrar el análisis técnico económico de la utilización de emulsión vs. Dinamita en las labores de desarrollo horizontal en la Unidad Minera Yanaquihua”. Asimismo, fue una investigación de tipo no probabilística, nivel cuantitativo, diseño pre experimental longitudinal. Al término el autor **concluyó** que:

- En la Unidad Minera Yanaquihua, al sustituir las dinamitas encartuchadas Semexsa 80 % (EXSA) por emulsión

Emulnor (FAMESA) en los frentes de sección 2,20 m × 2,50 m, la eficiencia de avance por disparo se incrementó en un 8,66 %. En este escenario, la perforación efectiva era de 1,73 m, lográndose un avance de 1,53 m con Semexsa y de 1,68 m al emplear Emulnor.

- El uso de Emulnor durante las labores de desarrollo subterráneo permite reducir el coste de explosivos en un 36 % por disparo al mes y disminuir los gastos totales de perforación y voladura en un 28,95 %. Para una operación típica que abarca 70 ml con sección de 2,20 m × 2,50 m y un gradiente horizontal del +6 %, esto supone un ahorro de más de 2 591,49 USD mensuales, equivalente a 31 097,90 USD anuales.
- Los ensayos llevados a cabo demuestran que la brecha en el costo unitario entre la dinamita y el Emulnor (US \$ 4,31/kg frente a US \$ 1,93/kg) permite generar economías en el consumo de explosivo, siempre que el patrón de carguío se controle de manera rigurosa. Con base en estos hallazgos, se desarrolló un patrón preliminar de carguío con Emulnor (véase Anexo 15, PUs de explosivos), el cual puede optimizarse mediante posteriores ensayos. Este esquema utiliza Emulnor como explosivo principal en todos los barrenos, reservando únicamente las cañas de bambú y los espaciadores de PVC para las coronas, de modo que se preserve la configuración de cargas desacopladas.

En Ayacucho, **Valer I. [7], en el año 2022**, en su investigación el cual planteó como **objetivo**: “Determinar de qué manera la propuesta de reemplazo de anfo por emulsión influirá en mejorar la voladura en la mina Parcoy CMH 2022”. Asimismo, fue una investigación cuantitativa, aplicada, explicativo, transversal. Al término el autor **concluyó** que:

- Como resultado de implementar emulsión en Minera Parcoy, sus operaciones han registrado un avance significativo: los costos operativos se han reducido y, en paralelo, la rentabilidad de la compañía ha aumentado, un logro especialmente valioso en el contexto de la crisis global actual.
- En cuanto al primer objetivo específico, se comprobó que la aplicación de emulsión disminuye la sobreexcavación en voladuras en hasta un 18 % en comparación con ANFO. Además, el costo unitario por tonelada volada pasó de 0,42 USD/TM a 0,34 USD/TM. Esta disminución obedece fundamentalmente a la acortación de la longitud de carga, condición que abre la posibilidad de explorar posteriormente un mayor espaciamiento y burden.

En Huancavelica, **Carhuapoma E. y Pumacahua R. [8], en el año 2022**, en su investigación el cual plantearon como **objetivo**: “Evaluar el cambio de explosivo dinamita convencional a Emulnor para evaluar su rendimiento de voladura en la Unidad Operativa Horizonte – La Libertad”. Asimismo, fue una investigación de tipo aplicada, nivel explicativo, método descriptivo, diseño transversal. Al término los autores **concluyeron** que:

- El valor de t obtenido ($t = 2,93$) evidencia que el reemplazo de dinamita convencional por Emulnor mejora de manera significativa el rendimiento de la voladura en la Unidad Operativa Horizonte
- El uso de Emulnor reduce las emisiones de monóxido de carbono en 4,38 kg por tonelada de explosivo.
- Asimismo, la emisión de gases nitrosos disminuye en 14,08 kg por tonelada al emplear Emulnor.
- Aunque el costo de voladura con Emulnor es ligeramente superior al de la dinamita, este incremento se compensa con creces gracias a la notable reducción de emisiones y a una mayor eficiencia en la fragmentación.
- El avance real por disparo con Emulnor supera en 0,29 m al logrado con dinamita convencional.

1.2.3. Locales

En Cerro de Pasco, **Espinoza J. [9]**, en el año 2022, en su investigación el cual planteó como **objetivo**: “Comparar los resultados de la voladura de frentes y tajeos utilizando explosivos dinamita Semexsa 65 y Exadit 45 con Emulnor 3000 y Detonita, en la “Empresa Minera MARSA”. Asimismo, fue una investigación aplicada, correlacional, método inductivo deductivo y diseño cuantitativo. Al término los autores **concluyeron** que:

- A partir de las 17 voladuras realizadas en frentes y las 5 ejecutadas en tajeos, empleando dinamitas Semexsa 65 y Exadit 45 junto con Emulnor 3000 (1 1/2" × 12"), y tras evaluar sus impactos técnico–económicos, se observó:

- Aspecto técnico: Se logró acelerar el avance en los frentes y aumentar los volúmenes de fragmentación en los tajeos. Se observaron reducciones en los factores de perforación y en los de potencia. La concentración de contaminantes en los gases se redujo apreciablemente. El manejo de Emulnor 3000 demostró ser sencillo y seguro en obra.
- Aspecto económico: La calidad superior de los disparos se tradujo en ahorros relevantes tanto en frentes como en tajeos, mejorando la relación costo–beneficio de las voladuras.
- Emisiones y seguridad: El monitoreo de gases reveló que los humos generados por emulsiones se dispersan con mayor rapidez en el ambiente, lo cual acorta los tiempos de reingreso al área de trabajo.
- Recomendación de uso: Como esquema óptimo de carga, se sugiere emplear Emulnor 3000 (1 1/2" × 12") en los barrenos de producción y reservar Detonita para los taladros periféricos.

1.3. Bases teóricas

1.3.1. Perforación de rocas

1.3.1.1. Definición

La perforación de rocas constituye el punto de partida del ciclo de arranque en la actividad minera, ya que permite generar cavidades cilíndricas dentro del macizo rocoso que serán utilizadas para alojar cargas explosivas junto con sus elementos complementarios. Esta labor es llevada a cabo mediante equipos especializados que combinan el impacto con el movimiento rotatorio, lo que permite desintegrar la roca y

avanzar progresivamente en su interior. La correcta disposición de los taladros, conforme a un diseño geométrico específico, asegura una distribución óptima de los explosivos, lo que a su vez contribuye a una fragmentación eficaz del material al momento de la voladura [10].

Dado que el rendimiento de esta última etapa depende directamente de la calidad del proceso perforativo, se puede afirmar que perforar con precisión es determinante para obtener buenos resultados en la fragmentación. Así, una ejecución deficiente durante la perforación compromete gravemente la eficiencia de la voladura posterior, mientras que una perforación bien ejecutada constituye la base de un arranque exitoso [11].

Desde el punto de vista técnico, perforar implica transmitir energía mecánica a través de una herramienta usualmente una broca unida a varillas que recibe impactos y giro desde un equipo perforador. Este sistema actúa sobre la roca generando fragmentos o detritos, los cuales son removidos del fondo del taladro mediante un fluido barrido, como aire comprimido o agua, que facilita la limpieza y continuidad del proceso [12].

En síntesis, la perforación de rocas es el procedimiento mediante el cual se crean orificios de dimensiones específicas en formaciones rocosas compactas, utilizando maquinaria de alta especialización, con el propósito fundamental de emplazar explosivos que permitirán descomponer el macizo y posibilitar la extracción de mineral o el avance de galerías subterráneas. En la minería subterránea peruana tradicional, este trabajo se realizaba con herramientas neumáticas manuales como las perforadoras de pierna o jacklegs que exigían un esfuerzo físico

considerable y lograban avances limitados por ciclo. Por el contrario, las prácticas actuales en operaciones mecanizadas emplean equipos hidráulicos conocidos como jumbos, los cuales, mediante uno o más brazos articulados, realizan múltiples perforaciones con mayor velocidad, exactitud y seguridad operativa. En apartados posteriores se examinará en detalle esta evolución tecnológica, que ha sido clave en la mejora sostenida de los indicadores de eficiencia en el desarrollo de labores subterráneas [13].

1.3.1.2. Tipos

Dentro de las operaciones de minería subterránea, la perforación de rocas puede ejecutarse mediante diversos métodos, los cuales se clasifican en función del tipo de equipo utilizado y del modo en que se lleva a cabo la labor. De manera general, es posible distinguir entre dos enfoques principales: por un lado, la perforación convencional o manual, que se efectúa con herramientas portátiles manipuladas directamente por el trabajador como los martillos neumáticos de mano, y por otro, la perforación mecanizada, en la que se emplean sistemas más sofisticados, como los jumbos hidráulicos, cuyo funcionamiento implica la operación remota de uno o varios brazos perforadores desde una cabina de control. Además de esta clasificación por nivel de mecanización, los métodos de perforación se diferencian también por el propósito técnico y la disposición espacial de los taladros. Así, se reconocen distintas aplicaciones según el objetivo operativo: por ejemplo, la perforación frontal se orienta al avance de galerías en desarrollo; la perforación de producción, también conocida como long-hole drilling, se emplea para ejecutar taladros largos dirigidos

al tumba del mineral en cámaras; y la perforación para sostenimiento se utiliza en la instalación de pernos de anclaje que estabilizan las estructuras subterráneas [11].

A continuación, se presentan los principales tipos de perforación empleados en el contexto de la minería subterránea, describiendo sus características técnicas, condiciones de uso y ventajas operativas [14], [15]:

- Perforadoras de pierna o jacklegs (taladros manuales):

Este tipo de equipo corresponde a herramientas neumáticas portátiles que cuentan con un soporte extensible, conocido como “pata”, que facilita su estabilidad durante la operación. El trabajador debe sujetar y orientar directamente el taladro contra la superficie rocosa, lo que implica una exigencia física considerable. Estos equipos son especialmente útiles en labores de desarrollo donde el espacio disponible es reducido o en vetas estrechas, logrando perforaciones de entre 1.5 y 3 metros por tiro. Su principal fortaleza radica en su simplicidad operativa y en el bajo costo de adquisición inicial. Sin embargo, su rendimiento en términos de productividad es limitado, y expone al operario a altos niveles de ruido, vibración y emisión de polvo, factores que inciden negativamente en la salud y seguridad laboral.

- Jumbos de perforación frontal:

Se trata de equipos móviles, propulsados mediante ruedas o sistemas de orugas, que incorporan uno o más brazos articulados hidráulicos. En cada brazo se monta un martillo perforador, lo que

permite realizar múltiples taladros en una sola operación. Los jumbos se utilizan principalmente para ejecutar la perforación de frentes de desarrollo en túneles o galerías, ofreciendo altos niveles de velocidad, precisión y eficiencia. Un operador desde la cabina de mando puede controlar simultáneamente varios martillos, optimizando los tiempos de ejecución y asegurando la uniformidad del patrón perforativo. Para ilustrar su capacidad, un jumbo estándar puede completar en un solo turno un conjunto de 40 barrenos de aproximadamente 4 metros cada uno, tarea que, bajo un sistema manual, demandaría varios turnos y la intervención de múltiples trabajadores. Adicionalmente, estos equipos permiten un control más exacto sobre la orientación y profundidad de cada taladro, minimizando errores operativos y desviaciones respecto al diseño planificado.

- Perforadoras de barrenos largos (long-hole drills):

Diseñadas específicamente para la perforación de taladros extensos con orientación vertical o inclinada, estas máquinas se emplean principalmente en labores de producción minera, como en los métodos de sublevel stoping o vertical retreat mining (VRM). Son equipos de alta precisión, montados sobre plataformas móviles o fijas, usualmente con sistemas hidráulicos automatizados que permiten operar con seguridad y eficiencia sin necesidad de exponer directamente al trabajador frente al macizo rocoso. Modelos especializados, como los de la serie DL de Sandvik, son capaces de generar taladros de gran diámetro entre 2 y 4 pulgadas

y con longitudes que pueden superar varias decenas de metros. Esta capacidad es fundamental para ejecutar voladuras de gran escala y asegurar un avance sostenido en zonas de explotación de mayor envergadura, sin comprometer la seguridad operativa.

1.3.1.3. Convencional vs mecanizada

La transición de métodos de perforación convencional (manual) a perforación mecanizada ha sido uno de los avances más significativos en la minería subterránea contemporánea, con implicancias directas en la productividad, seguridad y control de la operación. A continuación, se comparan ambos enfoques en varios aspectos clave [14], [16]:

- **Productividad y rendimiento operativo:**

El uso de sistemas mecanizados en la perforación de rocas ha demostrado generar un rendimiento significativamente superior en comparación con los métodos manuales. Los jumbos hidráulicos, gracias a su capacidad de ejecutar múltiples barrenos de manera simultánea y con elevadas velocidades de penetración, permiten completar en cuestión de minutos labores que, con herramientas convencionales, podrían prolongarse por varias horas. Un estudio realizado con un mini-jumbo en contextos de vetas estrechas evidenció una reducción del 74% en el tiempo requerido para perforar un round, en comparación con una perforadora stoper tradicional. Además del ahorro temporal, la eficiencia alcanzada mediante equipos mecanizados repercute en una disminución del costo unitario por metro perforado. En el mismo estudio, se documentó una reducción aproximada del 12% en el costo por pie

perforado al emplear jumbos, en contraste con tecnologías convencionales. Esta mejora se explica por el aprovechamiento más eficiente de la energía aplicada al proceso: los sistemas hidráulicos integrados y el control automatizado del avance proporcionan una perforación más rápida, profunda y continua. En consecuencia, se incrementa la cantidad de metros perforados por turno y se eleva el rendimiento por hora efectiva de trabajo, lo que convierte a la perforación mecanizada en una alternativa altamente rentable en términos técnicos y económicos.

- Calidad y precisión en la ejecución de taladros:

En los sistemas manuales de perforación, la exactitud del trabajo depende en gran medida de la destreza individual del operador, así como de su nivel de fatiga física. Esta dependencia suele derivar en desviaciones frecuentes respecto al diseño previsto, manifestadas en variaciones de ángulos, espaciamientos inconsistentes e incluso en taladros con profundidades inadecuadas o trayectorias desviadas. Tales irregularidades comprometen la eficacia de la voladura, al alterar la distribución óptima del explosivo y provocar efectos negativos como pérdida de energía, sobrerotura no controlada o fragmentación ineficiente. En contraste, los equipos mecanizados como los jumbos hidráulicos cuentan con sistemas estructurales de guía rígida y controles de precisión que permiten mantener una alineación y ubicación rigurosamente fiel al patrón de perforación diseñado. Esto significa que cada barreno se ejecuta con la orientación, separación y

profundidad requeridas, minimizando errores humanos y maximizando la uniformidad del resultado. La incorporación de esta tecnología favorece una disciplina operativa más estricta, ya que cada tiro se realiza de forma sistemática en el punto previsto. Como consecuencia, los resultados obtenidos por ronda de voladura se acercan con mayor exactitud al rendimiento teórico estimado, optimizando tanto el consumo de explosivos como la eficiencia global del proceso de arranque. La mecanización, en este sentido, no solo eleva la productividad, sino que también garantiza un estándar de calidad superior en la preparación de cada frente de trabajo.

- Seguridad y condiciones laborales del operario:

El empleo de perforadoras manuales implica una exposición directa del trabajador al frente rocoso, lo que conlleva una serie de riesgos inherentes a la operación. Entre ellos se encuentran los desprendimientos de material, la exposición constante a niveles elevados de ruido los martillos neumáticos pueden alcanzar aproximadamente 115 decibelios, y la transmisión de vibraciones a las extremidades superiores, factores que, sumados al esfuerzo físico requerido, incrementan la probabilidad de lesiones musculoesqueléticas y accidentes laborales. Frente a esta realidad, los sistemas mecanizados como los jumbos ofrecen condiciones notablemente más seguras. Estos equipos suelen incorporar cabinas blindadas para el operador o permiten el control remoto del proceso, alejando así al personal de zonas

potencialmente peligrosas. La ergonomía de la operación mejora considerablemente: se reduce la carga física, disminuye la incidencia de accidentes relacionados con proyecciones de roca o maniobras defectuosas, y se mitigan los efectos negativos del ruido y la vibración sobre el cuerpo humano. Otro aspecto relevante es la menor permanencia del personal en zonas críticas, como los techos recién volados. Al acelerar la perforación mediante jumbos, se acorta el tiempo de exposición a posibles desprendimientos posteriores al disparo, lo cual representa una ventaja sustancial en términos de seguridad operacional. En definitiva, la automatización de las tareas críticas mediante mecanización no solo incrementa la eficiencia técnica, sino que también eleva los estándares de protección y bienestar del trabajador en entornos subterráneos exigentes.

- Flexibilidad operativa y capacidad de cobertura:

En labores subterráneas de gran volumen, como rampas o túneles principales, la perforación mecanizada se vuelve prácticamente imprescindible debido a su capacidad para cubrir de manera eficiente y veloz toda la superficie del frente de trabajo. Por ejemplo, un jumbo de doble brazo es capaz de perforar cómodamente áreas de hasta 5 metros de altura por 6 metros de ancho, lo que permite avanzar grandes secciones sin interrupciones. En contraste, cuando se emplean equipos manuales, es necesario montar y desplazar estructuras auxiliares como andamios o plataformas para alcanzar las zonas superiores,

lo que aumenta la complejidad logística y reduce la productividad. Sin embargo, en labores subterráneas con geometrías estrechas o perfiles irregulares, los equipos mecanizados de gran tamaño pueden enfrentar dificultades de maniobra o acceso. En estos casos, la perforación convencional con herramientas portátiles sigue siendo útil como recurso complementario, especialmente en trabajos como realces angostos, recortes específicos o accesos donde la maquinaria pesada no puede operar con eficacia. Aun así, el desarrollo tecnológico ha dado lugar a versiones compactas de equipos mecanizados, como los minijumbos, diseñados específicamente para operar en espacios reducidos. Estos equipos han ido sustituyendo progresivamente el uso de herramientas manuales, incluso en frentes de dimensiones limitadas, debido a su eficiencia, seguridad y precisión. Así, la mecanización se adapta cada vez más a un rango amplio de escenarios subterráneos, consolidando su papel como tecnología versátil y dominante en la perforación minera actual.

- **Costos y análisis económico de la perforación:**

Desde una perspectiva económica, la perforación convencional presenta una ventaja inicial en cuanto al costo de adquisición, ya que los equipos como los martillos neumáticos representan una inversión significativamente menor en comparación con la maquinaria mecanizada. No obstante, este aparente ahorro se ve contrarrestado por los elevados costos operativos asociados a su bajo rendimiento, la necesidad de mayor cantidad de personal y los

tiempos prolongados de ejecución. En contraposición, los sistemas de perforación mecanizada implican una inversión de capital considerable, tanto en la compra de equipos como en su mantenimiento técnico especializado. Sin embargo, estos costos se amortizan con rapidez debido a la alta productividad que ofrecen. Diversos estudios han evidenciado que, a pesar del gasto inicial, el costo unitario por metro de avance tiende a ser más bajo en operaciones mecanizadas, precisamente por la eficiencia alcanzada en cada turno de trabajo. Adicionalmente, los beneficios no se limitan al proceso de perforación en sí. Las voladuras resultantes de una perforación más precisa suelen presentar mejor fragmentación, menor cantidad de zonas no arrancadas y menor sobrecarga de trituración, lo cual repercute favorablemente en todo el ciclo operativo posterior, reduciendo costos en manejo, carguío y transporte del material. Por estos motivos, la mecanización ha sido ampliamente adoptada por minas de mediana y gran escala, donde la necesidad de avanzar considerablemente en cortos periodos exige una solución eficiente y sostenible. En contextos donde el ritmo de desarrollo es un factor crítico, la relación costo-beneficio termina favoreciendo claramente al uso de jumbos, consolidándolos como la alternativa más rentable para el desarrollo subterráneo moderno.

La evidencia operativa demuestra que la perforación mecanizada ofrece ventajas sustanciales frente a los métodos tradicionales en prácticamente todos los parámetros clave de desempeño: desde la cantidad de metros

perforados y el ritmo de avance, hasta la calidad de los taladros y las condiciones laborales del personal. En consecuencia, la perforación manual ha quedado limitada a contextos excepcionales, como intervenciones en zonas de difícil acceso o en situaciones imprevistas donde la maquinaria no puede operar [16].

En el entorno minero peruano, la mecanización ha sido un factor determinante para cumplir con los exigentes cronogramas de desarrollo subterráneo y alcanzar mejoras sostenidas en los indicadores clave de rendimiento (KPI) vinculados a las etapas de perforación y voladura. No obstante, el éxito de este modelo tecnológico no depende exclusivamente del equipo en sí, sino también de factores complementarios fundamentales: la formación intensiva de operadores especializados en el manejo de jumbos y la implementación de un sistema técnico de mantenimiento y gestión operativa adecuado [16].

Cuando estas condiciones se atienden con rigor, la transición desde la perforación convencional hacia sistemas mecanizados no solo representa un cambio técnico, sino una transformación profunda en la eficiencia productiva. Este proceso marca un punto de inflexión hacia operaciones más competitivas, sostenibles y orientadas a la mejora continua de las actividades unitarias en el interior de la mina [17].

1.3.2. Voladura de rocas

La voladura, también conocida como tronadura en algunos países como Chile, constituye la fase activa del arranque de roca mediante el uso controlado de explosivos. Esta operación se realiza tras haber completado la perforación de una malla de taladros, en los cuales se introduce y

detona el explosivo con el fin de fracturar, fragmentar y desplazar el macizo rocoso. La detonación libera energía química en forma de una onda de choque de alta presión, seguida por una violenta expansión de gases a temperaturas elevadas. Esta secuencia genera fisuras y rompe la estructura de la roca, transformándola en material suelto o escombros, listo para ser cargado y transportado [17].

Desde el punto de vista físico, la voladura busca transformar una masa sólida en fragmentos manejables, aprovechando de forma controlada la energía súbita del explosivo. Para que esta transformación sea efectiva, es fundamental que la energía generada se canalice correctamente hacia la rotura del material, evitando su disipación por vías ineficaces como grietas naturales, vacíos o una carga mal distribuida. En este sentido, un diseño deficiente puede conducir a efectos no deseados como sobreexcavación, vibraciones excesivas, proyecciones descontroladas o fragmentación inadecuada, lo que compromete tanto la seguridad como la eficiencia de las operaciones siguientes [16].

Una voladura bien ejecutada optimiza el uso de la energía explosiva, logrando una fragmentación adecuada, mínima generación de efectos colaterales y condiciones óptimas para el posterior carguío y transporte. Cabe subrayar que la voladura no es un evento aislado, sino que forma parte de un ciclo estrechamente vinculado con la etapa anterior de perforación. La calidad del disparo depende directamente de la precisión con que se haya ejecutado la malla de perforación: una disposición geométrica incorrecta o un error en la profundidad de los taladros puede afectar negativamente el resultado de la voladura [18].

El proceso incluye además un diseño de secuencias de detonación, en el cual los barrenos se activan con retardos controlados. Esta técnica permite direccionar la fractura hacia zonas libres, logrando un arranque progresivo que evita interferencias entre las cargas y mejora el control de la fragmentación. Por lo tanto, el diseño de la voladura que incluye parámetros como la cantidad de explosivo por tiro, el tiempo entre detonaciones, el confinamiento y el espaciamiento debe buscar el máximo aprovechamiento energético, asegurando una rotura eficiente del macizo sin comprometer la integridad de estructuras cercanas ni generar efectos adversos innecesarios [19].

1.3.3. Los explosivos

1.3.3.1. Definición

Un explosivo puede definirse como una sustancia o combinación de sustancias químicas capaces de reaccionar a gran velocidad en un proceso conocido como detonación liberando una enorme cantidad de energía en forma de gases comprimidos a elevadas temperaturas. Esta reacción, que ocurre en fracciones de segundo, constituye la base de su aplicación en operaciones de voladura, donde su poder destructivo se emplea para fragmentar rocas de manera controlada [15].

En el ámbito de la ingeniería civil y minera, los explosivos utilizados suelen estar formulados a partir de mezclas homogéneas de componentes oxidantes y combustibles. Estos materiales, en conjunto, son sensibilizados mediante agentes específicos para asegurar que respondan a un estímulo de iniciación con la detonación esperada. Una formulación típica en minería incluye un agente oxidante como el nitrato

de amonio u otras sales nitrato y un combustible, que puede ser aceite fuel, cera, polvo de aluminio u otros hidrocarburos. A esta mezcla se le agregan sensibilizantes para facilitar la reacción, tales como nitroglicerina en el caso de dinamitas, o inclusiones físicas como microesferas de vidrio o burbujas de gas en las emulsiones [15].

Una vez activado por un sistema iniciador, el explosivo sufre una conversión energética abrupta: en cuestión de milisegundos, los componentes químicos se oxidan, generando una cantidad masiva de calor. Este calor, a su vez, produce gases calientes que se expanden de manera violenta, ejerciendo una presión suficiente para fracturar el macizo rocoso circundante. Es esta capacidad de liberar energía súbitamente lo que hace del explosivo una herramienta esencial en el ciclo de arranque de material en minería subterránea y a cielo abierto [15].

La detonación se define como una onda de choque química autosostenida que se desplaza a través del explosivo a velocidades supersónicas, alcanzando varios miles de metros por segundo. En los explosivos empleados en voladura, esta velocidad de reacción suele situarse en un rango típico de aproximadamente 4000 a 6000 m/s. Esta velocidad tan elevada implica que la energía química acumulada se libera de manera prácticamente instantánea, generando en el punto de detonación un pico de presión extremadamente alto [15].

Es precisamente esta liberación súbita y localizada de energía lo que otorga a los explosivos su notable capacidad para fragmentar roca y realizar trabajo mecánico. En milisegundos, el proceso genera simultáneamente una onda de choque que viaja a través del material

circundante, junto con una violenta expansión de gases calientes que ejerce presión sobre las paredes del taladro y las discontinuidades del macizo rocoso. La combinación de ambos efectos impacto y empuje fractura y desplaza la roca con gran eficacia [15].

A diferencia de la combustión convencional, como la que se produce al encender pólvora negra, la detonación es mucho más rápida y energética. Las reacciones de combustión simples se desarrollan a velocidades mucho menores y no generan ondas de choque significativas; por ello, se considera que sustancias que solo arden o se queman lentamente como deflagrantes o propulsantes no son verdaderos explosivos desde el punto de vista técnico, ya que carecen de la capacidad de producir los efectos destructivos asociados a la detonación [15].

Desde el punto de vista químico, un explosivo ideal se caracteriza por contener en su estructura todos los elementos necesarios para llevar a cabo la reacción de detonación sin requerir componentes externos. Esto implica la presencia equilibrada de un agente combustible y un comburente en proporciones óptimas, lo que permite que, una vez iniciada, la reacción sea completamente autosostenida. Esta característica es lo que se conoce como una mezcla íntima. Un caso representativo es la nitroglicerina, un compuesto explosivo líquido en el cual una sola molécula contiene tanto el combustible como el oxígeno necesario para su propia oxidación [15].

Por otro lado, en mezclas explosivas como el ANFO (nitrato de amonio con fuel oil), la reacción ocurre entre dos componentes diferentes: el nitrato de amonio actúa como oxidante, mientras que el fuel oil cumple la

función de combustible. Para asegurar una detonación eficiente, estos materiales deben mezclarse homogéneamente, formando un sistema químico uniforme que responda de manera predecible al estímulo de iniciación [15].

En la actualidad, las formulaciones comerciales de explosivos incluyen aditivos diseñados para modificar sus propiedades físicas y químicas, de modo que puedan adaptarse a diversas condiciones geotécnicas y operativas. Así, existen variantes con mayor potencia energética para fracturar rocas extremadamente duras, mientras que en otros contextos se prefieren explosivos más seguros, con velocidades de detonación reducidas, destinados a limitar los efectos colaterales como vibraciones o daños estructurales no deseados [15].

En el contexto minero, la elección del explosivo se realiza según criterios específicos de cada operación: los materiales de alta velocidad de detonación (alta brisance) son ideales para ambientes con rocas resistentes, ya que generan fragmentación más eficaz, mientras que las fórmulas de menor energía son útiles en situaciones donde se requiere preservar la integridad del entorno o minimizar la propagación de energía a estructuras adyacentes [15].

1.3.3.2. Clasificación

Los explosivos utilizados en minería se pueden clasificar de diversas maneras, ya sea por su composición química, su sensibilidad, su forma de uso (encartuchados vs. granel), su velocidad de reacción (alta o baja explosivos), etc. A nivel práctico en voladura de rocas, la clasificación más común distingue entre los explosivos comerciales de rompimiento

(diseñados para volar roca) y los explosivos iniciadores o accesorios (detonadores, cordón detonante, boosters, que sirven para iniciar o propagar la detonación). A continuación, se desarrolla la clasificación de explosivos por composición química [20], [21], [22]:

A. Dinamitas

Las dinamitas representan una de las formulaciones explosivas más tradicionales, desarrolladas originalmente a partir de nitroglicerina (NG) absorbida en una matriz porosa y combinada con agentes oxidantes. En su evolución moderna, las dinamitas gelatinizadas han incorporado componentes como nitroglicol, nitrato de amonio y estabilizantes orgánicos (por ejemplo, harina de madera o carbonato), logrando una consistencia densa de tipo plástico o pastoso. Estas dinamitas, aún empleadas en operaciones mineras peruanas, suelen contener entre un 20% y un 60% de NG o nitroglicol, con una densidad elevada que ronda los 1.4 g/cm^3 y una velocidad de detonación (VOD) que puede alcanzar entre 5000 y 6000 m/s. Se comercializan en forma de cartuchos cilíndricos recubiertos con envoltura de papel parafinado o plástico, en diferentes diámetros según la aplicación (por ejemplo, 25 mm o 32 mm).

Las dinamitas se distinguen por su alto contenido energético, buena resistencia al agua y alta sensibilidad al detonador convencional (cap-sensitive), lo que las convirtió en el explosivo principal durante muchas décadas, tanto para labores de arranque como para el cebado de otros agentes de menor sensibilidad. Su

capacidad de iniciar explosivos secundarios las hace especialmente útiles como boosters en diseños de voladura complejos.

No obstante, el uso extensivo de dinamita ha disminuido en los últimos años, principalmente debido a sus implicancias en términos de seguridad: el contenido elevado de nitroglicerina las hace más sensibles a impactos, fricción o temperaturas elevadas, aumentando el riesgo durante el transporte y manipulación.

Dentro de esta familia de productos, se reconocen diversos subtipos. Las dinamitas gelatinizadas, también conocidas como tipo Semigel o Goma, presentan una alta proporción de NG y una textura más flexible. En cambio, las dinamitas pulverulentas, con menor contenido de NG y mayores cargas inertes, han caído en desuso debido a su menor eficiencia y seguridad.

B. Pulverulentos o slurries (hidrogeles)

Los explosivos pulverulentos, también conocidos como slurries o hidrogeles, corresponden a formulaciones acuosas desarrolladas como una alternativa más segura a la dinamita a mediados del siglo XX. Estos explosivos consisten en una suspensión viscosa compuesta por nitrato de amonio como componente principal, combinado con otros nitratos (como los de sodio o calcio), sustancias combustibles entre ellas azúcares, carbón o aluminio en polvo y agentes espesantes, como la goma guar, que otorgan consistencia gelatinosa a la mezcla.

Una de sus principales ventajas operativas radica en su menor sensibilidad frente a estímulos accidentales, ya que su alta humedad interna dificulta una detonación no deseada. Para mejorar su resistencia al agua, los hidrogeles requieren un proceso de reticulación química, mediante el cual se endurece el gel y se estabiliza su estructura, impidiendo que se disuelva en condiciones húmedas. Además, se incorporan burbujas de aire o microesferas que actúan como sensibilizantes, permitiendo que el explosivo pueda ser iniciado adecuadamente con un detonador convencional.

A pesar de que los hidrogeles representaron un avance notable en materia de seguridad en su época, su uso ha disminuido en las últimas décadas, siendo reemplazados progresivamente por emulsiones explosivas, que ofrecen una mayor estabilidad química, mejor resistencia al agua y una vida útil más prolongada. No obstante, los slurries aún encuentran aplicación en ciertas operaciones específicas donde sus propiedades técnicas siguen siendo adecuadas o donde las condiciones del entorno permiten su uso seguro y eficaz.

C. ANFO (Nitrato de amonio–Fuel Oil)

El ANFO acrónimo de Ammonium Nitrate Fuel Oil es una mezcla explosiva ampliamente utilizada en minería, compuesta por nitrato de amonio poroso en forma de prills, al que se le incorpora aproximadamente un 5.5% en peso de gasóleo como componente combustible. Esta formulación se destaca por su bajo costo,

facilidad de preparación y buena disponibilidad, lo que la convierte en una de las opciones más utilizadas en voladuras a cielo abierto. En minería subterránea, su empleo ha estado históricamente condicionado a entornos secos, debido a sus limitaciones frente a la humedad. El ANFO puede suministrarse en cartuchos envueltos en papel para aplicaciones puntuales, aunque su presentación más habitual es a granel, cargando directamente los gránulos en el interior del barreno. Su densidad es relativamente baja, alrededor de 0.8 g/cm^3 , aunque puede incrementarse ligeramente mediante técnicas de compactación neumática.

Una de las principales desventajas del ANFO es su escasa resistencia al agua: el nitrato de amonio es soluble y se disuelve rápidamente si entra en contacto con humedad, lo que compromete su integridad y capacidad de detonación. Además, no es un explosivo sensible al detonador (non-cap-sensitive), por lo que siempre requiere un booster como una dinamita o pentolita para asegurar una iniciación efectiva. La velocidad de detonación del ANFO se encuentra en un rango de aproximadamente 3000 a 4000 m/s, dependiendo del diámetro del barreno y de las condiciones de confinamiento. A pesar de su baja brisancia, posee una excelente capacidad gasificante, lo que lo hace adecuado para voladuras de bancos donde el objetivo es desplazar grandes volúmenes de roca más que pulverizarla finamente.

D. Emulsiones

Las emulsiones explosivas constituyen en la actualidad la categoría de explosivos más utilizada en operaciones mineras, debido a su alto rendimiento, seguridad en el manejo y adaptabilidad a diversas condiciones geotécnicas. Se trata de sistemas tipo emulsión agua en aceite, en los que la fase interna corresponde a una solución altamente concentrada de nitrato de amonio frecuentemente acompañada de otros nitratos como los de calcio o sodio, mientras que la fase continua es un aceite combustible que incluye un agente emulsionante para mantener la estabilidad del sistema. Estas emulsiones se sensibilizan por la incorporación de pequeñas cavidades internas, ya sea mediante la adición de microesferas huecas o mediante la generación de burbujas de gas, como el nitrógeno, a través de procesos químicos. Estas cavidades actúan como sitios de iniciación, facilitando la propagación de la onda detonante. Una característica clave de las emulsiones modernas es que, en su estado base, no contienen nitroglicerina ni nitroglicol, y no son explosivas hasta que se les añade el sensibilizante. Esta propiedad las hace intrínsecamente más seguras para su manipulación, transporte y almacenamiento.

1.3.3.3. Características

Los explosivos se evalúan y comparan mediante una serie de propiedades o características técnicas que inciden en su rendimiento y uso seguro. Las más importantes incluyen: la energía, la densidad, la velocidad de detonación, la presión de detonación, el diámetro crítico, la resistencia al

agua, la sensibilidad, y la producción de gases (humeabilidad). A continuación, se explica cada una [15], [20], [23], [24]:

A. Energía explosiva

La energía explosiva se define como la capacidad de un explosivo para realizar trabajo útil, entendiendo este como la facultad de romper, fragmentar y desplazar el material rocoso. Este parámetro se cuantifica habitualmente en términos de energía liberada por unidad de masa (megajulios por kilogramo) o por volumen, y se expresa frecuentemente en relación con un explosivo patrón, siendo el ANFO el estándar de referencia más común. Durante la detonación, la energía del explosivo se manifiesta en dos formas principales. Por un lado, se genera una onda de choque que actúa en las inmediaciones del taladro, provocando la fractura inicial del macizo. Por otro lado, la expansión de los gases calientes resultantes contribuye a completar el proceso, separando y desplazando los fragmentos de roca. Un explosivo bien formulado debe presentar un equilibrio adecuado entre ambos componentes: impacto (brisanza) y gasificación. La cantidad total de energía que puede liberar un explosivo incide directamente en el volumen de roca que es capaz de romper. Por ello, en los diseños de voladura a gran escala se emplea el concepto de factor de carga, que representa la cantidad de explosivo (en kilogramos) necesaria por metro cúbico de roca, según su resistencia geomecánica y las condiciones del frente de trabajo.

B. Densidad

La densidad de un explosivo se define como la cantidad de masa contenida por unidad de volumen, generalmente expresada en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3). Este parámetro resulta clave tanto para determinar cuánta energía puede alojarse en el espacio disponible dentro de un taladro, como para comprender el comportamiento del explosivo durante la detonación. En términos generales, una mayor densidad implica una mayor concentración de energía por volumen, lo cual puede ser ventajoso en aplicaciones donde se busca máxima eficiencia energética en espacios reducidos.

La densidad también tiene implicancias prácticas en la carga de barrenos en presencia de agua. Los explosivos cuya densidad es menor que la del agua, como el ANFO suelto ($\sim 0.8 \text{ g}/\text{cm}^3$), tienden a flotar y no se distribuyen adecuadamente en taladros inundados. Por el contrario, las emulsiones, con densidades típicas de aproximadamente $1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$, se hunden con facilidad, permitiendo una carga más uniforme y efectiva en estos entornos.

Muchos explosivos comerciales modernos permiten ajustar su densidad para adaptarse a distintos requerimientos operativos. Por ejemplo, en las emulsiones bombeables, es posible modificar la proporción de microesferas o materiales de baja densidad para obtener formulaciones entre 0.9 y $1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$, según las condiciones geotécnicas del frente. En general, una mayor densidad hasta un límite técnico razonable se asocia con un mayor rendimiento por metro de taladro, por lo que se privilegia en zonas de alta

resistencia o donde se requiere una carga energética concentrada. En cambio, densidades más bajas se emplean estratégicamente en áreas donde se busca reducir la potencia, como en contornos de excavación o en formaciones rocosas blandas.

C. Velocidad de detonación

La velocidad de detonación, comúnmente abreviada como VOD (Velocity of Detonation), se refiere a la rapidez con la que la onda detonante se propaga a través del cuerpo del explosivo, y se expresa en metros por segundo (m/s). Este parámetro constituye uno de los indicadores más representativos del desempeño de un explosivo, ya que guarda una relación directa con su capacidad de fractura: cuanto mayor es la VOD, más intensa resulta la onda de choque generada, y por tanto mayor es la brisance o poder rompedor del explosivo.

En términos generales, productos como dinamitas y emulsiones presentan velocidades de detonación que oscilan entre 4500 y 6000 m/s, mientras que el ANFO en diámetros de carga comunes alcanza valores más modestos, en el rango de 3200 a 3800 m/s. No obstante, la VOD real en campo está condicionada por diversos factores como la composición química del explosivo, su densidad, el grado de confinamiento y el diámetro del barreno. Un diámetro insuficiente o una carga mal compactada, por ejemplo, pueden reducir significativamente la velocidad de detonación, comprometiendo la eficacia de la voladura.

En la práctica minera, es posible monitorear la VOD mediante sondas o cables especiales colocados en los barrenos, lo cual permite confirmar si la reacción se desarrolló conforme a lo previsto. Una VOD por debajo del valor esperado puede ser síntoma de diversos problemas operativos, como humedad excesiva, mala manipulación del explosivo o parámetros de carga inadecuados.

Desde el punto de vista funcional, los explosivos de alta VOD son especialmente eficaces en la fragmentación de rocas duras, debido a que su efecto brisante se concentra en la zona inmediata al taladro, produciendo fragmentación fina. Sin embargo, en voladuras cercanas a infraestructuras sensibles o zonas urbanas, puede preferirse el uso de explosivos de menor VOD, que, aunque ofrecen una fragmentación más gruesa, generan menores niveles de vibración y onda de choque, protegiendo estructuras adyacentes.

D. Presión de detonación

La presión de detonación es un parámetro fundamental que se refiere a la presión generada en el frente de choque durante la detonación de un explosivo, y se mide normalmente en gigapascales (GPa). Esta presión está directamente relacionada con dos variables esenciales del explosivo: su velocidad de detonación (VOD) y su densidad. Cuanto mayores son estos valores, mayor será la presión alcanzada en el instante de la

detonación, lo que incrementa la capacidad del explosivo para pulverizar o triturar la roca situada en las inmediaciones del taladro. Explosivos sensibles al detonador (cap-sensitive), como las dinamitas, generan presiones de detonación particularmente elevadas debido a su alta VOD y densidad, lo que en el pasado los hacía la opción preferida para romper macizos rocosos de gran dureza. Esta capacidad destructiva se traduce en el concepto de brisancia, término que alude al poder de choque o “capacidad de shattering” del explosivo. En el laboratorio, la brisancia puede medirse mediante ensayos como el test de arena de Hess o la prueba de expansión en plomo de Trauzl, los cuales permiten comparar de manera estandarizada el efecto rompedor de distintas formulaciones.

En el contexto de la operación minera diaria, el cálculo exacto de la brisancia no suele formar parte del diseño rutinario de voladuras. No obstante, los ingenieros reconocen las características generales de los productos disponibles: las emulsiones y las dinamitas gelatinizadas se consideran altamente brisantes, mientras que mezclas como el ANFO, aunque poseen menor capacidad de choque, ofrecen una excelente fuerza de empuje gracias a su elevada generación de gases.

La elección del tipo de explosivo se realiza en función del entorno geomecánico y los objetivos operativos. Así, en zonas con rocas duras o condiciones de alto confinamiento, se opta por explosivos de alta brisancia, que aseguren una fragmentación efectiva. En

cambio, en canteras de materiales blandos o en tareas donde se prioriza la proyección del material más que su trituración fina, se prefiere el uso de explosivos de menor brisancia y mayor efecto gasificante.

E. Resistencia al agua

La resistencia al agua hace referencia a la capacidad de un explosivo para conservar sus propiedades detonantes cuando se encuentra expuesto a ambientes húmedos o en contacto directo con agua. Esta característica, más que expresarse mediante valores numéricos, se describe cualitativamente según el comportamiento del explosivo en condiciones de humedad. En los explosivos modernos, como emulsiones y geles, la resistencia al agua proviene en gran parte de su estructura química: la emulsión agua-en-aceite actúa como una barrera física que protege la fase oxidante de la acción del agua externa. Esta cualidad resulta fundamental a la hora de elegir el tipo de explosivo a utilizar en frentes donde existen filtraciones o presencia constante de humedad. El ANFO, por su naturaleza porosa y absorbente, tiende a degradarse rápidamente al entrar en contacto con agua, disolviendo el agente oxidante y volviéndose ineficaz para detonar. En contraste, las emulsiones encartuchadas pueden permanecer varios días dentro de un barreno húmedo sin perder significativamente su capacidad energética ni su sensibilidad al iniciador. La resistencia al agua también tiene implicancias prácticas en el almacenamiento y la manipulación de explosivos.

En entornos húmedos, los cartuchos requieren protección adicional para evitar deterioro, lo cual influye en los procedimientos logísticos y de seguridad operativa.

F. Sensibilidad

La sensibilidad de un explosivo se refiere a la facilidad con la que puede ser iniciado por un estímulo externo, y constituye un criterio clave tanto para el diseño del disparo como para las consideraciones de seguridad operativa. En términos prácticos, los explosivos se clasifican en dos grandes grupos según su capacidad de iniciación: aquellos que son sensibles al detonador (cap-sensitive), los cuales pueden activarse mediante un detonador convencional, y aquellos que requieren un iniciador de mayor potencia, como un booster o carga de refuerzo (por ejemplo, pentrex o dinamita). Productos como las dinamitas, las emulsiones encartuchadas y ciertos tipos de geles pertenecen al primer grupo, ya que responden directamente al impulso generado por un detonador estándar. En cambio, explosivos como el ANFO a granel o las emulsiones no sensibilizadas solo pueden ser detonados eficazmente cuando se utiliza un iniciador de alta energía, dado que su umbral de activación es más alto. La sensibilidad efectiva de un explosivo depende de múltiples factores, entre ellos su formulación química especialmente el contenido de nitroglicerina u otros agentes sensibilizantes, así como variables externas como la temperatura ambiente o el estado físico del producto. Una sensibilidad excesiva, sin embargo, representa un riesgo operativo

importante: explosivos con alto contenido de nitroglicerina, como las dinamitas antiguas, podían reaccionar accidentalmente ante impactos, fricción o fuentes de calor, lo que comprometía la seguridad del personal. Por esta razón, los desarrollos actuales tienden a formular explosivos más estables, como las emulsiones con microesferas, que no reaccionan ante estímulos comunes de manipulación y requieren un iniciador específico para activarse.

G. Gases y humos

Como resultado de la detonación, los explosivos liberan una variedad de gases que forman parte inherente del proceso químico de oxidación rápida. En condiciones ideales, estos productos gaseosos serían predominantemente compuestos inertes como vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno (N_2), los cuales no representan riesgos significativos para la salud humana ni el medio ambiente. Sin embargo, en la práctica, las reacciones nunca son completamente limpias, y suele generarse una cierta proporción de gases tóxicos, especialmente monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO_x), que pueden representar un riesgo importante en operaciones subterráneas.

La toxicidad de estos humos cobra especial relevancia en minería bajo tierra, donde la circulación del aire es limitada y depende completamente de los sistemas de ventilación. Tras una voladura, se libera una “nube” de gases que debe ser evacuada o diluida antes de permitir el reingreso del personal al área afectada. Por ello, la calidad de los productos gaseosos no solo es un tema de

impacto ambiental, sino también un factor clave de seguridad operacional.

El tipo de gases generados depende en gran medida del balance de oxígeno en la formulación del explosivo. Un ANFO correctamente balanceado en oxígeno, por ejemplo, tiende a producir cantidades mínimas de NO_x , mientras que explosivos con exceso de combustible como algunas dinamitas ricas en fuel oil pueden generar niveles elevados de monóxido de carbono. Las emulsiones, cuando están bien formuladas y correctamente detonadas, son conocidas por emitir menores concentraciones de gases nocivos y, por ello, a veces se comercializan como agentes de voladura “limpios”. Sin embargo, si la detonación es incompleta o se produce bajo condiciones no ideales, también pueden liberar dióxido de nitrógeno (NO_2), que se identifica visualmente por su coloración naranja y su alta toxicidad.

Aunque la emisión de gases no afecta directamente la eficiencia del arranque de roca, sí representa una variable relevante en términos de seguridad, sostenibilidad y tiempos operativos. Un diseño de voladura adecuado debe considerar no solo la energía requerida, sino también las condiciones que aseguren una detonación completa, lo que implica la correcta selección de iniciadores, la adecuada compactación del explosivo en el barreno y la evitación de sobrecargas o huecos.

Desde el punto de vista de los indicadores clave de desempeño (KPIs), el tiempo necesario para ventilar la zona tras la voladura

podría considerarse una métrica indirecta de la calidad de la detonación. En este sentido, explosivos que generan altos niveles de NO_2 exigen tiempos de espera más prolongados antes de permitir la reentrada, mientras que voladuras limpias y bien ejecutadas permiten reducir ese intervalo, optimizando así el ciclo de producción.

1.3.3.4. Factores considerados para la selección del explosivo

Elegir el explosivo adecuado para una operación dada es una decisión clave que impacta en la seguridad, eficiencia y costos de la voladura. Esta selección debe considerar una serie de factores técnicos, operativos y económicos, entre los que destacan [21], [23], [25]:

- Condiciones del macizo rocoso: criterio esencial para la selección del explosivo

Uno de los primeros factores que deben considerarse al diseñar una voladura es la naturaleza geotécnica del macizo rocoso, ya que de ella depende en gran medida la elección del tipo de explosivo más adecuado. En presencia de humedad o infiltraciones de agua, se descartan inmediatamente aquellos productos que carecen de resistencia hídrica, como el ANFO seco a granel, y se prioriza el uso de explosivos impermeables como las emulsiones encartuchadas o dinamitas con formulaciones hidrorresistentes. Cuando se trata de una roca dura y competente, se recomienda el empleo de explosivos de alta densidad y elevada velocidad de detonación, como las emulsiones aluminizadas o las dinamitas gelatinizadas, ya que su alto poder rompedor garantiza una

fragmentación efectiva en medios geomecánicamente exigentes. En cambio, frente a macizos rocosos blandos, fracturados o alterados, la utilización de explosivos de gran energía podría resultar contraproducente, provocando una fragmentación excesiva o overbreak. En estas condiciones, resulta más eficiente emplear ANFO o cargas reducidas, y es fundamental controlar las vibraciones para evitar daños estructurales en las zonas remanentes del macizo.

- Objetivos de la voladura y criterios de fragmentación: influencia en la selección del explosivo

La elección del explosivo más adecuado para una voladura depende estrechamente del objetivo operativo específico, el cual puede variar según se trate de una voladura de desarrollo (avance) o de producción. En trabajos de avance, como en la excavación de túneles o galerías, el diseño busca principalmente obtener un perfil geométrico limpio y evitar la sobrerotura del macizo circundante. En estos casos, se prioriza el uso de cargas de menor energía en las zonas perimetrales, como cordón detonante en los tiros de contorno, o bien dinamitas de bajo rendimiento diseñadas para generar una voladura más controlada. Por otro lado, cuando se trata de voladuras de producción, el objetivo principal es fragmentar eficientemente el mineral para facilitar su posterior carguío y transporte. Para ello, se emplean explosivos de mayor energía que aseguren una fragmentación fina y homogénea del material. La elección del explosivo también está influenciada por el tamaño del

barreno: en tiros pequeños, típicos de labores de contorno, se requieren explosivos cap-sensitive que puedan presentarse en cartuchos de reducido diámetro; mientras que, en tiros de mayor volumen, se pueden utilizar agentes de voladura a granel más económicos, siempre que se garantice una iniciación adecuada.

- Las dimensiones del barreno específicamente su diámetro y longitud constituyen un factor determinante en la selección del explosivo, ya que condicionan tanto el tipo de producto que puede utilizarse como el método de carga. En perforaciones de pequeño diámetro, como aquellas de 25 mm, el espacio disponible solo permite introducir explosivos en presentaciones reducidas, como cartuchos delgados de dinamita o emulsiones encartuchadas especialmente diseñadas. En estos casos, el uso de ANFO a granel resulta ineficiente o inviable, debido a la dificultad de lograr un llenado uniforme en espacios tan estrechos. En contraste, cuando se trata de taladros largos, es preferible utilizar explosivos bombeables a granel, como las emulsiones a granel, que permiten una carga continua y segura sin la necesidad de encordar largas columnas de cartuchos, lo cual sería engorroso y menos eficiente.
- Disponibilidad logística y restricciones normativas: condicionantes prácticos en la selección de explosivos

Más allá de los criterios técnicos y geomecánicos, la elección del explosivo en una operación minera también está fuertemente condicionada por aspectos logísticos, regulatorios y de infraestructura. En muchos casos, la decisión no se basa

únicamente en el rendimiento del producto, sino en la disponibilidad real de ciertos tipos de explosivos dentro del contexto operativo o nacional. En el caso peruano, por ejemplo, muchas minas subterráneas ubicadas en zonas remotas no cuentan con acceso regular a unidades móviles de fabricación de explosivos (MEMUs), lo que limita la posibilidad de utilizar emulsiones a granel, a pesar de que estas podrían ofrecer mayor eficiencia. En estas condiciones, se opta por explosivos encartuchados como dinamitas o emulsiones preformuladas que, aunque menos versátiles en algunos casos, son más fáciles de transportar, almacenar y manipular en entornos sin infraestructura industrial avanzada.

- Seguridad operativa y consideraciones medioambientales en el uso de explosivos

Si bien el uso de explosivos en minería conlleva riesgos inherentes, no todos los productos presentan el mismo nivel de peligrosidad durante su manipulación, transporte o aplicación. En particular, las dinamitas que contienen nitroglicerina (NG) son reconocidas por su alta sensibilidad a impactos, fricción y temperatura, lo que exige medidas de precaución estrictas, como evitar golpes o exposición a fuentes de calor. Este comportamiento ha llevado a que, en muchas operaciones, se busquen alternativas más seguras para reducir el riesgo asociado. En ese sentido, las emulsiones no sensibilizadas destacan por su perfil favorable en términos de seguridad. Estos productos, en su estado base, no presentan capacidad explosiva hasta que se les añade el sensibilizante en el

lugar de uso. Esta característica permite que sean transportadas bajo normativas menos restrictivas, e incluso como materiales no explosivos, lo que representa una ventaja significativa desde la perspectiva logística y de seguridad operativa. Por esta razón, muchas empresas optan por emulsiones como primera opción en ambientes subterráneos o de difícil acceso.

- Costos y rendimiento económico: análisis costo-beneficio en la selección de explosivos

La elección del explosivo más adecuado en una operación minera no puede desligarse de una evaluación económica integral. Este proceso implica analizar la relación entre el costo por unidad de energía liberada y el impacto que dicha energía tiene sobre los costos totales de la voladura y las operaciones subsiguientes, como el chancado y la molienda. Aunque el ANFO se posiciona como uno de los explosivos más económicos por kilogramo, su bajo poder brisante puede traducirse en una fragmentación deficiente, lo que eleva los costos en etapas posteriores del proceso productivo.

Por el contrario, las emulsiones, aunque presentan un precio unitario más alto, pueden resultar más rentables si logran una fragmentación más eficiente con una menor cantidad de explosivo.

Por ejemplo, si una emulsión alcanza los mismos o mejores resultados que el ANFO utilizando un 20% menos de carga, y además reduce la necesidad de retrabajos o correcciones, su

mayor costo inicial queda compensado por los ahorros operativos globales.

1.3.4. Emulsión encartuchada

1.3.4.1. Definición

La emulsión encartuchada es un tipo de explosivo industrial ampliamente adoptado en la minería subterránea contemporánea, valorado tanto por su alto desempeño energético como por su seguridad en el manejo. Este explosivo pertenece a la familia de las emulsiones tipo agua-en-aceite, y se presenta en forma de cartuchos individuales generalmente cilindros o mangas plásticas flexibles de diversos diámetros y longitudes listos para ser insertados directamente en los barrenos perforados [26].

Desde el punto de vista compositivo, la emulsión encartuchada se estructura en dos fases: una fase interna acuosa que actúa como oxidante, compuesta por una solución concentrada de nitrato de amonio y, en ocasiones, nitrato de sodio o calcio; y una fase continua oleosa que contiene hidrocarburos, ceras y aceites combustibles. Ambas fases son estabilizadas mediante el uso de un agente emulsionante, que garantiza la homogeneidad del producto durante el transporte y almacenamiento [3]. En su estado base, esta emulsión no es explosiva, ya que no contiene ingredientes altamente sensibles como nitroglicerina o nitroglicol. Para activar su capacidad detonante, se le incorporan pequeñas burbujas de gas o microesferas huecas durante su fabricación, lo que crea puntos internos de sensibilidad que permiten la propagación de la onda de choque durante la detonación [27].

1.3.4.2. Características

La emulsión encartuchada se caracteriza por su elevada densidad y capacidad energética, factores que la posicionan como uno de los explosivos más potentes y eficientes en el entorno minero subterráneo. Su densidad típica se sitúa entre 1.1 y 1.2 g/cm³, lo que le permite concentrar una gran cantidad de energía por unidad de volumen. En comparación con la dinamita tradicional, estas emulsiones contienen una proporción superior de agentes oxidantes, y muchas formulaciones incorporan polvo de aluminio como aditivo combustible, lo que incrementa significativamente la temperatura y el rendimiento de la explosión [26].

Otro atributo destacado es su elevada velocidad de detonación (VOD), que generalmente oscila entre 5000 y 6000 m/s cuando se mide en cartuchos de diámetro mediano y en condiciones de confinamiento adecuado. Esta alta VOD permite generar una onda de choque intensa, lo que se traduce en un notable poder rompedor (brisanza), especialmente útil para la fragmentación de rocas duras y compactas [27].

Una de las características más destacadas de la emulsión encartuchada es su resistencia intrínseca al agua, lo que la convierte en una solución ideal para voladuras en condiciones húmedas o en presencia de acuíferos. Esta resistencia proviene de su estructura termoquímicamente estable: la fase oxidante acuosa (que contiene nitrato de amonio) está completamente encapsulada dentro de la fase oleosa continua, lo que impide su disolución incluso cuando se encuentra sumergida. Además, los cartuchos suelen venir recubiertos con envoltorios plásticos herméticos,

lo que refuerza su impermeabilidad y la hace apta para barrenos mojados sin pérdida de eficiencia [24].

En términos de seguridad en el manejo, la emulsión encartuchada presenta una ventaja significativa respecto a explosivos tradicionales como la dinamita. Al no contener nitroglicerina, la emulsión no presenta problemas de exudación, ni genera vapores tóxicos previos a la detonación. Además, en su estado no sensibilizado, es insensible a impactos accidentales, fricción o fuentes moderadas de calor. Esto significa que no detona por manipulación accidental y solo se activa mediante un iniciador adecuado (detonador o booster), lo cual reduce considerablemente los riesgos durante el transporte, almacenamiento y carguío. Aunque sigue siendo un explosivo potente y debe manipularse bajo protocolos estrictos, su estabilidad es mayor que la de dinamitas con alto contenido de NG, las cuales podían detonar con un golpe severo. Adicionalmente, al eliminar la nitroglicerina de su fórmula, la emulsión evita efectos secundarios sobre la salud de los operarios, como los dolores de cabeza derivados de su absorción dérmica o inhalación [23]. Otra ventaja clave es su compatibilidad con diversos sistemas de iniciación. La mayoría de las emulsiones encartuchadas disponibles en minería subterránea son sensibles al detonador (cap-sensitive), por lo que pueden ser activadas por detonadores estándar No.8 sin necesidad de reforzadores adicionales, especialmente en tiros cortos o de desarrollo. Para tiros de mayor longitud o de producción, donde se utilizan emulsiones no sensibilizadas, se requiere la adición de un booster. No obstante, las emulsiones encartuchadas están diseñadas para operar en

condiciones similares a las de la dinamita, facilitando así la sustitución directa de esta última sin cambios significativos en los protocolos operativos [28].

Desde una perspectiva ambiental y de ventilación post-voladura, las emulsiones también ofrecen beneficios. Su combustión, cuando está bien balanceada en oxígeno, tiende a ser más completa, generando principalmente dióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua. Esto implica menores emisiones de gases tóxicos como el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), lo que se traduce en un ambiente subterráneo más seguro y un tiempo de ventilación potencialmente menor en comparación con las voladuras realizadas con dinamita. Además, su composición no genera vapores peligrosos antes del disparo, mejorando aún más las condiciones ambientales del entorno laboral [28].

Finalmente, las emulsiones encartuchadas destacan por su versatilidad en formulación. Pueden ajustarse en términos de densidad, grado de sensibilidad, contenido de aluminio y proporción de matriz explosiva según los requerimientos específicos del frente de trabajo. Es común que los fabricantes ofrezcan líneas comerciales con diferentes grados energéticos (por ejemplo, tipo A, B o C), permitiendo a la operación minera seleccionar el producto más adecuado: emulsiones más potentes para frentes duros y formulaciones más suaves para zonas de contorno o rocas fracturadas. Esta flexibilidad supera la de la dinamita, cuyas variaciones eran más limitadas y centradas principalmente en el contenido de nitroglicerina, lo que restringía su rango de aplicación práctica [28].

1.4. Formulación de los problemas

1.4.1. Problema general

¿De qué manera el cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en el mejoramiento de los KPI de perforación y voladura – Minera Marsa 2023?

1.4.2. Problemas específicos

- ¿De qué manera el cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en el avance por disparo– Minera Marsa 2023?
- ¿De qué manera el cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en la sobrerotura – Minera Marsa 2023?
- ¿De qué manera el cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en la velocidad de detonación – Minera Marsa 2023?

1.5. Justificación

Justificación teórica. Este estudio enriquece la literatura de ingeniería de minas al corroborar y ampliar los marcos teóricos el desempeño en perforación y voladura. A escala global, investigaciones implementaron metodologías de diagnóstico y optimización mediante fotografía digital y monitoreo de vibraciones para ajustar parámetros de disparo. Al confrontar de forma empírica los resultados obtenidos con dinamita convencional y emulsiones (Emulnor), nuestro trabajo refina estos enfoques incorporando variables adicionales y aporta cifras que facilitan la calibración de los modelos en escenarios subterráneos y de desarrollo horizontal. De este modo, validamos, adaptamos y ampliamos las teorías existentes sobre diseño de mallas y fragmentación, proporcionando evidencia regional que robustece la fundamentación epistemológica de la voladura minera.

Justificación práctica. Desde el punto de vista operativo, la sustitución por emulsión se traduce en mejoras claras tanto en eficiencia como en la calidad de la fragmentación. Las emulsiones abaratan los costos de perforación y voladura, al disminuir el factor de potencia y la sobrerotura, al tiempo que elevan el avance efectivo por disparo. De manera similar, la adopción de emulsiones permitirá espaciar más la malla y acortar los tiempos de perforación, lo que se reflejará en un ahorro en las varillas de perforación y en una menor emisión de gases contaminantes en los frentes de trabajo. Estos beneficios operativos repercuten directamente en un aumento de la productividad diaria y en un cumplimiento más rápido de los programas de avance, favoreciendo la apertura anticipada de nuevos frentes mineralizados y reforzando la competitividad de las labores.

Justificación técnica. Desde una óptica técnica, la adopción de emulsiones redefine el comportamiento del explosivo al mejorar tanto el grado de confinamiento como la velocidad de detonación, lo que se traduce en una fragmentación más homogénea y en una reducción de la sobreexcavación. Al incrementar la exactitud en la transferencia de energía, se potencia la eficacia de los parámetros empleados en el diseño de mallas, posibilitando la implementación de anchos de burden y espaciamientos más generosos; esta flexibilidad puede elevar el área efectiva de malla. En conjunto, estas mejoras técnicas impulsan la incorporación de explosivos de última generación y refinan los procedimientos de planificación de tronaduras, contribuyendo a procesos más ágiles y productivos en la minería.

Justificación metodológica. El estudio ostenta alta objetividad, debido a que está basada en el método científico, además se constituye de una propia estrategia metodológica, usa métodos y técnicas que permitirán alcanzar los objetivos

propuestos. Además, para asegurar la calidad y la consistencia de los datos, se adaptaron los formatos de registro según las estrategias de elaboración propia. Gracias a esta configuración, el protocolo resulta replicable en otras explotaciones, garantizando la validez y fiabilidad de los resultados y estableciendo un procedimiento estandarizado para comparar el desempeño de la dinamita frente a las emulsiones.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Determinar que el cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en el mejoramiento de los KPI de perforación y voladura – Minera Marsa 2023.

1.6.2. Objetivos específicos

- Determinar que el cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en el avance por disparo– Minera Marsa 2023.
- Determinar que el cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en la sobrerotura – Minera Marsa 2023.
- Determinar que el cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en la velocidad de detonación – Minera Marsa 2023.

1.7. Hipótesis

1.7.1. Hipótesis específica

El cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en el mejoramiento de los KPI de perforación y voladura – Minera Marsa 2023

1.7.2. Hipótesis específica

- El cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en el avance por disparo– Minera Marsa 2023

- El cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en la sobrerotura – Minera Marsa 2023
- El cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en la velocidad de detonación – Minera Marsa 2023



II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

2.1. Lugar de estudio

Minera Aurífera Retamas S.A. es una compañía de capital completamente peruano dedicada a la actividad minera subterránea. Desde hace más de tres décadas, viene desarrollando de manera continua labores de exploración y explotación en el yacimiento denominado “Cerro El Gigante”, el cual se sitúa dentro del Batolito de Pataz, una formación que pertenece al complejo geológico del Marañón y que se caracteriza por su alta concentración de metales preciosos, principalmente oro y plata.

La empresa fue constituida en el año 1981 por el empresario Andrés Marsano Porras. Su operación principal se localiza a una altitud aproximada de 3900 metros sobre el nivel del mar, en el anexo de Llacuabamba, distrito de Parcoy, provincia de Pataz, en el departamento de La Libertad. Esta zona se encuentra en el flanco occidental de la Cordillera de los Andes, en un entorno geográfico de complejidad topográfica y alto valor geológico.

Minera Aurífera Retamas S.A. (MARSA) desarrolla sus actividades bajo un esquema de minería subterránea que integra tanto métodos convencionales como mecanizados, alcanzando una producción diaria promedio de aproximadamente 1200 toneladas de mineral con alto contenido de oro.

El ingreso principal a las zonas de operación se efectúa mediante dos accesos estratégicos: la Rampa Patrick y el Pique MARSA. La explotación del yacimiento se lleva a cabo aplicando dos métodos selectivos según la inclinación de las vetas: el método Cut and Fill para vetas con inclinación superior a 45°, y el método Long Wall en vetas de menor pendiente (inferiores a 45°). En los tajos de producción, la extracción del mineral se realiza utilizando cabrestantes

eléctricos que accionan sistemas de rastrillos, los cuales canalizan el material hacia tolvas de almacenamiento temporal.

El traslado del mineral desde las tolvas hasta los puntos de descarga principal se ejecuta con locomotoras eléctricas alimentadas por baterías. Estas unidades transportan la carga hasta los echaderos, desde donde el mineral es evacuado hacia la planta concentradora mediante volquetes. Para garantizar la estabilidad del macizo rocoso y mitigar los vacíos generados por la extracción, se aplica relleno hidráulico como técnica de sostenimiento.

Las labores de perforación en los tajos de producción se realizan con equipos neumáticos tipo Jack Leg. En los frentes de desarrollo, se utilizan tanto equipos neumáticos convencionales como jumbos hidráulicos, en función del grado de mecanización del área. La limpieza posterior a la voladura también presenta un enfoque mixto: en el sistema convencional se emplean palas neumáticas, mientras que en zonas mecanizadas se recurre a cargadores frontales tipo scooptram, tanto diésel como eléctricos.

2.2. Tipo de investigación

La investigación de carácter aplicado se orienta fundamentalmente a desarrollar soluciones concretas y eficaces para desafíos específicos en contextos reales. En este marco, el presente estudio se centra en optimizar de forma cuantitativa los indicadores de desempeño de las operaciones mineras, poniendo especial énfasis en la mejora continua de los procesos de perforación y voladura de roca. [29].

2.3. Nivel de investigación

Descriptivo explicativo [30]. En su vertiente descriptiva, se centra en caracterizar con detalle los hechos, procesos y circunstancias tal como se manifiestan,

aportando un panorama completo de los elementos clave del fenómeno. Desde la perspectiva explicativa, investiga tanto el “qué” como el “cómo” de los acontecimientos, buscando identificar las causas y efectos que los relacionan. De este modo, profundiza en los mecanismos y relaciones entre variables para esclarecer las razones subyacentes a los sucesos observados.

2.4. Diseño de investigación

Diseño comparativo transversal, porque el propósito del estudio es confrontar o comparar uno o más grupos que tienen el problema de estudio con uno o más grupos que no tienen dicho problema. Esto se hace con el fin de identificar los factores que contribuyeron a la aparición del problema, tomando en consideración que los datos recolectados serán en un tiempo y espacio predeterminados [31].

2.5. Población y muestra

2.5.1. Población

El grupo objetivo de la investigación comprende un conjunto de elementos, individuos u objetos que comparten atributos específicos relacionados con una ubicación y un período determinados [32]. En ese sentido, la población estará conformada por todas las voladuras realizadas en la Mina Marza, en el periodo 2023

2.5.2. Muestra

La muestra del estudio se refiere a una porción seleccionada de la población total, elegida con el propósito principal de extrapolar los hallazgos a todo el grupo [33]. En ese sentido, la muestra de estudio estará conformada por 18 voladura de pruebas.

2.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se utilizará el método de análisis documental, que supone la recolección y escritura de datos con el fin de facilitar la selección y organización del material [34]. Además, se usará la técnica de la observación directa, que es un método de recolección de datos mediante el cual el investigador observa de manera metódica y objetiva los sucesos, comportamientos o procesos tal como ocurren en su entorno natural o en un entorno controlado, sin intervenir ni manipular las variables. Este método facilita la adquisición de información completa y precisa sobre el mundo observado.

Los instrumentos utilizados serán los reportes e informes de perforación y voladura, además de las fichas de observación de la operación respecto a sus indicadores (avance por disparo, sobrerotura y velocidad de detonación).

2.7. Técnicas de análisis e interpretación de datos

El procesamiento de datos se llevará a cabo con el Microsoft Excel 2016, que permita analizar la estadística descriptiva de los datos para fines de demostración de la presente investigación.

- Revisión de datos: Consiste en examinar la información recolectada para identificar y corregir errores o faltas, y organizar los datos de manera coherente.
- Agrupación de datos: Se establecerán categorías específicas para clasificar las respuestas, donde cada una debe ser exclusiva.
- Organización de datos en tablas: Se procesarán y resumirán los datos utilizando herramientas informáticas para crear tablas estadísticas.

- Evaluación e interpretación de los resultados: Se realizará un análisis estadístico de los datos empleando técnicas descriptivas, como las medidas de tendencia central, para interpretar los hallazgos.



III. RESULTADOS

3.1. Datos técnicos del explosivo

En términos de densidad relativa, se observa un incremento progresivo desde el EMULNOR® 500, con $0,90 \text{ g/cm}^3$, hasta el EMULNOR® 5000, con $1,16 \text{ g/cm}^3$. Este aumento está directamente relacionado con una mayor masa explosiva por unidad de volumen, lo cual influye en la energía liberada y en la capacidad de carga por metro de taladro, siendo este último un aspecto crítico en labores de desarrollo y producción. A su vez, la velocidad de detonación (VOD), que condiciona la eficiencia de la fragmentación del macizo rocoso, también presenta variaciones significativas: desde los $4\,400 \text{ m/s}$ del EMULNOR® 500 hasta los $5\,800 \text{ m/s}$ del EMULNOR® 1000. No obstante, a pesar de que el EMULNOR® 3000 y 5000 presentan velocidades ligeramente menores ($5\,700 \text{ m/s}$ y $5\,500 \text{ m/s}$, respectivamente), estos mantienen niveles energéticos superiores.

Respecto a la presión de detonación, la cual está relacionada con la capacidad de ruptura del explosivo frente a la resistencia del material rocoso, el valor más alto corresponde al EMULNOR® 1000 con 95 Kbar , seguido muy de cerca por el EMULNOR® 3000 con 93 Kbar . Esta característica permite su empleo en rocas de alta competencia o en aplicaciones que requieran mayor confinamiento. Es importante notar que el EMULNOR® 500, aunque presenta la menor presión de detonación (44 Kbar), puede ser útil en voladuras controladas o de pre-corte, donde se busca minimizar daños al macizo rocoso remanente.

Finalmente, en cuanto a la energía específica, que representa la cantidad de calor liberado por unidad de masa (kcal/kg), se destaca el EMULNOR® 5000 con un valor de $1\,010 \text{ kcal/kg}$, lo que lo convierte en el explosivo con mayor capacidad energética de la serie. Este valor lo posiciona como una opción idónea para

aplicaciones donde se requiere alta energía por kilogramo, como en tajos con grandes cargas o condiciones de roca muy dura. En contraste, el EMULNOR® 500, con 628 kcal/kg, tiene una menor capacidad energética, lo cual podría ser favorable en contextos donde se busque una detonación de menor impacto.

Tabla 1.
Datos técnicos de los explosivos

	EMULNOR® 500	EMULNOR® 1000	EMULNOR® 3000	EMULNOR® 5000
DENSIDAD RELATIVA (g/cm³)	0,90	1,13	1,14	1,16
VELOCIDAD DE DETONACIÓN (m/s)	4 400	5 800	5 700	5 500
PRESIÓN DE DETONACIÓN (Kbar)	44	95	93	88
ENERGÍA (kcal/kg)	628	785	920	1010

3.2. Preliminares

FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. ha venido ejecutando pruebas controladas con emulsiones encartuchadas de la línea EMULNOR®, como parte del proceso progresivo de sustitución del explosivo tradicional (dinamita) por alternativas más eficientes y seguras en las operaciones de perforación y voladura de MARSA. Esta iniciativa forma parte de un proyecto de mejora continua orientado a optimizar el desempeño operativo y reducir los riesgos asociados al uso de nitroglicerina en labores subterráneas.

Las acciones se enfocaron en brindar soporte especializado al personal operativo, con el objetivo de facilitar la transición mediante la capacitación

práctica en el correcto manejo de las emulsiones EMULNOR® 5000, 3000, 1000 y 500, así como en el uso adecuado de los accesorios de voladura FANEL® LP. Estas sesiones incluyeron aspectos de manipulación segura, compatibilidad con sistemas de iniciación y recomendaciones para su aplicación en diferentes condiciones geotécnicas.

La implementación de este tipo de emulsión busca no solo reemplazar un insumo, sino también elevar los estándares técnicos y de seguridad del proceso de voladura en MARSA, a través de un producto con mayor estabilidad, menor toxicidad y mejor rendimiento detonante en ambientes húmedos o de difícil acceso.

3.3. Cantidad de disparos monitoreados

A nivel global, se tiene registro de 18 disparos ejecutados, los cuales generaron un avance acumulado de 21.2 metros lineales, resultando en un avance promedio de aproximadamente 1.18 metros por disparo.

En términos de rendimiento, la eficiencia consolidada del proceso de voladura se sitúa en 92%, lo que refleja un desempeño favorable respecto a los avances programados. Este nivel de eficiencia indica una adecuada planificación del ciclo perforación-voladura, así como una selección acertada de insumos y un control técnico operativo efectivo.

Por otro lado, se ha reportado una sobrerotura promedio del 14.10%, valor que, se mantiene dentro de límites técnicamente aceptables. La sobreexcavación puede comprometer la estabilidad geomecánica del entorno, además de generar impactos económicos por el aumento de volumen removido no programado o la posible pérdida de mineral aprovechable. Por ello, su control y reducción gradual

deben considerarse una prioridad en las futuras campañas de perforación y voladura.

Tabla 2.
Avance por disparo en labores mecanizadas 8"x9"

Labor	EC	Zona	Eficiencia de voladura (%)	Alto Prog. (m)	Ancho Prog. (m)	Ancho Labor real (m)	Altura Labor real (m)	Sobre rotura Famesa (%)	Avance Acumulad o Famesa (m)	Promedio de Avance de Famesa (m)	# DISP
XC 10362 NW	TAURO	CC31	96%	3	2.4	3.1	3.1	33.47%	11.9	2.983	4
XC 10362 SE	TAURO	CC31	91%	3	3.5	3.8	3.1	12.19%	5.7	2.830	2
GL 10455 S	TAURO	CC31	79%	2.7	3	3.0	2.94	8.89%	10.4	2.074	5
XC 10187 NW	TAURO	CC35	94%	3	2.4	2.8	3.05	19.69%	11.7	2.923	4
EST A	TAURO	CC43B	96%	3	3	3.2	3	6.67%	3.0	3.000	1
EST B	TAURO	CC43B	95%	3	3	3.2	3	6.67%	3.0	2.950	1
GL 9143	TAURO	CC43	97%	2.7	3	3.0	3	11.11%	2.5	2.452	1
TOTAL			92%				TOTAL	14.10%	21.2	TOTAL	18

3.3.1. Primer control

- 12 voladuras con Longitud de Perforación de 3.15m
- Con un Avance efectivo = 2.93 m/disparo
- Sobreroturaprom = 20.86%

La tabla 3 expone el control detallado de operaciones de avance en labores subterráneas para el periodo comprendido entre el 1 y el 12 de enero.

En cuanto a la eficiencia de voladura por labor, se observan resultados altamente favorables en XC 10362 NW, con eficiencias que oscilan entre el 91% y el 99%, lo que evidencia una consistencia operativa y un buen control del patrón de perforación. En XC 10362 SE, sin embargo, se registran valores más bajos, destacando una eficiencia de solo 82% el 1 de enero y un incremento posterior al 99% el 12 de enero, lo que sugiere mejoras en el diseño o ejecución del disparo. En la labor XC 10187 NW, los valores se mantienen también elevados, con 96% y 98% en las fechas analizadas, reflejando un proceso controlado y

eficiente. Las labores EST A y EST B, evaluadas el 4 de enero, presentaron eficiencias de 96% y 94%, respectivamente, valores técnicamente aceptables. Respecto al avance efectivo registrado por Famesa, la labor con mayor acumulación corresponde a XC 10362 SE con un avance total de 35.2 metros, evidenciando un número mayor de disparos o mayor longitud por ciclo de voladura. Le siguen las labores XC 10362 NW con avances consistentes de 3.1 m por disparo en múltiples fechas, lo que confirma una adecuada ejecución del diseño programado. Las demás labores, como XC 10187 NW, EST A y EST B, presentan avances individuales de entre 2.6 m y 3.1 m, valores acordes al patrón de perforación y a los estándares operativos para frentes de desarrollo horizontal.

En cuanto al porcentaje de sobrerotura Famesa. En XC 10362 NW, se reportan sobreroturas relativamente elevadas, alcanzando hasta 36.47%, lo que indica una tendencia a la sobreexcavación posiblemente relacionada con una carga excesiva o mal confinamiento del explosivo. En cambio, XC 10362 SE muestra un mejor control geométrico, con valores de sobrerotura en el orden del 12.19%, siendo uno de los frentes con mejor desempeño en este aspecto. La labor XC 10187 NW presenta sobreroturas moderadas entre 16.67% y 18.67%, mientras que EST A y EST B alcanzan niveles más controlados de 6.67% y 13.33%, respectivamente, lo cual sugiere una ejecución precisa en términos de delimitación del perímetro de voladura.

Tabla 3.
Avance por disparo primer control

Fecha	Labor	Turno	Altura Prog. (m)	Ancho Prog. (m)	Altura Labor real (m)	Ancho Labor real (m)	Contra inicial (m)	Contra final (m)	Long. Efect. Perf. (m)	Eficiencia de voladura (%)	Avance Famesa (m)	Sobre rotura Famesa (%)
01-ene	XC 10362 NW	NOCHE	3	2.4	3.1	3.1	9.8	12.9	3.118104	99%	3.1	33.47%
	XC 10362 SE	NOCHE	3	3.5	3.1	3.8	10.8	13.4	3.118104	82%	2.6	12.19%
	XC 10187 NW	DIA	3	2.4	3.1	2.6	9.3	12.3	3.118104	95%	3.0	11.94%
02-ene	XC 10362 NW	NOCHE	3	2.4	3.1	3.1	12.9	15.9	3.118104	96%	3.0	33.47%
03-ene	XC 10187 NW	NOCHE	3	2.4	3.1	3.1	12.3	15.4	3.118104	99%	3.1	33.47%
04-ene	XC 10362 NW	NOCHE	3	2.4	3.1	3.1	15.9	18.8	3.118104	93%	2.9	33.47%
	EST A	DIA	3	3	3	3.2	0.0	3.0	3.118104	96%	3.0	6.67%
	EST B	DIA	3	3	3	3.2	0.0	3.0	3.118104	95%	3.0	6.67%
05-ene	XC 10187 NW	DIA	3	2.4	3	2.8	11.5	14.3	3.118104	89%	2.8	16.67%
		NOCHE	3	2.4	3	2.8	8.7	11.5	3.118104	91%	2.8	16.67%
07-ene	XC 10362 NW	NOCHE	3	2.4	3.1	3.1	18.8	21.7	3.118104	94%	2.9	33.47%
12-ene	XC 10362 SE	DIA	3	3.5	3.1	3.8	13.4	16.5	3.118104	99%	3.1	12.19%
										94%	35.2	20.86%

3.3.2. Segundo control

- 06 voladuras con perforaciones de 2.54m
- Avance efectivo = 2.1m
- Sobrerotura = 9.26%.

La Tabla 4 presenta un registro técnico detallado de seis eventos de voladura en labores subterráneas, correspondientes principalmente a la labor GL 10455 S y, en un caso, a GL 9143.

Respecto a la eficiencia de voladura por labor, los valores muestran una variabilidad significativa. En la labor GL 10455 S, la eficiencia más alta se alcanzó el 2 de enero con un 98%, mientras que el valor más bajo se registró el 3 de enero, con tan solo 62%, indicando posibles problemas en la carga explosiva, el retacado o el diseño de la malla. Otros valores representativos en esta labor incluyen eficiencias de 82% (5 de enero), 75% (6 de enero) y 79% (11 de enero) que, si bien son aceptables, evidencian oportunidades de optimización. En contraste, la labor GL 9143, intervenida el 10 de enero, alcanzó una eficiencia del 97%, lo cual refleja un alto nivel de control técnico en la ejecución de ese disparo.

En relación al avance por disparo (Famesa), también se observa dispersión. En la labor GL 10455 S, el mayor avance se logró el 2 de enero con 2.4 metros, seguido por valores intermedios entre 1.5 y 2.1 metros en los restantes días. Estos valores sugieren una productividad moderada, afectada posiblemente por la eficiencia de detonación y la calidad del macizo rocoso. El disparo correspondiente a GL 9143 presentó un avance de 2.6 metros, el más alto de la serie, en concordancia con su alta eficiencia de voladura, reflejando condiciones favorables tanto en diseño como en ejecución.

El análisis del porcentaje de sobrerotura Famesa indica un buen control geométrico en la mayoría de los casos. En la labor GL 10455 S, los valores oscilan entre un mínimo de 3.70% (11 de enero) y un máximo de 14.81% (3 de enero), este último posiblemente asociado a una baja eficiencia del disparo y a una mala contención del explosivo. Finalmente se observa un total promedio de 2.1 m de avance efectivo y una sobrerotura del 9.26%.

Tabla 4.
Avance por disparo segundo control

Fecha	Labor	Turno	Altura Prog. (m)	Ancho Prog. (m)	Altura Labor real (m)	Ancho Labor real (m)	Contra inicial (m)	Contra final (m)	Long. Efect. Perf. (m)	Eficiencia de voladura (%)	Avance Famesa (m)	Sobrerotura Famesa (%)
02-ene	GL 10455 S	DIA	2.7	3	2.9	3	8.9	11.3	2.40792	98%	2.4	7.41%
03-ene	GL 10455 S	NOCHE	2.7	3	3.1	3	8.3	9.8	2.40792	62%	1.5	14.81%
05-ene	GL 10455 S	NOCHE	2.7	3	3	3	14.2	16.5	2.7432	82%	2.3	11.11%
06-ene	GL 10455 S	NOCHE	2.7	3	2.9	3	4.5	6.3	2.40792	75%	1.8	7.41%
10-ene	GL 9143	DIA	2.7	3	3	3	7.3	9.7	2.52984	97%	2.5	11.11%
11-ene	GL 10455 S	DIA	2.7	3	2.8	3	7.3	9.7	3.118104	79%	2.5	3.70%
											2.1	9.26%

3.4. Trabajos de campo

3.4.1. Malla con 28 taladros cargados GL9143 2.4x2.7 – 8 pies

- Parámetros técnicos:

- Sección prog : 2.4mx2.7m
- Sección inicial : 2.8mx2.9m
- Long. Perf. : 2.54m
- Avance real : 2.33m
- Sección final : 2.5x2.8
- Eficiencia Voladura : 91%
- Sobrerotura : 08%

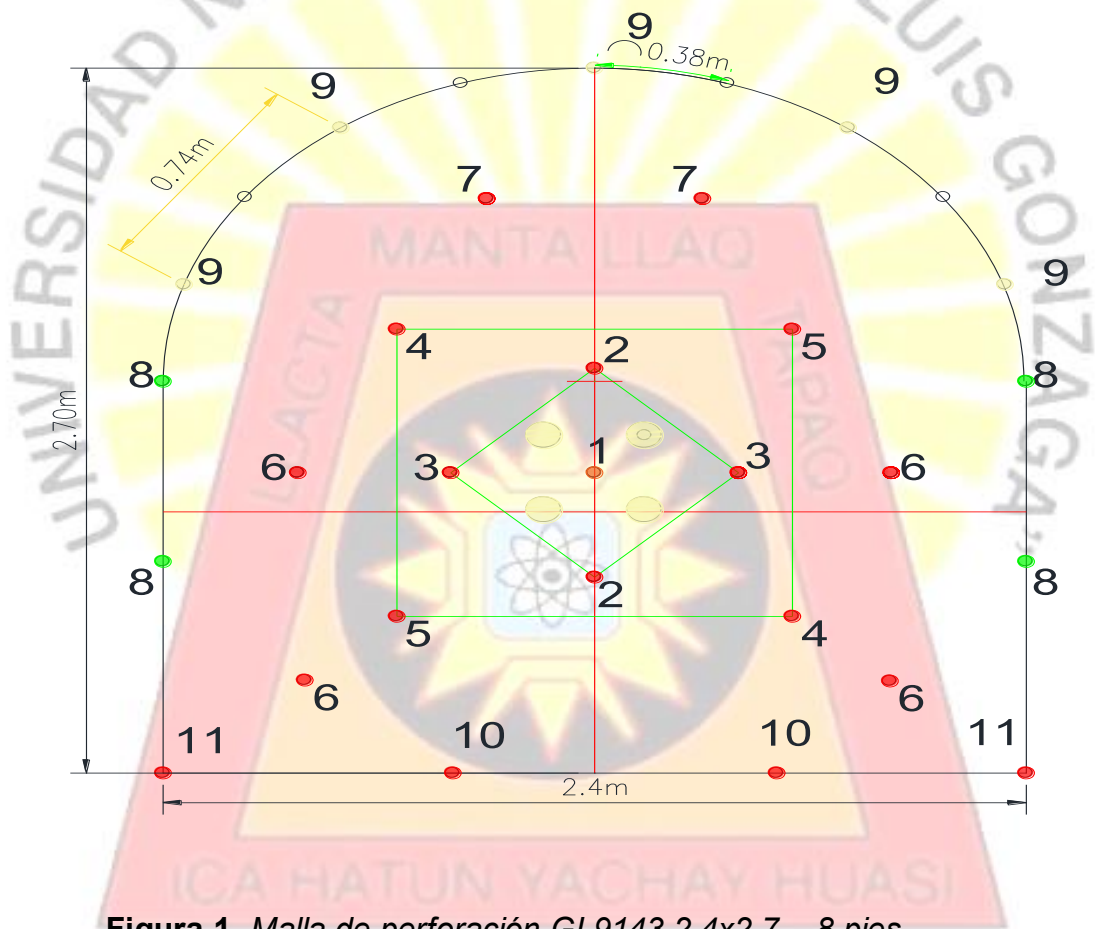


Figura 1. Malla de perforación GL9143 2.4x2.7 – 8 pies

Tabla 5.
Carguío de explosivos de malla GL9143 2.4x2.7 – 8 pies

GL 9143 - SECCIÓN 2.4 X 27 M - 8 PIES								
EXPLOSIVO					FANELES			
Número de Fanel	EMULNOR 5000 1 1/4 X 16	EMULNOR 3000 1 1/4 X 16	EMULNOR 1000 1 1/4 X 16	EMULNOR 500 1 1/4 X 12	PESO POR TALADRO (Kg)	Número de Fanel	TOTAL DE TALADROS	CARGA OPERANTE (Kg)
N° 1	5				1.89	N° 1	1	1.89
N° 2	1	3			1.479	N° 2	2	2.958
N° 3	1	3			1.479	N° 3	2	2.958
N° 4	1	3			1.479	N° 4	2	2.958
N° 5		3			1.101	N° 5	2	2.202
N° 6		3			1.101	N° 6	4	4.404
N° 7		3			1.101	N° 7	2	2.202
N° 8			3		1.071	N° 8	4	4.284
N° 9				4	0.804	N° 9	5	4.02
N° 10		3			1.101	N° 10	2	2.202
N° 11		3			1.101	N° 11	2	2.202
N° 12					0	N° 12		0
N° 13					0	N° 13		0
N° 14					0	N° 14		0
N° 15					0	N° 15		0
CANTIDAD DE TALADROS CARGADOS					28	PESO TOTAL DEL EXPLOSIVO (Kg)		32.28



Figura 2. Carguío y amarre de explosivos GL9143 2.4x2.7 – 8 pies



Figura 3. Resultados de voladura GL9143 2.4x2.7 – 8 pies

3.4.2. Malla con 30 taladros cargados GL10445S 2.4x2.7 – 10.1 pies

- Parámetros técnicos:
 - Sección prog : 2.4mx2.7m
 - Sección inicial : 2.7mx2.8m
 - Long. Perf. : 3.10m
 - Avance real : 2.55m
 - Sección final : 2.5x2.8
 - Eficiencia Voladura : 82%
 - Sobrerotura : 08%

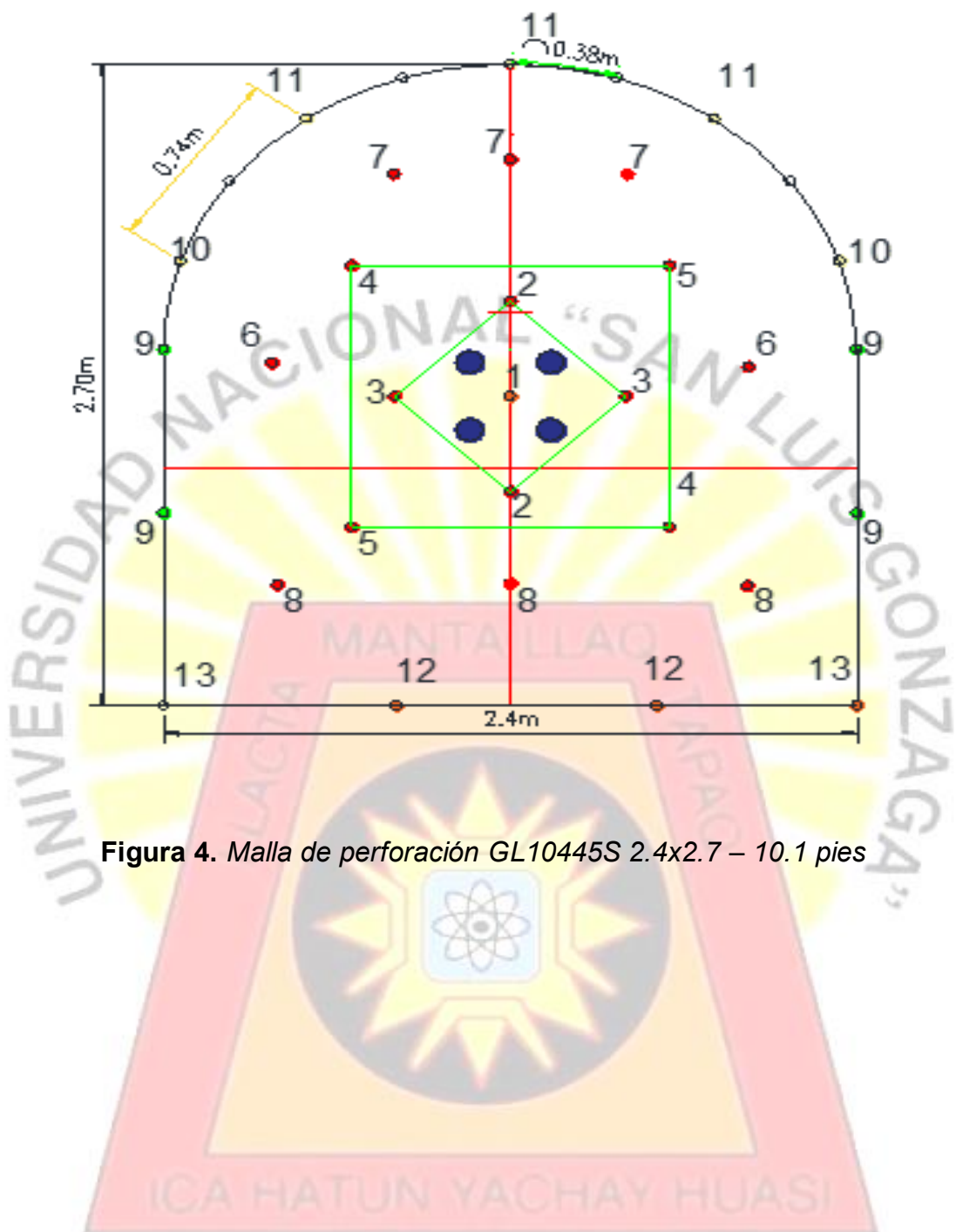


Figura 4. Malla de perforación GL10445S 2.4x2.7 – 10.1 pies

Tabla 6.
Carguío de explosivos de malla GL10445S 2.4x2.7 – 10.1 pies

GL 10445 S - SECCIÓN 2.4 X 27 M - 12 PIES								
EXPLOSIVO						FANELES		
Número de Fanel	EMULNOR 5000 1 1/4 X 16	EMULNOR 3000 1 1/4 X 16	EMULNOR 1000 1 1/4 X 16	EMULNOR 500 1 1/4 X 12	PESO POR TALADRO (Kg)	Número de Fanel	TOTAL DE TALADROS	CARGA OPERANTE (Kg)
N° 1	7				2.646	N° 1	1	2.646
N° 2	1	6			2.58	N° 2	2	5.16
N° 3	1	6			2.58	N° 3	2	5.16
N° 4	1	6			2.58	N° 4	2	5.16
N° 5		6			2.202	N° 5	2	4.404
N° 6		6			2.202	N° 6	4	8.808
N° 7		6			2.202	N° 7	2	4.404
N° 8			6		2.142	N° 8	4	8.568
N° 9				7	1.407	N° 9	5	7.035
N° 10		6			2.202	N° 10	2	4.404
N° 11		6			2.202	N° 11	2	4.404
N° 12					0	N° 12		0
N° 13					0	N° 13		0
N° 14					0	N° 14		0
N° 15					0	N° 15		0
CANTIDAD DE TALADROS CARGADOS				28	PESO TOTAL DEL EXPLOSIVO (Kg)		60.15	

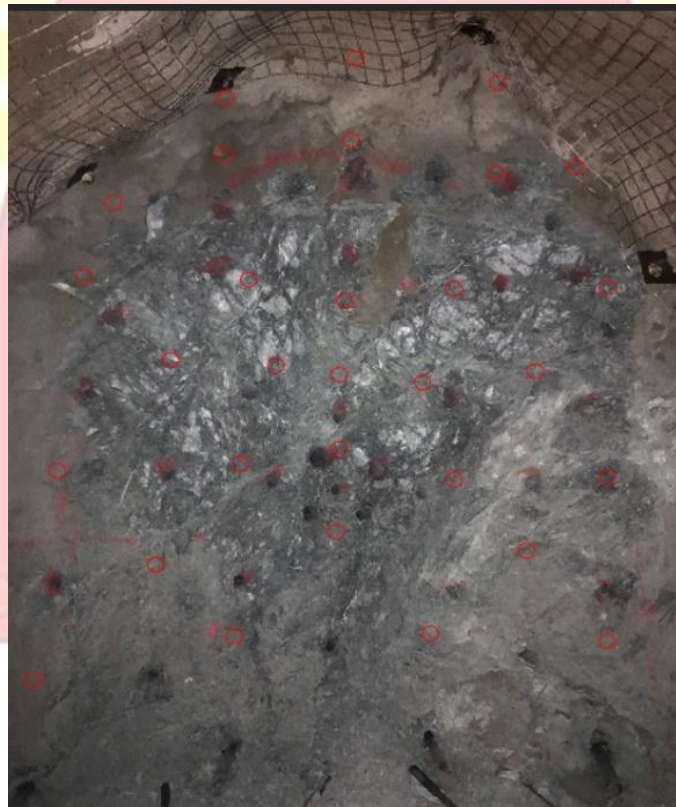


Figura 5. Trazado de malla GL10445S 2.4x2.7 – 10.1 pies



Figura 6. Resultados de voladura GL10445S 2.4x2.7 – 10.1 pies

3.4.3. Malla con 29 taladros cargados GL 10455-S 2.4 x 2.7 – 8 pies

- Parámetros técnicos
 - Sección prog. : 2.4m x 2.7m
 - Longitud perf. : 2.7m
 - Avance real : 1.8m
 - Sección final : 3.0m x 2.9m
 - Sobre rotura : 7.4%

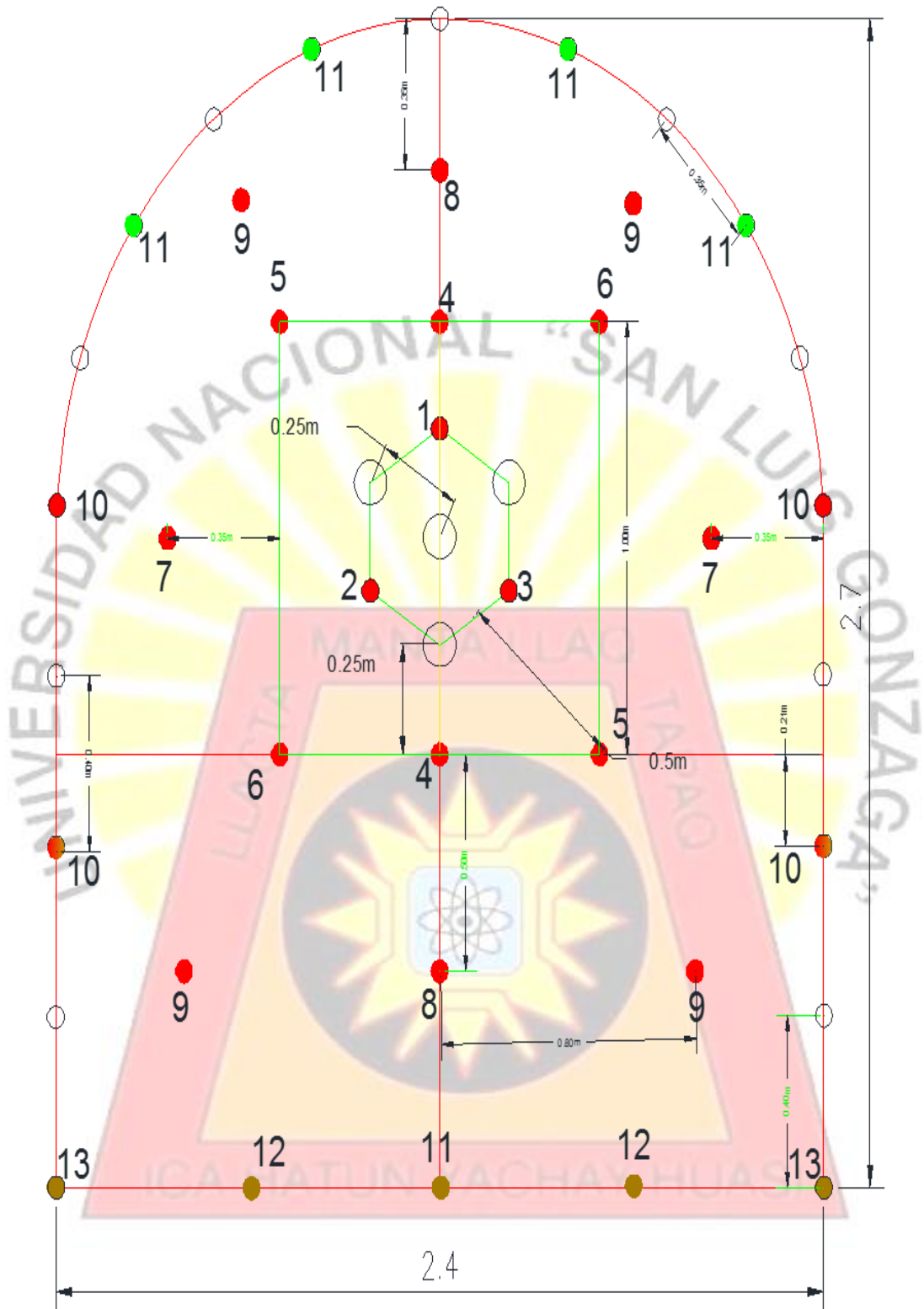


Figura 7. Malla de perforación GL 10455-S 2.4 x 2.7 – 8 pies

Tabla 7.
Carguío de explosivos de malla GL 10455-S 2.4 x 2.7 – 8 pies

(RMR 38) - SECCIÓN 2.4 M X 2.7 M - 9 PIES									
EXPLOSIVO						FANELES			
Número de Fanel	EMULNOR 5000 1 1/4 X 16	EMULNOR 3000 1 1/4 X 16	EMULNOR 1000 1 1/4 X 16	EMULNOR 500 1 1/4 X 12	PESO POR TALADRO (Kg)	Número de Fanel	TOTAL DE TALADROS	CARGA OPERANTE (Kg)	
N° 1	5				1.89	N° 1	1	1.89	
N° 2	5				1.89	N° 2	1	1.89	
N° 3	5				1.89	N° 3	1	1.89	
N° 4		5			1.835	N° 4	2	3.67	
N° 5		5			1.835	N° 5	2	3.67	
N° 6		5			1.835	N° 6	2	3.67	
N° 7		4			1.468	N° 7	2	2.936	
N° 8		4	4		2.896	N° 8	2	5.792	
N° 9		2	2		1.448	N° 9	4	5.792	
N° 10		2	2		1.448	N° 10	4	5.792	
N° 11			4		1.428	N° 11	5	7.14	
N° 12	1	5			2.213	N° 12	2	4.426	
N° 13	1	5			2.213	N° 13	2	4.426	
N° 14					0	N° 14		0	
N° 15					0	N° 15		0	
CANTIDAD DE TALADROS CARGADOS				30		PESO TOTAL DEL EXPLOSIVO (Kg)		52.98	



Figura 8. Perforación de malla GL 10455-S 2.4 x 2.7 – 8 pies



Figura 9. Resultados de voladura GL 10455-S 2.4 x 2.7 – 8 pies

Tabla 8.
Carguío de explosivos de malla XC 10362 SE 3.5m x 3.0m

(RMR 38) - SECCIÓN 3.5 M X 3 M - 12 PIES								
EXPLOSIVO						FANELES		
Número de Fanel	EMULNOR 5000 1 1/4 X 16	EMULNOR 3000 1 1/4 X 16	EMULNOR 1000 1 1/4 X 16	EMULNOR 500 1 1/4 X 12	PESO POR TALADRO (Kg)	Número de Fanel	TOTAL DE TALADROS	CARGA OPERANTE (Kg)
N° 1	8				3.024	N° 1	1	3.024
N° 2	1	6			2.58	N° 2	1	2.58
N° 3	1	6			2.58	N° 3	1	2.58
N° 4		6			2.202	N° 4	2	4.404
N° 5		6			2.202	N° 5	2	4.404
N° 6		6			2.202	N° 6	2	4.404
N° 7		6			2.202	N° 7	2	4.404
N° 8		5	1		2.192	N° 8	2	4.384
N° 9		5	1		2.192	N° 9	2	4.384
N° 10		5	1		2.192	N° 10	3	6.576
N° 11			1	4	1.161	N° 11	5	5.805
N° 12			5		1.785	N° 12	4	7.14
N° 13		6			2.202	N° 13	3	6.606
N° 14		6			2.202	N° 14	2	4.404
N° 15					0	N° 15		0
CANTIDAD DE TALADROS CARGADOS				32		PESO TOTAL DEL EXPLOSIVO (Kg)		65.10



Figura 11. *Marcado y perforación de malla XC 10362 SE 3.5m x 3.0m*



Figura 12. *Resultados de malla XC 10362 SE 3.5m x 3.0m*

3.5. Pruebas de campo de VOD

Para esto se realizan 03 pruebas de VOD. En estos tres tipos:

- a) EMULNOR® 5000 1" 1/4 x 16" columna continua (7 CARTUCHOS)
 - Columna de carga= 1.8m
 - Atacado sin cortes longitudinales
 - $VOD_{prom} = 4306\text{m/s}$
- b) EMULNOR® 5000 1" 1/4 x 16" columna continua (7 CARTUCHOS)
 - Columna de carga= 2.17m
 - Atacado con cortes longitudinales
 - $VOD_{prom} = 4292\text{m/s}$
- c) EMULNOR® 5000 1" 1/4 x 16" columna continua (8 CARTUCHOS)
 - Columna de carga= 2.21m
 - Atacado con 2 cortes longitudinales en los extremos
 - $VOD_{prom} = 4449\text{m/s}$

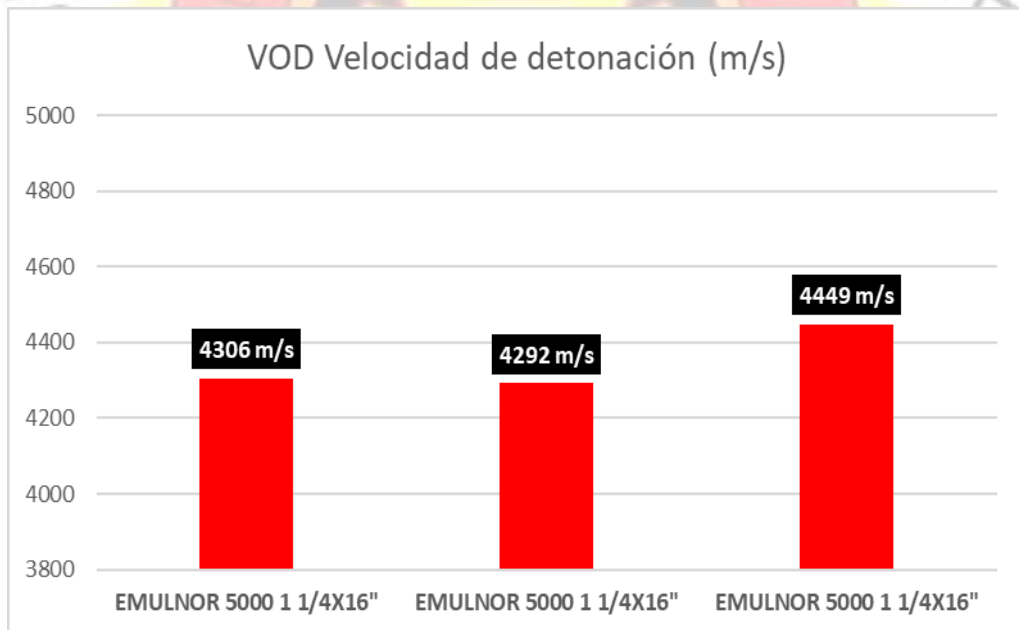


Figura 13. Velocidad de detonación

3.6. Capacitación

Se capacitó al personal sobre el uso de voladura controlada con el Emulnor 500

Tabla 9.
Cantidad de personal capacitado

EMPRESA CONTRATISTA	GUARDIA DIA	GUARDIA NOCHE	TOTAL
TAURO	55	35	90
MINCOTRALL	94	66	160
COMILUZ	35	35	70
ALFA	0	0	0
TOTAL			320

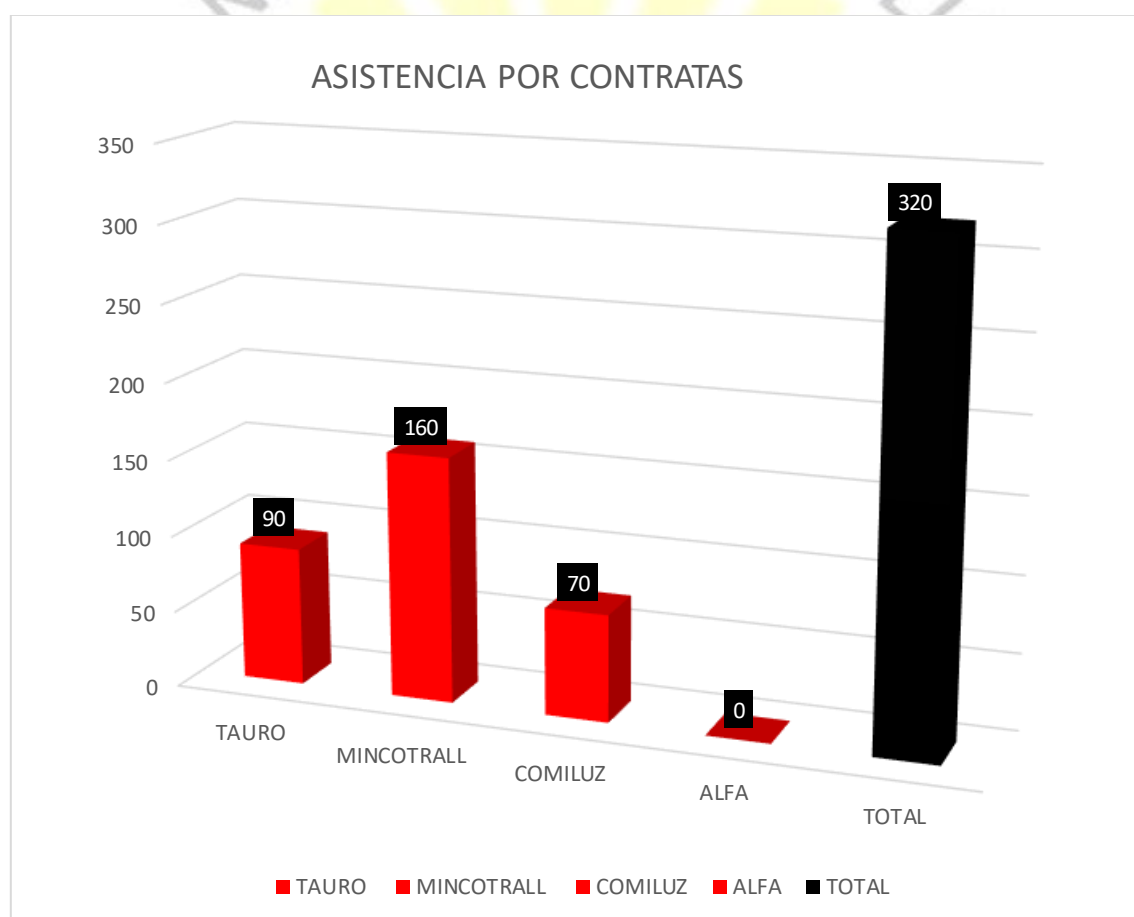


Figura 14. *Cantidad de personal capacitado*

IV. DISCUSIÓN

La Figura 15 muestra una representación gráfica comparativa del desempeño en eficiencia de avance, contrastando el estándar operativo establecido por la unidad minera MARSÁ con los resultados obtenidos durante la aplicación del control técnico proporcionado por FAMESA. Este indicador, expresado en términos porcentuales, permite evaluar la correspondencia entre el avance efectivo logrado tras la voladura y el avance proyectado en el diseño del ciclo perforación-voladura, constituyéndose así en una métrica clave para la gestión técnica del minado subterráneo.

De acuerdo con el gráfico, el valor de referencia definido por MARSÁ para eficiencia de avance se ubica dentro de un rango de 90% a 92%, siendo el 90% el umbral mínimo que asegura un nivel aceptable de rendimiento operacional bajo condiciones técnicas controladas. Este parámetro base refleja el estándar mínimo necesario para mantener una continuidad productiva estable, considerando la calidad de la perforación, el correcto carguío de explosivos y una ejecución eficiente de la detonación.

Por su parte, el resultado alcanzado en el contexto de intervención técnica de FAMESA registra un valor de 92%, ubicándose en el límite superior del rango de referencia establecido por la operación. Esta mejora de 2 puntos porcentuales respecto al valor base, aunque cuantitativamente discreta, representa una mejora operativa relevante cuando se proyecta en ciclos sucesivos, múltiples jornadas o diferentes frentes de desarrollo. Este incremento se traduce en mayor avance efectivo por disparo, reducción de pérdidas por retrabajo y mayor

aprovechamiento del diseño operativo, lo cual tiene un impacto positivo directo en los costos unitarios y en la eficiencia global del proceso.

Es probable que esta mejora esté asociada a la aplicación de tecnologías de voladura más controladas, un diseño más preciso en la malla de perforación, y una mejor distribución de la energía explosiva, elementos todos integrados al soporte técnico de FAMESA. Estos factores habrían contribuido a maximizar el aprovechamiento de cada ciclo, manteniendo la estabilidad de los contornos y evitando sobreroturas o avances ineficientes.

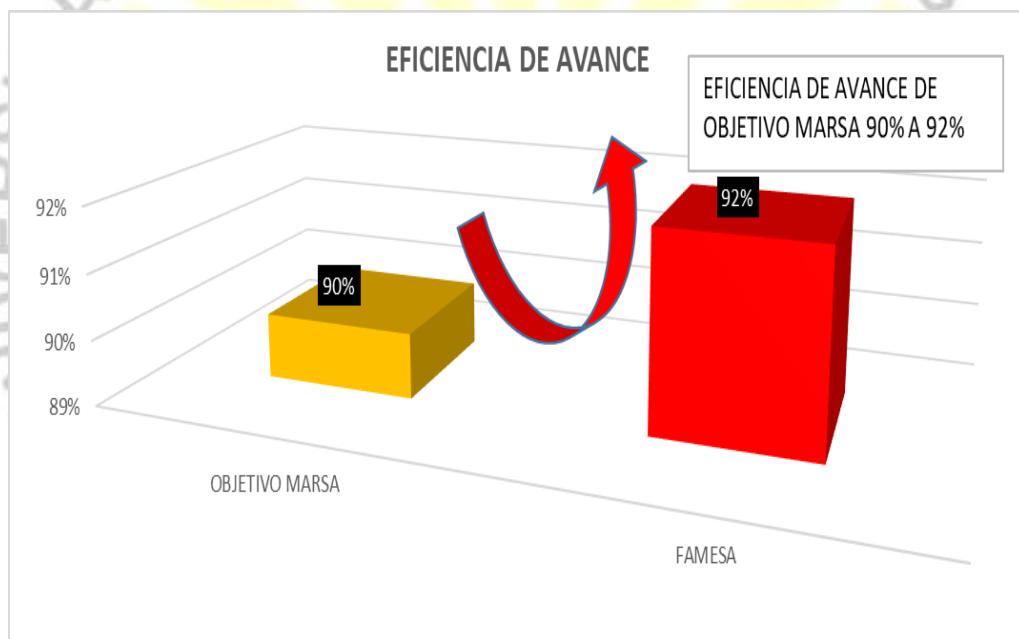


Figura 15. Eficiencia de avance (%)

La Figura 16 presenta un análisis comparativo del comportamiento de la sobrerotura (%), evaluando los resultados previos y posteriores a la aplicación del control técnico asociado al uso de explosivos de la línea FAMESA. En este gráfico, el eje vertical representa el porcentaje de sobrerotura, mientras que el eje horizontal diferencia dos escenarios: la situación inicial (antes de la

intervención técnica) y los resultados obtenidos con la implementación de los explosivos FAMESA y sus parámetros operativos optimizados.

Este indicador resulta crítico para evaluar el grado de sobreexcavación producido durante el proceso de voladura. Cuando la sobrerotura no se controla adecuadamente, puede comprometer la estabilidad geomecánica de la labor minera, incrementar los costos por volumen de roca removida innecesariamente, y generar dilución del mineral extraído, afectando la rentabilidad general del proceso.

En el escenario inicial, se reporta una sobrerotura del 22 %, valor que se encuentra por encima de los límites técnicos aceptables para operaciones subterráneas. Este exceso puede estar asociado a diversos factores operativos, tales como una distribución inadecuada del explosivo en la columna de carga, selección incorrecta del tipo de explosivo según la geomecánica local, deficiencias en el retacado, o una malla de perforación mal dimensionada. Estos elementos afectan directamente el direccionamiento de la energía detonante, provocando una fracturación no deseada que excede los perfiles proyectados.

Tras la implementación del control técnico y la utilización de emulsiones encartuchadas FAMESA, el porcentaje de sobrerotura se reduce al 14 %, lo que representa una mejora de 8 puntos porcentuales. Esta disminución evidencia un avance técnico relevante en el manejo del proceso de voladura, logrando una mejor distribución de energía, mayor precisión en el diseño de la malla, y una adecuación más efectiva entre el tipo de explosivo empleado y las características del macizo rocoso.

En conjunto, esta mejora no solo representa un avance en términos de control técnico y eficiencia operativa, sino que también contribuye a reducir impactos

estructurales, minimizar la pérdida de mineral útil y optimizar la relación costo-beneficio de la actividad extractiva. La comparación presentada refuerza la importancia de la supervisión técnica especializada y de la correcta selección de insumos explosivos como pilares fundamentales para la sostenibilidad operativa en minería subterránea.

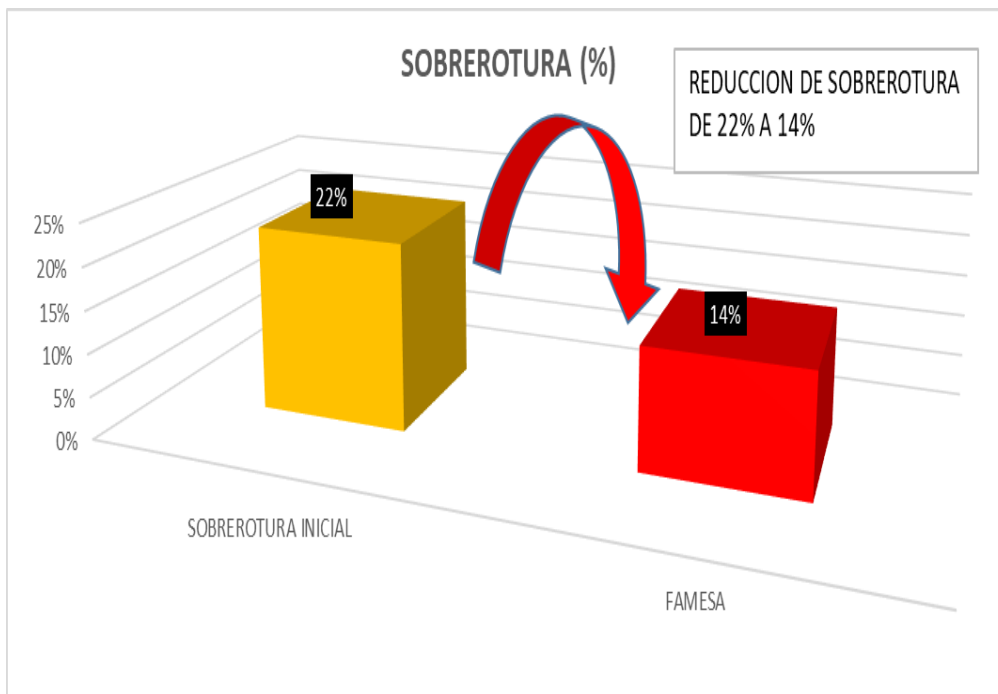


Figura 16. Sobrerotura (%)

V. CONCLUSIONES

- a) Los resultados obtenidos permiten concluir que la sustitución del explosivo convencional por una nueva formulación en las labores mecanizadas de Minera MARSÁ tuvo un impacto significativo en la mejora de los principales indicadores clave de desempeño (KPI) vinculados a las etapas de perforación y voladura durante el año 2023. La aplicación del nuevo explosivo, en un entorno con parámetros operativos controlados, permitió una optimización sustancial del ciclo de avance, reflejada en el aumento de la eficiencia de voladura, la disminución de los niveles de sobrerotura y la mejora en la velocidad de detonación alcanzada. Estos hallazgos evidencian una relación técnica directa entre las propiedades del explosivo utilizado y el desempeño operativo del proceso de minado, reafirmando la importancia estratégica de una correcta selección de insumos energéticos.
- b) La incorporación de explosivos optimizados en las labores mecanizadas de Minera MARSÁ tuvo un efecto positivo directo en el avance por disparo. En las condiciones operativas previas, el promedio de avance por disparo se situaba en 2.1 metros. Sin embargo, tras la implementación de explosivos de mayor desempeño energético como los suministrados por FAMESA, este valor se elevó a 3.1 metros por disparo, en labores como XC 10362 NW y GL 10455 S, lo que representa una mejora relativa del 47.6 %.
- c) En cuanto al control geométrico de las labores subterráneas, se concluye que la implementación de un nuevo tipo de explosivo tuvo un impacto favorable, particularmente en la reducción del nivel de sobrerotura. Tal

como se muestra en la Figura 16, el porcentaje de sobrerotura se redujo de un promedio inicial del 22% a un valor optimizado del 14%, lo que representa una mejora relativa del 36.4 %.

- d) Los resultados obtenidos evidencian que el cambio de explosivo en labores mecanizadas influyó favorablemente en la velocidad de detonación. Específicamente, al evaluar el desempeño del EMULNOR 5000 1 1/4"x16", se registraron velocidades de 4306 m/s, 4292 m/s y 4449 m/s en tres mediciones consecutivas. Estos valores reflejan un rango de VOD consistente, con una media aproximada de 4349 m/s, que se encuentra dentro de los márgenes adecuados para una voladura controlada en condiciones subterráneas.



VI. RECOMENDACIONES

- a) Se sugiere incorporar el explosivo FAMECORTE E20 en las labores de avance en desmonte, ya que ofrece un desempeño equivalente al cartucho EMULNOR® 1000 de dimensiones 1¼" × 16", manteniendo el mismo costo unitario. Esta alternativa permitiría optimizar la voladura controlada, favoreciendo un perfil más uniforme y contribuyendo a la reducción de los requerimientos de sostenimiento mediante Shotcrete, generando así un impacto positivo tanto en la calidad geométrica de la excavación como en los costos operativos asociados.
- b) Se recomienda la implementación y estandarización del uso de cuatro (04) guidores metálicos de dimensiones 1½" × 4 pies, cuya función principal es mantener el paralelismo entre los taladros durante la perforación. Esta práctica contribuirá a mejorar la precisión del diseño de malla, reduciendo desviaciones y errores en la orientación de los barrenos, lo que impacta directamente en la eficiencia energética de la voladura y en la reducción de la sobrerotura.
- c) Se propone el uso de materiales inertes como la arcilla para el retacado de los taladros, con el objetivo de maximizar el aprovechamiento de la energía generada por la columna explosiva. Esta medida permitirá mejorar la fragmentación del macizo rocoso y facilitar la retención de las cañas de PVC, especialmente en taladros ubicados en zonas críticas como coronas y hastiales. El uso adecuado de tacos inertes también mejora el confinamiento del explosivo, favoreciendo una voladura más controlada y segura.

- d) Se recomienda aplicar de forma sistemática el levantamiento topográfico de secciones transversales cada 3 metros con fines de cálculo y monitoreo de la dilución operativa. Como mejora futura, se sugiere incorporar un sistema de escaneo láser 3D, lo que permitiría obtener modelos más precisos del avance real frente al diseño teórico. Esta herramienta no solo mejoraría la exactitud en la medición de sobreroturas y dilución, sino que también facilitaría la toma de decisiones informadas para minimizar la pérdida de mineral y reducir costos operativos
- e) Se recomienda fortalecer los programas de formación del personal, con especial énfasis en la seguridad operacional durante las etapas de perforación y voladura. Es crucial que los trabajadores estén no solo técnicamente capacitados, sino también plenamente conscientes de los riesgos asociados a la manipulación de explosivos y al diseño de mallas de perforación

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ministerio de Energía y Minas, “Anuario Minero 2021”, Dirección de Promoción Minera. Consultado: el 26 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minem/colecciones/2400-anuario-minero>
- [2] B. Montalvo, “Diseño de malla de perforación y voladura para el control de dilución en el subnivel de producción ‘Los Gemelos’, en la explotación minera subterránea de la mina ‘Pique’, compañía OROCONCENT S.A., Portovelo Ecuador (Tesis de pregrado)”, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, 2022. Consultado: el 14 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/18114>
- [3] C. Solórzano, “Aumento de la eficiencia de avance por disparo cambiando el tipo de explosivo de emulsión encartuchada por emulsión a granel en los frentes de avance de sección 3.5mx3.0m - unidad minera San Vicente – Simsa, 2018 (Tesis de pregrado)”, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, 2019. Consultado: el 14 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.unitru.edu.pe/items/49377a48-ed2b-4f19-8f6b-58ab6cd23087>
- [4] M. Tito, “Análisis técnico - económico de la utilización de emulsión vs. dinamita en las labores de desarrollo horizontal en la Unidad Minera Yanaquihua - Arequipa en el año 2019 (Tesis de pregrado)”, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, 2020. Consultado: el 14 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/14305>

- [5] Á. Báez, “Modelamiento de la granulometría obtenida de operaciones de tronadura frente a cambios en el burden, el espaciamiento y tipo de explosivo: aplicación a fases 7 y 10 en minera los Pelambres (Tesis de pregrado)”, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2021. Consultado: el 14 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180438>
- [6] N. Espinosa y R. Hormaechea, “Optimización de procesos de perforación y voladura en los frentes de trabajo de la Sociedad Minera Santa Clara, Ponce Enríquez (Tesis de pregrado)”, Universidad del Azuay, Ecuador, 2021. Consultado: el 14 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/11525>
- [7] I. Valer, “Propuesta de reemplazo de explosivo ANFO por emulsión para mejorar la voladura en la Mina Parcoy CMH 2022 (Tesis de pregrado)”, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, 2022. Consultado: el 14 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unsch.edu.pe/server/api/core/bitstreams/3238d7be-a780-4160-92bf-8e768f4dc124/content>
- [8] E. Carhuapoma y R. Pumacahua, “Cambio de explosivo de dinamita convencional a emulnor para evaluar su rendimiento de voladura en la unidad operativa horizonte – La Libertad (Tesis de pregrado)”, Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, 2022. Consultado: el 14 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unh.edu.pe/items/fb6444ac-4488-47de-b6fe-dafd64d0e645>

- [9] J. Espinoza, "Comparación del uso de explosivos en la voladura de frentes y tajeos, en la Empresa Minera Marsa (Tesis de pregrado)", Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Päsco, 2022. Consultado: el 14 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://45.177.23.200/handle/undac/2896>
- [10] East Texas, "Perforación rotativa", Energy Glossary. Consultado: el 12 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://glossary.slb.com/es/terms/r/rotary_drilling
- [11] SONAMI, "Perforación y tronadura". [En línea]. Disponible en: <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/03/6.perforacion-y-tronadura.pdf>
- [12] V. Yepes, "Perforación mediante jumbos", Apuntes de la Universitat Politècnica de València. Consultado: el 11 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/07/27/perforacion-mediante-jumbos/>
- [13] Cámara Minera del Perú, "Voladura y perforación", 31/10/2019. [En línea]. Disponible en: <https://camiper.com/tiempominero/tipos-voladura-y-perforacion-minera-especializacion/>
- [14] C. López Jimeno, E. López Jimeno, y P. García Bermúdez, *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid, 2003.
- [15] J. Bernaola, J. Castilla, y J. Herrera, *Perforación y voladura de rocas en minería*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013.
- [16] J. Pernia, F. Ortiz, C. Lopez Jimeno, y E. Lopez Jimeno, *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid: ETIMSA, 2003. [En línea].

- Disponible en: <https://topodata.com/wp-content/uploads/2019/10/Manual-de-Perforación-y-Voladura-de-Rocas.pdf>
- [17] Instituto Tecnológico Geominero de España, *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid (España): Izquierdo S.A., 1994.
- [18] C. Konya y E. Albarrán, *Diseño de Voladuras*. Cuicatl, 1998.
- [19] J. Sanz y J. Santamaría, *Manual para el control y diseño de voladuras en obras y carreteras*. Madrid: Cinsa Eicciones Informatizadas S.A., 1993.
- [20] FAMESA, “Famesa Explosivos: Accesorios de voladura”. [En línea]. Disponible en: <http://www.famesa.com.pe/productos/accesorios/>
- [21] INACAP, “Extracción Mina I: Apuntes de Explosivos”, Universidad Tecnológica de Chile. [En línea]. Disponible en: http://www.inacap.cl/web/material-apoyo-cedem/alumno/Mineria-y-Geomatica/AAI_OPEX01_Material_Extraccion_Mina_I_Explosivos.pdf
- [22] Seguridad Minera, “Riesgos vinculados al uso de explosivos en actividades mineras”, *Revista Seguridad Minera*. Consultado: el 15 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/riesgos-vinculados-al-uso-de-explosivos-en-actividades-mineras/#:~:te>
- [23] M. Kononenko, O. Khomenko, I. Kovalenko, A. Kosenko, y R. Zahorodnii, “Determining the performance of explosives for blasting management”, *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, vol. 38, núm. 3, pp. 19–28, 2023, Consultado: el 29 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.3.2>
- [24] P. Persson, R. Holmberg, y J. Lee, *Rock Blasting and Explosives Engineering*. Washington D.C.: RC Press LLC, 1994. Consultado: el 4 de

- enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.routledge.com/Rock-Blasting-and-Explosives-Engineering/Persson-Holmberg-Lee/p/book/9780849389788>
- [25] Seguridad Minera, “Seguridad en manipulación de explosivos y voladura”, Revista Seguridad Minera. Consultado: el 15 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/seguridad-en-manipulacion-de-explosivos-y-voladura/>
- [26] C. Sueros, “Implementación de emulsiones energéticas Fortis Extra en roca traquita (Tesis de pregrado)”, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, 2021. Consultado: el 19 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unjbg.edu.pe/items/5cb6b56e-6e83-4322>
- [27] J. Capcha, “Análisis comparativo del uso de la emulsión gasificante (San – g) y el Slurrex – g, en la voladura, en compañía minera Coimolache S.A. Unidad Tantahuatay (Tesis de pregrado)”, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco, 2023. Consultado: el 29 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/4843>
- [28] S. kavinda, S. Nahper, J. Chaminda, y A. Dassanayaka, “Optimization of blasting geometry and explosive quantity in control blasting for dimension stone extraction”, *Proceedings of ISERME*, vol. 3, núm. 2, pp. 7–13, 2022, Consultado: el 17 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/370025142_Optimization_of_blasting_geometry_and_explosive_quantity_in
- [29] S. Carrasco, *Metodología de la investigación científica*. Lima: Editorial San Marcos, 2007.

- [30] C. Ocegueda, *Metodología de la Investigación: Métodos, técnicas y estructuración de trabajos académicos*, 2da ed. México D.F: ALBOX, 2015. Consultado: el 2 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/330409452_Metodologia_de_la_Investigacion_Metodos_Tecnicas_y_estructuracion_de_trabajos_academicos
- [31] R. Hernández, C. Fernández, y M. del P. Baptista, *Metodología de la Investigación*, 6ta ed. México D.F: Mc Graw Hill, 2014. Consultado: el 14 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: https://periodicooficial.jalisco.gob.mx/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf
- [32] G. Baena, *Metodología de la Investigación*, 3era ed. México D.F: Grupo Editorial Patria, 2017.
- [33] R. Hernández, C. Fernández, y P. Baptista, *Metodología de la Investigación*, 5ta ed. México D.F: Mc Graw Hill, 2010. Consultado: el 2 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/8832042/Metodolog%C3%ADa_de_la_investigaci%C3%B3n_5ta_edici%C3%B3n
- [34] J. Yuni y C. Urbano, *Técnicas para investigar. Recursos metodológicos para la preparación de proyectos de investigación*, 1era ed., vol. 2do. Argentina: Editorial Brujas, 2014. Consultado: el 4 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://abacoenred.com/wp-content/uploads/2016/01/T%C3%A9cnicas-para-investigar-2-Brujas-2014-pdf.pdf>




VIII. ANEXOS

Anexo N°1: Operacionalización de variables

VARIABLES	TIPO DE VARIABLE	INDICADORES	TÉCNICA/INSTRUMENTO
<p align="center">CAMBIO DE EXPLOSIVOS</p>	<p align="center">CUALITATIVO</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Selección y aplicación del emulnor • Selección de accesorios • Capacitación del personal en manipuleo 	<p align="center">Técnica del ANALISIS DOCUMENTAL</p>
<p align="center">MEJORAMIENTO DE KPI DE PERFORACION Y VOLADURA</p>	<p align="center">CUANTITATIVO</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Avance por disparo • Sobrerotura • Velocidad de detonación 	<p align="center">Técnica de LA OBSERVACIÓN DIRECTA</p>

Anexo N° 2: Matriz de consistencia

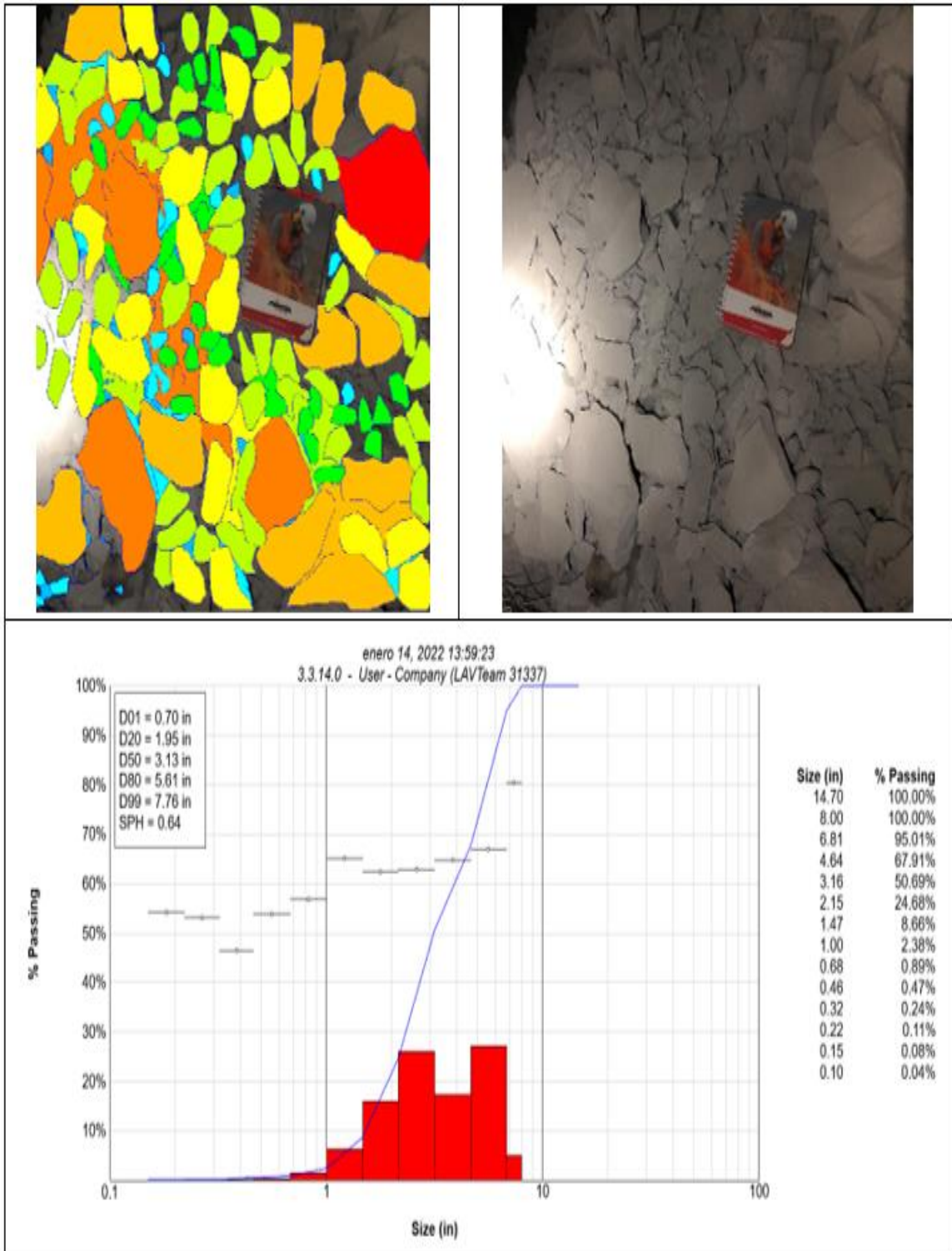
MEJORAMIENTO DE LOS KPI DE PERFORACIÓN Y VOLADURA MEDIANTE EL CAMBIO DE EXPLOSIVOS EN
LABORES MECANIZADAS – MINERA MARSA 2023

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general			
¿De qué manera el cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en el mejoramiento de los KPI de perforación y voladura – Minera Marsa 2023?	Determinar que el cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en el mejoramiento de los KPI de perforación y voladura – Minera Marsa 2023.	El cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en el mejoramiento de los KPI de perforación y voladura – Minera Marsa 2023.	Variable X: CAMBIO DE EXPLOSIVOS	<ul style="list-style-type: none"> Selección y aplicación del emulnor Selección de accesorios Capacitación del personal en manipuleo 	<p>Tipo: Aplicada</p> <p>Nivel: Descriptivo explicativo</p> <p>Diseño: Comparativo transversal</p>
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas			
¿De qué manera el cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en el avance por disparo– Minera Marsa 2023? ¿De qué manera el cambio de	Determinar que el cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en el avance por disparo– Minera Marsa 2023. Determinar que el cambio de	El cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en el avance por disparo– Minera Marsa 2023. El cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en la sobrerotura – Minera Marsa 2023.	 Variable Y: MEJORAMIENTO DE KPI DE PERFORACION Y VOLADURA	<ul style="list-style-type: none"> Avance por disparo Sobrerotura Velocidad de detonación 	<p>Población: la población estará conformada por todas las voladuras realizadas en la Mina</p>

<p>explosivo en labores mecanizadas influye en la sobrerotura – Minera Marsa 2023? ¿De qué manera el cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en la velocidad de detonación – Minera Marsa 2023?</p>	<p>explosivo en labores mecanizadas influye en la sobrerotura – Minera Marsa 2023. Determinar que el cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en la velocidad de detonación – Minera Marsa 2023.</p>	<p>El cambio de explosivo en labores mecanizadas influye en la velocidad de detonación – Minera Marsa 2023</p>		<p>Marza, en el periodo 2023 Muestra: La muestra estará conformada por 18 voladura de pruebas. Técnicas: El análisis documental y la observación directa</p>
--	--	--	--	--



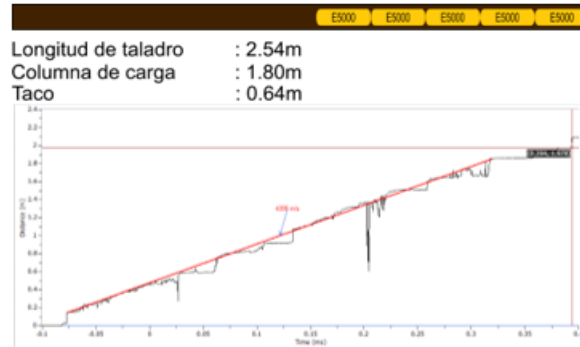
Anexo N° 3: Fragmentación



Anexo N° 4: VOD

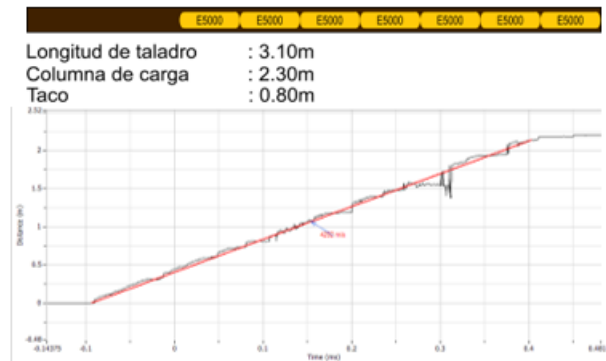
EMULNOR® 5000 1" 1/4 x 16" columna continua (5 CARTUCHOS)

Atacado sin cortes longitudinales $VOD_{prom} = 4306\text{m/s}$



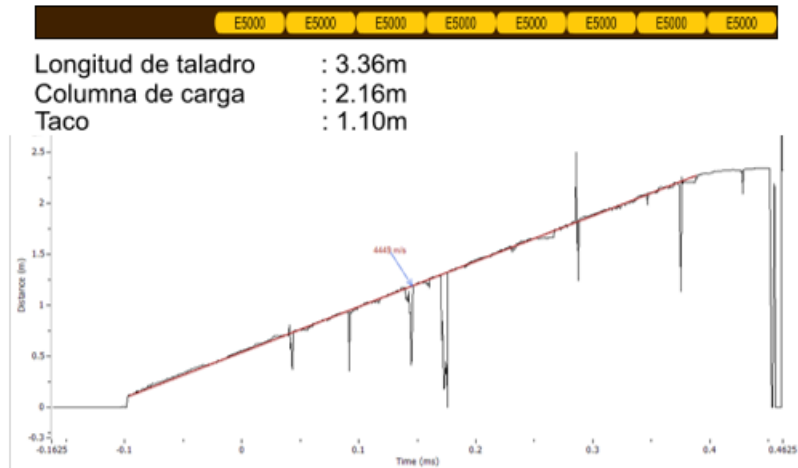
EMULNOR® 5000 1" 1/4 x 16" columna continua (7 CARTUCHOS)

Atacado con cortes longitudinales $VOD_{prom} = 4292\text{m/s}$



EMULNOR® 5000 1" 1/4 x 16" columna continua (8 CARTUCHOS)

Atacado con cortes longitudinales $VOD_{prom} = 4449\text{m/s}$



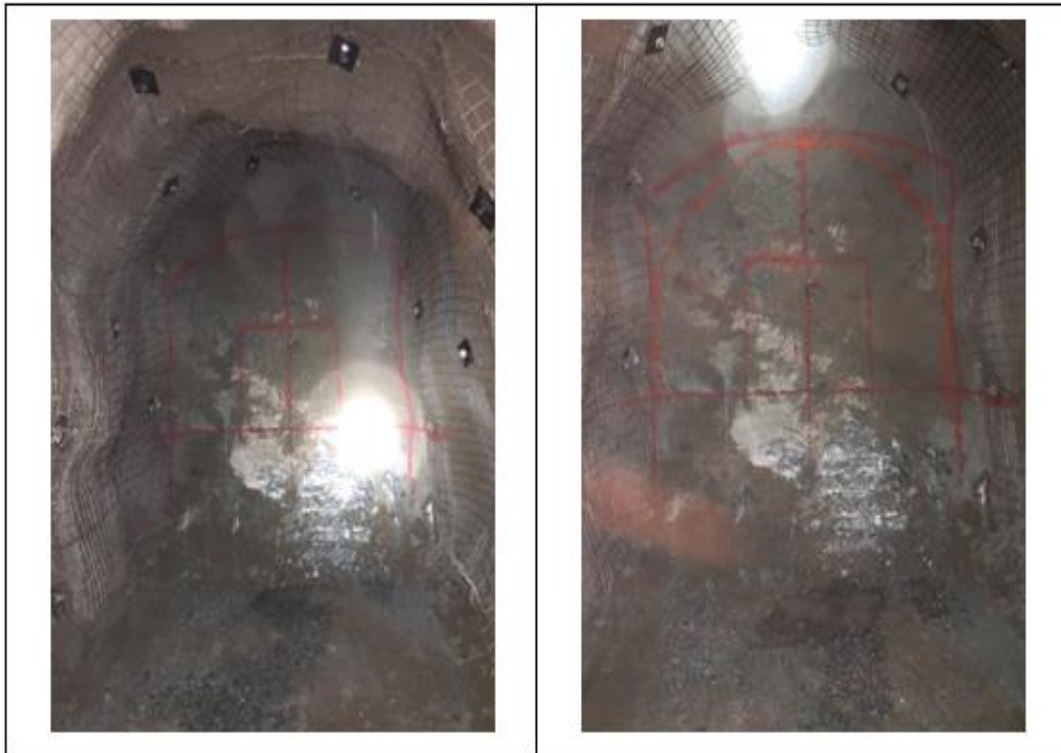
Anexo N° 5: Evidencia fotográfica



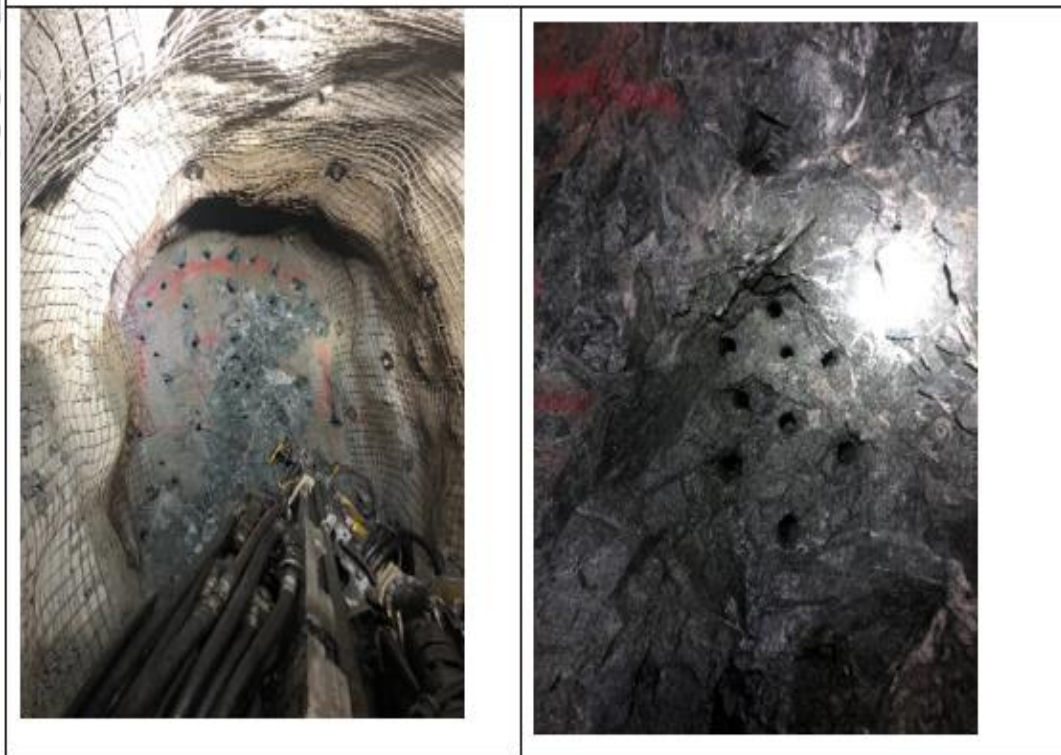
Resultados post voladura presencia de medias cañas



Resultados post voladura, sección controlada



Marcado de malla incorrecto vs correcta in situ - GL 10455 S



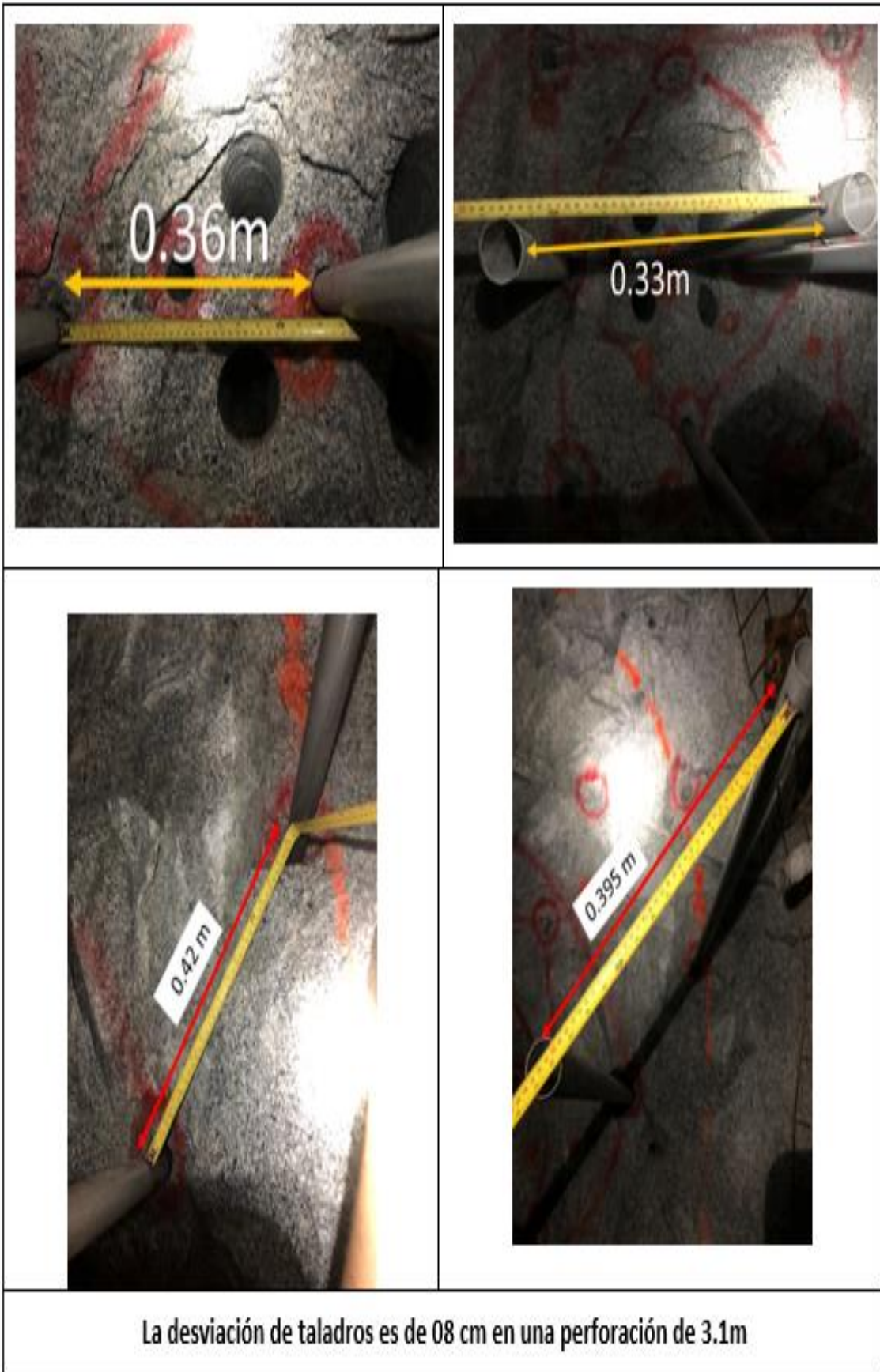
Gl 10455 S Desvíos operativos:



- 1) Marcado de malla de perforación irregular, no realizan la circunferencia de la bóveda
- 2) Operador de Jumbo perfora fuera de la malla de perforación, se debe seguir capacitando en los proyectos y sus secciones programadas CX 10187 (8ft x 9ft)



Longitud de perforación promedio = 3.10m (10.17 pies)





Controlando la sección con el correcto pintado de malla de perforación



Tacos post voladura 05-08 cm



Capacitación y entrenamiento al personal

