



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**“Optimización del diseño de perforación y voladura para bocaminas
mediante simulación de variables específicas”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Autores:

FABIÁN ARTURO JIMÉNEZ ZAPATA

MATEO JOSUÉ GUZMÁN ZÚÑIGA

Director:

ERNESTO PATRICIO FEIJOO CALLE

CUENCA, ECUADOR

2026

Mateo Josué Guzmán Zúñiga

Fabián Arturo Jiménez Zapata

Trabajo de Titulación

Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle

Mayo, 2026

**“Optimización del diseño de perforación y voladura para bocaminas
mediante simulación de variables específicas”**

DEDICATORIA

Este trabajo está especialmente dedicado a mí madre, Yesenia Zúñiga, y mi padre, Jhony Guzmán, quienes durante todo el transcurso de mi vida me han brindado su apoyo económico, han respaldado cada una de mis decisiones. Gracias por impulsarme hacer una mejor persona, hijo, estudiante y por formarme como un futuro profesional a través de sus consejos, su ejemplo de honestidad y sus constantes muestras de cariño. A mi hermano Alejandro, cuyo afecto y momentos compartidos hicieron de esta experiencia un camino mucho más alegre.

No puedo dejar pasar el apoyo emocional y económico, así como el ejemplo de rectitud, ética y honestidad que he recibido de mi abuelo, Rodrigo Zúñiga; gracias a él se presentó la oportunidad de seguir esta carrera que hoy me hace tan feliz.

De igual manera dedicar este trabajo al cielo, a mi abuela Gloria Escobar. Aunque hoy no está físicamente conmigo, el amor sincero que me brindo fue fundamental para completar esta etapa y seguirá siendo la inspiración para alcanzar mis futuras metas.

A todos ustedes les dedico este trabajo de titulación y logro, fruto de un gran esfuerzo y dedicación que no habría sido posible sin su motivación constante.

Mateo J. Guzmán Z.

A Dios por darme el don de la vida y permitirme llegar hasta este punto en la cual he cumplido con mis objetivos universitarios dándome su infinita bondad y amor.

A mi madre, Nelly Zapata por ser el origen de mis valores, ella nunca dudo de mí dándome toda su fe y su confianza para hacer mi sueño realidad, brindándome siempre su amor incondicional y siendo mi pilar fundamental en cada paso de mi vida.

A Leonardo Patiño, quien más que una que una figura en mi vida, ha sido un verdadero ejemplo de esfuerzo, compromiso y fortaleza teniéndome paciencia y por estar presente en cada momento importante, brindándome consejos y fortaleza para seguir adelante.

A mi tío, Héctor Jimenez que hoy me brinda su cuidado desde el cielo. Tu partida, marcada por las duras realidades de la inseguridad minera en la cual dejó una huella y me inspiro a seguir esta carrera. Este trabajo también nace del dolor y se convierte en un compromiso para valorar la vida y la seguridad en cada paso.

A mis demás familiares y amigos que de una u otra manera estuvieron presentes, por su comprensión y por ser esa motivación en momentos difíciles dándome su compañía y animo durante esta etapa.

A todos ustedes les dedico este trabajo con mucho amor, gratitud y respeto, quienes han sido parte esencial de mi vida y de este proceso, porque sin su apoyo, guía y presencia este logro no habría sido posible.

Fabian A. Jiménez Z.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mis agradecimientos a todas las personas que formaron parte de este camino en mi formación profesional, y cuya motivación fue clave para alcanzar mi meta.

A mi madre, Yesenia Zúñiga: gracias por cada muestra de amor, las palabras de aliento, los consejos y la motivación diaria durante estos cuatro años. Gracias por ser mi madre y amiga a la vez.

A mi padre, Jhony Guzmán: gracias por ser un ejemplo de lucha y por enseñarme a ser un hombre respetuoso y seguro al tomar decisiones. Tu esfuerzo diario por nuestra familia ha sido mi mayor inspiración; gracias por ser mi amigo y mi padre.

A mi hermano, Alejandro: desde que llegaste al mundo has sido uno de mis mejores amigos, ayudándome a seguir adelante con tu alegría y tu lealtad incorruptible.

A mi abuela, Gloria Escobar: aunque ya no estas presente, me ensañaste a valorar a las personas por lo que son y a encontrar la felicidad en lo sencillo, como en una sopa de fideo o una gelatina con galletas de animalitos. A mis abuelos Rodrigo Zúñiga y Janine Morales: gracias por el calor de hogar que me brindaron al inicio de esta etapa, por sus consejos, sus risas y el cariño constante.

A mis tíos Jonatan Zúñiga, Mary Velasco, Diego Zúñiga y Karla Pincay: gracias por apoyarme siempre y por demostrarme su orgullo en cada paso que doy.

A mis primos Kamila, Sofia, Emilio, Juanse y Joaquín: gracias por su cariño y por recordarme que, a pesar de los años, siempre llevamos un niño dentro.

A mis tíos y primos, Fernando Ayala, Ana Muñoz, Camilo y Nico Ayala: gracias por su apoyo incondicional y muestras de cariño a pesar de la distancia.

A mis amigos de toda la vida, Miguel Núñez, Iker Ramos y Juan Diego Viteri: gracias por su amistad sincera y leal, y por demostrarme que puedo llamarlos hermanos, aunque no seamos de sangre.

A mis docentes, los ingenieros Leo, Patricio, Eduardo y Fernando: gracias por compartir sus conocimientos conmigo y por convertirse en colegas en quienes pude confiar para pedir consejos profesionales en el futuro.

A todos ustedes les agradezco por su apoyo y cariño brindados, fueron mi inspiración para rendirme y hoy en día poder culminar esta linda etapa en mi alma mater, la Universidad del Azuay,

Mateo J. Guzmán Z.

En primer lugar, agradezco a Dios, por ser mi guía constante, por darme fortaleza en momentos difíciles y por iluminar mi camino para no rendirme ante cada desafío.

A mi mamá, Nelly Zapata por su amor incondicional, su sacrificio silencioso y su apoyo permanente. Gracias por ser mi inspiración constante, por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia, y por nunca dejar de creer en mí.

A Leonardo Patiño, quien me apoyó como un verdadero padre sin llevar mi misma sangre. Gracias por su respaldo, sus consejos y por demostrarme que la familia se construye con amor, compromiso y corazón.

A mi familia y amigos, por acompañarme durante todo mi proceso, por sus palabras de ánimo, su paciencia y por estar siempre presentes en cada momento importante.

A mis profesores de toda mi vida universitaria, quienes con dedicación y vocación compartieron sus conocimientos y contribuyeron a mi formación profesional.

Este logro no es solo mío, sino de todos quienes formaron parte de este camino y creyeron en mí. A todos ustedes mis sinceros agradecimientos

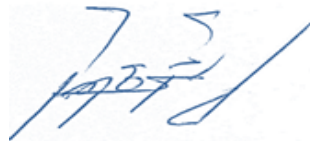
Fabián A. Jiménez Z

RESUMEN

El presente trabajo investigativo tiene como objetivo optimizar el diseño de mallas de perforación y voladura para minería subterránea mediante la simulación de variables específicas y geomecánicas. En base a una metodología cuantitativa y analítica, se analizó el comportamiento del macizo rocoso en una bocamina de tipo 4mx4m, desarrollando una matriz de cálculo hecha en Microsoft Excel para analizar 5 propuestas distintas.

Este estudio conlleva parámetros específicos críticos como el espaciamiento, el factor de carga, el burden y las propiedades de los explosivos tipo ANFO y emulsiones. Los resultados nos permitieron distinguir que la propuesta 2, que emplea un burden de 0.60m y un espaciamiento de 0.75m, es la opción más eficiente para un buen consumo energético y avance operativo, utilizando 36 barrenos en total. Finalmente se obtuvo que la correcta combinación de emulsión en la zona de corte y ANFO en las zonas de producción realiza una buena liberación de energía y minimiza la sobre excavación, garantizando la estabilidad de la estructura.

Palabras claves: perforación, voladura, diseño, malla, optimización.



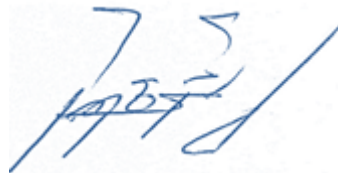
Ing Patricio Feijoo Calle.
Director de tesis.

ABSTRACT

The present research work aims to optimize the design of drilling and blasting patterns for underground mining through the simulation of specific and geomechanical variables. Based on quantitative and analytical methodology, the behavior of the rock mass in a 4mx4m type heading was analyzed, developing a calculation matrix in Microsoft Excel to analyze 5 different proposals.

This study involves critical specific parameters such as spacing, charge factor, burden, and the properties of ANFO and emulsion type explosives. The results allowed us to determine that proposal 2, which uses a 0.60m burden and 0.75m spacing, is the most efficient option for good energy consumption and operational advance, using a total of 36 drill holes. Finally, it was found that the correct combination of emulsion in the cut zone and ANFO in the production zones achieves good energy release and minimizes over. Finally, it was found that the correct combination of emulsion in the cut zone and ANFO in the production zones achieves a good energy release and minimizes over-excavation, ensuring the stability of the structure.

Keywords: drilling, blasting, design, mesh, optimization.



Ing. Patricio Feijoo Calle.
Thesis Director.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTO	5
RESUMEN	7
ABSTRACT.....	8
INDICE DE TABLAS	11
INDICE DE FIGURAS.....	12
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO 1	14
MARCO TEÓRICO.....	14
1.1 Conceptos preliminares.....	14
1.2 Tipos de bocaminas.....	15
1.2.1 Bocamina de acceso principal o galería.....	15
1.2.2 Rampa	17
1.2.3 Pique	18
1.3 Geometría de bocaminas.....	18
1.4 Litología y calidad geomecánica del macizo rocoso	19
1.4.1 Esfuerzos in situ.....	21
1.4.2 Humedad	21
1.4.3 Vibraciones producidas por voladuras.....	22
1.4.4 Fallas	23
1.4.5 Diaclasas	24
1.5 Sistema Rock Mass Rating (RMR).....	24
1.6 Explosivos en minería subterránea	26
1.6.1 Explosivos tipo ANFO.....	27
1.6.2 Explosivos tipo emulsión.....	27
1.6.3 Explosivos encartuchados.....	28

1.7 Mecanismos de fracturas inducidas por explosivos.....	31
1.8 Factores de diseño de voladura	31
CAPÍTULO 2.....	35
METODOLOGÍA	35
2.1 Metodología empleada.....	35
2.1.1 Parámetros geométricos del diseño.....	35
2.1.2 Variables estudiadas.....	36
2.2 Procesamiento y corrección de datos	37
2.2.1 Determinación del volumen de roca	37
2.2.2 Caracterización de los explosivos empleados.....	38
2.3.3 Factor de carga.....	39
2.3 Elaboración de matriz	40
CAPITULO 3.....	43
ANALISIS DE RESULTADOS	43
3.1 Análisis y valoración de resultados obtenido.....	43
3.2 Ventajas y desventajas de la metodología propuesta.....	45
3.2.1 Ventajas.....	45
3.2.2 Desventajas	45
CONCLUSIONES	47
RECOMENDACIONES.....	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades geomecánicas de diversos tipos de roca.....	20
Tabla 2. Clasificación de niveles de vibración y sus efectos potenciales en estructuras	23
Tabla 3. Clasificación de la calidad del macizo rocoso según el sistema de Rock Mass Rating (RMR).....	25
Tabla 4. Características, ventajas y aplicaciones de explosivos en minería subterránea	30
Tabla 5. Factores de diseño de voladura y su influencia en el proceso de fragmentación	33
Tabla 6. Rangos típicos de parámetros de diseño para perforación y voladura subterránea	34
Tabla 7. Parámetros geométricos para el diseño de la malla de perforación.....	36
Tabla 8. ANFO	38
Tabla 9. EMULSEN 7.20	38
Tabla 10. Cálculos de las 5 propuestas.....	40
Table 11. Matriz con respecto a los dos explosivos más utilizados en minería subterránea	40
Tabla 12. Números de barrenos por zona	43

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Malla de perforación propuesta 2.....44

INTRODUCCIÓN

En minería subterránea, las bocaminas son infraestructuras esenciales para garantizar el acceso, la ventilación y la viabilidad económica de la explotación de yacimientos subterráneos. La estabilidad de estas estructuras se encuentra relacionadas con la geomecánica del macizo rocoso, ante las características de la estructura del terreno. Ya que un mal cálculo que lleve a un daño excesivo llevan a comprometer la seguridad y los costos operativos, genera ser meticulosos con los procesos de perforación y voladura, de acuerdo con criterios técnicos estrictos.

Atreves de los años, el diseño de mallas de perforación se ha visto envuelta de la experiencia en campo, sin embargo, la minería actual se basa en análisis los cuales permiten obtener una mejor eficiencia en el uso de energía. Las características de los parámetros como el espaciamiento, el factor de carga y el burden, influyen específicamente en la distribución de la presión de detonación y en las características de las grietas. De igual manera la correcta selección de explosivos lleva a considerar la resistencia de agua y la densidad de los explosivos como el ANFO o las emulsiones.

La presente investigación analiza esta problemática, mediante la simulación de variables específicas, con la finalidad de diseñar una malla de perforación que logre una estabilidad entre la optimización energética de explosivos y la seguridad del contorno de excavación.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Conceptos preliminares

La minería subterránea se fundamenta como el conjunto de técnicas aplicadas para la extracción de minerales situados en profundidades donde la explotación a cielo abierto resulta inviable técnica o económicamente, apoyándose en un sistema de excavaciones cuya estructura primordial son las bocaminas, las cuales fungen como el punto de conexión vital entre la superficie y las labores interiores para garantizar el acceso, ventilación y transporte de mineral.

La estabilidad y eficacia de estas aperturas dependen intrínsecamente del comportamiento de la litología y la calidad geomecánica del macizo rocoso, ya que la respuesta del material ante las cargas se define por su composición mineralógica, estructura y resistencia; de esta forma, rocas duras y compactas, como los granitos, exhiben una mejor respuesta, mientras que los materiales fracturados o alterados requieren refuerzos adicionales. A ello se suma la influencia de los esfuerzos in situ, cuya distribución desigual puede generar concentraciones de tensión críticas que comprometen la estabilidad de la excavación, y la inevitable presencia de humedad, que reduce significativamente la cohesión y resistencia del macizo rocoso, favoreciendo la disgregación y la propagación de grietas. Por último, las discontinuidades estructurales son determinantes, pues tanto las fallas como las diaclasas reducen la resistencia global, condicionan la propagación de las ondas de detonación y aumentan el riesgo de colapsos locales, haciendo imperativa su caracterización para definir el patrón de perforación y voladura más adecuado que minimice el daño estructural.

1.2 Tipos de bocaminas

En minería subterránea, las bocaminas constituyen las excavaciones iniciales que permiten el acceso al yacimiento mineral y facilitan el desarrollo de las labores internas. Estas estructuras son fundamentales para el transporte de personal, equipos, ventilación, extracción del mineral y evacuación de material estéril. Su diseño depende de factores como la geometría del yacimiento, la topografía del terreno, la profundidad del depósito y el método de explotación seleccionado.

En general, las principales formas de acceso a una mina subterránea incluyen galerías de acceso, rampas y piques, cada una con características constructivas y operativas específicas. La elección del tipo de bocamina influye directamente en el diseño de perforación y voladura, ya que determina la orientación de los frentes de excavación, la distribución de taladros y los patrones de carga explosiva utilizados para lograr una fragmentación adecuada del macizo rocoso (Córdova et al., 2021).

Además, en excavaciones subterráneas profundas, el diseño y desarrollo de estas labores debe considerar las condiciones geomecánicas del macizo rocoso y la redistribución de esfuerzos generada por la excavación. En este contexto, las técnicas de perforación y voladura controlada se utilizan para optimizar la fragmentación de la roca y minimizar los daños en el contorno de las excavaciones, garantizando la estabilidad de las labores mineras (Yao et al., 2024).

1.2.1 Bocamina de acceso principal o galería

La bocamina de acceso principal, también conocida como galería, corresponde a una excavación horizontal o ligeramente inclinada que permite ingresar desde la superficie hacia el

interior de la mina. Este tipo de acceso se utiliza principalmente cuando el yacimiento aflora en la superficie o se encuentra relativamente cercano al nivel del terreno, permitiendo establecer un acceso directo hacia el cuerpo mineralizado.

Las galerías son ampliamente utilizadas en minería subterránea debido a que facilitan el transporte de mineral, equipos y personal mediante sistemas de transporte como locomotoras, cintas transportadoras o camiones. Asimismo, sirven como conductos para la ventilación, drenaje y circulación dentro de la mina. Su sección transversal suele diseñarse de acuerdo con los requerimientos de operación, considerando el espacio necesario para el tránsito de equipos y la estabilidad geomecánica del macizo rocoso.

Durante la excavación de galerías, el método de perforación y voladura es uno de los más empleados, especialmente en macizos rocosos competentes. Este proceso consiste en la perforación de un conjunto de taladros distribuidos estratégicamente en el frente de excavación, los cuales posteriormente se cargan con explosivos para fragmentar la roca y permitir el avance de la excavación. Según Córdova et al. (2021), el diseño adecuado del patrón de perforación y voladura resulta fundamental para controlar la fragmentación de la roca y optimizar el avance de las excavaciones subterráneas.

Por otra parte, en excavaciones profundas se debe considerar la influencia de los esfuerzos in situ del macizo rocoso. En estos casos, la aplicación de técnicas de voladura controlada o prea condicionamiento del macizo rocoso puede contribuir a reducir concentraciones de esfuerzos y mejorar la estabilidad del frente de excavación (Yao et al., 2024).

1.2.2 Rampa

La rampa es una excavación subterránea inclinada que conecta distintos niveles de la mina o comunica la superficie con zonas profundas del yacimiento. A diferencia de las galerías horizontales, las rampas presentan pendientes generalmente comprendidas entre 8 % y 15 %, lo que permite la circulación de equipos móviles como camiones y cargadores utilizados en el transporte del mineral y del material estéril.

Este tipo de acceso se ha convertido en uno de los más utilizados en la minería moderna, especialmente en operaciones mecanizadas, debido a su flexibilidad operativa y a la posibilidad de transportar mineral mediante equipos de carga y acarreo. Además, las rampas permiten desarrollar la mina de manera progresiva, facilitando el acceso a diferentes niveles del depósito mineral.

Desde el punto de vista del desarrollo minero, la excavación de rampas se realiza comúnmente mediante perforación y voladura, siguiendo patrones de perforación diseñados en función de la sección de la excavación, el tipo de roca y los objetivos de fragmentación. Un diseño adecuado del patrón de perforación permite controlar la dirección del avance, optimizar el consumo de explosivos y minimizar la sobre excavación de la sección de la rampa (Córdova et al., 2021).

Asimismo, en condiciones de alta presión geomecánica, las excavaciones inclinadas pueden experimentar redistribuciones significativas de esfuerzos en el macizo rocoso. En estos casos, técnicas de voladura controlada y preacondicionamiento del macizo rocoso se utilizan para generar zonas de fractura controlada que permitan disipar tensiones y reducir el riesgo de inestabilidad en el frente de excavación (Yao et al., 2024).

1.2.3 Pique

En la excavación de piques mediante perforación y voladura, uno de los aspectos más relevantes a considerar es la generación de vibraciones inducidas por la detonación de explosivos, ya que estas pueden afectar la estabilidad del macizo rocoso circundante y las estructuras cercanas dentro de la mina. La detonación produce ondas de esfuerzo que se propagan a través del macizo rocoso generando movimiento de partículas, fenómeno que se conoce como vibración del terreno. La intensidad de estas vibraciones depende de diversos factores, entre los que destacan la cantidad de explosivo utilizada, la geometría de los taladros, las características geológicas del macizo rocoso y la distancia respecto al punto de detonación. En este contexto, el control de parámetros de diseño de voladura resulta fundamental para minimizar los efectos adversos sobre las paredes del pique y garantizar la estabilidad de la excavación. De acuerdo con Hosseini, Yari y Ramezanzadeh (2023), la velocidad pico de partícula es uno de los principales indicadores utilizados para evaluar la intensidad de las vibraciones generadas por voladuras y su posible impacto en estructuras y macizos rocosos, por lo que su estimación y control constituyen un aspecto clave en el diseño de voladuras en operaciones mineras subterráneas.

1.3 Geometría de bocaminas

La geometría de las bocaminas constituye uno de los aspectos fundamentales en el diseño y desarrollo de labores mineras subterráneas, ya que determina las condiciones de estabilidad de la excavación, la eficiencia operativa y la seguridad de las actividades mineras. La sección transversal de una bocamina suele diseñarse considerando factores como el método de explotación, el tipo de equipos que circularán por la labor, las condiciones geomecánicas del macizo rocoso y los requerimientos de ventilación y transporte del mineral.

De acuerdo con Herrera Herbert (2024), la geometría de los accesos a una mina subterránea debe adaptarse a las condiciones topográficas y geológicas del entorno, así como a la función específica de la excavación dentro del sistema minero. Las secciones más comunes en bocaminas suelen ser de forma rectangular, trapezoidal o en arco, dependiendo de la estabilidad del macizo rocoso y de los sistemas de sostenimiento requeridos.

Desde el punto de vista del diseño de perforación y voladura, la geometría de la excavación influye directamente en la distribución de los taladros, el patrón de perforación y la cantidad de explosivo utilizada en cada ciclo de avance. Un diseño geométrico adecuado permite optimizar la fragmentación del macizo rocoso, controlar la sobre excavación y garantizar el avance eficiente de la labor minera (Córdova, 2021).

1.4 Litología y calidad geomecánica del macizo rocoso

La litología y las propiedades geomecánicas del macizo rocoso desempeñan un papel determinante en el comportamiento de las excavaciones subterráneas y en el diseño de las operaciones de perforación y voladura. La litología se refiere al tipo de roca presente en el yacimiento, incluyendo características como su composición mineralógica, textura y grado de alteración, mientras que la geomecánica estudia la respuesta del macizo rocoso frente a las cargas y esfuerzos inducidos por la excavación.

En minería subterránea, el comportamiento del macizo rocoso está influenciado por factores como la presencia de discontinuidades, el estado de esfuerzos naturales y las propiedades mecánicas de la roca intacta. Estas condiciones determinan la estabilidad de las excavaciones y condicionan el diseño de los patrones de perforación y voladura utilizados para el avance de las labores (Yao et al., 2024).

Las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, como la resistencia a compresión, la densidad y el módulo de elasticidad, influyen directamente en el comportamiento de la roca frente a los esfuerzos inducidos por las excavaciones y las voladuras. Estas propiedades determinan la forma en que la roca se fractura y condicionan el diseño de los parámetros de perforación y voladura. En la Tabla 1 se presentan rangos típicos de propiedades geomecánicas para diferentes tipos de roca reportados en la literatura especializada.

Tabla 1. Propiedades geomecánicas de diversos tipos de roca

Tipo de roca	Resistencia a compresión (MPa)	Densidad (g/cm³)	Módulo de elasticidad (GPa)
Granito	100 – 250	2,6 – 2,7	40 – 70
Basalto	150 – 300	2,8 – 3,0	50 – 90
Caliza	30 – 250	2,3 – 2,7	20 – 70
Arenisca	20 – 170	2,2 – 2,6	10 – 50
Lutita	5 – 100	2,2 – 2,6	5 – 30

Fuente: Adaptado de Bieniawski (1989); Herrera Herbert (2024); Yao et al. (2024).

Como se muestra en la Tabla 1, las diferentes litologías presentan variaciones significativas en sus propiedades geomecánicas, como la resistencia a la compresión, la densidad y el módulo de elasticidad. Estas propiedades influyen directamente en el comportamiento del macizo rocoso frente a los esfuerzos inducidos por las excavaciones y las voladuras. Por ejemplo, rocas ígneas como el granito y el basalto suelen presentar mayores valores de resistencia y rigidez, lo que implica una mayor dificultad para su fragmentación durante las operaciones de voladura. En contraste, rocas sedimentarias como las lutitas o algunas areniscas presentan valores menores de resistencia, lo que facilita su fragmentación, pero puede generar problemas de estabilidad en las excavaciones. Por lo tanto, el conocimiento de las propiedades geomecánicas de la roca resulta fundamental para el diseño adecuado de los parámetros de perforación y voladura.

1.4.1 Esfuerzos in situ

Los esfuerzos in situ corresponden a las tensiones naturales presentes en el macizo rocoso antes de que se realicen las excavaciones mineras. Estos esfuerzos se originan principalmente por el peso de las capas de roca suprayacentes y por procesos tectónicos que han actuado a lo largo del tiempo geológico.

Durante la excavación de una bocamina, el equilibrio de esfuerzos del macizo rocoso se modifica, generando redistribuciones de tensiones alrededor de la excavación. Estas redistribuciones pueden provocar fracturamiento adicional de la roca, desprendimientos o deformaciones si no se consideran adecuadamente en el diseño del avance minero. En excavaciones profundas, el control de los esfuerzos inducidos mediante técnicas de voladura controlada o preacondicionamiento del macizo rocoso puede contribuir a reducir concentraciones de tensiones y mejorar la estabilidad de la excavación (Yao et al., 2024; Córdova, 2021).

1.4.2 Humedad

La presencia de humedad o agua dentro del macizo rocoso puede influir significativamente en las propiedades mecánicas de las rocas y en el comportamiento de las excavaciones subterráneas. El agua puede actuar como agente lubricante en las discontinuidades, reduciendo la resistencia al corte de las juntas y aumentando la posibilidad de deslizamientos o desprendimientos de bloques.

Así mismo, la humedad puede afectar el desempeño de los explosivos utilizados en la voladura, especialmente aquellos que no presentan resistencia al agua. Por esta razón, en ambientes húmedos o con presencia de filtraciones es necesario seleccionar explosivos con

características adecuadas, como emulsiones o explosivos encartuchados resistentes al agua (Kramarczyk, 2022).

1.4.3 Vibraciones producidas por voladuras

Las voladuras generan ondas de esfuerzo que se propagan a través del macizo rocoso produciendo vibraciones en el terreno. Estas vibraciones pueden afectar la estabilidad de las excavaciones subterráneas y las estructuras cercanas si no se controlan adecuadamente.

Uno de los parámetros más utilizados para evaluar la intensidad de las vibraciones generadas por voladuras es la velocidad pico de partícula (PPV), la cual permite estimar el nivel de movimiento que experimenta el macizo rocoso durante la detonación de los explosivos. De acuerdo con Hosseini et al. (2023), el control de variables como la carga por retardo, la distancia al punto de detonación y la secuencia de iniciación permite reducir la magnitud de las vibraciones y minimizar los daños al macizo rocoso circundante.

Además, el diseño adecuado de los parámetros de voladura también permite disminuir la propagación excesiva de ondas de choque, lo que contribuye a mantener la estabilidad de las excavaciones subterráneas (Losaladjome Mboyo et al., 2024).

Las vibraciones generadas por voladuras se propagan a través del macizo rocoso en forma de ondas sísmicas que pueden generar movimientos de partículas en el terreno. Uno de los parámetros más utilizados para evaluar la intensidad de estas vibraciones es la velocidad pico de partícula (PPV), la cual permite estimar los posibles efectos sobre estructuras o excavaciones cercanas. En la Tabla 2 se presentan los niveles de vibración comúnmente utilizados para evaluar el impacto de las voladuras en el macizo rocoso.

Tabla 2. Clasificación de niveles de vibración y sus efectos potenciales en estructuras

Velocidad pico de partícula (mm/s)	Nivel de vibración	Posibles efectos
< 5 mm/s	Bajo	Sin daños en estructuras ni excavaciones
5 – 25 mm/s	Moderado	Posibles vibraciones perceptibles
25 – 50 mm/s	Alto	Riesgo de daños menores en estructuras sensibles
> 50 mm/s	Muy alto	Posible daño estructural o inestabilidad

Fuente: Adaptado de Hosseini et al. (2023); Losaladjome Mboyo et al. (2024).

La Tabla 2 presenta una clasificación de los niveles de vibración del terreno en función de la velocidad pico de partícula (PPV), la cual es uno de los indicadores más utilizados para evaluar los efectos de las voladuras sobre el macizo rocoso y las estructuras cercanas. Valores bajos de PPV indican niveles de vibración reducidos que generalmente no generan daños en las estructuras ni en las excavaciones subterráneas. Sin embargo, a medida que la velocidad pico de partícula aumenta, también se incrementa el riesgo de generar daños estructurales o inestabilidad en el macizo rocoso. Por esta razón, el control de los parámetros de diseño de voladura, como la carga por retardo y la secuencia de detonación, resulta fundamental para limitar la propagación de vibraciones y garantizar la seguridad de las operaciones mineras.

1.4.4 Fallas

Las fallas geológicas corresponden a fracturas en el macizo rocoso a lo largo de las cuales se ha producido desplazamiento relativo de los bloques de roca. Estas estructuras pueden tener diferentes dimensiones y orientaciones, y representan zonas de debilidad dentro del macizo rocoso.

En minería subterránea, la presencia de fallas puede afectar significativamente la estabilidad de las excavaciones, ya que estas zonas suelen presentar rocas fracturadas, alteradas o con menor resistencia mecánica. Por esta razón, la identificación y caracterización de las fallas resulta fundamental para el diseño de las labores mineras y para la planificación de los sistemas de sostenimiento necesarios (Herrera Herbert, 2024).

1.4.5 Diaclasas

Las diaclasas son fracturas o discontinuidades en el macizo rocoso que no presentan desplazamiento apreciable entre los bloques de roca. Estas estructuras geológicas son muy comunes en diferentes tipos de rocas y pueden influir considerablemente en el comportamiento geomecánico del macizo rocoso.

Según Ruiz (2018), las diaclasas constituyen uno de los elementos estructurales más importantes en la evaluación de macizos rocosos, ya que determinan la forma en que la roca se fragmenta y se comporta frente a los esfuerzos inducidos por las excavaciones mineras. La orientación, espaciamiento y persistencia de las diaclasas son factores clave que deben considerarse en el diseño de perforación y voladura.

1.5 Sistema Rock Mass Rating (RMR)

El sistema Rock Mass Rating (RMR) es uno de los métodos más utilizados para la clasificación geomecánica de macizos rocosos en ingeniería de minas y obras subterráneas. Este sistema permite evaluar la calidad del macizo rocoso mediante la asignación de valores numéricos a diferentes parámetros geomecánicos, tales como la resistencia de la roca intacta, el

espaciamiento de las discontinuidades, el estado de las juntas, la presencia de agua y la orientación de las discontinuidades respecto a la excavación.

La aplicación del sistema RMR permite estimar el comportamiento del macizo rocoso frente a las excavaciones y definir los sistemas de sostenimiento más adecuados para garantizar la estabilidad de las labores subterráneas. Asimismo, esta clasificación resulta útil para optimizar el diseño de los patrones de perforación y voladura en función de las condiciones geomecánicas del macizo rocoso (Yao et al., 2024).

La calidad del macizo rocoso puede evaluarse mediante el sistema Rock Mass Rating, el cual clasifica el macizo en diferentes categorías de acuerdo con sus propiedades geomecánicas. Esta clasificación se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de la calidad del macizo rocoso según el sistema de Rock Mass Rating (RMR)

RMR	Calidad del macizo rocoso	Descripción geomecánica	Condiciones típicas
81 – 100	Muy buena	Macizo rocoso competente, discontinuidades poco frecuentes	Excavaciones estables con poco sostenimiento
61 – 80	Buena	Rocas relativamente resistentes con fracturamiento moderado	Requiere sostenimiento ligero
41 – 60	Regular	Presencia moderada de discontinuidades	Se requieren sistemas de sostenimiento más frecuentes
21 – 40	Mala	Macizo rocoso fracturado o alterado	Alto riesgo de inestabilidad
< 20	Muy mala	Rocas muy fracturadas o alteradas	Requiere sostenimiento intensivo

Fuente: Adaptado de Bieniawski (1989); Yao et al. (2024).

La Tabla 3 muestra la clasificación del macizo rocoso según el sistema Rock Mass Rating (RMR), el cual permite evaluar la calidad del macizo rocoso mediante un rango de valores numéricos. A partir de esta clasificación, es posible identificar las condiciones de estabilidad del macizo rocoso y definir los requerimientos de sostenimiento necesarios para las excavaciones subterráneas. Los valores más altos del índice RMR corresponden a macizos rocosos de buena calidad, los cuales presentan mayor estabilidad y requieren menores medidas de sostenimiento. Por el contrario, valores bajos del RMR indican macizos rocosos altamente fracturados o alterados, lo que implica mayores riesgos de inestabilidad y la necesidad de aplicar sistemas de soporte más robustos. En este sentido, la aplicación del sistema RMR constituye una herramienta fundamental para el diseño seguro y eficiente de las labores mineras subterráneas.

1.6 Explosivos en minería subterránea

En las operaciones de minería subterránea se utilizan diversos tipos de explosivos diseñados para fragmentar el macizo rocoso de manera eficiente y segura. Entre los explosivos más utilizados se encuentran los explosivos encartuchados, ANFO y emulsiones explosivas.

Las emulsiones explosivas han ganado gran popularidad en las últimas décadas debido a su alta estabilidad, seguridad en el manejo y resistencia al agua. Estas emulsiones están compuestas principalmente por una fase oxidante y una fase combustible, las cuales se combinan para formar un sistema altamente energético capaz de generar una gran cantidad de gases y energía durante la detonación (Kramarczyk, 2022).

La selección del tipo de explosivo depende de factores como el tipo de roca, la presencia de agua, el diámetro de los taladros y los objetivos de fragmentación del proceso de voladura.

1.6.1 Explosivos tipo ANFO

El ANFO es uno de los explosivos industriales más utilizados en la minería debido a su bajo costo y a su alta capacidad de generación de energía durante la detonación. Este explosivo está compuesto principalmente por una mezcla de nitrato de amonio (oxidante) y combustible líquido, generalmente diésel o fuel oil, en proporciones aproximadas de 94 % y 6 %, respectivamente. Al detonar, esta mezcla produce una rápida liberación de gases y energía que genera la fragmentación del macizo rocoso.

El ANFO presenta un buen rendimiento en rocas de dureza media a alta y es especialmente adecuado para taladros de mayor diámetro, ya que su sensibilidad a la detonación es relativamente baja y requiere generalmente el uso de un explosivo iniciador o booster para asegurar una detonación eficiente. Sin embargo, una de sus principales limitaciones es su baja resistencia al agua, ya que la presencia de humedad puede disolver el nitrato de amonio y afectar el desempeño del explosivo. Por esta razón, su uso se recomienda principalmente en taladros secos o con condiciones de humedad controladas (Jimeno et al., 1995; Hartman & Mutmansky, 2002).

1.6.2 Explosivos tipo emulsión

Las emulsiones explosivas representan una de las tecnologías más avanzadas en el campo de los explosivos industriales utilizados en minería. Estas emulsiones consisten en una mezcla homogénea formada por una fase oxidante acuosa, generalmente basada en nitrato de

amonio, y una fase combustible compuesta por aceites o hidrocarburos, estabilizadas mediante agentes emulsificantes que permiten mantener la mezcla en estado estable.

Según Kramarczyk (2022), las emulsiones explosivas se caracterizan por su elevada estabilidad química, alta densidad energética y excelente resistencia al agua, lo que las convierte en una alternativa muy eficiente para operaciones de minería subterránea donde existe presencia de humedad o filtraciones en los taladros. Además, estos explosivos presentan un alto grado de seguridad durante su transporte y manipulación, ya que generalmente se producen en estado no sensibilizado y adquieren sus propiedades explosivas únicamente después del proceso de sensibilización.

Otra ventaja importante de las emulsiones explosivas es que permiten una mayor flexibilidad en el diseño de voladuras, ya que pueden ajustarse en densidad y energía de acuerdo con las condiciones geológicas y geomecánicas del macizo rocoso. Esto facilita la optimización del proceso de fragmentación de la roca y la reducción de efectos secundarios como vibraciones o daños excesivos en el contorno de la excavación (Kramarczyk, 2022).

1.6.3 Explosivos encartuchados

Los explosivos encartuchados son materiales explosivos que se presentan en forma de cilindros o cartuchos envueltos en papel o material plástico, los cuales se introducen directamente en los taladros perforados en el macizo rocoso. Este tipo de explosivo es ampliamente utilizado en minería subterránea debido a su facilidad de manejo, su capacidad para adaptarse a diferentes diámetros de perforación y su relativa seguridad durante las operaciones de carga. Generalmente están compuestos por mezclas de nitrato de amonio con

combustibles u otros componentes energéticos que permiten generar una reacción explosiva controlada al momento de la detonación.

Una de las principales ventajas de los explosivos encartuchados es su versatilidad, ya que pueden emplearse tanto como carga principal en taladros de pequeño diámetro como en la iniciación de otros explosivos más sensibles. Además, muchos de estos productos poseen cierta resistencia a la humedad, lo que permite su utilización en condiciones donde existe presencia de agua dentro de los taladros. En minería subterránea, estos explosivos suelen emplearse en labores de desarrollo como galerías, rampas y piques, donde los diámetros de perforación son relativamente pequeños y se requiere un control adecuado de la fragmentación del macizo rocoso (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995; Hartman & Mutmansky, 2002).

Los explosivos utilizados en minería subterránea presentan diferentes características en cuanto a composición, resistencia al agua y aplicaciones operativas. En la Tabla 4 se presenta una comparación de los principales explosivos utilizados en labores subterráneas.

Tabla 4. Características, ventajas y aplicaciones de explosivos en minería subterránea

Tipo de explosivo	Composición principal	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones en minería subterránea
Explosivos encartuchados	Mezclas de nitrato de amonio con combustibles y sensibilizadores, empaquetadas en cartuchos cilíndricos	Fácil manipulación, buena iniciación, adecuados para taladros pequeños	Costo mayor en comparación con ANFO	Desarrollo de galerías, rampas y labores de pequeño diámetro
ANFO	94 % nitrato de amonio + 6 % fuel oil	Bajo costo, alta energía de explosión, fácil preparación	Baja resistencia al agua requiere booster para iniciar	Voladuras en taladros secos y de mayor diámetro
Emulsiones explosivas	Emulsión de nitrato de amonio con hidrocarburos estabilizados	Alta estabilidad, resistencia al agua, mayor seguridad	Costo superior al ANFO	Voladuras en condiciones húmedas o con presencia de agua

Fuente: Adaptado de Jimeno et al. (1995); Hartman & Mutmansky (2002); Kramarczyk (2022).

Como se observa en la Tabla 4, los diferentes tipos de explosivos utilizados en minería subterránea presentan características particulares que determinan su aplicación en las operaciones de perforación y voladura. Los explosivos encartuchados destacan por su facilidad de manejo y su adaptabilidad a taladros de pequeño diámetro, lo que los hace adecuados para labores de desarrollo como galerías, rampas y piques. Por otro lado, el ANFO es ampliamente utilizado debido a su bajo costo y elevada capacidad energética, aunque su uso se ve limitado en condiciones donde existe presencia de agua. En contraste, las emulsiones explosivas presentan una mayor estabilidad y resistencia a la humedad, lo que las convierte en una alternativa eficiente en ambientes subterráneos donde los taladros pueden contener agua. En

conjunto, estas diferencias evidencian que la selección del explosivo debe realizarse considerando las condiciones geológicas, operativas y ambientales de la labor minera.

1.7 Mecanismos de fracturas inducidas por explosivos

La detonación de explosivos dentro de un taladro genera una rápida liberación de energía que se transforma en ondas de choque y gases de alta presión, los cuales actúan sobre el macizo rocoso produciendo fracturamiento y fragmentación de la roca.

De acuerdo con Ding et al. (2022), el proceso de fracturamiento inducido por explosivos se desarrolla en varias etapas. Inicialmente, la detonación produce una onda de choque que se propaga radialmente desde el taladro, generando compresión en la roca circundante. Posteriormente, al reflejarse estas ondas en las superficies libres de la excavación, se generan esfuerzos de tracción que provocan la formación de grietas y la fragmentación del macizo rocoso.

Investigaciones experimentales y numéricas han demostrado que la propagación de las ondas de esfuerzo y el desarrollo de fracturas dependen de factores como la energía del explosivo, las propiedades mecánicas de la roca y la presencia de discontinuidades en el macizo rocoso (Chengjie et al., 2024; Fu et al., 2024).

1.8 Factores de diseño de voladura

El diseño de una voladura en minería subterránea implica la definición de diversos parámetros técnicos que determinan la eficiencia del proceso de fragmentación de la roca y el avance de las excavaciones. Entre los factores más importantes se encuentran el diámetro de

los taladros, el espaciamiento entre perforaciones, el burden, la cantidad de explosivo por taladro, la secuencia de detonación y el tipo de explosivo utilizado.

Un diseño adecuado de estos parámetros permite optimizar la fragmentación del macizo rocoso, reducir la sobre excavación y controlar los efectos secundarios de la voladura, como vibraciones, proyección de fragmentos o daños en el contorno de la excavación.

Asimismo, el análisis de las condiciones geomecánicas del macizo rocoso y de los esfuerzos presentes en la zona de excavación resulta fundamental para establecer patrones de perforación y voladura que garanticen la estabilidad de las labores mineras (Córdova, 2021; Losaladjome Mboyo et al., 2024).

El diseño de una voladura en minería subterránea requiere la definición de diversos parámetros técnicos que influyen directamente en la eficiencia del proceso de fragmentación del macizo rocoso. Entre los factores más relevantes se encuentran el diámetro de los taladros, el burden, el espaciamiento entre perforaciones, la carga de explosivo y la secuencia de detonación. Estos parámetros determinan la distribución de la energía liberada durante la detonación y, por lo tanto, el tamaño de fragmentación de la roca, el avance de la excavación y los efectos secundarios asociados a la voladura. En la Tabla 5 se presentan los principales factores de diseño de voladura y su influencia en el comportamiento del proceso de fragmentación del macizo rocoso.

Tabla 5. Factores de diseño de voladura y su influencia en el proceso de fragmentación

Factor	Descripción	Influencia en la voladura
Diámetro del taladro	Tamaño de la perforación donde se carga el explosivo	Determina la cantidad de explosivo y el tamaño de fragmentación
Burden	Distancia entre el taladro y la cara libre	Influye en la eficiencia de la fragmentación
Espaciamiento	Distancia entre taladros	Controla la distribución de energía en la roca
Tipo de explosivo	Características energéticas del explosivo	Afecta la fragmentación y las vibraciones
Secuencia de detonación	Orden en que detonan los taladros	Reduce vibraciones y mejora el control de la voladura
Carga por retardo	Cantidad de explosivo detonada por intervalo de tiempo	Influye en las vibraciones generadas

Fuente: Adaptado de Córdova (2021); Losaladjome Mboyo et al. (2024); Ding et al. (2022).

De acuerdo con la información presentada en la Tabla 5, el diseño de voladura depende de diversos parámetros técnicos que influyen directamente en la eficiencia de la fragmentación del macizo rocoso. Entre estos factores destacan el diámetro de los taladros, el burden, el espaciamiento y la carga de explosivo, los cuales determinan la distribución de la energía liberada durante la detonación. Asimismo, la secuencia de detonación y la carga por retardo permiten controlar la propagación de las ondas de choque y reducir efectos secundarios como vibraciones excesivas o daños en el contorno de la excavación. Por lo tanto, la adecuada selección y combinación de estos parámetros resulta esencial para optimizar el proceso de voladura y garantizar un avance eficiente de las labores mineras.

Los parámetros de diseño de perforación y voladura influyen directamente en la eficiencia del proceso de fragmentación del macizo rocoso. En la Tabla 6 se presentan algunos valores típicos utilizados en labores subterráneas reportados en la literatura especializada.

Tabla 6. Rangos típicos de parámetros de diseño para perforación y voladura subterránea

Parámetro	Descripción	Rango típico en minería subterránea
Burden (B)	Distancia entre el taladro y la cara libre	0,8 – 1,5 m
Espaciamiento (S)	Distancia entre taladros adyacentes	1,0 – 1,8 m
Diámetro de taladro	Tamaño del taladro perforado	32 – 64 mm
Longitud de taladro	Profundidad del taladro en el frente	2 – 4 m
Factor de carga	Cantidad de explosivo por volumen de roca	0,6 – 1,5 kg/m ³
Retardo entre detonaciones	Intervalo de tiempo entre taladros	25 – 75 ms

Fuente: Adaptado de Jimeno et al. (1995); Córdova (2021); Ding et al. (2022).

En la Tabla 6 se presentan rangos típicos de parámetros utilizados en el diseño de perforación y voladura en minería subterránea. Estos valores constituyen referencias técnicas que permiten establecer configuraciones iniciales para el diseño de patrones de perforación en función de las características del macizo rocoso y de la geometría de la excavación. Parámetros como el burden y el espaciamiento influyen directamente en la distribución de la energía explosiva dentro del macizo rocoso, mientras que el diámetro y la longitud de los taladros determinan la cantidad de explosivo que puede ser utilizada en cada perforación. En conjunto, estos parámetros permiten lograr una fragmentación adecuada de la roca y optimizar el avance de la excavación, evitando problemas como sobre excavación o fragmentación inadecuada del material.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1 Metodología empleada

La presente investigación se llevó a cabo usando una metodología cuantitativa, analítica y comparativa encaminada a optimizar el diseño de perforación y voladura que es empleada en labores mineras mediante la simulación de variables específicas que puedan afectar la evolución de la fragmentación del macizo rocoso.

La metodología utilizada se fundamenta en la evaluación de distintas configuraciones constructivas de la malla de perforación, considerando así los cambios en los distintos parámetros operacionales y geométricos que llegan a determinar el rendimiento del proceso de voladura. Se llevó a cabo la simulación de estos parámetros a través de una matriz de cálculo creada en Microsoft Excel, lo que posibilitó la evaluación de diversos escenarios de diseño mediante un cambio controlado de ciertas variables.

Se aprovechó el estudio de una bocamina cuadrada de 4 m x 4m, un diseño que por lo general es utilizado habitualmente en las labores mineras subterráneos. Dicha geometría nos permite que se evalué de forma representativa el comportamiento y desarrollo de los parámetros de perforación y voladura en las excavaciones de acceso y que su desarrollo sea evaluado de manera representativa.

2.1.1 Parámetros geométricos del diseño

Los parámetros geométricos que se utilizan en la simulación son valores típicamente hallados en la bibliografía técnica y que se aplican a las operaciones de minería subterránea.

Tabla 7. Parámetros geométricos para el diseño de la malla de perforación

Parámetro	Valor
Sección del túnel	4 m x 4 m
Área del frente	16 m ²
Diámetro del barreno	0,083 m
Longitud de perforación	3,3 m
Avance por disparo	3,05 m

Fuente: Elaboración propia

Se estableció una longitud de perforación de 3 m, que está dentro del rango que se utiliza comúnmente en las labores subterráneas y contribuye a conseguir un equilibrio adecuado entre la estabilidad del frente de excavación, el avance por disparo y la eficacia del método de perforación.

2.1.2 Variables estudiadas

Las variables técnicas que se presentan a continuación fueron analizadas con el fin de perfeccionar el diseño: burden (B), espaciamento entre barrenos (S), relación burden – espaciamento (S/B), tipo de explosivo utilizado, factor de carga, número de barrenos, distribución de barrenos en el frente de excavación

A manera que la energía explosiva se dispersa por el macizo rocoso se ve perjudicada de una manera muy directa por las variables mencionadas, por consiguiente, también tiene su impacto la eficacia del procedimiento de fragmentación. Dentro de ello; se establecieron cinco escenarios de simulación para el análisis, en los que se alteró la conexión entre burden y espaciamento, partiendo de un espaciamento mínimo de 0,50 m. Esto se hizo con el propósito de examinar configuraciones de malla abiertas y cerradas.

2.2 Procesamiento y corrección de datos

El procesamiento de los datos se ejecutó a partir de una hoja de cálculo creada en Microsoft Excel, en dicha hoja se fusionaron ecuaciones empleadas para diseñar malla de perforación y voladura en minería subterránea en la cual todas son de gran utilidad para procesar la información. Primero, se establecieron las características geométricas de la excavación, que incluyen el área del frente, la sección del túnel y la longitud de perforación. Utilizando estos datos, se determinó el volumen de roca que se fragmentó en cada ciclo de voladura.

2.2.1 Determinación del volumen de roca

La cantidad de roca extraída por disparo se determinó mediante la expresión que se indica a continuación:

Volumen

$$V = A \times L$$

donde:

V = volumen de roca (m³)

A = área del frente (m²)

L = longitud de avance (m)

Dentro de la fórmula sustituyo valores:

$$V = 16 \times 3,05$$

$$V = 48,8 \text{ m}^3$$

Dicho valor representa la cantidad de roca que va ser fragmentada durante cada ciclo de la voladura.

2.2.2 Caracterización de los explosivos empleados

La investigación cuenta ya con dos tipos de explosivos en la cual soy frecuentemente utilizados en la minería subterránea dentro de ellos tenemos: ANFO; Emulsión explosiva Emulsen 7.20

A continuación, las siguientes tablas describen las propiedades energéticas y físicas que han sido registradas por los fabricantes y la literatura técnica especializada.

Tabla 8. ANFO

Propiedad	Valor
Densidad	800 Kg/cm ³
Velocidad de detonación	2000 m/s
Resistencia al agua	Baja
Energía relativa	Media

Fuente: adaptado de ficha técnica ANFO, EXPLOCEN C.A.

El ANFO se utiliza mucho en minería ya que presenta un bajo costo y una alta disponibilidad, sin embargo, el desempeño se puede ver afectado en condiciones de humedad.

Tabla 9. EMULSEN 7.20

Propiedad	Valor
Densidad	1 120 Kg/cm ³
Velocidad de detonación	5 600 m/s
Resistencia al agua	Alta
Energía relativa	Alta

Fuente: adaptado de ficha técnica EMULSEN 720, EXPLOCEN C.A.

Emulsen 720 presenta una mayor densidad teniendo así un mejor desempeño en ambientes húmedos, lo que permite mejorar la eficiencia de la fragmentación en condiciones geológicas complejas.

2.3.3 Factor de carga

El factor de carga se refiere a la cantidad de explosivo empleada en cada unidad de volumen de roca fragmentada, y se expresa con la siguiente relación:

$$FC = \frac{\text{Carga explosiva}}{\text{Volumen de roca}}$$

En minería subterránea este parámetro suele variar entre:

$$0.8 - 1.3 \text{ kg/m}^3$$

Para la simulación se adoptaron diferentes valores de factor de carga dentro de este rango con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema de voladura.

Para definir nuestros casos de estudio, definimos los 5 casos de burden (B) a estudiar como parámetros bases. Posterior, se estableció la relación espaciamento/burden (S/B) en base a criterios técnicos, lo que nos permitió poder así calcular el espaciamento (S). Seguidamente se determinó el área por barreno, con dichos valores y considerando un área total constante, se procedió a calcular el número de barrenos (N). Finalmente, se asignó el factor de carga (Fc) en función de las condiciones del macizo rocoso y los requerimientos de fragmentación, ajustándolo así progresivamente conforme van aumentado los parámetros geométricos de las mallas.

A continuación, detallamos las fórmulas utilizadas:

- Cálculo del espaciamento:

$$S = \left(\frac{S}{B}\right) \times B$$

Donde:

S/B = relación espaciamento

B = Burden

- Área por barreno:

$$A = B \times S$$

- Numero de barrenos:

$$N = \frac{\text{Área}}{B \times S}$$

La presente tabla detalla el análisis de todos los parámetros involucrados al diseño de la malla de perforación para voladura, considerando así la variación progresiva de cada parámetro.

Tabla 10. Cálculos de las 5 propuestas

Caso	Burden (m)	Espaciamiento (m)	Área por barreno	Nº barrenos	Relación S/B	Factor de carga
1	0.50	0.60	0.30	53	1.20	0.90
2	0.60	0.75	0.45	36	1.25	1.00
3	0.70	0.90	0.63	25	1.28	1.10
4	0.80	1.05	0.84	19	1.31	1.20
5	0.90	1.20	1.08	15	1.33	1.30

Fuente: Elaboración propia

2.3 Elaboración de matriz

Se creó una matriz de simulación con el propósito de mejorar el diseño de la red de perforación, utilizando como base la variabilidad de las variables más relevantes que afectan la forma en que se produce la voladura resaltando aquí en nuestra matriz los dos tipos de explosivos a usarse.

Tabla 11. Matriz con respecto a los dos explosivos más utilizados en minería subterránea

PARAMETROS	ESPECIFICACIÓN	UNIDAD
Velocidad de detonación 1 ANFO	2000	m/s
Velocidad de detonación 2 EMULSEN	5600	m/s
720		
Densidad explosiva 1	800	kg/m ³
Densidad explosivo 2	1120	kg/m ³
Diametro de los barrenos	0,083	m/s
Desviación	0,02	m/m
Barrenos al centro	0,12	m
Avance teórico	3,59	m
Avance real	3,05	m
Lcmax	4,28	kg/m

Lfmax	5,99	kg/m
s	3,9	
C	0,4	
Cuadro 1	1,15	
V1	0,13	
l1	0,11	
V1'	0,07	
B1	0,1	
Q1	0,32	
Cuadro 2	2	
V2'	0,2	
l2	0,46	
V2'	0,14	
B2	0,27	
Q2	1,41	
Cuadro 3	2	
V3'	0,54	
l3	1,24	
V3'	0,48	
B3	0,87	
Q3	3,78	
Cuadro 4	2	
V4'	1,75	
l4	3,98	
V4'	1,69	
B4	3	
Q4	12,14	
ZONAS		
Zona B		
V	0,5	m
F	1,45	m
E	0,5	m
C	0,54	
lf	0,06	
lc	0,03	
Lt	0,09	
Hf	0,65	
Hc	1,57	
QB	0,09	
Zona E		
V	0,5	m
F	1,45	m
E	0,5	m
C	0,54	

lf	0,05	
lc	0,04	
Lt	0,1	
Hf	0,65	
Hc	1,57	
QE	0,11	
Zona C		
V	0,5	m
F	1,2	m
E	0,5	m
C	0,54	
lf	0,05	
lc	0,03	
Lt	0,08	
Hf	0,65	
Hc	1,57	
QC	0,07	
Area 1	16	m ²
Area 2	0	m ²
Area Túnel	16	m ²
Volumen de extracción	48,8	m ³
Consumo específico	1,23	kg/m ³
Pt	129,07	m
Pe	2,6	m/m ³

Fuente: Elaboración propia

Dicha matriz es el corazón técnico del diseño de perforación y voladura, dentro de ella vamos a encontrar parámetros técnicos, geométricos y de carga explosiva para el avance de la labor subterránea permitiéndonos así evaluar la eficiencia del proceso.

CAPITULO 3

ANALISIS DE RESULTADOS

3.1 Análisis y valoración de resultados obtenido

Los análisis de los resultados se apoyan de las distintas configuraciones expuestas en el capítulo 2, teniendo en cuenta las variables como el burden, espaciamiento, relación S/B, número de barrenos, los dos tipos de explosivos más utilizados en minería subterránea y su consumo específico.

Analizando los cinco casos de estudio, se logra evidenciar que la gran variación de los parámetros geométricos afecta directamente la eficiencia del diseño de voladura. En contexto, la disminución del burden y espaciamiento genera un aumento en el número de barrenos, lo cual, si mejora la fragmentación, pero a costo de un mayor consumo de explosivo y costos operativos. Mientras que, al aumentar el burden y espaciamiento se logra reducir el número de barrenos; sin embargo, esto nos puede afectar a la calidad de la fragmentación y el control del avance, generando así zonas de roca no bien fracturadas.

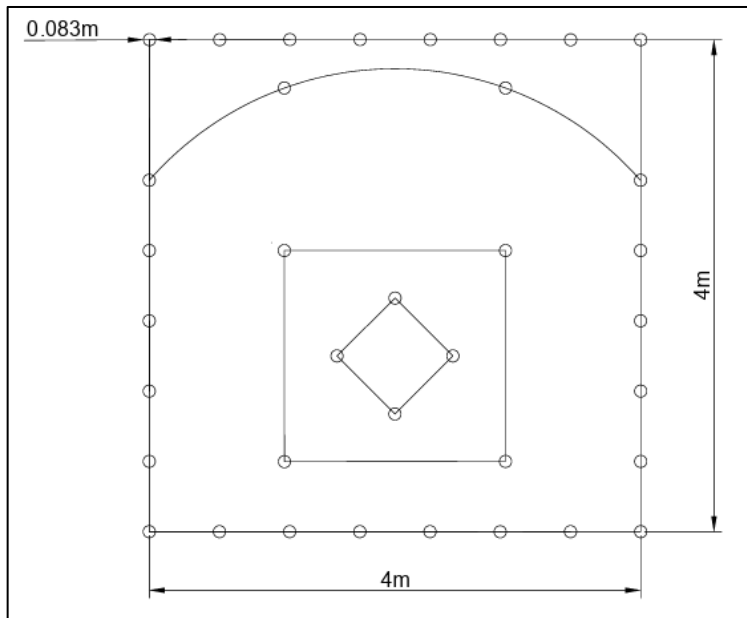
Dadas las circunstancias; en la propuesta 2 logro presentar un mejor equilibrio entre eficiencia operativa y consumo energético. A partir de todo el análisis evaluado, se seleccionó la propuesta 2 como la configuración más aceptable y eficiente. En la Figura 1 se presenta la malla de perforación asignando los siguientes números de barrenos en cada zona:

Tabla 12. Números de barrenos por zona

Zonas	Numero de barrenos
A1	2
A2	2
A3	2
A4	2
B	8
E	8
C	4
C	8
TOTAL	36

Fuente: Elaboración propia

Figura 1: Malla de perforación caso 2



Fuente: Elaboración propia

Dicha malla nos ayuda a una adecuada liberación de energía, garantizando así tanto la fragmentación del macizo rocoso como el control geométrico del frente de excavación.

El uso combinado de los explosivos, utilizando Emulsión en la zona de corte y ANFO en las zonas de producción y contorno, facilito una distribución eficiente de la energía, ayudando a aprovechar las propiedades de cada tipo de explosivo. La Emulsión al presentar una rapidez de detonación y densidad, facilita el arranque inicial, en cambio el ANFO permite optimizar costos en las zonas de menor requerimiento energético.

Finalmente, todos estos resultados obtenidos nos reflejan que la optimización del diseño de perforación y voladura no siempre depende de una variable, sino de la interacción conjunta entre parámetros geométricos y energéticos, siendo fundamental encontrar un equilibrio adecuado entre ellos.

3.2 Ventajas y desventajas de la metodología propuesta

3.2.1 Ventajas

Dentro del estudio la metodología planteada presenta diversas ventajas para el diseño de mallas de perforación para bocaminas:

Primero nos permite poder tener una evaluación sistemática de todas las variables geométricas principales como el burden y espaciamiento, ayudándonos así poder identificar las configuraciones optimas en función de todos los criterios técnicos y operativos.

Segundo el empleo de simulación a través de matrices de cálculo ayuda al análisis de varios escenarios sin la necesidad de realizar pruebas en campo, lo que disminuye costos y tiempos en la etapa de diseño.

Tercero la metodología nos permite poder incluir tanto parámetros geométricos y energéticos, teniendo en consideración tipo de explosivo, factor de carga y distribución de barrenos, lo que brinda una visión más integral de todo el proceso de voladura.

Concluyendo que la metodología nos permite mejorar el control del avance y así mismo la calidad de la excavación, estableciendo así una mejor distribución de los barrenos en función a la zona de influencia.

3.2.2 Desventajas

Pese a sus ventajas, la metodología también nos presenta ciertas desventajas que debemos de tener muy en cuenta:

Principalmente tenemos que considerar que el modelo empleado esta basado en condiciones ideales, ya que aquí no se considera todas las variables geomecánicas del macizo rocoso, como su fracturamiento, su heterogeneidad o presencia de

discontinuidades, ya que todas ellas pueden afectar el comportamiento real de la voladura.

Segundo la precisión real de los resultados está vinculado a la calidad de los datos de entrada, así como la densidad del explosivo, velocidad de detonación y condiciones de carga en el barreno.

Tercero, la simulación no sustituye completamente la validación en campo, siendo así necesario adaptar parámetros mediante pruebas reales para así poder tener resultados más óptimos.

En definitiva esta aplicación necesita de conocimientos técnicos en diseño de voladuras, lo cual simboliza una limitación dentro de los contextos donde no se dispone de personal especializado.

CONCLUSIONES

- Se estableció que el diseño de la malla de perforación está profundamente condicionado por la interacción entre el burden, espaciamiento y el tipo de explosivo, siendo todos esos los parámetros más destacados para la eficiencia del proceso de voladura.
- En función de los cinco casos de estudio, se reflejó que las distintas configuraciones con un bajo burden y espaciamiento aumenta el número de barrenos mejorando así la fragmentación, sin embargo, aumenta un consumo progresivo de explosivos y costos operativos.
- La alternativa mejor propuesta y más eficiente se presenta en la propuesta 2 en la cual tiene un burden de 0,60 m y su espaciamiento de 0,75, este caso logra un mejor equilibrio tanto entre sus números de barrenos 36 y la calidad de fragmentación.
- Para la malla de perforación la distribución de sus barrenos de cada zona nos ayuda optimizar una mejor liberación de energía, enfatizando así la importancia de la asignación del número de barrenos para la zona de corte para poder tener una mejor generación de cara libre.
- El empleo combinado de los explosivos emulsión en el corte y ANFO en las zonas de producción y contorno, ayuda una mejor distribución de energía, aprovechando todas las propiedades de los explosivos y así poder optimizar sus costos.
- Toda la metodología empleada en la simulación de variables nos permitió poder evaluar distintos escenarios de diseño sin la necesidad de una prueba de campo, aplicándose, así como una herramienta eficaz para toda la optimización del proceso.

RECOMENDACIONES

- Se sugiere poner en práctica en campo el diseño de la propuesta 2, realizando así pruebas piloto que nos permitan validar estos resultados obtenidos mediante la simulación de estas variables operativas.
- Así mismo se recomienda ajustar los parámetros de diseño en función a las condiciones geomecánicas del macizo rocoso, teniendo en cuenta factores como el fracturamiento, resistencia y presencia de discontinuidades.
- Para asegurar la coherencia del análisis y para aislar el impacto de las variables geométricas principales, se debe mantener invariable el diámetro del barreno (0,083 m) durante el diseño.
- Se recomienda emplear el uso de emulsión en las zonas de corte para así poder tener una adecuada generación de cara libre, y el ANFO en las zonas de producción y contorno para así optimizar costos operativos.
- Tener un control de la distribución de los barrenos en el contorno, evitando una sobrecarga, para lograr minimizar la sobre excavación y generar una mejor estabilidad del túnel.
- Incorporar en futuros estudios variables adicionales como desviación de perforación, pérdidas de energía y eficiencia de detonación, con el objetivo de mejorar la precisión del modelo.
- Se sugiere utilizar instrumentos digitales (como software especializado o hojas de cálculo) para automatizar el diseño de la malla y simplificar el análisis de diversos escenarios.
- Instruir a los empleados operativos para que ejecuten correctamente el diseño de perforación y voladura, garantizando el cumplimiento en el terreno de los parámetros establecidos durante la etapa de diseño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons.
- Chengjie, L., et al. (2024). Experimental and numerical simulation research on blasting stress waves. Scientific Reports. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-XXXXX>
- Córdova, E. (2021). Blasting and preconditioning modelling in underground mining. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 121(5), 211–220. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1400/2021>
- Ding, X., Li, H., Liu, Z., & Wang, J. (2022). The law of blast stress wave propagation and fracture. Scientific Reports, 12, 22109. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22109-z>
- Fu, S., et al. (2024). Study on the characteristics of blast-induced damage zone in hard rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.
- Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). Introductory mining engineering (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Herrera Herbert, J. (2024). Construction of access to an underground mine. Universidad Politécnica de Madrid.
- Hosseini, S., Yari, M., & Ramezanzadeh, A. (2023). Assessment of ground vibration during blasting in underground operations. Scientific Reports, 13, 4421. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29746-y>

Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. (1995). Manual de perforación y voladura de rocas. Instituto Tecnológico Geominero de España.

Kramarczyk, B. (2022). Emulsion explosives: A tutorial review and highlight. *Energies*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/xxxxx>

Losaladjome Mboyo, H., et al. (2024). Assessing the impact of surface blast design parameters on ground vibration. *Minerals*, 14(1), 51.

Ruiz, R. G. (2018). El término diaclasa y su aplicación adecuada a la valoración de macizos rocosos. *Tekhné*, 21(3), 73–74.

Yao, T., et al. (2024). Blast Damage Zone Strength Reduction method for deep underground excavations. *Frontiers in Earth Science*, 12, 106745.