



**UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS**

**“Análisis del consumo específico de explosivos para voladuras a cielo  
abierto en bancos con geometría constante”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

**INGENIERO EN MINAS**

**Autores:**

JESSICA PAULINA BRAVO LEÓN

JOSE DANIEL REYES RODAS

**Director:**

ERNESTO PATRICIO FEIJOO CALLE

**CUENCA, ECUADOR**

**2026**

Jessica Paulina Bravo León

José Daniel Reyes Rodas

Trabajo de Titulación

Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle

Mayo, 2026

**“Análisis del consumo específico de explosivos para voladuras a cielo  
abierto en bancos con geometría constante”**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de titulación dedico a Dios, por haberme concedido salud y conocimiento para culminar mi carrera. Dedico a mis padres y a mis hermanos que son un pilar fundamental en mi vida, con su apoyo inquebrantable me ha permitido alcanzar mis metas.

Además, dedico a mis profesores y amigos, quienes han sido una parte esencial de mi crecimiento académico.

Finalmente, me dedico a mí misma, por nunca rendirme, y por ser fiel a mis valores.

**Jessica Bravo L.**

Primeramente, agradezco a Dios por su presencia constante en mi vida, por su guía y dirección, y por hacer posible este logro.

Dedico este trabajo a mi querida mamá, Cindy, por su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante a lo largo de mi vida y de mi carrera académica. Gracias por ser mi ejemplo de esfuerzo y perseverancia.

Con mucho cariño, también dedico esta tesis a mis hermanos: Lizeth, Marlon, María José, José Armando y Matías, quienes han estado presentes brindándome motivación, alegría y apoyo en cada momento.

**José Reyes R.**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a la Universidad del Azuay por brindarnos la oportunidad de formarnos con excelencia, y en especial a la Escuela de Ingeniería en Minas por su valioso apoyo durante mi formación académica.

A mi familia y amigos, por su constante apoyo y motivación durante a lo largo de toda esta etapa. Expreso mi sincero agradecimiento al Ing. Patricio Feijoo, tutor de tesis, por su valiosa guía académica; y al Ing. Leonardo Núñez, al Ing. Eduardo Luna y al Ing. Fernando Valencia, por impulsar mi desarrollo académico y profesional.

A todas las personas que han formado parte de mi camino, con esfuerzo y su sabiduría compartida, gracias por inspirarme a ser constante en cada momento.

**Jessica Bravo L.**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Dios, por iluminar mi camino, darme fortaleza en los momentos difíciles y permitirme alcanzar esta importante meta académica.

A mi madre, Cindy, le agradezco profundamente por su amor infinito, sacrificio y apoyo incondicional. Su confianza en mí, sus consejos y su constante motivación han sido fundamentales para seguir adelante y no desistir ante los desafíos presentados durante este proceso.

A mis hermanos: Lizeth, Marlon, María José, José Armando y Matías, gracias por estar siempre presentes, por su cariño, comprensión y palabras de aliento, que me motivaron a continuar esforzándome cada día.

De manera especial, expreso mi gratitud al Ingeniero Patricio Feijoo, tutor de tesis, por compartir sus conocimientos, brindarnos su orientación y acompañarnos con paciencia y dedicación durante el desarrollo de esta investigación, contribuyendo significativamente a nuestra formación académica y profesional.

**José Reyes R.**

## RESUMEN

El presente trabajo tuvo como finalidad evaluar la eficacia del uso de explosivos en minería a cielo abierto mediante la aplicación de diferentes métodos de explotación. La investigación estuvo enfocada principalmente en el análisis del consumo específico generado a través del método de Konya, con el propósito de identificar alternativas que permitan optimizar las operaciones de voladura y mejorar la eficiencia en los procesos mineros.

Para el desarrollo del estudio se realizaron un total de quince tablas aplicativas, divididas en tres grupos de análisis. En el primer grupo se trabajó con perforaciones de 2 pulgadas utilizando diferentes tipos de explosivos. En el segundo grupo se aplicaron las mismas condiciones, pero con perforaciones de 3 pulgadas. Finalmente, en el tercer grupo se realizaron pruebas con perforaciones de 4 pulgadas, permitiendo comparar el comportamiento del consumo específico en cada caso.

Durante la investigación se mantuvieron constantes variables como la formación geológica del macizo rocoso, mientras que las variables modificadas fueron el tipo de explosivo y el diámetro de perforación. Con base en los resultados obtenidos, se realizó un análisis comparativo para verificar la efectividad del consumo específico y determinar cuál de las condiciones evaluadas presenta mejores resultados para la optimización de las operaciones de voladura en minería a cielo abierto.

### **Palabras clave**

Minería a cielo abierto, voladura, explosivos, consumo específico, método de Konya.



---

Ing. Patricio Feijoo Calle.  
**DIRECTOR DE TESIS.**

## ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate the effectiveness of explosives in open-pit mining using different blasting methods. The research focused primarily on analyzing specific explosive consumption using the Konya method, with the aim of identifying alternatives to optimize blasting operations and improve the efficiency of mining processes.

For the study, a total of fifteen application tables were created, divided into three groups of analyses. The first group used 2-inch boreholes with different types of explosives. The second group applied the same conditions but with 3-inch boreholes. Finally, the third group tested 4-inch boreholes, allowing for a comparison of specific explosive consumption in each case.

During the research, variables such as the geological formation of the rock mass were kept constant, while the type of explosive and the borehole diameter were modified. Based on the results obtained, a comparative analysis was performed to verify the effectiveness of specific consumption and determine which of the evaluated conditions yields the best results for optimizing blasting operations in open-pit mining.

**Keywords:** Open-pit mining, blasting, explosives, specific consumption, Konya method.



---

Ing. Patricio Feijoo Calle.  
**THESIS DIRECTOR.**

## Tabla de Contenidos

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT.....	vi
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1.....	2
MARCO TEÓRICO.....	2
1.1    Aspectos generales .....	2
1.1.1    Antecedentes .....	2
1.2    Marco teórico .....	2
1.2.1    Terminología en procesos de perforación y voladura.....	2
1.2.2    Sistema de explotación de canteras .....	5
1.2.3    Tipos de canteras.....	6
1.2.4    Clasificación granulométrica.....	6
1.2.5    Sistemas de explotación por cortas mineras .....	6
1.2.6    Elementos de una explotación a cielo abierto .....	7
1.2.7    Perforación .....	9
1.2.8    Operación de perforación .....	11
1.2.9    Voladura.....	12
1.2.10    Proceso de voladura en bancos .....	14
1.2.11    Explosivos y accesorios para voladuras.....	15
Detonadores.....	15
Explosivos.....	16
Emulsiones .....	16
Tipos de explosivos.....	16
Accesorios.....	18
Mecha lenta u ordinaria.....	18
Cordón detonante .....	18

Relés de retardo.....	18
Multiplicadores.....	18
Óhmetros.....	19
Explosores eléctricos.....	19
CAPÍTULO 2.....	20
MÉTODOS DE VOLADURA A CIELO ABIERTO .....	20
2.1 Metodología .....	20
2.2 Método de Konya.....	20
2.3 Método de Rodgers .....	22
2.4 Método de Langefors .....	24
2.5 Método de Ash.....	25
2.6 Método de López Jimeno.....	27
2.7 Consumo específico .....	29
2.8 Costos de voladura.....	30
2.9 Datos principales.....	30
2.10 Aplicación de cálculo por método Konya .....	31
CAPÍTULO 3.....	47
ANÁLISIS DE DATOS .....	47
1.1 Aplicación del método.....	47
1.2 Análisis de datos.....	47
CONCLUSIONES .....	54
RECOMENDACIONES .....	55
BIBLIOGRAFIA.....	56

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Clasificación granulométrica.....	6
<b>Tabla 2.</b> Tipo y clase de explosivo, clase de roca .....	26
<b>Tabla 3.</b> Resistencia a la Compresión Simple .....	26
<b>Tabla 4.</b> Diámetro de perforación.....	27
<b>Tabla 5.</b> Burden o piedra (B).....	27
<b>Tabla 6.</b> Espaciamiento (S) .....	28
<b>Tabla 7.</b> Retacado (T).....	28
<b>Tabla 8.</b> Excavación (J).....	28
<b>Tabla 9.</b> Dimensionamiento de la longitud de carga de fondo según la resistencia de la roca .....	29
<b>Tabla 10.</b> Costos de insumos en voladura. ....	30
<b>Tabla 11.</b> Datos constantes en aplicación.....	30
<b>Tabla 12.</b> Información de fichas técnicas por Explocen C.A.....	31
<b>Tabla 13.</b> Cálculo con explosivo ANFO .....	32
<b>Tabla 14.</b> Cálculo con explosivo Elmusen 1000x.....	33
<b>Tabla 15.</b> Cálculo con explosivo Anemul 20-80.....	34
<b>Tabla 16.</b> Cálculo con explosivo elmusen 5000x.....	35
<b>Tabla 17.</b> Cálculo con explosivo elmusen 720.....	36
<b>Tabla 18.</b> Cálculo con explosivo ANFO .....	37
<b>Tabla 19.</b> Cálculo con explosivo Elmusen 1000x.....	38
<b>Tabla 20.</b> Cálculo con explosivo Anemul 20-80.....	39
<b>Tabla 21.</b> Cálculo con explosivo elmusen 5000x.....	40
<b>Tabla 22.</b> Cálculo con explosivo elmusen 720.....	41
<b>Tabla 23.</b> Cálculo con explosivo ANFO. ....	42
<b>Tabla 24.</b> Cálculo con explosivo elmusen 1000x.....	43
<b>Tabla 25.</b> Cálculo con explosivo anemul 20-80.....	44
<b>Tabla 26.</b> Cálculo con explosivo elmusen 5000x.....	45
<b>Tabla 27.</b> Cálculo con explosivo elmusen 720.....	46
<b>Tabla 28.</b> Resumen de los resultados obtenidos para perforaciones de 2pulgadas .....	48
<b>Tabla 29.</b> Resumen de los resultados obtenidos en perforaciones de 3 pulgadas .....	50
<b>Tabla 30.</b> Resumen de los resultados obtenidos para perforación de 4 pulgadas.....	51

<b>Tabla 31.</b> Calificativos de explosivos en perforación de 2pulgadas.....	52
<b>Tabla 32.</b> Calificativos de explosivos en perforación de 3 pulgadas .....	53
<b>Tabla 33.</b> Calificativos de explosivos en perforación de 4 pulgadas .....	53

## Índice de Figuras

<b>Figura. 1</b> Esquema de explotación de cortas mineras .....	7
<b>Figura. 2</b> Elementos de una explotación a cielo abierto.....	9
<b>Figura. 3</b> Esquema de diseño de perforación .....	12
<b>Figura. 4</b> Partes de un banco para voladura .....	13
<b>Figura. 5</b> Partes de un detonador.....	15
<b>Figura. 6.</b> Consumo específicos en perforación de 2 pulgadas .....	48
<b>Figura. 7</b> Tipos de explosivos y número de barras .....	49
<b>Figura. 8.</b> Consumo específicos de 3 pulgadas .....	50
<b>Figura. 9</b> Consumo específico de 4 pulgadas; tipos de explosivo y numero de barras.....	51

## INTRODUCCIÓN

La minería a cielo abierto es primordial para el desarrollo económico, destacándose en la actividad extractiva de minerales y materiales esenciales para diferentes industrias, como la construcción. Dentro del ámbito de voladuras constituyen un proceso clave en la fragmentación y arranque de la roca, cuya optimización implica la extracción y el manejo de material. En la planificación de voladuras se considera aspectos técnicos como el tipo de formación geológica, el diámetro de perforación y tipo de explosivo a emplear, factores de costos operativos de la mina.

El presente trabajo tiene como objetivo el análisis de consumo específico de explosivos para voladuras en bancos de geometría constante. Los métodos reconocidos para voladura a cielo abierto son: Ash, Langefors, López Jimeno, Rodgers; sin embargo, en el estudio se aplica el método de Konya, evaluando con diferentes tipos de explosivos en formaciones de andesitas o basaltos, con el fin de determinar su consumo óptimo en función del diámetro de perforación y el número barrenos.

La investigación busca prevenir problemáticas derivadas de una incorrecta adquisición de explosivos y accesorios, que pueden generar un gasto adicional, pérdidas económicas e ineficiencia en operaciones complementarias de la mina. De esta manera, se garantizaría una mejor toma de decisiones estratégicas más acertadas.

El análisis del consumo específico de explosivos para voladuras a cielo abierto en bancos con geometría constante tiene como objetivo primordial el sustento teórico y técnico en la optimización en explosivos en voladuras, su mejora en las operaciones mineras y la eficiencia de recursos, también la reducción de costos en la fragmentación de la roca.

## **CAPÍTULO 1**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **1.1 Aspectos generales**

##### **1.1.1 Antecedentes**

El desarrollo investigativo de voladuras a cielo abierto ha abordado diversos enfoques como la optimización de voladuras que consideran de manera fundamental el diseño en fusión a condiciones geológicas del yacimiento. En este contexto, es primordial analizar los métodos y costos asociados, con el propósito de respaldar la decisión adecuada.

Conforme al avance del proyecto de titulación, el estudio abarcará el análisis de la metodología de voladura en canteras o cortas mineras, centrándose en la evaluación económica y comportamiento en la explotación de bancos, condiciones geomecánicas combinando lo técnico como diseño de voladura, método aplicado.

#### **1.2 Marco teórico**

##### **1.2.1 Terminología en procesos de perforación y voladura**

###### Minería a cielo abierto

Herrera Herbert (2006) afirma que la minería a cielo abierto se caracteriza por los grandes volúmenes que se debe mover dependiendo del yacimiento, como material estéril y el mineral de beneficio a extraer.

El ratio es una variable de los depósitos, que condiciona la actividad económica en el apartado de explotaciones y su profundidad.

### Materiales áridos

Se determina material árido a los que sigue un tratamiento industrial mediante una clasificación granulométrica, se emplea en el área de construcción.

Las características del material son:

- Ser materiales minerales sólidos e inertes de origen natural.
- Son dimensionados a su granulometría.

Según Herrera Herbert (2006), determino que los combinados con aglomerantes de activación hidráulica o ligantes bituminosos en la elaboración de:

- Hormigones.
- Productos artificiales de alta resistencia.
- Aglomerados asfálticos.
- Materiales como lastres para la construcción de bases, subbases granulares, bases estabilizadas.
- Basaltos, sub-basaltos y gravillas destinadas a ejes viales.
- Escollera como protección contra la erosión marina, fluvial o eólica.
- Rellenos de variados tipos.
- Materias primas para diversas industrias, como la de cemento, el yeso, las arenas y cargas desarrolladas en la fabricación de pintura, papel, entre otros.

Los áridos se clasifican según su proceso de extracción y por el tipo de roca proveniente, ya que su aprovechamiento depende del proceso. Esto permite dividirlos en categorías como

- “Áridos naturales: son materiales granulares obtenidos en graveras, donde el material extraído es sometido a un proceso de lavado y clasificación.
- Áridos de machaqueo: se obtienen mediante la trituración, molienda y clasificación de distintas rocas provenientes de canteras, así granulometrías de áridos rechazados.

- Áridos artificiales: se generan como subproductos o residuos de procesos industriales, como es el caso de las escorias siderúrgicas.
- Áridos reciclados: son materiales provenientes de la demolición y desmantelamiento de edificaciones como hormigones, cerámicos.
- Áridos ligeros: son productos, ya sean naturales o artificiales, utilizados para la fabricación de piezas o elementos constructivos con un peso reducido”.

*(Herrera Herbert, 2006)*

### Roca ornamental

Es un grupo especial de roca natural que tienen un interés comercial por las siguientes características:

- Su vistosidad.
- Belleza.
- Características físico-mecánicas como textura, durabilidad.
- Aptitud para el pulido.

Los tipos de roca ornamental influyen en la parte comercial y sus aplicaciones en los siguientes grupos:

- Grupo de pizarras
- Grupo de los mármoles
- Grupo de los granitos y similares
- Otras piedras como areniscas, cuarcitas, calizas, fosilíferas y travertínicas, etc.

*(Herrera Herbert, 2006)*

### Minerales industriales

Los minerales industriales son rocas más difíciles de encontrar en su forma natural, tienen predominancia metálica por su propiedad física y química.

Los minerales industriales no se diferencian en la utilización sino en sus propiedades ya que son elementos inertes a veces pueden provocar reacciones químicas, bajo determinadas condiciones.

La clasificación de algunos minerales industriales es:

- Carburo de silicio: cuarzo y choque de petróleo.
- Sulfato sódico: subproducto de procesos metalúrgicos.
- Carbonato sódico: sal, carbonato de calcio, carbón, amoníaco.

*(Herrera Herbert, 2006)*

### **1.2.2 Sistema de explotación de canteras**

Es un sistema de explotación en canteras se realiza en rocas industriales, rocas ornamentales y materiales de construcción. Se considera que la actividad minera en canteras es el más antiguo, para la obtención de materias primas.

El método que desarrolla la explotación es la aplicación de banqueo con uno o varios niveles como los siguientes:

- Obtener un todo - uno para alimentar las plantas de tratamiento y obtener un producto destinado a la construcción, fabricación de productos industriales o de cemento.
- Una explotación cuidadosa de grandes bloques, caracterizado por un gran número bancos para arrancar los bloques con ayuda de maquinaria.

### 1.2.3 Tipos de canteras

Las canteras se clasifican según su tipo de roca de explotación en:

- Las canteras de áridos: rellenos, escolleras, asfaltos, hormigones.
- Las canteras de roca ornamental: pizarra, granito, mármoles.
- Las canteras de rocas y minerales industriales: cementos, ladrillera, cerámica y vidrio.

(Herrera Herbert, 2006)

### 1.2.4 Clasificación granulométrica

Su clasificación por granulometría de cada material influye en el comportamiento del material, lo que demuestra en la siguiente tabla:

**Tabla 1.** Clasificación granulométrica

Material	Tamaño mm
Escollera	>200
cantos gruesos	100 – 200
Cantos medios	20 – 100
Grava	2 – 20
Arena	0,02 – 2
Limo	0,002 – 0,02
Arcilla	< 0,002

*Fuente:* (Herrera Herbert, 2006)

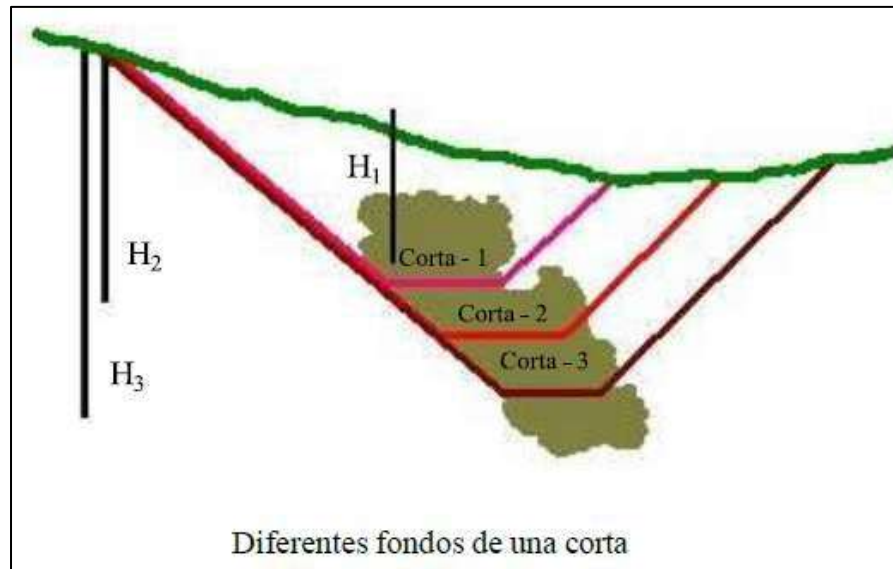
### 1.2.5 Sistemas de explotación por cortas mineras

Es un sistema de explotación tridimensional mediante banqueo descendente, con perfiles verticales adoptando la forma troncocónica, la explotación se realiza en minería metálica. La extracción en cada nivel es con uno o varios tajos en los bancos.

Los yacimientos explotados por el sistema de cortas mineras determinadas por Herrera Herbert son:

- Yacimientos masivos de importante profundidad.

- Yacimientos en capas potentes con buzamiento vertical.
- Yacimientos formados por un conjunto de capas inclinadas o filones.
- Yacimientos complejos con difícil selectividad mineral.
- Yacimientos de masas de rocas.
- Yacimientos de ley.



**Figura. 1** Esquema de explotación de cortas mineras  
Fuente: (Herrera Herbert, 2018)

El sistema de cortas mineras permite extraer minerales metálicos como hierro, cobre, plomo, zinc, aluminio, uranio, oro, dependiendo en su geología, también se da en rocas industriales y ornamentales.

### 1.2.6 Elementos de una explotación a cielo abierto

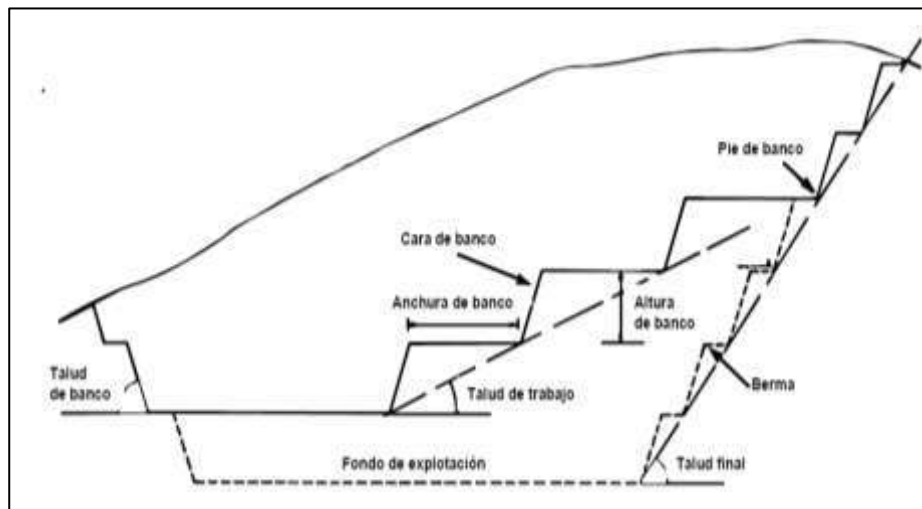
Los principales elementos que conforman una cantera son:

- Banco: es un módulo entre dos niveles que constituye la rebanada que se explota material estéril y mineral, excavación desde el punto de espacio hasta una posición final establecida.

- **Altura de banco:** es la distancia vertical entre dos niveles, desde el pie del banco hasta la parte más alta. La altura del banco es dada por las especificaciones de maquinaria como palas, perforadoras y normas oficiales.
- **Talud de banco:** es el ángulo delimitado por la horizontal y la línea de la pendiente de la cara del banco.
- **Talud de trabajo:** es el ángulo determinado por los pies de los bancos entre el cual se encuentra tajos o plataformas de trabajo.
- **Talud final de explotación:** es la inclinación máxima estable del talud delimitado por la horizontal y la línea que une el pie del banco inferior con la cabeza superior.
- **Bermas:** son las superficies horizontales intermedias entre los taludes finales de la excavación, que beneficia a la estabilidad y condiciones de seguridad del diseño.
- **Pistas :** es la conformación de vías para la explotación de materiales, también se efectúan los movimientos de equipos, se caracteriza por su anchura, su pendiente .
- **Ángulo de talud de banco:** se determina por la base y el material puzolánico en la zona de intereses, mediante tablas experimentales que recomiendan valores para una mejor estabilidad y seguridad en las labores operacionales.

Los ángulos recomendables para bancos son los siguientes:

- Ángulo de talud para bancos en trabajo ( $\emptyset_t$ ): 65°.
- Ángulo de talud para bancos en receso ( $\emptyset_r$ ): 50°.



**Figura. 2** Elementos de una explotación a cielo abierto

Fuente: (Herrera Herbert, 2007)

### 1.2.7 Perforación

La perforación es una operación fundamental de iniciación a una voladura, cuyo objetivo es realizar huecos cilíndricos para alojar al explosivo y sus accesorios (taladros, barrenos, hoyos). Además, se logra un confinamiento para el explosivo aprovechando la fuerza expansiva. La perforación en base lo mecánico son la rotación y la percusión.

#### Sistema de perforación: percusión

Es una perforación que permite fragmentar la roca, causando principalmente un impacto de filo. Los equipos utilizados son de perforación para pozos de agua, considerando que es un trepano con forma de cuchilla, con el filo inferior afilado y su cable suspendido.

#### 1. Perforación neumática

Se trata de una perforación realizada mediante aire comprimido a una determinada presión. Tiene dos alternativas que son:

- Percusión fuera del taladro y se transmite a la broca por una sarta de varillas denominado martillo en cabeza.
- El martillo de fondo es un martillo que se sitúa en el taladro y golpea el pistón directo a la broca.

## 2. Perforación de sistema odex o denominada recubrimiento

El equipo permite traspasar a materiales de recubrimiento, similar a un sondeo.

## 3. Perforación hidráulica

La perforación hidráulica es un sistema de energía mediante martillos de forma rectangular y se transmite al sistema hidráulico que funciona mediante aceite a 100 – 250 bar a un rango de presión en 15 a 35 veces superior al aire.

*(Bernaola Alonso J, Castilla Gómez J, Herrera Herbert J(2013))*

### Sistema de perforación: rotación

La forma de perforación consiste en la fragmentación de roca se realiza por compresión, corte o combinación de ambos.

#### 1. Perforación por corte

Su estructura de corte es por el carburo de tungsteno como herramienta fija en perforación. En la ruptura de la roca es la consecuencia de esfuerzos generados de cizalladura, donde la velocidad varía según la fuerza y empuje aplicado.

#### 2. Perforación rotativa con tricono

Es una herramienta formada por tres piñas troncocónicas que ruedan en el fondo del taladro. Su origen se dio en pozos petroleros que son más profundos el cual aumentaba el diámetro de perforación, también las formaciones.

#### 3. Perforación con corona de diamante

La perforación de corona se realiza por el método de sondeos con obtención de testigos que se basa en la conminación de la roca, además combina la compresión y abrasión.

La perforación es un sistema rotativo con velocidad directamente proporcional al empuje en la rotación con los siguientes parámetros:

- Corona de concreción 20 a 50 kg por cm<sup>2</sup> de área de corte.
- Corona de inserción 60 a 75 kg por cm<sup>2</sup> de área de corte
- Respecto a las velocidades periféricas
- Coronas de carburo de tungsteno 0,3 a 0,6 m-s
- Coronas de inserción de 1 a 3 m-s
- Coronas de concertación de 2 a 4 m-s

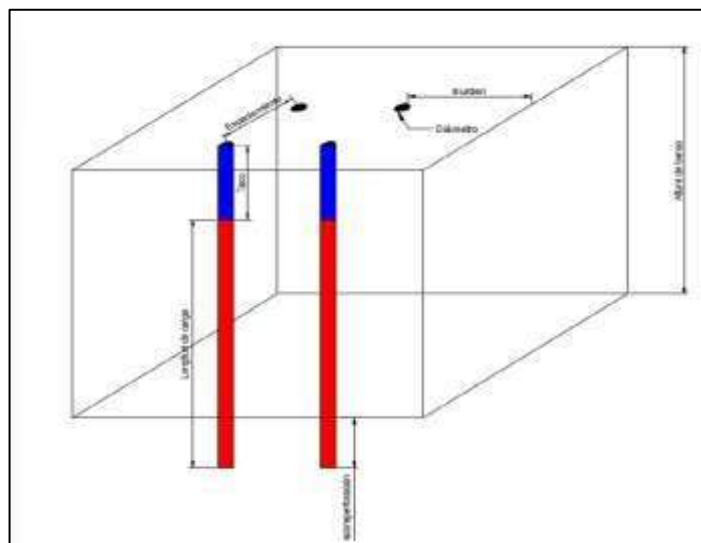
*(Bernaola Alonso J, Castilla Gómez J, Herrera Herbert J(2013))*

### **1.2.8 Operación de perforación**

El proceso se realiza mediante perforación rotativas y de rotopercusión, también cuentan con equipos adicionales como: compresores, captadores de polvo, tanques, reservorios de agua, entre otros. Los equipos funcionan de acuerdo al yacimiento, sus características físicas y geométricas, litológicas. Para un desarrollo adecuado en la operación de perforación es importante lo siguiente:

- Diseño de malla de perforación.
- Altura de banco.
- Diámetro de perforación.
- Longitud de carga.
- Burden o piedra.

- Taco.
- Espaciamiento entre barrenos.
- Longitud de perforación.
- Sobre perforación.
- Número de perforaciones.
- Total de perforaciones.



**Figura. 3** Esquema de diseño de perforación  
**Fuente:** (Choud, 2016)

### 1.2.9 Voladura

Es una operación principal de extracción de minerales en operaciones mineras alcanzando una fragmentación de la roca y requerir principalmente una cantidad exacta de explosivos. También se referencia como la carga masiva de explosivos en los huecos hechos en la perforación, como causa una detonación inmediata.

Las ondas se esparcen en la cara libre causando esfuerzos de tensión en una masa.

Se incorpora las siguientes definiciones como:

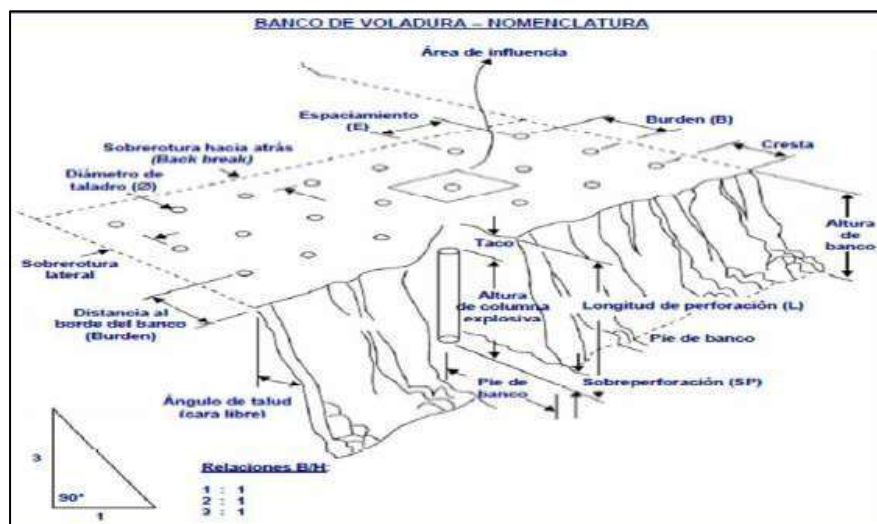
- Disposición de barrenos: ubicación de barrenos en la voladura.
- Carga de explosivo: cantidad de agentes explosivos.
- Secuencia: orden de detonación de barrenos.
- Fragmentación: distribución de tamaños de pila de roca volada.
- Desplazamiento: movimiento de la pila de roca volada.

(Bernaola Alonso et al., 2013, p. 139)

### Variables de una voladura

Para la voladura es primordial conocer las variables de aplicación que son:

- Diámetro del pozo, depende del equipo de perforación para hacer el barreno.
- Inclinación de la perforación, movimiento de las rocas es perpendicular al eje de barrenos.
- Densidad del explosivo.
- Resistencia a la compresión de la roca.
- Dimensiones de la voladura.



**Figura. 4** Partes de un banco para voladura  
 Fuente: (Díaz Martínez, 2012)

### **1.2.10 Proceso de voladura en bancos**

Las voladuras en banco según Gustafsson (1977), son realizadas con barrenos normalmente verticales en una o varias hileras, con salida hacia la superficie libre.

Las diferentes estructuras de la roca pueden modificar los resultados de voladura en banco, ya que las condiciones de compresión y cizalladura influyen. Se determinaría que la operación de fragmentación es ineficaz por un inadecuado análisis del uso del explosivo.

Las voladuras en bancos se realizan de manera vertical y superficial con una cara libre al frente paralelo. Los barrenos se perforan utilizando una malla definida por la distancia del frente el cual se le llama piedra o burden y el espaciamiento lateral entre los mismos.

Las características de la geometría de los bancos es la sobre perforación, lo que hace referencia a la prolongación de longitud de perforación, además la existencia de un mayor confinamiento en el banco lo cual acumula la energía. Las variables de diseño son altura, inclinación de los barrenos respecto a la vertical y la distribución del explosivo dentro de los mismos.

Los explosivos utilizados en voladuras de banco se dan cuando el material no se pueda extraer mecánicamente, debido los siguientes factores dimensiones, dureza, compactación, además los explosivos cubren económicamente en la habilidad en la extracción rápida y eficaz en comparación a la maquinaria

*(Bernaola Alonso J, Castilla Gómez J, Herrera Herbert J (2013)*

### 1.2.11 Explosivos y accesorios para voladuras

#### Detonadores

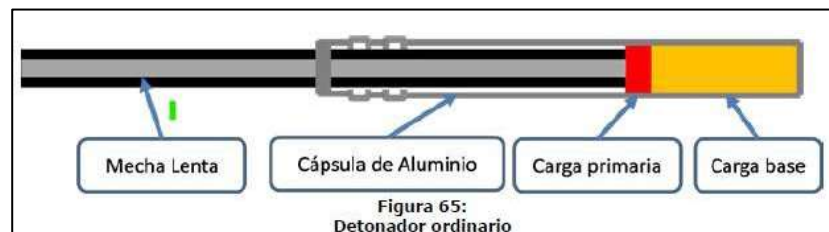
La detonación es un tipo de combustión que ocurre a velocidad supersónica que genera una onda de choque causando altos gradientes de presión y temperatura. Los explosivos son capsulas de aluminio y cobre, en cuyo fondo este comprimido la cantidad de fulminante

Los detonadores se clasifican en ordinarios y eléctricos.

#### Detonadores ordinarios

Es un casquillo de cobre y aluminio que contiene un explosivo muy sensible, se inicia por las mechas lentas. Además, son muy sensibles al calor, fuego, roce y a los golpes.

Mediante la introducción de la mecha lenta en el extremo abierto de la capsula se aloja la carga explosiva del detonador, se engarza por tenazas especiales se utiliza para voladura en rocas ornamentales



**Figura. 5** Partes de un detonador  
**Fuente:** (Bernaola, Castilla, & Herrera,(2013))

#### Detonadores eléctricos

Sus procesos se desarrollan en el paso de corriente eléctrica en el filamento, sustancia es de materia inflamable.

Se compone de dos cables de cobre o hierro convenientemente aislado, forman un circuito dirigido al explosor (Tuñón Suarez,1988).

## **Explosivos**

Su elaboración consta de una mezcla de sustancias químicas presente en estado sólido y se transforman en gases por la detonación controlada. En consideración a las características de este hay que prevenir su manejo, sensibilidad a la iniciación, estabilidad y evaluación de almacenaje.

Los explosivos al ser detonados generan gases con diferentes características como la temperatura, volumen, presión y la velocidad de reacción.

## **Emulsiones**

Es un explosivo de alta potencia utilizado en barrenos con agua, se le denomina como explosivo industrial que está conformado por gotas de disolución de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  o  $\text{NaNO}_3$  en agua entre 14 a 20% y un 4% de gasoil.

## **Tipos de explosivos**

Los explosivos para minería son sustancias químicas diseñadas para generar una reacción rápida y violenta fragmentando rocas y facilitando la extracción de minerales.

En las características determinadas por Suarez Tuñón(1988) los explosivos son:

- Potencia explosiva
- Poder rompedor
- Velocidad de detonación
- Densidad de encartuchado
- Resistencia al agua
- Calidad de humos
- Sensibilidad
- Estabilidad química

Los explosivos se dividen en gelatinosos, pulverulentos, anfos, hidrogeles, pólvoras.

Gelatinosos: son un tipo de explosivo utilizado para la minería, caracterizado por textura viscosa con resistencia al agua.

Componentes de nitroglicerina junto a otras sustancias y su nombre es conocido como goma.

Arranque o fragmentación de rocas duras y cristalinas.

Son muy sensibles a los golpes y se congelan con facilidad siendo muy peligroso el manejo.

Pulverulentos: son explosivos caracterizados por su textura en polvo granulada, lo que los hace fáciles de cargar en barrenos, pero con limitaciones en entornos húmedos.

- Compuesto por nitratos amónico como base principal.
- Seguro a los golpes y choques.
- Son muy sensibles a la humedad.
- Los más usados son armonita y ligamita.

Anfo: explosivo que se emplean en voladuras de bancos en minas a cielo abierto, optimizando fragmentación y reduciendo costos operativos. Su uso exige protocolos estrictos de almacenamiento y transporte por regulaciones de seguridad.

- Es una mezcla de nitrato amoniac y combustible líquido.
- Son muy insensibles a los golpes y precisan de otro explosivo como goma o cordón detonante.
- Se utiliza en barrenos con agua.
- El más empleado es la nagolita. (Tuñón Suarez,1988)

## **Accesorios**

### Mecha lenta u ordinaria

La formación de la mecha lenta es por su núcleo de pólvora rodeado con hilado de alquitranado y es más resistente, otras con PVC que se conserva por la humedad.

Su conservación debe ser perfecta evitando el sol, humedad y del frío excesivo pueden provocar alteraciones y defectos.

### Cordón detonante

Es considerado un tipo de mecha que tiene una gran potencia y velocidad de detonación. La característica esencial del cordón detonante es su impermeabilidad que protege a la pentrita que influye en su velocidad de orden de 7000m/s, por lo tanto, sus colores son indicadores de cantidad de explosivo a utilizar.

### Relés de retardo

Son artificios del cordón detonante que interrumpe la detonación entre 15 a 200 milisegundos, creando voladura conexas con el cordón detonante su utilización es cuando las líneas eléctricas de alta tensión están cerca, también presente por una gran cantidad de barrenos realizados. *(Tuñón Suarez, 1988)*

### Multiplicadores

Se les denomina iniciadores de voladura de explosivos de baja sensibilidad como anfo, hidrogeles, se emplea los encartuchados o a granel. Su forma cilíndrica está constituida por una mezcla de pentolita y de TNT.

### Óhmetros

Es un equipo que es destinado a medir la resistencia en voladura permite artillero comprobar y medir el circuito para su uso es primordial su certificación por el fabricante.

### Explosores eléctricos

Es un equipo que genera corriente eléctrica para iniciar voladuras, además en un solo disparo resulta la energía limitada para evitar riesgos de accidentes.

*(Bernaola Alonso J, Castilla Gómez J, Herrera Herbert J (2013)*

## CAPÍTULO 2

### MÉTODOS DE VOLADURA A CIELO ABIERTO

#### 2.1 Metodología

El procedimiento metodológico implementado para voladuras a cielo abierto busca optimizar la fracturación rocosa por la integración sistemática de los factores principales:

- Tipo de explosivo al adquirir.
- Roca.
- Longitud de columna.
- Diseño de mina (distancia entre barrenos, número de barrenos).
- Velocidad de detonación y su propagación de onda.

#### 2.2 Método de Konya

El método propuesto por Konya y Walter en 1990, propone la ecuación para hallar la línea de menor resistencia que son valores bastante similares al calcular por el método sueco. En consideración los parámetros estructurales como el macizo rocoso.

Se calcula con los siguientes parámetros:

Burden o piedra (B)

$$B = 0,012 * \left( \frac{2 * De}{Dr} + 1,5 \right) \emptyset e$$

B: Burden.

De: Densidad del explosivo.

Dr: Densidad de la roca.

$\emptyset e$ : Diámetro del explosivo.

$$Burden\ final = B * Kr * Kd * ks$$

B: Burden.

Kr: Corrección por hileras.

Kd: Corrección por tipo de depósito.

Ks: Corrección para estructura geológica.

Índice de rigidez (IR):

$$IR = \frac{\text{Altura de banco}}{\text{Burden}}$$

Altura de banco (H):

$$H = \frac{60 * \text{Diametro de explosivo}}{100}$$

Espaciamiento (S):

Espaciamientos altos:  $2 * \text{Burden}$

Espaciamientos bajos:  $\frac{\text{Altura del banco} + 2 * \text{Burden}}{3}$

Bancos altos = IR superior 4

Bancos bajos= IR inferior a 4

Retacado (T):

$\text{Retacado } T = 0,7 * \text{Burden}$

$\text{Retacado } T = 1,3 * \text{Burden}$

Sobre excavación (J):

$$J = 0,3 * \text{Burden}$$

Angulo de inclinación del barreno grados:

Máxima inclinación de los barrenos, 20°

Longitud del barreno (L):

$L = \text{Altura del banco} + \text{Sobre perforación}$

Longitud del explosivo (l):

Longitud del explosivo = Longitud de barreno - Retacado

### 2.3 Método de Rodgers

El modelo toma los parámetros geomecánicos del macizo rocoso y los parámetros del frente de voladura, incorpora relaciones empíricas y fórmulas derivadas de trabajos de Holmberg, y propone una malla optimizada que equilibra:

- La fragmentación esperada de la roca (lo suficientemente fina para reducir los costos de carguío, molienda, chancado)
- El consumo de explosivos / factor de carga
- La penetración efectiva por disparo / avance lineal
- La minimización de defectos de voladura (sobre excavación, tiros anillados, tacos, disparos soplados) (Velarde, 2016).

Los parámetros de cálculo son los siguientes:

Burden o piedra (B):

$$B = \left( \frac{De * 2}{Dr} + 1,8 \right) * \left( \frac{\emptyset e}{25,4} * 0,3048 \right)$$

B: Burden.

De: Densidad del explosivo.

Dr: Densidad de la roca.

$\varnothing e$ : Diámetro del explosivo.

Índice de rigidez (IR):

$$IR = \frac{\textit{Altura de banco}}{\textit{Burden}}$$

Altura de banco (H):

$$H = \textit{Burden} * \textit{Indice de rigidez}$$

Espaciamiento (S):

$$S = \textit{Burden} * 1,15$$

Retacado (T):

$$\textit{Retacado T} = 0,7 * \textit{Burden}$$

Sobre excavación (J):

$$J = 0,3 * \textit{Burden}$$

Longitud del barreno (L):

$$L = \textit{Altura del banco} + \textit{Sobre perforación}$$

Longitud del explosivo (l):

Longitud del explosivo = Longitud de barreno

## 2.4 Método de Langefors

Langefors y kihlstrom proponen el cálculo del valor de la piedra máxima en la línea menor de resistencia el cual funciona en exactitud en diámetros pequeños de rocas de altas dureza.

Los parámetros del método Langefors de cálculo son:

Factor de fuerza del explosivo (s):

$$s = \frac{\delta * VD}{\delta o * VDo}$$

$\delta$  : Densidad del explosivo.

$\delta o$ : Densidad del explosivo.

VD: Velocidad de detonación del explosivo.

VDo: Velocidad de detonación del explosivo.

Densidad lineal de fondo (IF) y densidad lineal de columna (IC)

$$IF = 1,07 * \left(\frac{E}{V}\right) * f * \left(\frac{1}{SF}\right) * V^2 * c' \quad Ic = 0,38 * \left(\frac{E}{V}\right) * f * \left(\frac{1}{SF}\right) * V^2 * c'$$

E: Espaciamiento en metros.

V: piedra máxima en metros.

f: Factor de fisaje en bancos verticales es igual a 1.

c: Constante de la roca = 0,35.

$\left(\frac{E}{V}\right)$ : Recomendado alrededor de 1,3.

$$c' = c + \frac{0,07}{V} \quad \text{Si } V < 1,4m$$

$$c' = c + 0,05 \quad \text{Si } V > 1,4m$$

Altura de fondo (hF):

$$hF = 1,3 * V$$

Altura de columna (hc):

$$hc = K - 2V$$

K: Altura del banco.

Longitud de perforación (L):

$$L = K + 0,3V$$

## 2.5 Método de Ash

El método de Ash se calcula mediante los siguientes parámetros:

Burden o piedra (B):

$$B = \frac{kb * \emptyset}{12}$$

B: Piedra o burden en pies.

$\emptyset$ : Diámetro del barreno en pulgadas.

kb: Constante que depende de la clase de roca y el tipo de explosivo que se emplea que

son:

**Tabla 2.** Tipo y clase de explosivo, clase de roca

Tipo de explosivo	Densidad del explosivo (g/cm <sup>3</sup> )	Clase de roca		
		Blanda	Media	Dura
Baja potencia	0,8 a 0,9	30	25	20
Media potencia	1 a 1,2	35	30	25
Alta potencia	1,2 a 1,6	40	35	30

**Tabla 3.** Resistencia a la Compresión Simple

Clase	Descripción	RCS
		Mpa
A	Resistencia muy alta	> 225
B	Resistencia alta	112 - 225
C	Resistencia media	56 - 112
D	Resistencia baja	28 - 56
E	Resistencia muy baja	< 28

**Fuente:** (Stagg, K. G., y Zienkiewicz, O. C., 1970)

Profundidad del barreno (L):

$$L = K_e * B \quad (K_e \text{ es entre } 1,5 \text{ y } 4)$$

Espaciamiento (E):

$$E = k_s * B$$

Ks: 2,0 para iniciación simultánea de taladros.

Ks: 1,0 para taladros secuenciados con retardos largos.

Ks: 1,2 a 1,8 para taladros secuenciados con retardos cortos.

Longitud de retacado (T):

$$T = k_t * B$$

Kt: entre 0,7 y 1,6.

Sobre perforación (S):

$$S = k_j * B$$

Kj: entre 0,2 y 1.

Longitud de carga de fondo (hf):

$$hf = 1,3 * B$$

Longitud de columna (hc):

$$hc = L + S - T - hf$$

## 2.6 Método de López Jimeno

Es un método propuesto en 1994 se basa en diseñar el patrón de voladura en función del diámetro seleccionado para la perforación de barreros y en la resistencia de comprensión simple.

Para su aplicación del método por los siguientes formulas y parámetros:

Diámetro de perforación:

**Tabla 4.** Diámetro de perforación

Altura del banco (m)	Diámetro de barreno (mm)
8 - 10	65 - 90
10 - 15	100 - 150

Burden o piedra (B):

**Tabla 5.** Burden o piedra (B)

Variable de diseño	Resistencia de la roca (MPa)			
	Blanda < 70	Media 70- 120	Dura 120-180	Muy dura > 180
Piedra B	39D	37D	35D	33D

(López Jimeno, 1994)

Índice de rigidez (IR):

$$IR = \frac{\text{Altura de banco}}{\text{Burden}}$$

Altura de banco (H):

La altura máxima aconsejada en minas y canteras es de 15 m y en ocasiones especiales deben alcanzar una altura de 20 metros como en voladuras de escollera.

Espaciamiento (S):

**Tabla 6.** Espaciamiento (S)

Variable de diseño	Resistencia de la roca (MPa)			
	Blanda < 70	Media 70-120	Dura 120-180	Muy dura > 180
Espaciamiento S	51D	47D	43D	38D

Retacado (T):

**Tabla 7.** Retacado (T)

Variable de diseño	Resistencia de la roca (MPa)			
	Blanda < 70	Media 70-120	Dura 120-180	Muy dura > 180
Retacado T	35D	34D	32D	30D

Sobre excavación (J):

**Tabla 8.** Excavación (J)

Variable de diseño	Resistencia de la roca (MPa)			
	Blanda < 70	Media 70-120	Dura 120-180	Muy dura > 180
Sobre perforación J	10D	11D	12D	12D

Longitud de barreno (L):

$$L = \frac{H}{\cos\beta} + \frac{\beta}{100} * J$$

H: Altura del banco.

B: Angulo con respecto a la vertical en grados.

J: Sobre perforación.

Longitud de explosivo (l):

$$l = \text{Longitud de barreno} - \text{Retacado}$$

Densidad de carga (D):

$$D = 0,000785 * De * (\varnothing_{\text{explosivo}})^2$$

Observaciones:

**Tabla 9.** Dimensionamiento de la longitud de carga de fondo según la resistencia de la roca

Variable de diseño	Resistencia de la roca (MPa)			
	Blanda < 70	Media 70-120	Dura 120-180	Muy dura > 180
Longitud de carga de fondo (Lf)	30D	35D	40D	46D

## 2.7 Consumo específico

El consumo específico depende de ciertos parámetros de las variables operativas, entre las que se destacan como:

- El diámetro del barreno.
- La resistencia de roca.
- El grado de fragmentación.
- El desplazamiento.
- Esponjamiento requerido. (Bernaola, Castilla & Herrera, (2013))

Cervantes, calcula el consumo específico en la cantidad de explosivo necesaria para fragmentar un  $1m^3$  de la roca se calcula:

$$\text{Consumo específico}(CE) = \frac{\text{Carga total del explosivo}}{\text{Volumen total de la roca fragmentada}}$$

## 2.8 Costos de voladura

Gonzales Ponce, B. (2022) afirma que los costos para una voladura y analiza los costos que implica por lo que consta los valores de adquirir explosivos por cada metro lineal. (p.37)

*Tabla 10. Costos de insumos en voladura.*

Insumo	Costos
Mecha lenta	\$ 0,67 metro lineal
Fulminante	\$0,50cts
ANFO	\$2,21kg
Dinamita	\$2,42 kg
Elmusen	\$ 1,30kg

## 2.9 Datos principales

Los datos establecidos se basan en prácticas de voladura a cielo abierto en el Ecuador principalmente en la provincia del Guayas, para una adecuada optimización se establece lo siguiente:

*Tabla 11. Datos constantes en aplicación.*

Datos Generales	Descripción	Unidades
Tipo de roca	Andesita-Basalto	
Densidad de la roca	28000	Kg/m <sup>3</sup>
Volumen de producción	1.000	Toneladas
Kr (corrección por número de hileras.)	1	
Kd (corrección por el tipo de depósito)	1,18	

Ks (corrección para estructura geológica)	0,95
---	------

Las fichas técnicas de explosivos, aportadas por Explocen C.A., proporcionan los parámetros clave para determinar su consumo específico en cada método de voladura. Estos valores, adaptados a la energía requerida por cada tipo de roca volcánica, se presentan seguidamente:

**Tabla 12. Información de fichas técnicas por Explocen C.A**

Parámetros	Tipos de explosivo					Unidad
	Elmusen 720	Elmusen 5000X	Anemul 20/80	Elmusen 1000X	ANFO	
Densidad	1120	1090	1210	1120	800	$\frac{kg}{m^3}$
Diámetro	1,5	1	2	1,50	Presentacion en sacos de 25kg	in
	2,0	1,25	2,05			
	2,50	1,38	3			
	3,00	2				
	3,50	2,5				
Velocidad detonación-confinamiento	5600	5400	5568	5600	3200	n/s

## 2.10 Aplicación de cálculo por método Konya

Posteriormente, se realizaron los cálculos aplicables al método Konya, detallados en las siguientes tablas:

- Aplicación del método de Konya con diferentes explosivos y diámetro de perforación constante de 2 pulgadas

Datos				
ANFO	De	800		
Densidad de la roca-andesita	Dr	2800		
Diámetro de perforacion	Øe	2	50.8	mm
Observaciones del método	Kr	1		
	Kd	1.18		
	Ks	0.95		
Volumen Total	VT	357.1		
Toneladas		1,000		

Tabla 13. Cálculo con explosivo ANFO

Parámetros		Resultados		Parámetros		Resultados	
Burden-piedra	B	1.3	m				
Burden final	B	1.4	m				
Altura de banco	H	3.0	m				
Índice de rigidez	IR	2.2			2.0		
Espaciamiento	E1	2.8	m	E2	2.0	m	
Retacado	R	1.0	m	R	1.8	m	
Sobreexcavación	S	0.4	m				
Longitud de barreno	L	3.5	m				
Longitud -explosivo	Lexp	2.5	m	Lexp	1.6	m	
Volumen de barreno	Vb	12	m <sup>3</sup>	Vb	8	m <sup>3</sup>	
Número de barrenos	#b	29		#b	42		
Perforación	Per	102	m	Per	147	m	
Perforación específica	Pe	0.28	m/m <sup>3</sup>	Pe	0.41	m/m <sup>3</sup>	
Índice de carga	Ic	1.6	kg/m				
	Carga	4.0	kg	Carga	2.6	kg	
	Carga Total	117.7	kg	Carga Total	111.8	kg	
Consumo específico	qe	0.33	kg/m <sup>3</sup>	qe	0.31	kg/m <sup>3</sup>	

Datos				
Elmusen 1000x	De	1120		
Densidad de la roca-andesita	Dr	2800		
Diámetro de perforacion	Øe	2	50.8	mm
	Kr	1		
Observaciones del método	Kd	1.18		
	Ks	0.95		
Volumen Total		357.1		
Toneladas		1.000		

**Tabla 14.** Cálculo con explosivo Elmusen 1000x

Parámetros		Resultados		Parámetros		Resultados	
Burden-piedra	B	1.4	m				
Burden final	B	1.6	m				
Altura de banco	H	3.0	m				
Índice de rigidez	IR	1.9				2.1	
Espaciamiento	E1	3.1	m	E2		2.1	m
Retacado	R	1.1	m	R		2.0	m
Sobreexcavación	S	0.5	m				
Longitud de barreno	L	3.5	m				
Longitud -explosivo	Lexp	2.4	m	Lexp		1.5	m
Volumen de barreno	Vb	15	m <sup>3</sup>	Vb		10	m <sup>3</sup>
Número de barrenos	#b	24		#b		36	
Perforación	Per	83	m	Per		127	m
Perforación específica	Pe	0.23	m/m <sup>3</sup>	Pe		0.36	m/m <sup>3</sup>
Índice de carga	lc	2.3	kg/m				
	Carga	5.5	kg	Carga		3.4	kg
	Carga Total	130.2	kg	Carga Total		121.0	kg
Consumo específico	qe	0.36	kg/m <sup>3</sup>	qe		0.34	kg/m <sup>3</sup>

Datos			
Anemul 20-80	De	1210	
Densidad de la roca-andesita	Dr	2800	
Diámetro de perforación	Øe	2	50.8 mm
	Kr	1	
Observaciones del método	Kd	1.18	
	Ks	0.95	
Volumen Total		357.1	
Toneladas		1,000	

**Tabla 15.** Cálculo con explosivo Anemul 20-80

Parámetros		Resultados		Parámetros		Resultados	
Burden-piedra	B	1.4	m				
Burden final	B	1.6	m				
Altura de banco	H	3.0	m				
Índice de rigidez	IR	1.9				2.1	
Espaciamiento	E1	3.2	m	E2		2.1	m
Retacado	R	1.1	m	R		2.1	m
Sobreexcavación	S	0.5	m				
Longitud de barreno	L	3.5	m				
Longitud -explosivo	Lexp	2.4	m	Lexp		1.4	m
Volumen de barreno	Vb	16	m <sup>3</sup>	Vb		10	m <sup>3</sup>
Número de barrenos	#b	22		#b		35	
Perforación	Per	79	m	Per		122	m
Perforación específica	Pe	0.22	m/m <sup>3</sup>	Pe		0.34	m/m <sup>3</sup>
Índice de carga	lc	2.5	kg/m				
	Carga	5.9	kg	Carga		3.5	kg
	Carga Total	132.2	kg	Carga Total		121.7	kg
Consumo específico	qe	0.37	kg/m <sup>3</sup>	qe		0.34	kg/m <sup>3</sup>

Datos				
Elmusen 5000x	De	1090		
Densidad de la roca-andesita	Dr	2800		
Diámetro de perforación	Øe	2	50.8	mm
Observaciones del método	Kr	1		
	Kd	1.18		
	Ks	0.95		
Volumen Total	Vol Total	357.1		
Toneladas		1,000		

**Tabla 16.** Cálculo con explosivo elmusen 5000x

Parámetros		Resultados		Parámetros		Resultados	
Burden-piedra	B	1.4	m				
Burden final	B	1.6	m				
Altura de banco	H	3.0	m				
Índice de rigidez	IR	2.0				2.1	
Espaciamiento	E1	3.1	m	E2		2.1	m
Retacado	R	1.1	m	R		2.0	m
Sobreexcavación	S	0.5	m				
Longitud de barreno	L	3.5	m				
Longitud -explosivo	Lexp	2.4	m	Lexp		1.5	m
Volumen de barreno	Vb	15	m <sup>3</sup>	Vb		10	m <sup>3</sup>
Número de barrenos	#b	24		#b		37	
Perforación	Per	85	m	Per		129	m
Perforación específica	Pe	0.24	m/m <sup>3</sup>	Pe		0.36	m/m <sup>3</sup>
Índice de carga	lc	2.2	kg/m				
	Carga	5.4	kg	Carga		3.3	kg
	Carga Total	129.5	kg	Carga Total		120.7	kg
Consumo específico	qe	0.36	kg/m <sup>3</sup>	qe		0.34	kg/m <sup>3</sup>

Datos				
Elmusen 720	De	1120		
Densidad de la roca-andesita	Dr	2800		
Diámetro de perforación	Øe	2	50.8	mm
Observaciones del método	Kr	1		
	Kd	1.18		
	Ks	0.95		
Volumen Total		357.1		
Toneladas		1,000		

*Tabla 17. Cálculo con explosivo elmusen 720*

Parámetros		Resultados		Parámetros		Resultados	
Burden-piedra	B	1.4	m				
Burden final	B	1.6	m				
Altura de banco	H	3.0	m				
Índice de rigidez	IR	1.9				2.1	
Espaciamiento	E1	3.1	m	E2		2.1	m
Retacado	R	1.1	m	R		2.0	m
Sobreexcavación	S	0.5	m				
Longitud de barreno	L	3.5	m				
Longitud -explosivo	Lexp	2.4	m	Lexp		1.5	m
Volumen de barreno	Vb	15	m <sup>3</sup>	Vb		10	m <sup>3</sup>
Número de barrenos	#b	24		#b		36	
Perforación	Per	83	m	Per		127	m
Perforación específica	Pe	0.23	m/m <sup>3</sup>	Pe		0.36	m/m <sup>3</sup>
Índice de carga	lc	2.3	kg/m				
	Carga	5.5	kg	Carga		3.4	kg
	Carga Total	130.2	kg	Carga Total		121.0	kg
Consumo específico	qe	0.36	kg/m <sup>3</sup>	qe		0.34	kg/m <sup>3</sup>

- Método de Konya con diferentes explosivos y diámetro de perforación constante de 3pulgadas

Datos				
ANFO	De	800		
Densidad de la roca-andesita	Dr	2800		
Diámetro de perforación	Øe	3	76.2	mm
Observaciones del método	Kr	1		
	Kd	1.18		
	Ks	0.95		
Volumen Total	VT	357.1		
Toneladas		1,000		

**Tabla 18.** Cálculo con explosivo ANFO

Parámetros		Resultados		Parámetros		Resultados	
Burden-piedra	B	1.9	m				
Burden final	B	2.1	m				
Altura de banco	H	4.6	m				
Índice de rigidez	IR	2.2				2.9	
Espaciamiento	E1	4.2	m	E2		2.9	m
Retacado	R	1.5	m	R		2.8	m
Sobreexcavación	S	0.6	m				
Longitud de barreno	L	5.2	m				
Longitud -explosivo	Lexp	3.7	m	Lexp		2.4	m
Volumen de barreno	Vb	41	m <sup>3</sup>	Vb		29	m <sup>3</sup>
Número de barrenos	#b	9		#b		13	
Perforación	Per	45	m	Per		65	m
Perforación específica	Pe	0.13	m/m <sup>3</sup>	Pe		0.18	m/m <sup>3</sup>
Índice de carga	lc	3.6	kg/m				
	Carga	13.6	kg	Carga		8.9	kg
	Carga Total	117.7	kg	Carga Total		111.8	kg
Consumo específico	qe	0.33	kg/m <sup>3</sup>	qe		0.31	kg/m <sup>3</sup>

Datos				
Elmusen 720	De	1120		
Densidad de la roca-andesita	Dr	2800		
Diámetro de perforación	Øe	3	76.2	mm
Observaciones del método	Kr	1		
	Kd	1.18		
	Ks	0.95		
Volumen Total		357.1		
Toneladas		1,000		

*Tabla 19. Cálculo con explosivo Elmusen 1000x*

Parámetros		Resultados		Parámetros		Resultados	
Burden-piedra	B	2.1	m				
Burden final	B	2.4	m				
Altura de banco	H	4.6	m				
Índice de rigidez	IR	1.9				3.1	
Espaciamiento	E1	4.7	m	E2		3.1	m
Retacado	R	1.7	m	R		3.1	m
Sobreexcavación	S	0.7	m				
Longitud de barreno	L	5.3	m				
Longitud -explosivo	Lexp	3.6	m	Lexp		2.2	m
Volumen de barreno	Vb	51	m <sup>3</sup>	Vb		33	m <sup>3</sup>
Número de barrenos	#b	7		#b		11	
Perforación	Per	37	m	Per		57	m
Perforación específica	Pe	0.10	m/m <sup>3</sup>	Pe		0.16	m/m <sup>3</sup>
Índice de carga	lc	5.1	kg/m				
	Carga	18.5	kg	Carga		11.3	kg
	Carga Total	130.2	kg	Carga Total		121.0	kg
Consumo específico	qe	0.36	kg/m <sup>3</sup>	qe		0.34	kg/m <sup>3</sup>

Datos			
Anemul 20-80	De	1210	
Densidad de la roca-andesita	Dr	2800	
Diámetro de perforación	Øe	3	76.2 mm
	Kr	1	
Observaciones del método	Kd	1.18	
	Ks	0.95	
Volumen Total		357.1	
Toneladas		1,000	

*Tabla 20. Cálculo con explosivo Anemul 20-80.*

Parámetros		Resultados		Parámetros		Resultados	
Burden-piedra	B	2.2	m				
Burden final	B	2.4	m				
Altura de banco	H	4.6	m				
Índice de rigidez	IR	1.9				3.1	
Espaciamiento	E1	4.8	m	E2		3.1	m
Retacado	R	1.7	m	R		3.2	m
Sobreexcavación	S	0.7	m				
Longitud de barreno	L	5.3	m				
Longitud -explosivo	Lexp	3.6	m	Lexp		2.1	m
Volumen de barreno	Vb	54	m <sup>3</sup>	Vb		35	m <sup>3</sup>
Número de barrenos	#b	7		#b		10	
Perforación	Per	35	m	Per		54	m
Perforación específica	Pe	0.10	m/m <sup>3</sup>	Pe		0.15	m/m <sup>3</sup>
Índice de carga	lc	5.5	kg/m				
	Carga	19.9	kg	Carga		11.9	kg
	Carga Total	132.2	kg	Carga Total		121.7	kg
Consumo específico	qe	0.37	kg/m <sup>3</sup>	qe		0.34	kg/m <sup>3</sup>

Datos				
Elmuse 5000x	De	1090		
Densidad de la roca-andesita	Dr	2800		
Diámetro de perforación	Øe	3	76.2	mm
Observaciones del método	Kr	1		
	Kd	1.18		
	Ks	0.95		
Volumen Total	Vol Total	357.1		
Toneladas		1,000		

**Tabla 21.** Cálculo con explosivo elmusen 5000x.

Parámetros		Resultados		Parámetros		Resultados	
Burden-piedra	B	2.1	m				
Burden final	B	2.3	m				
Altura de banco	H	4.6	m				
Índice de rigidez	IR	2.0				3.1	
Espaciamiento	E1	4.7	m	E2		3.1	m
Retacado	R	1.6	m	R		3.0	m
Sobreexcavación	S	0.7	m				
Longitud de barreno	L	5.3	m				
Longitud -explosivo	Lexp	3.6	m	Lexp		2.2	m
Volumen de barreno	Vb	50	m <sup>3</sup>	Vb		33	m <sup>3</sup>
Número de barrenos	#b	7		#b		11	
Perforación	Per	38	m	Per		57	m
Perforación específica	Pe	0.11	m/m <sup>3</sup>	Pe		0.16	m/m <sup>3</sup>
Índice de carga	lc	5.0	kg/m				
	Carga	18.1	kg	Carga		11.1	kg
	Carga Total	129.5	kg	Carga Total		120.7	kg
Consumo específico	qe	0.36	kg/m <sup>3</sup>	qe		0.34	kg/m <sup>3</sup>

Datos			
Elmusen 1000x	De	1120	
Densidad de la roca-andesita	Dr	2800	
Diámetro de perforación	Øe	3	76.2 mm
Observaciones del método	Kr	1	
	Kd	1.18	
	Ks	0.95	
Volumen Total		357.1	
Toneladas		1,000	

**Tabla 22.** Cálculo con explosivo elmusen 720.

Parámetros		Resultados		Parámetros		Resultados	
Burden-piedra	B	2.1	m				
Burden final	B	2.4	m				
Altura de banco	H	4.6	m				
Índice de rigidez	IR	1.9				3.1	
Espaciamiento	E1	4.7	m	E2		3.1	m
Retacado	R	1.7	m	R		3.1	m
Sobreexcavación	S	0.7	m				
Longitud de barreno	L	5.3	m				
Longitud -explosivo	Lexp	3.6	m	Lexp		2.2	m
Volumen de barreno	Vb	51	m <sup>3</sup>	Vb		33	m <sup>3</sup>
Número de barrenos	#b	7		#b		11	
Perforación	Per	37	m	Per		57	m
Perforación específica	Pe	0.10	m/m <sup>3</sup>	Pe		0.16	m/m <sup>3</sup>
Índice de carga	lc	5.1	kg/m				
	Carga	18.5	kg	Carga		11.3	kg
	Carga Total	130.2	kg	Carga Total		121.0	kg
Consumo específico	qe	0.36	kg/m <sup>3</sup>	qe		0.34	kg/m <sup>3</sup>

- Método de Konya con diferentes explosivos y diámetro de perforación constante de 4pulgadas

Datos				
ANFO	De	800		
Densidad de la roca-andesita	Dr	2800		
Diámetro de perforación	Øe	4	101.6	mm
Observaciones del método	Kr	1		
	Kd	1.18		
	Ks	0.95		
Volumen Total	VT	357.1		
Toneladas		1,000		

**Tabla 23.** Cálculo con explosivo ANFO.

Parámetros		Resultados		Parámetros		Resultados	
Burden-piedra	B	2.5	m				
Burden final	B	2.8	m				
Altura de banco	H	6.1	m				
Índice de rigidez	IR	2.2				3.9	
Espaciamiento	E1	5.7	m	E2		3.9	m
Retacado	R	2.0	m	R		3.7	m
Sobreexcavación	S	0.8	m				
Longitud de barreno	L	6.9	m				
Longitud -explosivo	Lexp	5.0	m	Lexp		3.3	m
Volumen de barreno	Vb	98	m <sup>3</sup>	Vb		68	m <sup>3</sup>
Número de barrenos	#b	4		#b		5	
Perforación	Per	25	m	Per		37	m
Perforación específica	Pe	0.07	m/m <sup>3</sup>	Pe		0.10	m/m <sup>3</sup>
Índice de carga	lc	6.5	kg/m				
	Carga	32.2	kg	Carga		21.2	kg
	Carga Total	117.7	kg	Carga Total		111.8	kg
Consumo específico	qe	0.33	kg/m <sup>3</sup>	qe		0.31	kg/m <sup>3</sup>

Datos			
Elmusen 720	De	1120	
Densidad de la roca-andesita	Dr	2800	
Diámetro de perforación	Øe	4	101.6 mm
	Kr	1	
Observaciones del método	Kd	1.18	
	Ks	0.95	
Volumen Total		357.1	
Toneladas		1,000	

**Tabla 24.** Cálculo con explosivo elmusen 1000x.

Parámetros		Resultados		Parámetros		Resultados	
Burden-piedra	B	2.8	m				
Burden final	B	3.1	m				
Altura de banco	H	6.1	m				
Índice de rigidez	IR	1.9				4.1	
Espaciamiento	E1	6.3	m	E2		4.1	m
Retacado	R	2.2	m	R		4.1	m
Sobreexcavación	S	0.9	m				
Longitud de barreno	L	7.0	m				
Longitud -explosivo	Lexp	4.8	m	Lexp		3.0	m
Volumen de barreno	Vb	120	m <sup>3</sup>	Vb		79	m <sup>3</sup>
Número de barrenos	#b	3		#b		5	
Perforación	Per	21	m	Per		32	m
Perforación específica	Pe	0.06	m/m <sup>3</sup>	Pe		0.09	m/m <sup>3</sup>
Índice de carga	lc	9.1	kg/m				
	Carga	43.9	kg	Carga		26.8	kg
	Carga Total	130.2	kg	Carga Total		121.0	kg
Consumo específico	qe	0.36	kg/m <sup>3</sup>	qe		0.34	kg/m <sup>3</sup>

Datos				
Anemul 20-80	De	1210		
Densidad de la roca-andesita	Dr	2800		
Diámetro de perforación	Øe	4	101.6	mm
	Kr	1		
Observaciones del método	Kd	1.18		
	Ks	0.95		
Volumen Total		357.1		
Toneladas		1.000		

**Tabla 25.** Cálculo con explosivo anemul 20-80

Parámetros		Resultados		Parámetros		Resultados	
Burden-piedra	B	2.9	m				
Burden final	B	3.2	m				
Altura de banco	H	6.1	m				
Índice de rigidez	IR	1.9				4.2	
Espaciamiento	E1	6.5	m	E2		4.2	m
Retacado	R	2.3	m	R		4.2	m
Sobreexcavación	S	1.0	m				
Longitud de barreno	L	7.1	m				
Longitud -explosivo	Lexp	4.8	m	Lexp		2.9	m
Volumen de barreno	Vb	127	m <sup>3</sup>	Vb		82	m <sup>3</sup>
Número de barrenos	#b	3		#b		4	
Perforación	Per	20	m	Per		31	m
Perforación específica	Pe	0.06	m/m <sup>3</sup>	Pe		0.09	m/m <sup>3</sup>
Índice de carga	lc	9.8	kg/m				
	Carga	47.1	kg	Carga		28.1	kg
	Carga Total	132.2	kg	Carga Total		121.7	kg
Consumo específico	qe	0.37	kg/m <sup>3</sup>	qe		0.34	kg/m <sup>3</sup>

Datos			
Elmusen 5000x	De	1090	
Densidad de la roca-andesita	Dr	2800	
Diámetro de perforación	Øe	4	101.6 mm
Observaciones del método	Kr	1	
	Kd	1.18	
	Ks	0.95	
Volumen Total	Vol Total	357.1	
Toneladas		1,000	

*Tabla 26. Cálculo con explosivo elmusen 5000x*

Parámetros		Resultados		Parámetros		Resultados	
Burden-piedra	B	2.8	m				
Burden final	B	3.1	m				
Altura de banco	H	6.1	m				
Índice de rigidez	IR	1.9				4.1	
Espaciamiento	E1	6.3	m	E2		4.1	m
Retacado	R	2.2	m	R		4.1	m
Sobreexcavación	S	0.9	m				
Longitud de barreno	L	7.0	m				
Longitud -explosivo	Lexp	4.8	m	Lexp		3.0	m
Volumen de barreno	Vb	120	m <sup>3</sup>	Vb		79	m <sup>3</sup>
Número de barrenos	#b	3		#b		5	
Perforación	Per	21	m	Per		32	m
Perforación específica	Pe	0.06	m/m <sup>3</sup>	Pe		0.09	m/m <sup>3</sup>
Índice de carga	lc	9.1	kg/m				
	Carga	43.9	kg	Carga		26.8	kg
	Carga Total	130.2	kg	Carga Total		121.0	kg
Consumo específico	qe	0.36	kg/m <sup>3</sup>	qe		0.34	kg/m <sup>3</sup>

Datos			
Elmuse 1000x	De	1120	
Densidad de la roca-andesita	Dr	2800	
Diámetro de perforación	Øe	4	101.6 mm
Observaciones del método	Kr	1	
	Kd	1.18	
	Ks	0.95	
Volumen Total		357.1	
Toneladas		1.000	

*Tabla 27. Cálculo con explosivo elmuse 720.*

Parámetros		Resultados		Parámetros		Resultados	
Burden-piedra	B	2.8	m				
Burden final	B	3.1	m				
Altura de banco	H	6.1	m				
Índice de rigidez	IR	2.0				4.1	
Espaciamiento	E1	6.2	m	E2		4.1	m
Retacado	R	2.2	m	R		4.0	m
Sobreexcavación	S	0.9	m				
Longitud de barreno	L	7.0	m				
Longitud -explosivo	Lexp	4.9	m	Lexp		3.0	m
Volumen de barreno	Vb	118	m <sup>3</sup>	Vb		78	m <sup>3</sup>
Número de barrenos	#b	3		#b		5	
Perforación	Per	21	m	Per		32	m
Perforación específica	Pe	0.06	m/m <sup>3</sup>	Pe		0.09	m/m <sup>3</sup>
Índice de carga	lc	8.8	kg/m				
	Carga	42.9	kg	Carga		26.3	kg
	Carga Total	129.5	kg	Carga Total		120.7	kg
Consumo específico	qe	0.36	kg/m <sup>3</sup>	qe		0.34	kg/m <sup>3</sup>

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS DE DATOS

#### 1.1 Aplicación del método

El método Konya se aplicó para la optimización de consumo específico en voladuras a cielo abierto, evaluando se seleccionó cinco tipos de explosivos que son:

- ANFO
- Elmusen 1000x
- Anemul 20/80
- Elmusen 5000x
- Emulsen 720

Los cálculos se consideró los diámetros de perforación de 2,3 y 4 pulgadas, con datos geotécnicos, geometría del área minera.

#### 1.2 Análisis de datos

El Análisis de resultados con diámetro de perforación de 2 pulgadas aplicado a diferentes explosivos obteniendo.

Un consumo específico tiene un rango entre 0.31 y 0.37 Kg/m<sup>3</sup>. En el cuál analizamos el número de barrenos para su factibilidad en el uso en el caso uno y dos por su variable de volumen de barreno.

##### Caso 1

ANFO su volumen de barreno es de 12 m<sup>3</sup>, en cual se establece 29 barrenos con un consumo específico de 0.33 kg/m<sup>3</sup>.

Emulsen 1000x esta con un volumen de barreno de 15 m<sup>3</sup>, su número de barrenos es de 24 y su consumo específico corresponde a 0.36kg/m<sup>3</sup>.

Anemul 20-80, el volumen de barreno es de 16m<sup>3</sup>, numero de barrenos es de 22 con un consumo específico de 0.37kg/m<sup>3</sup>.

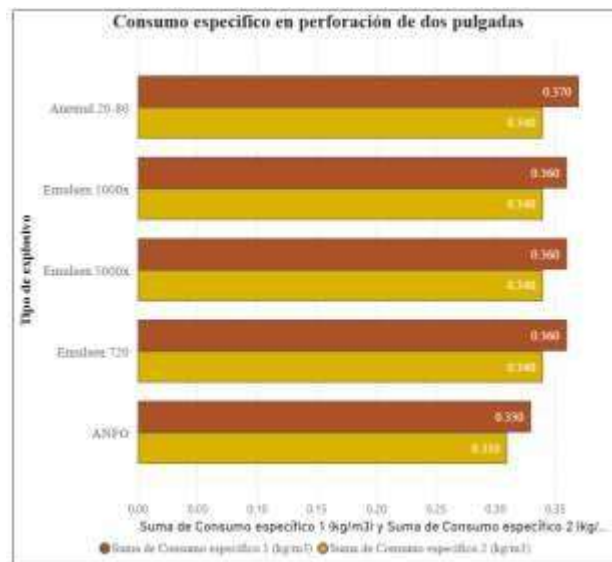
Emulsen 5000x, su volumen de barrenos es de 15 m<sup>3</sup> como resultado de 24 barrenos y un consumo específico de 0.36 kg/m<sup>3</sup>.

Además, en el caso 2 surge que en la mayoría de los explosivos su volumen de barrenos es de 10 m<sup>3</sup> con excepción el explosivo ANFO que su volumen es de 8 m<sup>3</sup>.

El número de barrenos en el caso dos se da entre 30 a 42 barrenos y el consumo específico es constante a 0.34, ANFO es de 0.31 kg/m<sup>3</sup>

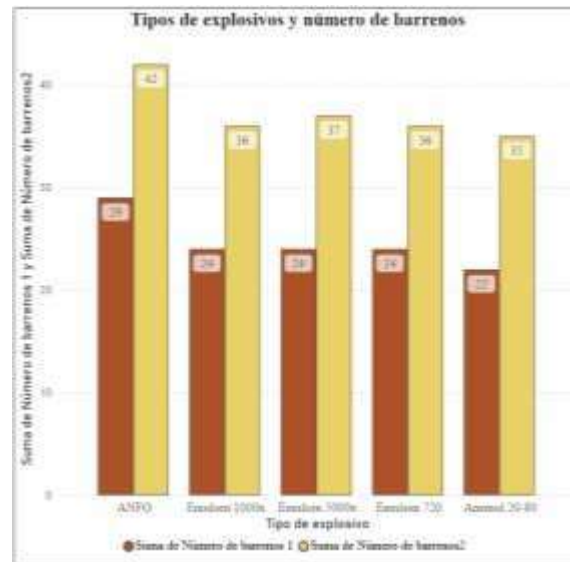
**Tabla 28.** Resumen de los resultados obtenidos para perforaciones de 2pulgadas

TABLA DE RESULTADOS DE PERFORACIÓN DE 2PULGADAS						
Tipo de explosivo	Volumen barreno1 (m3)	Volumen barreno2 (m3)	Número de barrenos 1	Número de barrenos2	Consumo específico 1 (kg/m3)	Consumo específico 2 (kg/m3)
ANFO	12	8	29	42	0.33	0.31
Emulsen 1000x	15	10	24	36	0.36	0.34
Anemul 20-80	16	10	22	35	0.37	0.34
Emulsen 5000x	15	10	24	37	0.36	0.34
Emulsen 720	15	10	24	36	0.36	0.34



**Figura. 6.** Consumo específicos en perforación de 2 pulgadas

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura. 7** Tipos de explosivos y número de barras

Mediante el análisis de resultados de perforación de 3 pulgadas de diámetro aplicado a diferentes explosivos muestra que el consumo específico se mantiene en un rango entre 0.31 a 0.36 kg/m<sup>3</sup>, sin presentar variaciones muy elevadas entre los distintos tipos de explosivos.

Sin embargo, en el caso específico del explosivo ANFO, se obtiene el menor consumo específico, con valores de 0.31 a 0.33, lo cual representa una ventaja en cuanto al uso. Además, el número de barrenos es mayor en comparación con los demás explosivos, con un rango de 9 a 13, lo que implica mayor trabajo en perforación.

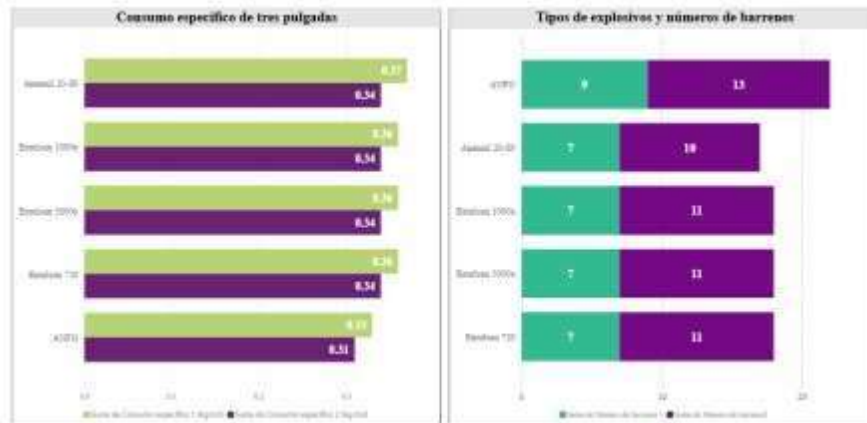
Por otro lado, los explosivos tipo emulsión como emulsen 1000x, anemul 20-80, emulsen 5000x y emulsen 720, resulta comportamiento más uniforme, con un número de barrenos menor que se encuentra entre 7 a 11, lo que mejora la eficiencia en la operación.

El consumo específico, de los explosivos presentan valores ligeramente más altos, entre 0.34 a 0.37, siendo el anemul 20-80 el que registra el valor más alto. Sin embargo, esta diferencia se compensa con la reducción en el número de barrenos.

En resumen, el ANFO presenta el menor consumo específico, los explosivos tipo emulsión resultan más eficientes en el proceso general, ya que permiten reducir el número de barrenos y optimizar el tiempo y los costos de perforación.

**Tabla 29.** Resumen de los resultados obtenidos en perforaciones de 3 pulgadas

TABLA DE RESULTADOS DE PERFORACIÓN DE 3 PULGADAS						
Tipo de explosivo	Volumen barrenos1 (m3)	Volumen barrenos2 (m3)	Número de barrenos 1	Número de barrenos2	Consumo específico 1 (kg/m3)	Consumo específico 2 (kg/m3)
ANFO	41	29	9	13	0.33	0.31
Emulsen 1000x	51	33	7	11	0.36	0.34
Anemul 20-80	54	35	7	10	0.37	0.34
Emulsen 5000x	50	33	7	11	0.36	0.34
Emulsen 720	51	33	7	11	0.36	0.34



**Figura. 8.** Consumo específicos de 3 pulgadas  
**Fuente:** Elaboración propia.

El análisis de resultados con diámetro de perforación de 4 pulgadas aplicado a diferentes explosivos muestra una mayor eficiencia en comparación con diámetros menores, especialmente en la reducción del número de barrenos.

El consumo específico se mantiene en un rango entre 0.31 a 0.37 kg/m<sup>3</sup>, sin presentar variaciones significativas entre los explosivos analizados.

En el caso del ANFO, se obtiene el menor consumo específico, con valores de 0.31 a 0.33, lo cual representa una ventaja en cuanto al uso de explosivo. Sin embargo, el número de barrenos es ligeramente mayor en comparación con los demás, con un rango de 4 a 5.

Por otro lado, los explosivos tipo emulsión como emulsen 1000x, anemul 20-80, emulsen 5000x y emulsen 720 presentan un comportamiento uniforme, con un número de

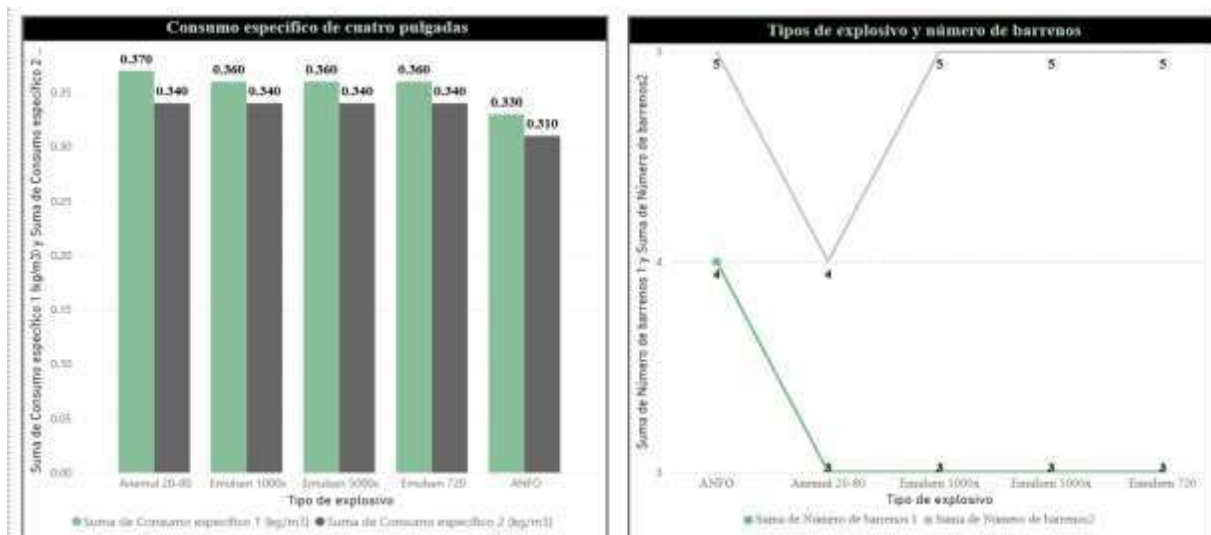
barrenos menor que se mantiene entre 3 a 5, lo que mejora la eficiencia en el proceso de perforación.

En cuanto al consumo específico, estos explosivos presentan valores ligeramente más altos, entre 0.34 a 0.37, siendo el anemul 20-80 el que registra el mayor consumo. Sin embargo, esta diferencia se compensa con la reducción en el número de barrenos.

En deducción, al aumentar el diámetro de perforación a 4 pulgadas, se logra una reducción considerable en el número de barrenos, optimizando el tiempo y los costos operativos. Aunque el ANFO presenta el menor consumo específico, los explosivos tipo emulsión resultan más eficientes en el proceso general debido a la menor cantidad de perforaciones requeridas.

**Tabla 30.** Resumen de los resultados obtenidos para perforación de 4 pulgadas

TABLA DE RESULTADOS DE PERFORACIÓN DE 4 PULGADAS						
Tipo de explosivo	Volumen barreno1 (m3)	Volumen barreno2 (m3)	Número de barrenos 1	Número de barrenos2	Consumo específico 1 (kg/m3)	Consumo específico 2 (kg/m3)
ANFO	98	68	4	5	0.33	0.31
Emulsen 1000x	120	79	3	5	0.36	0.34
Anemul 20-80	127	82	3	4	0.37	0.34
Emulsen 5000x	118	78	3	5	0.36	0.34
Emulsen 720	120	79	3	5	0.36	0.34



**Figura. 9** Consumo específico de 4 pulgadas; tipos de explosivo y numero de barras  
**Fuente:** Elaboración propia.

Mediante el análisis posterior se presentará los calificativos según el consumo específico, número de barrenos, carga de barrenos, de los diferentes tipos de explosivos como muy eficiente, bueno, regular y muy malo.

Posteriormente en la tabla de explosivos para perforación de 2 pulgadas es favorable el uso del explosivo ANFO y emulsen 5000x, su consumo específico que se mantiene de 0.33 y 0.36 kg/m<sup>3</sup>, su número de barrenos es menor a 40.

Se determino que podría aplicarse el explosivo ANFO por su menor consumo específico. Si se propone un menor número de barrenos, se recomienda los siguientes explosivos anemul20/80 y emulsen 5000x, al contrario, su consumo específico va aumentando.

**Tabla 31.** Calificativos de explosivos en perforación de 2pulgadas

<b>Calificativos en perforación de 2pulgadas</b>		
Tipo de explosivo	Calificativo por consumo específico	Calificativo otras variables
ANFO	Muy bueno	Alto
Emulsen 1000x	Bueno	Intermedio
Anemul20/80	Bueno	Intermedio
Emulsen 5000x	Bueno	Intermedio
Emulsen 720	Bueno	Intermedio

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla para perforación de 3 pulgadas con diferentes explosivos se clasifica por las siguientes categorías dependiendo de sus variables de consumo específico, volumen de la roca por barreno y espaciamiento entre barrenos, el cual resultaría aplicable en cualquier tipo de explosivo dependiendo el número de barrenos al ejecutarse, es menor a 13.

El consumo específico del caso uno oscila entre 0.33 a 0.36 kg/m<sup>3</sup>, el caso 2 el consumo específico tiende a ser constante es de 0.34 kg/m<sup>3</sup>, sus condiciones de otras variables son similares.

**Tabla 32.** *Calificativos de explosivos en perforación de 3 pulgadas*

<b>Calificativos en perforación de 3 pulgadas</b>		
Tipo de explosivo	Calificativo por consumo específico	Calificativo otras variables
ANFO	Muy bueno	Medio alto
Emulsen 1000x	Bueno	Medio
Anemul20/80	Bueno	Medio
Emulsen 5000x	Bueno	Medio
Emulsen 720	Bueno	Medio

**Fuente:** Elaboración propia.

Al analizar la tabla de calificativos de los diferentes explosivos con perforación de 4 pulgadas, se observa que el explosivo ANFO presenta un consumo específico dentro de un intervalo bajo, lo cual su calificativo es muy bueno. No obstante, al evaluar otras variables, se determina como medio alto.

En cuanto los demás explosivos analizados, los valores de consumo específico se mantienen en criterios similares.

**Tabla 33.** *Calificativos de explosivos en perforación de 4 pulgadas*

<b>Calificativos en perforación de 4 pulgadas</b>		
Tipo de explosivo	Calificativo por consumo específico	Calificativo otras variables
ANFO	Muy bueno	Medio alto
Emulsen 1000x	Bueno	Medio
Anemul20/80	Bueno	Medio
Emulsen 5000x	Bueno	Medio
Emulsen 720	Bueno	Medio

**Fuente:** Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Para concluir el análisis de consumo específico de explosivos para voladuras a cielo abierto en bancos de geometría constante, se logró evaluar mediante la aplicación del método de Konya con los parámetros claves como la densidad del explosivo, tipo de roca y tipo de explosivos. El análisis se realizó con perforaciones de dos, tres y cuatro pulgadas permitiendo establecer el burden, espaciamiento, longitud de barreno, carga de explosivo y el volumen de roca fragmentada, el cual se influyó directamente el diámetro de perforación.

Los resultados obtenidos en la aplicación de diferentes explosivos comerciales, demostrando una rentabilidad constante. Destacando el explosivo ANFO como eficiente en el consumo específico, depende del diseño en voladuras.

La utilización de tablas sistematizadas permitió una facilidad de comprensión de resultados.

Se comprobó que mantener variables constantes como la formación geológica y modificar parámetros como el diámetro de perforación y el tipo de explosivo contribuyen significativamente a identificar configuraciones más eficientes para las operaciones de voladura.

El método de Konya constituye una herramienta técnica importante para el diseño y optimización de voladuras a cielo abierto, ya que permite mejorar la planificación de perforación y carga explosiva, reduciendo costos operativos y aumentando la eficiencia en la fragmentación de roca.

## **RECOMENDACIONES**

Mediante las bases del proyecto investigativo, según los resultados y conclusiones, se plantea las siguientes recomendaciones:

- Realizar proyecciones adicionales con los diferentes métodos de voladura a cielo abierto que son confiables, con el fin de ampliar el análisis de consumo específico para garantizar decisiones acertadas en su planificación y gestión.
  
- En función de los resultados obtenidos y las condiciones, se reconoce que el uso del explosivo ANFO en los diferentes tipos de diámetro de perforación por lo que se recomienda su utilización en proyectos para la fragmentación del material como base esencial la optimización económica en cada operación.

## BIBLIOGRAFIA

- Herrera Herbert, J. (2018). La explotación por el método de corta minera. In La explotación por el método de corta minera. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. <https://doi.org/10.20868/upm.book.70245>.
- Herrera Herbert, J., & Pla Ortiz de Urbina, F. (2006). Métodos de Minería a Cielo Abierto. In Métodos de Minería a Cielo Abierto. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. <https://doi.org/10.20868/upm.book.10675>.
- Puma Zaruma, K., & Llerena Estrella, J. (2021). Optimización del proceso de perforación y voladura en una mina dedicada a la extracción metálica a pequeña escala en la comunidad La fortuna Ponce Enríquez.
- Recalde, E., & Morante, F. (2007). Metodología de planificación minera a corto plazo y diseño minero a mediano plazo en la cantera Pifo.
- Centro Ecuatoriano de eficiencia de recursos. (2022). Guía de minas y canteras de material pétreo.
- González Dota, B. (2022). Optimización de los procesos de perforación y voladura en la Sociedad minera Nueva Rojas, concesión Bella Rica, Camilo Ponce Enríquez-Azuay.
- Pacheco Sanmartín, J. (2022). Propuesta de técnica de voladura controlada de precorte para talud final, caso de estudio cantera Luzagui, Daule-Guayas.
- Cervantes Choud, P. (2016). Modelización de la planificación de producción minera no metálica a cielo abierto.
- Herrera Herbert, J. (2007). Diseño de Explotaciones de Cantera. In Diseño de Explotaciones de Cantera. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. <https://doi.org/10.20868/upm.book.21839>
- Pérez Jiménez, D. (2020). Desarrollo de los procesos mineros en cielo abierto para su optimización.
- Herrera Herbert, J., & Pla Ortiz de Urbina, F. (2022). Métodos de Minería a Cielo Abierto. In Métodos de Minería a Cielo Abierto. Universidad Politécnica de

Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía.  
<https://doi.org/10.20868/upm.book.10675>

- Sastre Pascual, J. (2007). Los minerales industriales. El recorrido de los minerales.
- Condori, W. (2023). Optimización de costos de perforación y voladura empleando el corte Konya en la galería 260SE de la unidad minera Pomasi-CIEMSA.
- Díaz Martínez, J., Guarín Aragón, M., & Jiménez Builes, J. (2012). Análisis y diseño de la operación de perforación y voladuras en minería de superficie empleando el enfoque de la programación estructurada (Vol. 32).
- Romero Quizhpi, J., Haro Guerrero, V., & Proaño Cadena, G. (n.d.). Análisis de voladura en roca lutita de la cantera de agregados San Luis en la ciudad de Guayaquil.
- Cánovas, M., & Trigueros, E. (2021). Una revisión de los factores que afectan a la generación de vibraciones y modelos predictivos empíricos. *Journal of Mining Engineering and Research*, 3(1), 7–19.  
<https://doi.org/10.35624/jminer2021.01.02>
- Charro, D., Mideros Morab, A., & Gaudry, K. H. (2020). Economía circular desde competencia de aridos y petreos en los Gad municipales en Ecuador.
- Hidalgo, T., López, I., Pincheira, J., & Troncoso, A. (n.d.). Minería a cielo abierto: Métodos de tronadura.