

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

OPTIMIZACIÓN DE LA VOLADURA EN LA CONCESIÓN MINERA
"PERLA DEL PACÍFICO" UBICADA EN EL CANTÓN GENERAL
VILLAMIL.

PROYECTO INTEGRADOR

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN MINAS

Presentado por:

JULIO JORDANO BURBANO PUERTAS

MANUEL ALEJANDRO MEZA VELIZ

GUAYAQUIL-ECUADOR

2020

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedicamos a nuestros padres, que nos han apoyado durante toda nuestra carrera.

Julio Jordano Burbano Puertas

Manuel Alejandro Meza Veliz

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento a nuestros profesores y tutores por ser una guía en nuestra formación profesional.

Julio Jordano Burbano Puertas

Manuel Alejandro Meza Veliz

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Julio Jordano Burbano Puertas* y *Manuel Alejandro Meza Veliz* damos nuestro consentimiento para que la ESPOC realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Julio Jordano Burbano
Puertas

Manuel Alejandro Meza
Veliz

EVALUADORES

.....
Samantha Tamara Jiménez Oyola

PROFESOR CO-TUTOR

.....
Jesús Washington Crespo Quintero

PROFESOR TUTOR

.....
Samantha Tamara Jiménez Oyola

PROFESOR DE LA MATERIA

RESUMEN

Una voladura óptima debe asegurar un tamaño adecuado en la fragmentación de la roca. Para esto, es importante considerar algunos factores, como los parámetros de la malla de perforación y la cantidad de explosivos necesarios para volar una cantidad específica de material, lo cual se conoce como consumo específico. Actualmente, en la concesión minera "Perla del Pacífico" se extrae piedra caliza mediante perforación y voladura con una malla rectangular y un consumo específico de explosivos deficiente, lo que provoca roca con sobre tamaño y aumenta los costos generales de la voladura.

Con el fin de mejorar el resultado final de la voladura, este trabajo contempló tres fases, comenzando con la revisión bibliográfica y la recolección de información disponible. En una segunda etapa se utilizó la metodología propuesta por López Jimeno (2003), para bancos de pequeñas dimensiones, y finalmente, se analizó e interpretó los resultados obtenidos con la metodología propuesta.

Como resultados se obtuvo que el consumo específico optimizado es de 0,1412 kg/t, lo cual está dentro del rango adecuado para piedra caliza, en contraste con los 0,107 kg/t con los que la concesión trabaja actualmente. Adicional a esto, con el proceso de voladura se asegura un tamaño medio de la roca de 17,55 cm, sin cambiar la producción por turno que se tiene actualmente, lo que incide en una disminución importante de los costos generales de la voladura.

Además, este trabajo incluye un análisis de los costos generales de la operación de voladura y los costos por barreno, para las condiciones actuales y para la propuesta. Con base en los resultados se demuestra que, aunque el costo por barreno es más caro en la presente propuesta, se disminuyen los costos finales de la operación, siendo una mejor alternativa de aplicación.

Palabras Clave: Consumo específico, Perforación, Voladura, Fragmentación.

ABSTRACT

An optimal rock blasting must ensure an adequate size in the rock fragmentation. Because of this, it is important to consider some factor such as the parameters of the perforation mesh and the amount of explosives required to blow up a specific amount of material, which is known as specific consumption. Currently, in the “Perla del Pacífico” mining concession, limestone is extracted by drilling and blasting with a rectangular mesh and a poor specific consumption of explosives, which causes oversized rock and increases the general costs of blasting.

In order to improve the final result of the blast, this work was done in three phases, starting first with the bibliographic review and the collection of available information. Then, the methodology proposed by López Jimeno (2003) was used for small banks, and finally, the results obtained with the proposed methodology were analyzed and interpreted.

The methodology showed that the optimized specific consumption is 0.1412 kg / t, which is within the adequate range for limestone, in contrast to the 0.107 kg / t with which the concession currently works. In addition to this, the blasting process ensures an average rock size of 17.55 cm, without changing the current production per shift, which leads to a significant decrease in the general costs of blasting.

In addition, this work includes an analysis of the general costs of the blasting operation and the costs per hole, for the current conditions as well as the proposed. Based on the results, it is shown that, although the cost per hole is more expensive in the present proposal, the final costs of the operations are reduced, being a better application alternative.

Keywords: Specific Consumption, Drilling, Blasting, Fragmentation

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT.....	II
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VII
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas.....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Justificación del problema	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo General	2
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Marco teórico	3
1.4.1. Área de estudio	3
1.4.2. Clima.....	4
1.4.3. Geología.....	5
1.5. Descripción de las operaciones de arranque	5
1.5.1. Perforación y voladura	5
1.5.2. Teoría de perforación de roca	5
1.5.3. Métodos mecánicos de perforación	6
1.5.4. Accesorios de perforación rotopercutiva	6
1.5.5. Teoría de voladura de roca.....	7
1.5.6. Teoría de optimización de voladura	7
1.5.7. Variables controlables en la voladura	8
1.5.8. Explosivos	10
1.5.9. ANFO.....	10
1.5.10. Pentolitas.....	10
1.5.11. Fragmentación de la roca	11

CAPÍTULO 2.....	12
2. Metodología.....	12
2.1. Fase I: Obtención de datos.....	13
2.2. Fase II: Procesamiento de datos.....	13
2.2.1. Perforación y voladura	13
2.2.2. Diámetro de perforación	13
2.2.3. Variables de diseño	14
2.2.4. Consumo específico de explosivo.....	17
2.2.5. Predicción de fragmentación de la roca	17
2.3. Fase III: Análisis e interpretación de resultados	19
2.3.1. Aspectos técnicos actuales de la cantera	19
2.3.2. Parámetros para el esquema de perforación y voladura	19
2.3.2.1. Esquema de perforación.....	20
2.3.3. Análisis de fragmentación	20
2.3.4. Factores económicos.....	21
CAPÍTULO 3.....	22
3. Resultados y discusión	22
3.1. Optimización de la perforación y voladura.....	22
3.1.1. Parámetros para el esquema de perforación y voladura	22
3.1.2. Esquema de perforación	24
3.1.3. Análisis de fragmentación.....	25
3.1.4. Factores económicos	25
3.2. Análisis de resultados	27
CAPÍTULO 4.....	29
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	¡Error! Marcador no definido.
4. Conclusiones y recomendaciones.....	29
4.1. Conclusiones	29

4.2. Recomendaciones.....	30
---------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

Abreviaturas

ANFO	Ammonio Nitrate - Fuel Oil
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS	World Geodetic System
CE	Consumo específico de explosivos
PE	Perforación específica

Simbología

kg	Kilogramo
g	Gramo
t	Tonelada
m	Metro
m ³	Metro cúbico
m ²	Metro cuadrado
mlp	Metro lineal de perforación
ha	Hectárea
mm	Milímetro
pulg	Pulgada
°C	Grados Centígrados
D	Diámetro de barreno
H	Altura de banco
B	Burden
S	Espaciamiento
J	Sobreperforación
kcal	Kilocalorias

Índice de figuras

Figura 1.1. Ubicación de la concesión minera Perla del Pacífico. Fuente: (Burbano y Meza, 2020).....	3
Figura 1.2. Esquema de perforación rectangular. Fuente: (Burbano y Meza, 2020).....	9
Figura 1.3. Esquema de perforación tresbolillo. Fuente: (Burbano y Meza, 2020).....	9
Figura 2.1. Metodología general. Fuente: (Burbano y Meza, 2020).....	12
Figura 2.2 Esquema de perforación de la cantera. Fuente: (Alomalisa Maliza & Villamar Marazita, 2018).....	20
Figura 2.3 Costo de explosivos por barreno. Fuente: (Burbano y Meza, 2020).....	21
Figura 3.1 Esquema de barreno. Fuentes: (Burbano y Meza, 2020).....	24
Figura 3.2 Malla de voladura optimizada. Fuentes: (Burbano y Meza, 2020).....	24

Índice de tablas

Tabla 1.1 Datos generales de concesión minera. Fuente (Alomalisa & Villamar, 2018).....	4
Tabla 2.1 Datos de diseño para el diámetro de barreno. Fuente: López Jimeno, C. (2003).....	14
Tabla 2.2 Datos para variables de diseño de malla de perforación. Fuente: López Jimeno, C. (2003).....	14
Tabla 2.3 Datos para variables de diseño de malla de perforación. Fuente: (Alomalisa Maliza & Villamar Marazita, 2018).....	19
Tabla 2.4 Aspectos económicos de la cantera en explosivos. Fuente: (Alomalisa Maliza & Villamar Marazita, 2018).....	21
Tabla 3.1 Factores para el diseño de malla de voladura. Fuente: (Burbano y Meza, 2020).....	22
Tabla 3.2 Factores de explosivos. Fuente: (Burbano y Meza, 2020).....	23
Tabla 3.3 parámetros para la predicción de fragmentación de la roca. Fuente: (Burbano y Meza, 2020).....	25
Tabla 3.4. Costo de insumo para voladura. Fuente: (Burbano y Meza, 2020).....	25
Tabla 3.5. Costos iniciales de voladura. Fuente: Burbano y Meza (2020).....	26
Tabla 3.6 Costos optimizados de voladura. Fuente: Burbano y Meza (2020).....	26
Tabla 3.7. Costo de voladura por tonelada. Fuente: Burbano y Meza (2020).....	26
Tabla 3.8. Comparación de los datos iniciales con los optimizados Fuente: (Burbano y Meza, 2020).....	28

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En el Ecuador, la Ley de Minería en su artículo 1 categoriza a la minería dentro de un sector estratégico, ya que esta actividad cumple con un rol importante en la economía del país. Según datos de Ministerio de Economía y Finanzas (2019) en el año 2017 la minería representó el 1,6% del PIB, además en el 2018 las explotaciones de minas y canteras representaron más del 50% de la inversión total en el país, alcanzando un valor de USD 742 millones. La actividad minera está comprendida por varias fases, que comienzan con una prospección de la materia prima de interés hasta el cierre de la concesión (Asamblea Nacional del Ecuador, 2018).

La creciente actividad minera de los últimos años ha ocasionado que exista competitividad en el mercado minero ecuatoriano, obligando a que los productores de materias primas mejoren su efectividad. Es decir, realicen la mayor cantidad de operaciones al menor costo posible asegurando siempre la calidad del resultado final. Sin embargo, minimizando el costo de perforación y voladura no siempre podría resultar en la máxima rentabilidad de un proyecto minero, por eso es necesario garantizar una fragmentación óptima de la roca, considerando el balance entre el sobredimensionamiento del proceso y una voladura deficiente (Leiva Torres, 2007)

El caso de estudio es la concesión minera llamada “Perla del Pacífico”, ubicada en el cantón Gral. Villamil. Esta concesión opera en forma de cantera, extrayendo calizas mediante métodos tradicionales de arranque mineral por medio de perforación y voladura. La fragmentación del macizo rocoso comienza realizando, de manera empírica, la malla de perforación con base en factores operativos, económicos y de producción. Mediante este proceso se alcanza una producción de $140 m^3$ por turno.

1.1. Descripción del problema

La concesión minera “Perla del Pacífico” realiza las actividades del sector primario, dedicándose a la extracción de recursos minerales no metálicos, la cual sigue una serie

de procesos mineros para su posterior comercialización. La caliza es uno de los minerales con mayor demanda en el país, debido a su uso en la industria de la construcción, la cual ha tenido un incremento significativo en los últimos años.

En la cantera “Perla del Pacífico” se realizan las operaciones mineras de forma empírica, ocasionando errores en los procesos para la extracción de caliza, lo que genera un consumo específico de explosivo de aproximadamente 0.107 kg/t , acorde a lo reportado en la tesis realizada por Alomalisa y Villamar (2018). Además, cuando se realiza la voladura en el banco de explotación, se producen partes del mineral con sobretamaño en el 90% de la voladura, esto se traduce en costos para la empresa, asociados al personal extra para realizar el rompimiento manual del mineral que no cumple con la granulometría adecuada. Un consumo específico bajo y una voladura mal diseñada influye directamente en los costos operativos del proceso extractivo y encarece drásticamente los gastos de producción.

1.2. Justificación del problema

Con base en la problemática detectada en la concesión minera Perla del Pacífico, este trabajo tiene la finalidad de realizar un estudio técnico del proceso de voladura para optimizar el consumo específico de explosivos (CE). Además, se busca generar rocas con una granulometría no mayor a 7 pulgadas, mediante un método de predicción de fragmentación, con la finalidad a reducir los gastos de personal extra asociados a una mala fragmentación.

En un trabajo realizado previamente en la concesión minera Perla del Pacífico, los autores Alomalisa y Villamar (2018) sugirieron un sistema alternativo de explotación, a partir de un estudio técnico y económico en la concesión minera. Uno de los parámetros importantes de esta propuesta fue la optimización del consumo específico de explosivos en la cantera. Debido a esto, el presente trabajo aborda esta problemática y presenta el análisis del proceso de voladura de cara a su optimización.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Plantear la optimización de la voladura en la concesión minera “Perla del Pacífico” ubicada en el Cantón General Villamil, mediante un estudio técnico para el mejoramiento del consumo específico de explosivos.

1.3.2. Objetivos específicos

- Establecer el consumo específico de explosivos que se tiene inicialmente en la cantera, para el mejoramiento de la fragmentación de la roca.
- Evaluar los parámetros de voladura para la modificación de la granulometría óptima que permita la reducción de los costos operativos.
- Demostrar que la producción por turno se mantiene de acuerdo con el proceso de optimización planteado.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Área de estudio

La concesión minera “Perla del pacífico” se encuentra ubicada en la comuna San Antonio del cantón General Villamil – Playas de la provincia del Guayas – Ecuador. En la **Figura 1.1** y **Tabla 1.1** se presenta información de la concesión.

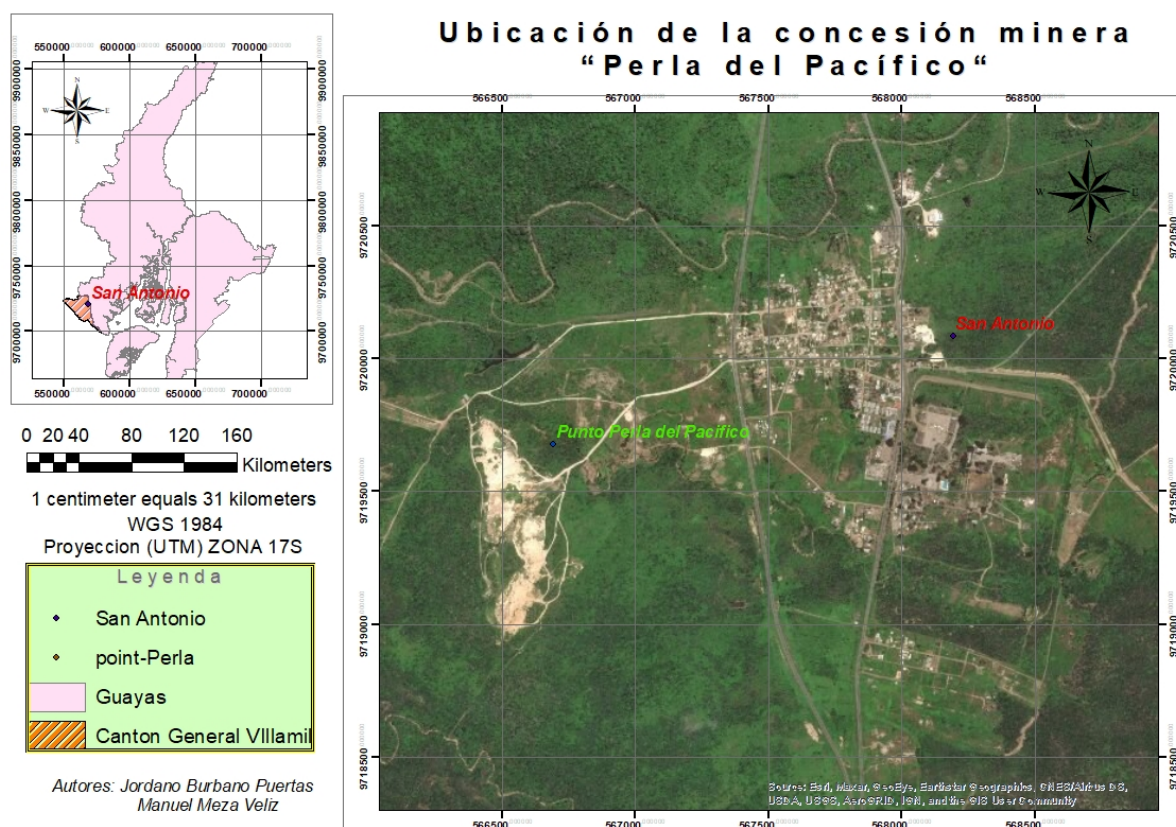


Figura 1.1. Ubicación de la concesión minera Perla del Pacífico. Fuente: Burbano y Meza (2020)

Tabla 1.1 Datos generales de concesión minera. Fuente: Alomalisa y Villamar (2018)

Código Catastral	63	Fecha de inscripción	18/07/2001
Titular	Gaibor Solorzano Jaime Cristóbal	Mineral de interés	Caliza
Provincia	Guayas	Tipo de solicitud	Concesión minera
Cantón	Playas	Fase de recurso	Exploración- Explotación
Plazo (meses)	254	Superficie	2.48 ha
Casillero judicial	3396	Estado actual	Inscrita
Coord. X	566691	Coord. Y	9719678
Sistema de referencia: WGS84 UTM 17S			

Para este trabajo se tomó como referencia el proyecto integrador “Optimización de explotación de caliza en la concesión minera “Perla del Pacífico” ubicada en la comuna San Antonio, cantón General Villamil, provincia del Guayas – Ecuador” realizado en la misma concesión. En el citado proyecto los autores proponen una voladura convencional para trabajos realizados a cielo abierto usando explosivos. Actualmente, en la cantera se trabaja con un consumo específico de 0.107 kg/t , el mismo que se subirá a un índice mayor entre $0,12 \text{ kg/t}$ y $0,16 \text{ kg/t}$, que teóricamente sería el ideal para el tipo de roca existente en el área de estudio. Esto se hará asegurando una granulometría óptima evitando el sobretamaño, ya que actualmente, cuando se hace la voladura, se genera mineral que no cumple con el tamaño de venta y se lo tiene que romper manualmente.

1.4.2. Clima

El clima de la zona está clasificado como semihúmedo, con una variación pluviométrica anual de 500 a 1.000 mm. recogidos de diciembre a mayo. La estación seca, en este sector de la costa, es muy marcada. Las temperaturas medias superan los $24 \text{ }^\circ\text{C}$ por las noches y se registran temperaturas de hasta 20°C en el verano, mientras

que puede alcanzar los 34°C, en el invierno. La vegetación en este sector esta constituida por un bosque seco con numerosos "Ceibos" (Moreira Moran, 2019).

1.4.3. Geología

La zona de estudio está constituida por materiales de la Formación San Eduardo. Esta formación (Eoceno Temprano – Eoceno Medio) es parte de la Cordillera Chongón Colonche, sobreyace a la formación Guayaquil (Cretácico) y subyace a la formación Calizas Las Delicias (Eoceno Tardío). Las cuatro unidades estratigráficas que conforman la formación San Eduardo se diferencian por el contenido de carbonato de calcio, características litológicas, paleontológicas, petrográficas y bioestratigrafías. Se identificaron tres afloramientos en una superficie de cinco hectáreas; las litologías predominantes son calizas brechoides con recristalizaciones de calcita, caliza margosa, seguido de nódulos de chert y escasa arcillolita (Moreira Moran, 2019).

1.5. Descripción de las operaciones de arranque

Las operaciones de arranque habituales que se realizan en una cantera para la extracción de minerales son la perforación y voladura. La planificación de estas operaciones tiene que estar estrechamente ligada con la demanda que tiene la cantera (Piéro Vera, 2017).

1.5.1. Perforación y voladura

La perforación y voladura es una técnica que se aplica para la extracción de rocas duras con finalidad de arrancar el material del macizo rocoso. Este método es aplicado en diferentes tipos de explotación tanto en el campo de la minería como en obras civiles (Rudy Milton, 2015).

1.5.2. Teoría de perforación de roca

La perforación es la operación inicial que se ejecuta para el desprendimiento de la roca, realizando agujeros con una distribución técnica llamándose a esto una malla de perforación, estos agujeros serán cargados posteriormente con explosivos, que mediante su detonación transfieren la energía que se necesita para la fragmentación de la roca por la expansión de la onda que se genera (Bernaola Alonso, Castilla Gomez, & Herrera Herbert, 2013).

1.5.3. Métodos mecánicos de perforación

Se abarcan dos tipos de métodos; perforación por rotación y perforación por rotopercusión, lo que estrechamente ligados por la forma en la que operan. En la rotación se aglomeran todos métodos que conllevan la fragmentación de la roca por compresión y corte con la ayuda de un empuje, debido a esto, la rotura de la roca se da por cizallamiento. Por otro lado, la rotopercusión, es la forma de perforación donde la fragmentación del macizo rocoso se da por el impacto sobre el mismo y del principio de rotación antes mencionado (Bernaola Alonso, Castilla Gomez, & Herrera Herbert, 2013).

1.5.4. Accesorios de perforación rotopercutiva

En la ejecución para los trabajos de perforación se pueden realizar diferentes tipos de combinación con los accesorios disponibles en el mercado, los factores a tomar en cuenta para la elección los implementos de perforación son: diámetro de barrenos, longitud de barreno, características generales de la roca, especificaciones de la máquina de perforación y disponibilidad en el mercado (Aules Almeida, 2013).

Tipo de roscas. – la finalidad de las roscas es unir distintos accesorios como las culatas, manguitos, varillas y bocas en la perforación. La unión de los accesorios tiene que realizarse de la manera más eficiente posible para alcanzar una mejor transmisión de energía. Los principales tipos de roscas son:

- Rosca R (Soga)
- Rosca T
- Rosca C
- Rosca GD o HI

Adaptadores. – Son aquellos elementos que mantienen estática la máquina de perforación con la finalidad de reducir la pérdida de energía por el impacto.

Varillaje. – Es el elemento que da la longitud del barreno para realizar el alcance requerido en la perforación.

Manguitos. – Son implementos que sirven para la unión de varillas para alcanzar la distancia deseada, tratando de no perder la energía que se transmite a través de ellos.

Broca. – Es el elemento que estará que transmitirá la energía de impacto sobre el macizo rocoso para la perforación.

1.5.5. Teoría de voladura de roca

Los explosivos son sustancias químicas inestables que cuando se ven afectados por factores externos, producen una reacción que resulta en una estabilidad de los compuestos.

En principio, la energía química se transforma en energía cinética en forma de onda expansiva. La clave de la importancia de un explosivo es determinada por la capacidad de liberar ondas en el menor tiempo posible.

Una columna de explosivos son todas las sustancias explosivas y componentes que conforman el interior de un barreno, la cual está construida por tres elementos básicos:

Carga de Fondo; esta es la carga explosiva que se encuentra en la parte más baja del barreno, y que necesita hacer el trabajo mecánico más grande, ya que ésta tiene que fragmentar el material al pie del banco y formar uno nuevo. Según el Laboratorio Oficial Madariaga (2017), se requiere alrededor del triple de energía en el fondo del barreno que en la columna.

Retacado; parte de la columna que mantiene a la carga confinada dentro del barreno, la cual está constituida por material inerte y no explosivo. El retacado por temas de seguridad reduce las proyecciones de material fragmentado.

Carga de Columna; está ubicada entre el retacado y la carga de fondo. Tiene como característica principal la expansión y el desplazamiento del material. En minas a cielo abierto, es muy utilizado el ANFO para condiciones secas de perforación.

1.5.6. Teoría de optimización de voladura

Con los estudios técnicos realizados a lo largo del tiempo, se llegaron a resultados en los que la distribución geométrica de la malla de perforación influye considerablemente, dando un mejor repartimiento en la liberación de energía por el explosivo y la facilidad en el método de encendido (López Jimeno, 2003).

1.5.7. Variables controlables en la voladura

Los factores que intervienen para el diseño de una malla de voladura se agrupan en tres grupos, y son las siguientes:

- De dimensionamiento
- Según las características de los explosivos
- Según periodo de retardo y orden de iniciación

Diámetro de barreno (D). – Para su elección de este se deben considerar los siguientes parámetros.

- Características el macizo rocoso
- Grado de fragmentación requerido
- Altura del banco
- Dimensiones del equipo de carga

Altura del banco (H). - Esta medida se encuentra estrechamente condicionada por varios componentes, y tiene gran influencia en los resultados de las voladuras. Existe una relación entre la altura del banco y el burden (H/B), la cual nos indica que, si este valor es muy grande, se facilita el desplazamiento y deformación de la roca. La relación óptima entre H y B es de tres (López Jimeno, 2003).

Inclinación de barrenos. – la utilización de la perforación inclinada tiene varias ventajas como desventajas, que tienen que ser evaluados para cada caso en particular. Algunas de las ventajas son las siguientes:

- Mejor fragmentación, esponjamiento y deslizamiento.
- Taludes más sanos y seguros
- Menor sobreperforación y mejor beneficio de la energía de los explosivos
- Menor carga específica
- Mayor rendimiento por volumen arrancado

Entre las desventajas tenemos:

- Aumento la longitud de la perforación
- Dificulta la posición de las máquinas para su perforación
- Problema en la carga de explosivos
- Mayor desgaste de las brocas y varillaje

Sobreperforación (J). - Es la distancia adicional que se necesita para la perforación con la finalidad de lograr una mejor fragmentación y rotura de la roca.

Burden (B) y espaciamento (S). - estas variables dependerán las propiedades de la roca, diámetro de perforación, el explosivo a utilizarse, altura del banco y fragmentación deseada.

Esquema de perforación. - Para las voladuras a cielo abierto se utilizan esquemas cuadrados y rectángulos de manera habitual, siendo el más efectivo el sistema al tresbolillo que es formando triángulos equiláteros.

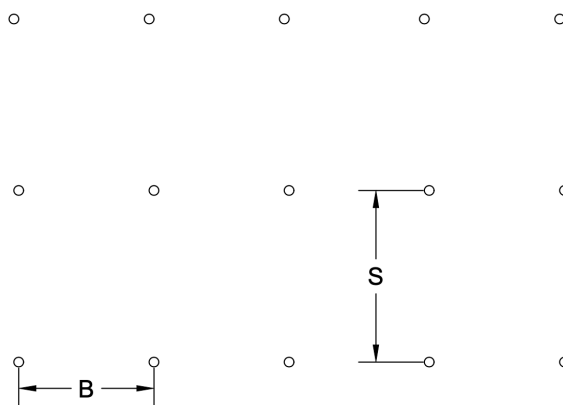


Figura 1.2. Esquema de perforación rectangular. Fuente: Burbano y Meza (2020)

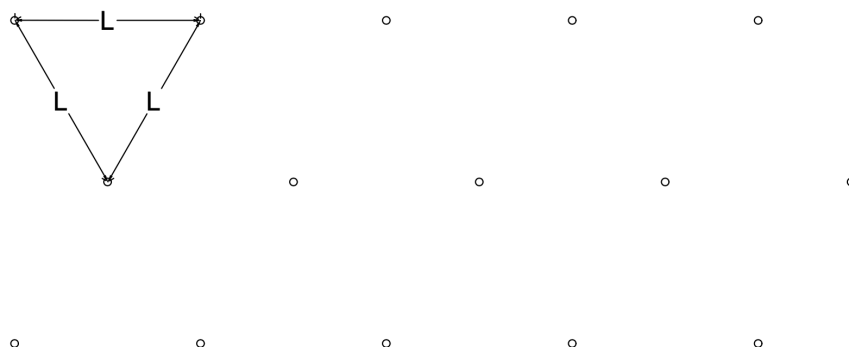


Figura 1.3. Esquema de perforación tresbolillo. Fuente: Burbano y Meza (2020)

1.5.8. Explosivos

La elección de los explosivos que se van a utilizar requiere un análisis muy minucioso de las propiedades de la roca a fragmentar, y de los tipos de explosivos disponibles en el mercado.

Consumo específico de explosivos (CE). – Es la cantidad de explosivos necesaria para fragmentar 1 m^3 o 1 tonelada de roca. Un alto consumo de explosivos genera una buena fragmentación, pero genera mayores costos en explosivos (López Jimeno, 2003).

1.5.9. ANFO

El nitrato de amonio (NH_4NO_3) se mezcla con cualquier combustible para producir un agente explosivo. El ANFO en particular es la mezcla de la sustancia con gas-oil el mismo que en Ecuador tiene como nombre comercial diésel. Este combustible es muy usado como detonante ya que tiene un punto de volatilidad más bajo, haciendo la mezcla con diésel más segura ante el riesgo de explosión.

El agua juega un papel muy importante en el uso del ANFO, porque una de las desventajas de este explosivo es su uso en medios húmedos, pues este pierde una gran cantidad de calor para la evaporización del agua y rebaja sustancialmente la potencia explosiva. En el **Anexo A** se encuentra un gráfico que muestra la caída en la velocidad de detonación a medida que aumenta el porcentaje de agua, ya que este explosivo tiene características muy pobres, solo sirve para la voladura de rocas consideradas blandas y su aplicación más frecuente es como carga de columna en trabajos a cielo abierto (Contreras & Santamaria Arias, 1998).

1.5.10. Pentolitas

Las pentolitas son un tipo de explosivo hecho de una mezcla de Pentrita y TNT al 50% en peso caracterizado por tener una alta densidad, velocidad y presión de detonación. Debido a esto, se utilizan principalmente en obras mineras como booster, es decir, para iniciar explosivos y agentes de voladuras en barrenos.

Según López Jimeno (2003) los booster se deberían colocar lo más al fondo de la perforación. Además, indica que en barrenos menores a 10 m con poca presencia de

agua, se podría hacer la detonación solo con un iniciador y la pentolita sería la carga de fondo dentro de la perforación.

Como ventajas en la utilización de las pentolitas, Contreras & Santamaria Arias, (1998) señala:

- Alta sensibilidad a los impactos y rocas
- Alta resistencia mecánica
- Ninguna alteración con el tiempo
- Fácil manejo y posicionamiento

1.5.11. Fragmentación de la roca

En la industria minera, la fragmentación de la roca es uno de los factores que influye en el rendimiento de la producción, ya que la granulometría limita los equipos de arranque y de conminución en la planta de procesamiento mineral. Es así, que lograr una fragmentación óptima para los procesos posteriores a la voladura en función de los parámetros de diseño de la malla de perforación, resulta clave para el éxito en las operaciones generales (Mundaca Muñoz, 2019).

Ecuación de Kuznetsov. - Una forma para predecir la fragmentación de una voladura es mediante la ecuación presentada por V.M. Kuznetzov en 1971, la cual estima el tamaño del tamiz por el cual pasa el 50% de la roca fracturada. Este método resulta muy útil pues toma datos de la roca, del volumen volado, de la cantidad de explosivos y de la potencia destructiva de estos.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este proyecto se expone en la **Figura 2.1**, en la cual se explica mediante un diagrama de flujo dividido en tres fases:

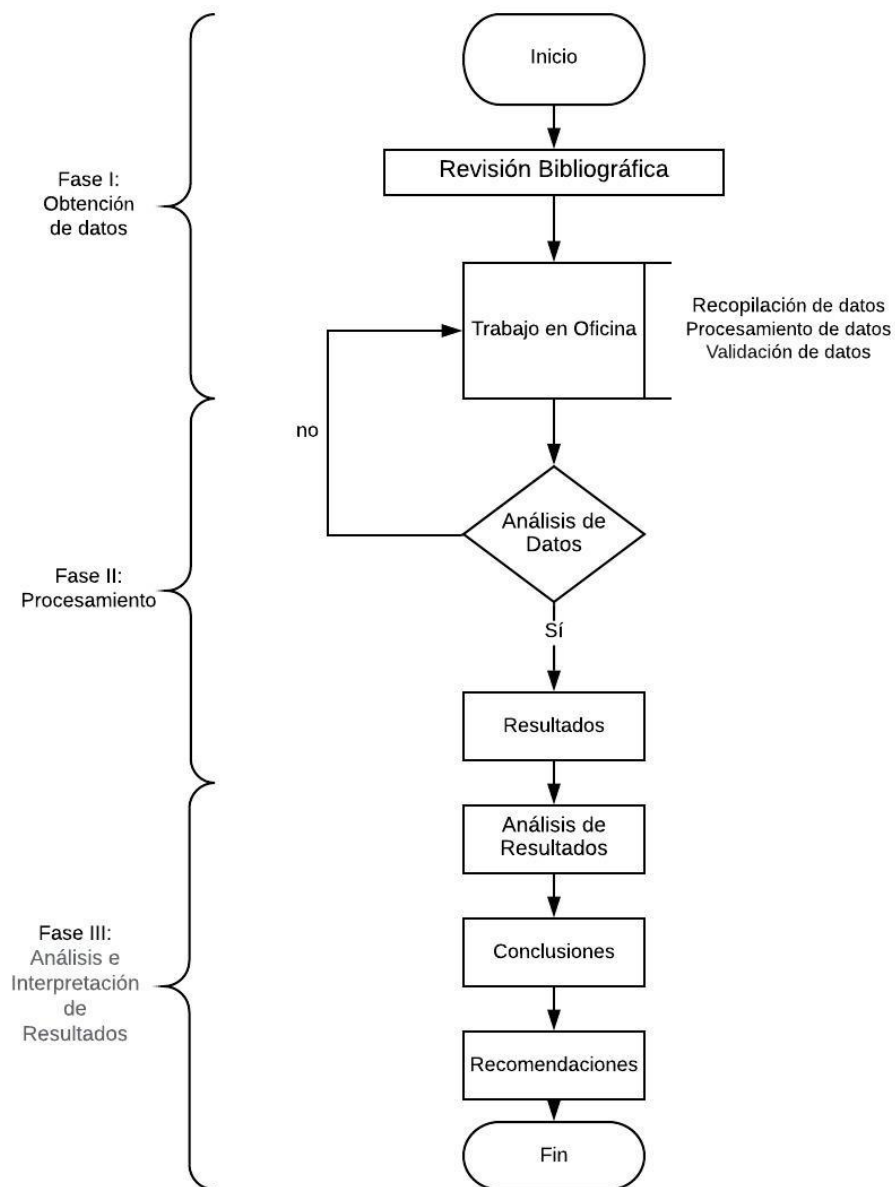


Figura 2.1. Metodología general. Fuente: Burbano y Meza (2020)

2.1. Fase I: Obtención de datos

En esta primera fase se revisó los documentos referentes al tema de diseño de voladuras, usando principalmente el Manual de Perforación y Voladura de Rocas escrito por López Jimeno, el cual fue hecho para el gobierno español a través del Instituto Tecnológico Geominero de España, y que sirve como guía para una correcta voladura de rocas.

Para la obtención de datos de los explosivos se investigó el mercado local, debido a que las características de los productos pueden variar, así como su disponibilidad. EXPLOCEN C.A. es una empresa ecuatoriana que tiene documentado los diferentes tipos de explosivos y accesorios con sus respectivas propiedades y precios.

Con la finalidad de predecir correctamente el tamaño medio de la roca después de la voladura se encontraron varios métodos, de los cuales elegimos la ecuación de Kuznetsov por su simplicidad y porque su efectividad ha sido probada en diferentes proyectos.

2.2. Fase II: Procesamiento de datos

Fue en la Fase II de Procesamiento, donde se obtuvieron los resultados en base al marco teórico y lo analizado de la Fase I. En esta fase se obtiene el consumo específico y el tamaño de la fragmentación de la roca.

2.2.1. Perforación y voladura

Teniendo como referencia la metodología que emplea López Jimeno C. (2003) para el cálculo de la voladura se toman en cuenta los siguientes parámetros:

2.2.2. Diámetro de perforación

La selección de este parámetro depende del ritmo de excavación y de la resistencia de la roca, como se lo indica en la **Tabla 2.1**.

Tabla 2.1 Datos de diseño para el diámetro de barreno. Fuente: López Jimeno, C. (2003)

Diámetro del barreno (mm)	Producción horaria media (m^3b/h)	
	Roca blanda – media < 120	Roca dura – muy dura < 120
65	190	60
89	250	110
150	550	270

Para este análisis se toma como dato el diámetro de perforación de la maquinaria utilizada en la cantera.

2.2.3. Variables de diseño

Estos son los parámetros que indican qué forma va a tener el esquema de perforación y junto al diámetro son los puntos de partida para el análisis de la optimización de cualquier voladura en una operación minera a cielo abierto. En la **Tabla 2.2** se muestra una tabla de las variables de diseño con respecto a la resistencia a la compresión simple de la roca en función del diámetro.

Tabla 2.2 Datos para variables de diseño de malla de perforación. Fuente: López Jimeno, C. (2003)

Variables de diseño	Resistencia a la compresión simple (MPa)			
	Blanda < 70	Media 70 - 120	Dura 120 - 180	Muy dura >180
Burden (B)	39 D	37 D	35 D	33 D
Espaciamiento (S)	51 D	47 D	43 D	38 D
Retacado (T)	35 D	34 D	32 D	30 D
Sobreperforación (J)	10 D	11 D	12 D	12 D

Altura del banco

La altura del banco (H) está dada generalmente en función de equipo de carga y es un dato del problema con el que se debe trabajar. En este caso de estudio, el parámetro H viene dada por la altura de los taludes en la cantera.

Longitud del Taladro

$$L = \frac{H}{\cos\beta} + \left(1 - \frac{\beta}{100}\right) * J \quad (2.1)$$

Donde:

L = Longitud del taladro, m.

B = Burden, m.

H = Altura del banco, m.

β = Ángulo de inclinación del taladro, grados.

Con la finalidad de obtener el consumo específico (CE) óptimo se procesa a la obtención de una serie de parámetros, que son indispensables para conseguirlo.

Perforación específica

$$PE = \left(1 + \frac{J}{H+J}\right) * \left(\frac{1}{B*S}\right) \quad (2.2)$$

Donde:

PE = Perforación específica

Número de perforaciones

$$\#P = \left(\frac{\text{Producción en } m^3}{H*B*S}\right) \quad (2.3)$$

Donde:

$\#P$ = Número de perforaciones

Volumen real explotado

Este valor indica la cantidad real, en metros cúbicos, que se produce por la voladura y es la relación entre la perforación específica obtenida en la ecuación (2.2) y la longitud del taladro L sacada de la ecuación (2.1), por el número de perforaciones $\#P$ que se obtiene de la ecuación (2.3).

$$V = \left(\frac{PE}{L*(\#P)}\right) \quad (2.4)$$

Donde:

V = Volumen real explotado m^3 .

$$V_t = V * \rho \quad (2.5)$$

Donde:

V_t = Toneladas reales de material explotado

ρ = Densidad de la roca

Longitud de carga de fondo

$$l_f = \left(\frac{\left(\left(\frac{D}{2} * 2,54 \right)^2 * H_a * 100 * \pi \right) / 1000}{\left(\frac{\Phi}{2} * 2,54 \right)^2 * L_e * 2,54 * \pi / 1000} + 2 \right) * \left(\frac{L_e * 2,54}{100} \right) \quad (2.6)$$

Donde:

H_a = Columna con presencia de agua, m

Φ = Diámetro de la carga de fondo

Como no se tiene presencia de agua en el macizo rocoso, la fórmula (2.6) se simplifica a la siguiente:

$$l_f = (2) * \left(\frac{L_B * 2,54}{100} \right) \quad (2.7)$$

Donde:

L_B = Longitud de detonante o booster en pulgadas.

Carga de fondo

Se utiliza l_f de la ecuación (2.7) para obtener la carga de columna CF.

$$CF = \left(\frac{D}{2} * 2,54 \right)^2 * \pi * l_f * (0,1) * \rho_B \quad (2.8)$$

ρ_B = Densidad de la carga de fondo

Longitud de carga columna

$$l_c = H + J - T - l_f \quad (2.9)$$

Carga Columna

Se utiliza l_c de la ecuación (2.9) para obtener la carga de columna CC.

$$CC = \left(\frac{D}{2} * 2,54\right)^2 * \pi * l_c * (0,1) * \rho_{Ex} \quad (2.10)$$

ρ_{Ex} = Densidad del explosivo

Una vez adquiridos los factores anteriormente, se procese a calcular el consumo explosivo.

2.2.4. Consumo específico de explosivo

El consumo específico de explosivos se obtiene considerando los valores tomados de las ecuaciones (2.8), (2.10), (2.3) y (2.4). Este es el valor que se va a optimizar, y para esto el consumo actual deberá subir de 0.107 kg/t hacia un rango de entre 0.12 kg/t y 0.16 kg/t siendo estos valores los adecuados para un tipo de roca de resistencia media según la teoría de López Jimeno (2003).

$$CE = \frac{(CC+CF)*(\#P)}{V_t} \quad (2.11)$$

Donde:

CE = Consumo específico de explosivo, kg/t

2.2.5. Predicción de fragmentación de la roca

Como siguiente punto se desea lograr la reducción de la granulometría inicial, para aquello se va a predecir cuál es la fragmentación de la roca con respecto al esquema planteado. La metodología a aplicar para la predicción del tamaño medio de la roca volada ($X_{(50)}$) fue presentada por Kuznetsov (1973), la cual se muestra en la ecuación (2.12):

$$X_{(50)} = A * \left(\frac{Q^{1/6}}{K^{0,8}}\right) * \left(\frac{115}{REE}\right)^{19/30} \quad (2.12)$$

Donde:

$X_{(50)}$ = Tamaño de medio de roca fragmentada (*cm*)

A = Factor de roca

$Q = CC + CF$ = Masa de explosivo por taladro (*Kg*)

K = Factor de potencia (*Kg/m³*)

REE = Potencia relativa de ANFO en peso

Fuente: Michael Adebola, Ogbodo, & Peter (2016)

Para la obtención del parámetro A se utilizó el índice de volabilidad de Lilly "BI" de la siguiente manera:

$$A = 0,12 * BI \quad (2.13)$$

El índice de volabilidad BI (Blastability Index) se formula de la siguiente manera:

$$BI = 0,5 * (RMD + JPS + JPO + SGI + H') \quad (2.14)$$

Donde:

RMD : Parámetro que clasifica la descripción del macizo rocoso como quebradizo, fracturado o masivo

JPS : Parámetro que representa ponderadamente el espaciamiento de los planos de diaclasas

JPO : Parámetro que asigna un factor según la orientación de los planos de diaclasas

SGI : Influencia de la gravedad específica = $(25 * SG) - 50$

SG : Densidad del macizo rocoso (*t/m³*)

H' : Dureza

Fuente: (Mundaca Muñoz, 2019)

Estos valores se presentan en el **Anexo B**, y fueron asumidos debido a la falta de información de los parámetros en el sitio. Sin embargo, se sabe que la roca es piedra caliza y algunas características son conocidas.

Para obtener el factor de potencia K se utiliza la ecuación (2.15) (Vilca Barrantes, 2019).

$$K = \frac{(Kg) \text{ de explosivos}}{t \text{ o } m^3 \text{ de material volado}} \quad (2.15)$$

Finalmente REE viene dado por la ecuación (2.16) (Rincón Flórez, Fonseca Becerra, & Carvajal Medina, 2015).

$$REE = \frac{PAP \text{ explosivo en cuestión}}{PAP \text{ del explosivo patrón}} \quad (2.16)$$

PAP = presión absoluta por peso, (cal/g)

2.3. Fase III: Análisis e interpretación de resultados

En la Fase III del proyecto se analiza los resultados obtenidos por Alomalisa y Villamar (2018), con la finalidad de realizar una comparación de costos considerando los cambios de los parámetros de diseño y el tamaño medio de la roca volada obtenidos en la Fase II de esta investigación. Con esto, se busca analizar el impacto económico de la fragmentación actual en comparación con lo propuesto en esta investigación.

2.3.1. Aspectos técnicos actuales de la cantera

2.3.2. Parámetros para el esquema de perforación y voladura

A continuación, en la **Tabla 2.3** se muestran los parámetros de la malla de perforación actuales, los cuales se van a modificar para poder obtener un diagrama de perforación diferente.

Tabla 2.3 Datos para variables de diseño de malla de perforación. Fuente: Alomalisa Maliza & Villamar Marazita (2018)

Parámetros		Unidad
Altura del banco	2,1	m
Área	72	m ²
# Perforaciones	26	----
Diámetro de perforación	1 1/2	pulg.
Burden	1,5	m
Espaciamiento	1,9	m
Taco	0,4	m
Profundidad total	2,4	m

Explosivo/Riodín		
Diámetro	7/8	pulg.
Largo	7	pulg.
Densidad	1,3	g/m ³
Explosivo/ANFO		
Densidad	0,8	g/cm ³
Carga Específica		
<i>CE</i>	0,291	kg/m ³

2.3.2.1. Esquema de perforación

La **Figura 2.2** muestra el esquema de perforación actual con sus respectivas medidas de burden = 1.8 m y espaciamiento = 1.5 m en una distribución rectangular. Este diagrama tiene concordancia con los parámetros indicados en la **Tabla 2.3**. Cabe recalcar que como no existe un estudio técnico en el cual basarse, este esquema no se sigue en todas las voladuras, dejando muchas irregularidades e inconsistencias en la producción.

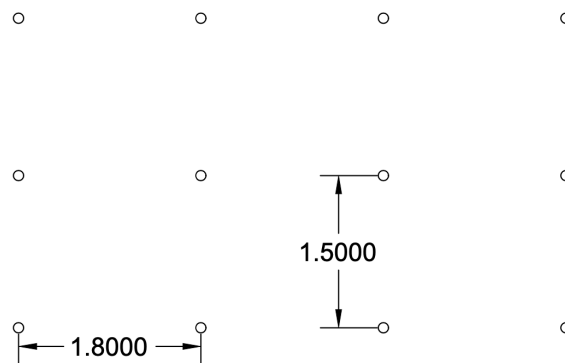


Figura 2.2 Esquema de perforación de la cantera. Fuente: Alomalisa Maliza & Villamar Marazita (2018)

2.3.3. Análisis de fragmentación

Según Alomalisa y Villamar (2018), en la cantera, cuando se rompe el banco se obtiene una fragmentación deficiente. Esto lo respaldan midiendo manualmente las

aristas de las rocas ya voladas y que superan 1 metro de longitud en el 90% de las voladuras que se analizaron.

El sobretamaño se considera a cualquier roca que después de la voladura supera el metro de longitud en cualquiera de sus lados. Esto presenta un problema porque el uso que se le puede dar a una roca de estas características es limitado y obliga a la concesión “Perla del Pacífico” a tener dos trabajadores extra dentro de su plantilla para que por medio de métodos manuales (combo y cincel) se reduzca la granulometría a una más manejable, principalmente por la maquinaria de carga.

2.3.4. Factores económicos

En la **Tabla 2.4** se presentan los aspectos económicos de la cantera. El costo de la voladura por perforación es de \$5.59 en el cual el rubro más representativo es el de la dinamita y el ANFO como se puede ver en la **Figura 2.3** con un total del 83% del costo por barreno.

Tabla 2.4 Aspectos económicos de la cantera en explosivos. Fuente: Alomalisa Maliza & Villamar Marazita (2018)

Insumo	Inicial
Mecha	\$ 0,69
Fulminante	\$ 0,27
Anfo	\$ 2,21
Dinamita	\$ 2,42
Total	\$ 5,59

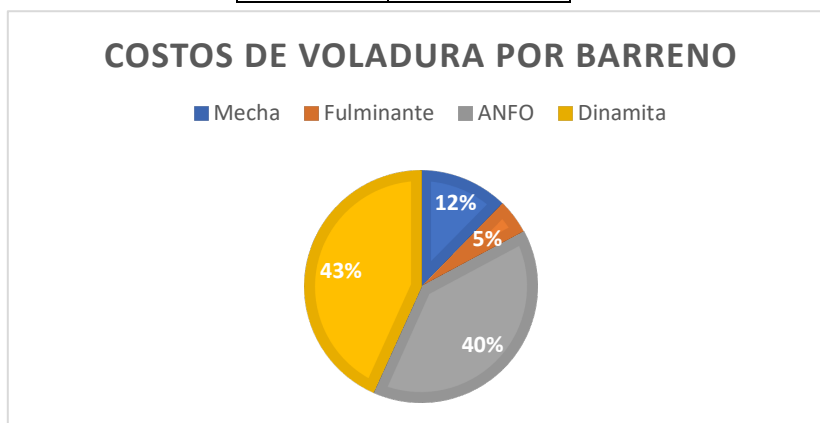


Figura 2.3 Costo de explosivos por barreno. Fuente: (Burbano y Meza, 2020)

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos mediante la metodología planteada, con la finalidad de realizar un análisis de comparativo entre el proceso de voladura para las condiciones actuales y las optimizadas propuestas en este proyecto, con base en factores técnicos. Además, se presenta el impacto económico que se genera en las operaciones de voladura.

3.1. Optimización de la perforación y voladura

Con base en la Fase II de la metodología, a continuación, se presentan los resultados del esquema de perforación, consumo específico de explosivos, fragmentación de la roca y costos de operación.

3.1.1. Parámetros para el esquema de perforación y voladura

En la **Tabla 3.1** se presentan los resultados para el diseño de la malla de voladura obtenidos por la metodología descrita en el Capítulo II.

Para la obtención de las variables de diseño, en la **Tabla 2.2** se clasifican los parámetros según la resistencia a la compresión simple de la roca, que para el caso de estudio es piedra caliza, la cual se encuentra en el rango medio.

Además, en la **Tabla 3.1** se calcularon valores de volumen real explotado y perforación específica, los cuales no son exactamente para el diseño de la malla, sin embargo, se los muestra aquí porque se derivan de los valores para el diseño.

Tabla 3.1 Factores para el diseño de malla de voladura. Fuente: Burbano y Meza (2020)

Parámetros		Unidad
Volumen para explotar	140	m^3
Volumen real explotado	140,55	m^3
Densidad de roca	2,7	t/m^3
Altura del banco	2	m
Área	54	mm^2
# Perforaciones	27	-----

Diámetro de perforación	1,5	<i>pulg.</i>
Burden	1,41	<i>m</i>
Espaciamiento	1,79	<i>m</i>
Taco	0,4	<i>m</i>
Longitud de carga de columna	2,02	<i>m</i>
Sobreperforación	0,42	<i>m</i>
Sobreperforación %	17	%
Perforación Específica	0,4649	<i>mlp/m³</i>
Profundidad total	2,42	<i>m</i>

En **Tabla 3.2** se muestra los explosivos y accesorios considerados en la propuesta de en los cuales hubo cambios, con la finalidad de optimizar la fragmentación de la roca. Aquí también encontramos el valor para el consumo específico.

Tabla 3.2 Factores de explosivos. Fuente: Burbano y Meza (2020)

Explosivos		
Parámetros		Unidad
Booster/Pentolita		
Diámetro	33	<i>mm</i>
Largo	135	<i>mm</i>
Densidad	1,6	<i>g/cm³</i>
Calor de explosión	1300	<i>kcal/kg</i>
Explosivo/ANFO		
Densidad	0,8	<i>g/cm³</i>
Calor de explosión	911	<i>kcal/kg</i>
Carga de Columna		
CC	1,80	<i>kg</i>
Consumo Específico		
CE	0,1412	<i>kg/t</i>

Por otro lado, en la **Figura 3.1** se muestra un barreno con sus características donde se puede observar que no se utilizó carga de fondo, lo que implica que solo hay carga de columna. Además, se colocó un booster de pentolita al final del barreno para ayudar con la detonación de la carga de columna. Adicionalmente, es importante indicar que para

encender los explosivos se consideraron accesorios como mecha de seguridad y fulminante #8, este último colocado dentro de la pentolita.

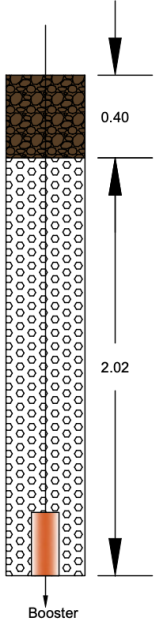


Figura 3.1 Esquema de barreno. Fuentes: Burbano y Meza (2020)

3.1.2. Esquema de perforación

La **Figura 3.2** muestra el esquema de perforación que se genera mediante la metodología de López Jimeno (2003), dando lugar al burden y espaciamiento, de 1,4 y 1,79 metros respectivamente de acuerdo con lo indicado en la **Tabla 3.1**.

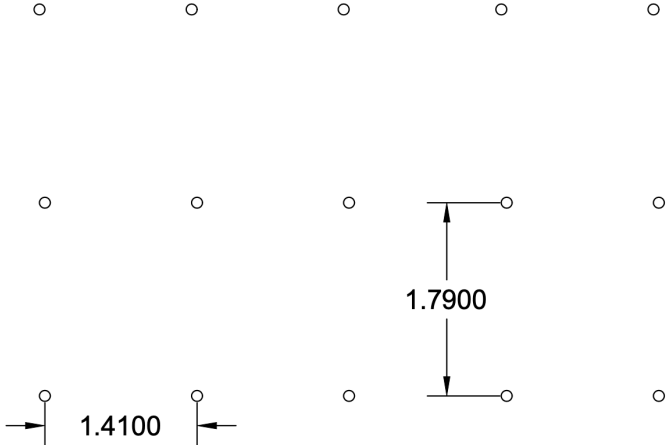


Figura 3.2 Malla de voladura optimizada. Fuentes: Burbano y Meza (2020)

3.1.3. Análisis de fragmentación

Para utilizar la fórmula de Kuznetsov (1973), en primer lugar, se calcularon parámetros necesarios para la determinación del tamaño medio de la roca, tales como el índice de volabilidad, factor de potencia, entre otros, mencionados en la **Tabla 3.3**.

Tabla 3.3 parámetros para la predicción de fragmentación de la roca. Fuente: Burbano y Meza (2020)

Predicción de fragmentación		
Parámetros		Unidad
A	6,63	--
Índice de volabilidad (BI)	55,25	--
Factor de potencia (K)	0,38	<i>Kg/m³</i>
Potencia relativa del ANFO en peso (REE)	1	--
Influencia de gravedad específica (SGI)	17,5	--
Tamaño de medio de la roca (X50)	17,55	<i>cm</i>

3.1.4. Factores económicos

En la **Tabla 3.4** se encuentran los precios unitarios de los accesorios y explosivos, así como también el costo total de voladura por barreno y por metro cúbico.

Tabla 3.4. Costo de insumo para voladura. Fuente: Burbano y Meza (2020)

Insumo	Cantidad por Barreno	Unidades	Precio/u	Costo/Barreno	Costo/m3
Mecha	2,42	m	0,30 \$	\$ 0,73	\$ 0,14
Fulminante	1,00	Unidad	0,22 \$	\$ 0,22	\$ 0,04
ANFO	1,84	Kg	1,10 \$	\$ 2,03	\$ 0,39
Pentolita	1,00	Unidad	2,82 \$	\$ 2,82	\$ 0,54
Costos Totales				\$ 5,80	\$ 1,11

Según datos del Ministerio de trabajo (2020) con respecto al salario básico unificado, se obtiene los siguientes resultados para el personal extra en la fragmentación manual de la roca volada, además se suman los costos de explosivos y accesorios dando como resultado los gastos mensuales y anuales para las condiciones iniciales representadas en la **Tabla 3.5**.

Tabla 3.5. Costos iniciales de voladura. Fuente: Burbano y Meza (2020)

Insumos	Inicial		Perforaciones	Días laborales	Costo mensual
Explosivos y accesorios	Mecha	\$0,69	25	22	\$379,50
	Fulminante	\$0,27			\$148,50
	ANFO	\$2,21			\$1.215,50
	Dinamita	\$2,42			\$1.331,00
Personal extra				\$800,00	
Costos de voladura mensual					\$3.874,50
Costos de voladura anual				\$46.494,00	

De la misma manera en la **Tabla 3.6** se muestran los costos mensuales y anuales propuestos, donde el costo por personal extra es cero, el numero de perforaciones aumenta a 27 y la dinamita cambia por pentolita.

Tabla 3.6. Costos optimizados de voladura. Fuente: Burbano y Meza (2020)

Insumos	Optimizado		Perforaciones	Días laborales	Costo mensual
Explosivos y accesorios	Mecha	\$0,73	27	22	\$433,62
	Fulminante	\$0,22			\$130,68
	ANFO	\$2,03			\$1.205,82
	Pentolita	\$2,82			\$1.675,08
Personal extra				\$0,00	
Costos de voladura mensual					\$3.445,20
Costos de voladura anual				\$41.342,40	

En la **Tabla 3.7** están mostrados los valores de producción y gastos de voladura mensuales con la finalidad de representar el costo por tonelada de roca volada.

Tabla 3.7. Costos de voladura por tonelada. Fuente: Burbano y Meza (2020)

	Producción mensual	Densidad	Costos de voladura	
	m3	t/m3	Mensuales	Por tonelada
Inicial	3080	2,7	\$3.874,50	\$0,47
Optimizados	3092,1		\$3.445,20	\$0,41

3.2. Análisis de resultados

Con los resultados obtenidos en el apartado anterior, se observaron cambios en la mayoría de los parámetros los cuales repercuten en los aspectos económicos y técnicos de la voladura. A continuación, se explica el impacto de cada una de las optimizaciones.

Los elementos en la malla de voladura que le dan forma a esta son el burden y el espaciamiento los cuales disminuyeron, lo que conlleva a un aumento en el número de perforaciones, que al finalizar los cálculos se obtuvo un volumen de $140,55 \text{ m}^3$. Con esto podemos observar que se cumple con la demanda que tiene en la cantera de 140 m^3 por turno, la cual no cambia considerablemente, es más, se puede interpretar que el cambio despreciable.

La distribución de los explosivos cambió porque no se usó carga de fondo, este no fue necesario debido a la corta longitud del banco. Esto implicó que aumentara la longitud de carga de columna, sin cambiar el espacio que ocupa el taco.

En lo que respecta a los explosivos, el ANFO no cambió como carga de columna ya que es efectivo y barato, por lo que no hubo la necesidad de reemplazarlo. No obstante, para encender la carga de columna fue necesario un detonante. Inicialmente se tenía dinamita que fue cambiada por pentolita debido a su calor de explosión que genera una mayor cantidad de energía liberada. En el **Anexo C** se muestra que la pentolita tiene un calor de 1300 kcal/kg siendo más potente que las 921 kcal/kg de la dinamita explogel III (Anexo D).

Teniendo en cuenta todos los parámetros de diseño y de explosivos para el esquema de volado, se tiene un consumo específico de $0,1412 \text{ kg/t}$ frente a los $0,1070 \text{ kg/t}$ iniciales de la cantera. Con esto se comprueba que la cantidad de explosivos es la óptima para el tipo de roca que se tiene, ya que está dentro del rango propuesto por la metodología utilizada en la Fase II.

Para verificar que el esquema de voladura propuesto no genera rocas con sobretamaño, se tuvo que predecir la dimensión media de la roca ya fracturada, considerando todos los parámetros optimizados, obteniendo así un diámetro promedio de $17,55 \text{ cm}$ o $6,90$

pulgadas, lo que en base a la investigación realizada está dentro del rango aceptable para la posterior venta de la roca.

Considerando que actualmente la voladura genera un 90% de rocas con sobretamaño, las cuales no son aptas para la venta y tampoco para la carga. Esta situación obliga a la empresa a contratar a dos trabajadores adicionales que se dedican solo al rompimiento de la roca manualmente. Como se muestra en la **Tabla 3.6** resulta más barato pagar mensualmente \$3445,20, frente los \$3874,50 representados por los costos iniciales en la **Tabla 3.5**.

En la **Tabla 3.8** se visualizan los costos por perforación que se generan debido a los accesorios y explosivos de voladura. Se puede apreciar una comparación entre los datos iniciales y optimizados, siendo \$5,59 y \$5,80 respectivamente, determinándose un aumento de \$0,21 por barreno en los datos optimizados. Esto quiere decir que cada voladura costará \$16,85 más que la actual.

Tabla 3.8. Comparación de los datos iniciales con los optimizados Fuente: Burbano y Meza (2020)

Insumo	Inicial		Optimizado	
	Explosivos y accesorios	Mecha	\$ 0,69	Mecha
Fulminante		\$ 0,27	Fulminante	\$ 0,22
ANFO		\$ 2,21	ANFO	\$ 2,03
Dinamita		\$ 2,42	Pentolita	\$ 2,82
Costos totales/ Barreno		\$ 5,59		\$ 5,80
Consumo específico	0,1070 <i>kg/t</i>		0,1412 <i>kg/t</i>	

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- La concesión minera “Perla del pacífico” explota caliza en forma de cantera mediante arranque convencional de perforación y voladura con una producción por turno de $140 m^3$, para lo cual utiliza una malla rectangular. Para este proceso se emplea una maquina a rotoperCUSión con una broca de 1,5 pulgadas y usando como explosivos ANFO y dinamita. Todo este resulta en una operación deficiente, produciendo rocas con sobretamaño y costos innecesarios.
- Actualmente, el consumo específico de explosivos en la cantera es de $0,107 kg/t$, esto genera que en el 90% de las voladuras existan rocas con sobretamaño debido a que el proceso es deficiente. Con lo propuesto en este proyecto se presenta un aumento de este coeficiente a $0,1412 kg/t$ debido a la modificación de algunos factores. El esquema de perforación, que en principio tenía medidas de burden y espaciamiento de 1,8 m y 1,50 m respectivamente, cambió a un burden de 1,41 m y un espaciamiento de 1,79 m. Además, se reemplazó la dinamita explotel III por la pentolita de 150 gramos 1P.
- Con respecto a la problemática del sobre tamaño de las rocas, se determinó que aumentando el consumo específico de explosivos se mejora el tamaño de la roca volada. Para asegurar que lo propuesto cumple el objetivo de disminuir las dimensiones de la roca, se predijo el tamaño de fragmentación obteniéndose como resultado un promedio de 17,55 cm de diámetro.
- Teniendo en cuenta los cambios de la malla de perforación y el tipo de explosivos, el volumen de producción presentó una ligera modificación con una diferencia de $0.55 m^3$ a favor del esquema propuesto. No obstante, el valor es tan mínimo que se puede considerar despreciable.
- Acorde con lo propuesto en este proyecto, existe un aumento en los costos de voladura de \$0,21 por barreno, lo que representa un incremento de \$16,85 en el costo de voladura por turno, sin embargo, en los costos mensuales del proceso se aprecia un ahorro de \$429,30 que representa un 11,08% menos, lo cual se logró mejorando la fragmentación con la finalidad de eliminar el personal extra.

- Eliminando el personal extra en esta etapa de la extracción del mineral se intenta mitigar el riesgo que produce tener personal innecesario en la zona de voladura.
- Finalmente, la propuesta de optimización para el proceso de voladura en la concesión minera Perla del Pacífico mejora el consumo de explosivos, obteniendo una mejor fragmentación de la roca y disminuyendo los costos de la operación.

4.2. Recomendaciones

- Realizar un estudio geológico minucioso en la cantera, con la finalidad de obtener datos más confiables que servirán para estudios técnicos relacionados con el proceso de voladura.
- Ejecutar un control de las vibraciones y la generación de polvo, ya que pueden afectar a las comunidades cercanas.
- Llevar un control del tamaño de roca después de la voladura, con respecto a la cantidad de explosivos, para futuras referencias técnicas.

BIBLIOGRAFÍA

- Asamblea Nacional del Ecuador. (2018). Ley de Minería. Quito: Registro Oficial del Ecuador.
- Alomalisa Maliza, J., & Villamar Marazita, K. (2018). Optimización de explotación de caliza en la concesión minera “Perla del Pacífico” ubicada en la comuna San Antonio, cantón General Villamil, provincia del Guayas – Ecuador. Guayaquil.
- Contreras, J. S., & Santamaria Arias, J. (1998). Manual para el control y diseño de voladuras en obras de carreteras. Madrid: Centro de Publicaciones, Ministerio de Fomento.
- H. Bampfield, W. M. (1984). Emulsion Explosives . Cil. Inc.
- Mundaca Muñoz, O. (19 de Septiembre de 2019). Canales Sectoriales. Obtenido de Interempresas:<https://www.interempresas.net/Mineria/Articulos/254240-Prediccion-de-fragmentacion-ajustada-y-Burden-en-funcion-de-una-granulometria-requerida.html>
- Michael Adebola, J., Ogbodo, D., & Peter, E. (2016). Rock Fragmentation Prediction using Kuz-Ram Model. *Journal of Environment and Earth Science*, VI, 110-115.
- Rincón Flórez, J., Fonseca Becerra, J., & Carvajal Medina, R. (Julio-Diciembre de 2015). Cálculo de parámetros termodinámicos para explosivos militares. Aplicación de 10 fundamentos termodinámicos y propiedades de los explosivos militares. *Revista Científica General José María Córdova*, XIII(16), 221-239.
- López Jimeno, C. (2003). Manual De Perforación Y Voladura De Rocas. Madrid: Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- Ministerio de Economía y Finanzas. (20 de Junio de 2019). Ministerio de Economía y Finanzas. Obtenido de finanzas.gob.ec: <https://www.finanzas.gob.ec/usd-3-800-millones-de-inversion-minera-hasta-2021-daran-mas-prosperidad-al-ecuador/>

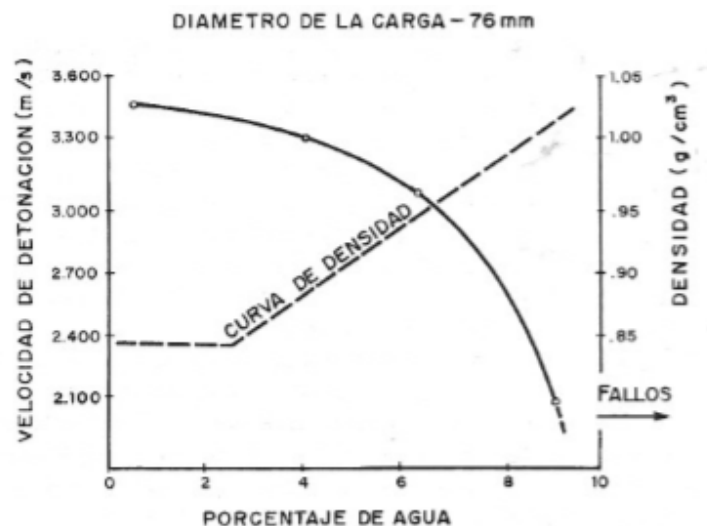
- Aules Almeida, E. A. (2013). "Estudio de la factibilidad del cambio de conexión btc por tsh-er en tubería de revestimiento de 20" y 13 3/8" para pozos a perforar en el cssfd". Quito.
- Bernaola Alonso, J., Castilla Gomez, J., & Herrera Herbert, J. (2013). Perforación y voladura de rocas en minería. Madrid: Departamento de explotación de recursos minerales y obras subterráneas.
- EXPLOCEN C.A. (2019). Issfa austin explocen explosivos y accesorios. Obtenido de explocen: <https://www.explocen.com.ec/producto/pentolita-cilindrica/>
- EXPLOCEN C.A. (2019). Issfa austin explocen explosivos y accesorios. Obtenido de explocen: <https://www.explocen.com.ec/producto/explogel-iii-1-1-8-x-4/>
- Laboratorio Oficial Madariaga. (2017). Guía de buenas prácticas en el diseño y ejecución de voladuras en banco. Madrid: Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital. Obtenido de <http://www.minetad.gob.es/energia/mineria/Explosivos/Guias/Guia-buenaspracticass-voladuras-banco.pdf>
- Leiva Torres, A. (2007). Influencia de la optimización de la fragmentación de roca en la rentabilidad de las operaciones mina-molienda. Lima, Perú: Pontificia universidad católica del Perú.
- Moreira Moran, R. C. (2019). Bioestratigrafía y ambiente sedimentario de depositación de las calizas de la formación san eduardo (eoceno) al sur del bosque protector cerro blanco, provincia del guayas. Guayaquil.
- Piéro Vera, B. D. (2017). "Optimización del plan de minado de cantera de caliza la unión distrito de baños del inca – cajamarca" 2015. Puno.
- Rudy Milton, C. T. (2015). "Diseño de perforación y voladura para reducción de costos en el frente de la galería progreso de la contrata minera cavilquis-corporación minera ananea s.a". Puno.
- Vilca Barrantes, R. (2019). Reducción de costos mediante la optimización de las variables del diseño de perforación y voladura para la explotación de caliza -

cantera mercedes. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO, FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS. Puno: Repositorio Institucional UNA-PUNO.

ANEXOS

ANEXO A

Influencia sobre el contenido de agua sobre la velocidad de detonación. Fuente: (López Jimeno, 2003)



ANEXO B

Valoración de las características del macizo rocoso para el índice de volabilidad de Lily.

Fuente: (Mundaca Muñoz, 2019)

PARAMETRO	RATING
Descripción de la masa rocosa (RMD)	
Quebradizo/Desmenuzable	10
Se fractura en bloques	20
Totalmente masivo	50
Espaciamiento de los planos de diaclasas (JPS)	
Cercano (<0.1 m)	10
Intermedio (0.1 a 1m)	20
Amplio (>1 m)	50
Orientación de los planos de diaclasas (JPO)	
Horizontal	10
Inclinación hacia fuera de la cara	20
Rumbo normal a la cara	30
Inclinación hacia dentro de la cara del banco	40
Influencia de la Gravedad Especifica (SGI)	$SGI = 25 * SG - 50$ Donde SG es la densidad del macizo y está en ton/m ³
Dureza (H = 0.05 x RC)	1 - 10

ANEXO C

Características técnicas para la pentolita. Fuente: (EXPLOCEN C.A., 2019)

PARAMETROS	UNIDAD	ESPECIFICACION
DENSIDAD	g/cm ³	1,6
VELOCIDAD DE DETONACIÓN*	m/s	7418
VELOCIDAD DE DETONACIÓN**	m/s	7700
VOLUMEN DE GASES	l/kg	777
CALOR DE EXPLOSIÓN	Kcal/kg	1300
TEMPERATURA DE EXPLOSIÓN	° C	3982
ENSANCHAMIENTO TRAUZL	cm ³ /10g	400
RESISTENCIA AL AGUA	----	Excelente
VIDA ÚTIL	años	10

ANEXO D

Características técnicas para la Dinamita Explogel III. Fuente: (EXPLOCEN C.A., 2019)

PARAMETROS	UNIDAD	ESPECIFICACION
DENSIDAD	g/cm ³	1,16
VELOCIDAD DE DETONACIÓN**	m/s	4750
VOLUMEN DE GASES	l/kg	931
CALOR DE EXPLOSIÓN	Kcal/kg	921
TEMPERATURA DE EXPLOSIÓN	° C	2587
ENSANCHAMIENTO TRAUZL	cm ³ /10g	415
PODER ROMPEDOR, METODO HESS	mm	22
RESISTENCIA AL AGUA	----	Limitada
CATEGORÍA DE HUMOS	----	Primera
VIDA ÚTIL	años	1

ANEXO E

Cálculo para los parámetros de voladura. Fuente: Burbano y Meza (2020)

VOLADURA PATRON

MALLA (mxm)	1,41	x	1,79	Volumen (m³)	140,55	
Diámetro (pulg)	1,5	pulg		Volumen (ton)	379,48	ton
Inclinación (°)	10	°		P.E. (mlp/m³)	0,4649	mlp/m³
δ CC (Kg)	0,8	Kg		C.E. (Kg/m³)	0,3538	Kg/m³
δ CF (Kg)	0,8	Kg		C.E. (Kg/ton)	0,1310	Kg/ton
				V del hueco(m³)	0,002759	m³

#	Profnd (m)	Taco (m)	Cfondo (m)	Ccolm (m)	CF (Kg)	CC (Kg)	Booster 240 gr	Taponex ABAJO
1	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
2	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
3	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
4	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
5	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
6	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
7	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
8	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
9	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
10	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
11	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
12	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
13	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
14	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
15	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
16	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
17	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
18	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
19	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
20	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
21	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
22	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
23	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
24	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
25	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
26	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
27	2,42	0,4		2,02		1,84	2	
Promd	2,42	0,40		2,02	0,15	1,84		
Total	65,34			54,54		49,72	54	
					Carga total	49,72	kg	

Fragmentación		Pentolita	
SGL	17,5	densidad	1,6 g/cm3
BI	55,25	calor	1300 kcal/kg
A	6,63	Diámetro	33 mm
K	0,38	largo	135 mm
X(50)	17,52		
			-1,4954