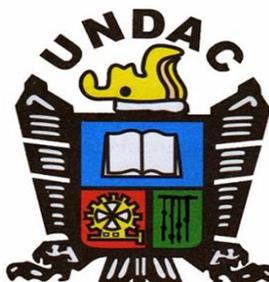


**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS**

**Escuela de Formación Profesional de ingeniería de Minas**



**TESIS**

**Estudio de la perforación para evitar la caída de rocas en el  
tajo norte Mina el Brocal S.A. región Pasco.**

**Para optar el título profesional de:**

**Ingeniero de Minas**

**Autor: Bach. Jonathan Emerson CONDOR CHAVEZ**

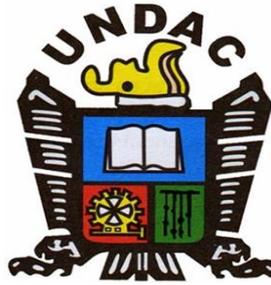
**Asesor: Mg. Luis Alfonso UGARTE GUILLERMO**

**Cerro de Pasco - Perú - 2021**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS**

**Escuela de Formación Profesional de ingeniería de Minas**



**TESIS**

**Estudio de la perforación para evitar la caída de rocas en el  
tajo norte Mina el Brocal S.A. región Pasco.**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

---

**Mg. Nieves Oswaldo GORA TUFINO**

**PRESIDENTE**

---

**Ing. Julio Cesar SANTIAGO RIVERA**

**MIEMBRO**

---

**MG. Raul FERNANDEZ MALLQUI**

**MIEMBRO**

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo va dedicado mis queridos padres Héctor Cóndor Solís y Nera Chávez Yanayaco por su esfuerzo, sacrificio y dedicación hacia mí.

A mis hermanos, por su apoyo incondicional durante toda esta trayectoria.

A mis colegas de trabajo y colegas de estudios por su entendimiento, comprensión y apoyo desinteresado.

A mi alma mater Universidad Nacional Daniel A. Carrión, Facultad de Ingeniería de Minas, por brindarme la satisfacción de lograr mi carrera profesional y las sanas enseñanzas.

## **RECONOCIMIENTO**

A mis familiares y amigos por su apoyo incondicional, por cada uno de sus consejos que me permitieron cumplir una de las metas que me proyecte con esta noble carrera profesional.

A la compañía Brocal S.A., a los ingenieros y al personal de esta empresa por el tiempo dedicado y su gran apoyo para el desarrollo de la tesis.

A mi asesor Mg. Luis Alfonso Ugarte Guillermo por compartir sus experiencias y enseñanzas durante toda esta trayectoria.

## RESUMEN

El objetivo general del presente estudio es optimizar la perforación y voladura para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el tajo Norte Mina el Brocal, S.A., Región Pasco, teniendo en cuenta que las viviendas se encuentran colindantes con el tajo.

La metodología empleada es no experimental descriptivo de carácter cualitativo y cuantitativo empleando como instrumento de recolección de datos, la técnica de observación y entrevista directa a personas con experiencia en perforación y voladura controlada.

Entre las principales conclusiones mencionamos: La necesidad de disminuir la carga máxima instantánea por la cercanía de los objetos, obliga a una mayor secuenciación del encendido combinado detonador de micro retardo y retardador de superficie. Además, mejoró en un 20% la fragmentación debido a la iniciación se realiza taladro a taladro, haciendo que no se desperdicie la energía explosiva y las vibraciones no exceden de 12 mm/seg en la velocidad pico partícula, lo cual a 500 m que se encuentra la población no se registra vibración alguna. Al mismo tiempo el perfilado de taludes es más controlado debido a la poca vibración generada en la voladura.

**Palabras claves:** Perforación, voladura, desprendimiento de rocas, tajo Norte.

## ABSTRAC

The general objective of this study is to optimize drilling and blasting to avoid rock loosening and ground vibrations in the North Pit Mina el Brocal, S.A., Pasco Region, taking into account that the houses are adjacent to the pit.

The methodology used is non-experimental, descriptive, qualitative and quantitative, using as a data collection instrument the technique of observations and direct interviews with people with experience in controlled drilling and blasting.

Among the main conclusions we mention: The need to decrease the maximum instantaneous load due to the proximity of the objects, requires a greater sequencing of the combined ignition of the micro-delay detonator and the surface retarder. In addition, fragmentation was improved by 20% due to the initiation of drill by drill, causing that explosive energy is not wasted and vibrations do not exceed 12 mm / sec in the peak particle velocity, which at 500 m that is finds the population does not register any vibrated. At the same time, slope profiling is more controlled due to the low vibration *generated in blasting*.

**Keywords:** Drilling, blasting, rockfall, North pit.

## INTRODUCCIÓN

El problema de vibraciones por voladura tiene especial importancia para la explotación del Tajo Norte de la Sociedad Minera El Brocal S.A., cuyas crestas en el límite Norte se encuentra aproximado a 500 metros aproximados de las edificaciones del área urbana. A raíz de las múltiples quejas de la población había que reformular el diseño del disparo a fin de disminuir el nivel de vibraciones del terreno, y evitar los daños a la propiedad privada y pública. La determinación de la carga óptima instantánea y segura, para voladuras controladas; cuando hay objetos que pueden ser afectados por vibraciones al estar cerca de las voladuras, lleva involucradas una serie de incertidumbres que van más allá del margen probabilístico de riesgo, debido a la desviación de la realidad respecto a los modelos asumidos para las predicciones. Se entiende por objeto, las viviendas públicas, instrumentos sensibles, y todo lo que pueda ser dañado directa o indirectamente por las vibraciones que se transmiten por el suelo.

Teóricamente, se plantea que los parámetros de la onda sísmica que se relacionan más fuertemente con el daño a las edificaciones y otros objetos son:

- La Velocidad Pico Partícula de la vibración en los cimientos o apoyo.
- La proximidad de la frecuencia de esta vibración a la frecuencia natural del objeto
- El tiempo de acción de la vibración sobre el objeto.

El presente trabajo, por tanto, aplica y planifica las técnicas y medidas de prevención, para minimizar las vibraciones del macizo rocoso y evitar daños a estructuras de poblaciones cercanas a la explotación minera, también se emplea el denominado factor de energía, que ilustra con mayor fidelidad el consumo de energía de los explosivos en las voladuras determinando su correlación con las vibraciones.

Teniendo en cuenta el esquema de tesis del reglamento de grados y títulos de la UNDAC, la tesis se divide en: cuatro capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

CAPITULO I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN. Referido a: Identificación y determinación problema, delimitación de la investigación, formulación del problema

(problema principal y problemas específicos), formulación de objetivos (objetivo general y objetivos específicos), justificación de la investigación y limitaciones de la investigación.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO. Contiene: Antecedentes de estudio, bases teóricas – científicas, definición de términos básicos, formulación de hipótesis (hipótesis general e hipótesis específicas), identificación de variables y definición operacional de variables e indicadores.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN. Incluye: Tipo de investigación, métodos de investigación, diseño de investigación, población y muestra; técnicas e instrumentos de recolección de datos, técnicas de procesamiento y análisis de datos; tratamiento estadístico; selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación y orientación ética.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN. Comprende: Descripción del trabajo de campo; presentación, análisis e interpretación de resultados, prueba de hipótesis y discusión de resultados.

Finalmente se presenta: conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos donde se incluye la matriz de consistencia, los instrumentos de investigación e imágenes.

El autor.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	I
RECONOCIMIENTO.....	II
RESUMEN.....	III
ABSTRAC.....	IV
INTRODUCCIÓN .....	V
ÍNDICE GENERAL.....	VII
CAPÍTULO I.....	1
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	1
1.1. Identificación y determinación del problema.....	1
1.2. Delimitación de la investigación. ....	2
1.2.1 Delimitación espacial.....	2
1.2.2 Delimitación temporal.....	2
1.2.3 Delimitación temática .....	3
1.3. Formulación del problema.....	3
1.3.1 Problema principal.....	3
1.3.2 Problemas específicos. ....	3
1.4 Formulación de Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivo general. ....	3
1.4.2 Objetivo específico. ....	4
1.5 Justificación de la investigación.....	4
1.6 Limitaciones de la investigación. ....	4

CAPÍTULO II.....	5
MARCO TEÓRICO .....	5
2.1. Antecedentes de estudio.....	5
2.2. Bases teóricas - científicas.....	8
2.2.1. Perforación.....	8
2.2.1.1. Perforación en tajo abierto. ....	8
2.2.2. Voladura.....	11
2.2.2.1. Voladura controlada. ....	12
2.2.2.2. Sistema DECK. ....	15
2.2.2.3. Vibraciones. ....	15
2.2.2.4. Distancia escalada. ....	18
2.2.2.5. Factor de energía.....	19
2.2.3. Explosivos. ....	20
2.2.3.1. ANFO.....	21
2.2.3.2. Nitrato de amonio.....	21
2.2.3.3. Performance del ANFO.....	21
2.2.3.4. Emulsión .....	22
2.2.3.5. Emulsión gasificable.....	22
2.2.3.6. ANFO pesado. ....	23
2.2.3.7. Fragmentación de la roca.....	24
2.2.4. Desprendimiento de rocas.....	25
2.2.4.1. Factores.....	26
2.2.5. Tajo Norte. ....	26

2.2.5.1.	Estabilidad física del Tajo Norte .....	27
2.2.5.2.	Perforación y voladura .....	28
2.2.6.	Sociedad Minera El Brocal S. A.....	32
2.2.6.1.	Marco Geológico .....	37
2.2.6.2.	Marco Geomécánico .....	50
2.3.	Definición de términos básicos.....	53
2.4.	Formulación de Hipótesis:.....	57
2.4.1.	Hipótesis General.....	57
2.4.2.	Hipótesis Específica .....	57
2.5.	Identificación de Variables:.....	57
2.5.1.	Variables independientes .....	57
2.5.2.	Variables dependientes .....	57
2.6.	Definición Operacional de variables e indicadores. ....	57
CAPÍTULO III.....		59
METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN .....		59
3.1.	Tipo de investigación.....	59
3.2.	Método de investigación.....	60
3.3.	Diseño de investigación.....	60
3.4.	Población y muestra.....	60
3.4.1.	Población .....	60
3.4.2.	Muestra .....	60
3.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos. ....	61
3.6.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	61

3.7.	Tratamiento Estadístico.....	62
3.8.	Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.....	62
3.9.	Orientación ética. ....	62
CAPÍTULO IV .....		64
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		64
4.1.	Descripción del trabajo de campo .....	64
4.1.1	Procedimiento de trabajo.....	64
4.1.2	Zona de estudio .....	65
4.1.2.1	Propiedades del macizo rocoso .....	65
4.1.2.2	Tecnología utilizada .....	66
4.1.3	Sistemas de iniciación .....	71
4.1.3.1	Sistema no eléctrico .....	71
4.1.4	Aplicación del sistema silencioso en la mina El Brocal S.A .....	76
4.1.4.1	Instalación del sistema silencioso .....	77
4.1.4.2	Iniciación del sistema silencioso .....	77
4.2	Presentación, Análisis e Interpretación de Resultados .....	79
4.3	Prueba de hipótesis.....	81
4.4	Discusión de resultados. ....	82
CONCLUSIONES		
RECOMENDACIONES		
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

## **CAPÍTULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Identificación y determinación del problema.**

En las labores de excavación a cielo abierto las operaciones de perforación y voladura de rocas encuentran un gran campo de aplicación técnica, por los diversos tipos y diseños de excavación, los cuales se aplican básicamente con dos propósitos:

- Utilizar el material rocoso excavado (mineral, enrocado, relleno)
- Utilizar el espacio excavado (vías de acceso, alojar estructuras).

La perforación y voladura de rocas son actividades primarias y binomiales que determinan la productividad e influyen en gran parte la rentabilidad de sus operaciones, que a su vez van en paralelo en la optimización y la implementación de nuevos procesos de producción mediante mejoras estándares y bajos costos, lo que permite comprender, controlar y efectuar una toma de decisiones adecuada tanto a nivel estratégico como operativo. En los trabajos de excavación en roca, las operaciones unitarias de mayor importancia son la perforación y voladura, que en promedio alcanzan hasta el 40% del costo total de operación.

Un diseño inapropiado de la perforación y voladura conduce a problemas, como: mala fragmentación, costosa voladura secundaria que adicionalmente influye en el incremento de los costos en las actividades subsecuentes (remoción, carguío, acarreo, chancado y molienda, según el caso). También, origina impactos ambientales (fly rocks, vibraciones, ruido, entre otros.)

Para que una empresa tenga sus procesos de perforación y voladura en forma eficiente y alineada con sus objetivos estratégicos, debe realizar:

- ✓ Una evaluación y diagnóstico del actual proceso de perforación y voladura, desde el punto de vista de cadena de valor del negocio, identificando los cuellos de botella existentes en dichos procesos.
- ✓ Proponer mejoras en dichos procesos, y trabajando primero con los propios recursos.
- ✓ Reducir o incrementar costos en dichos procesos.

Es por ello que el presente trabajo de control de vibraciones en el Tajo Norte, busca establecer parámetros de perforación y voladura, de manera que se pueda mejorar las relaciones de responsabilidad social con las comunidades aledañas y la conservación del perfil del avance del tajo en forma efectiva evitando desprendimiento en bancos aledaños que suman trabajos adicionales de limpieza y transporte y por ende el incremento de los costos productivos.

## **1.2. Delimitación de la investigación.**

**1.2.1 Delimitación espacial.** El estudio se realizó en el Tajo Norte, mina Colquijirca Sociedad Minera El Brocal S.A, ubicada en el distrito de Tinyahuarco, provincia y región Pasco.

**1.2.2 Delimitación temporal.** La elaboración del presente estudio se ejecutó durante los meses de enero a mayo del 2019.

**1.2.3 Delimitación temática.** El motivo del presente reside en realizar el estudio de perforación y voladura para evitar el desprendimiento de rocas en el tajo Norte. mina el Brocal S.A. región Pasco.

### **1.3. Formulación del problema.**

#### **1.3.1 Problema principal**

1. ¿Cómo optimizar la perforación y voladura para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el tajo norte Mina el Brocal S.A., región Pasco?

#### **1.3.2 Problemas específicos.**

1. ¿Cómo diseñar la malla de perforación para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el Tajo Norte, Mina el Brocal S.A., región Pasco?
2. ¿Cómo optimizar la voladura para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el Tajo Norte, Mina el Brocal S.A., región Pasco?
3. ¿Cómo relacionar la malla de perforación y la optimización de voladura para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el Tajo Norte, ¿Mina el Brocal S.A., región Pasco?

### **1.4 Formulación de Objetivos.**

#### **1.4.1 Objetivo general.**

1. Optimizar la perforación y voladura para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el tajo norte Mina el Brocal S.A., región Pasco.

#### **1.4.2 Objetivo específico.**

1. Diseñar la malla de perforación para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el Tajo Norte, Mina el Brocal S.A., región Pasco.
2. Optimizar la voladura para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el Tajo Norte, Mina el Brocal S.A., región Pasco.
3. Relacionar la malla de perforación y la optimización de voladura para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el Tajo Norte Mina el Brocal S.A., región Pasco.

#### **1.5 Justificación de la investigación.**

El presente estudio en el Tajo Norte en la unidad minera Colquijirca, Sociedad Minera El Brocal S.A. está basada en las pruebas de perforación y voladura realizadas para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno, y la seguridad para no afectar a las viviendas que se encuentran colindantes al tajo.

El análisis del diseño de perforación y optimización de voladura para evitar el desprendimiento de rocas en el Tajo Norte permitirá tomar una mejor decisión en cuanto al empleo de explosivos que es importante para realizar el monitoreo de las vibraciones del terreno producidas por la voladura y que estos se encuentren por debajo del estándar establecido para no afectar a las viviendas contiguas.

#### **1.6 Limitaciones de la investigación.**

Para la elaboración del presente trabajo de investigación se presentaron problemas como, la dificultad de obtener datos e información de la empresa, insuficiente información bibliográfica sobre el tema y factor económico.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de estudio.

**OVIEDO, L. F. (2017)**, en su tesis: *“Diseño de mallas de Perforación y Voladura haciendo uso del Software Drill and Blast Vulcan 8.0 para obtener una óptima Fragmentación en E.E. Ajani Unidad Minera Anabi”*, en la Escuela profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa. Sus principales conclusiones son:

1. Cada macizo rocoso (según sus características geotécnicas), tiene su propia selección de tiempos de detonación (apropiados para voladura) y este parámetro es importante para una buena calidad de voladura, sin embargo, para este estudio, la fragmentación se dio por una mayor energía aportante del explosivo de los taladros, ya que los tiempos de detonación fueron aprovechados para obtener frecuencias.
2. Para este estudio el uso del doble deck de carga, no significó un impacto significativo en la mejora de la fragmentación, y se optó por aumentar el

Power Factor a través de la reducción de los parámetros de perforación (burden y espaciamiento).

3. Es importante lograr una buena impedancia (roca vs explosivo), ya que se aprovecha la energía del explosivo; en caso no se hubiese trabajado con HA 55, la reducción de los parámetros de perforación (burden y espaciamiento) no hubiese sido significativa, ya que la energía entregada por el HA 46 (305 kcal/tn) es menor respecto que la del HA 55 (324 Kcal/tn).

**CAMARENA, A. (2019) en su tesis. *Optimización de los rendimientos de perforación a partir del modelo geotécnico con fines de minimizar costos de perforación en la Compañía Minera Antamina*, en la Facultad de Ingeniería de Minas de la UNCP. Huancayo. Entre sus principales conclusiones mencionamos:**

1. Aplicando el parámetro de velocidad de perforación del modelo geotécnico con respecto a los reportes de la empresa Drillco Tools se determina una reducción de 0.22 dólares por metro. Teniendo en cuenta los metros perforados durante los meses de enero hasta agosto la reducción del costo de perforación es 68300.86 dólares.
2. Aplicando el parámetro de Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS) y la Descripción del Macizo Rocosos (RMR) se logra sectorizar por cada fase el tipo de broca usado por la empresa Drillco Tools, por consiguiente, se logra reducir 23 brocas triconicas para una misma cantidad de metros perforados durante estos 8 meses, en términos de costo de accesorios de broca se reducen 87285 dólares.
3. La propiedad del macizo rocoso tiene una relación directa a los rendimientos de perforación, en fase 8 presenta un tipo de roca dura en UCS y un RMR bueno a diferencia de las otras fases que presentan una roca media y regular respectivamente.

4. La empresa Drillco Tools no realiza una correcta sectorización de sus modelos de brocas en las distintas fases operativas que cuentan con diversas litologías y distinta calidad del macizo rocoso. El 96 % de su uso en la perforación de rocas fue para el modelo SA 625, mientras que solo el 3.21 % fue destinado para el modelo SA 615.
5. La vida útil obtenida a partir de los datos perforados reales en mina son las siguientes: el modelo SA 615 tiene 1972.88 metros perforados para tipo de roca suave y media, y el modelo SA 625 presenta 1480.76 metros perforados para tipo de roca duro y muy duro.

**ZAVALA, K. S. (2017), en su tesis. *Empleo de Agente de Voladura Gasificado para minimizar costos de Voladura en la Compañía Minera Antamina S.A.* Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, en la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas, Huaraz. Sus principales conclusiones son:**

1. El empleo de agente de voladura gasificado minimizó el costo del disparo de 4,000 hasta los 7,000 US\$ en comparación al agente de voladura convencional, cifras que representan un ahorro significativo del 4% a 9% usando HA73G y HA82G respectivamente.
2. Las propiedades obtenidas por el empleo del agente de voladura gasificado registran un VOD de hasta 5600 m/s superando ampliamente al HA 4,700 m/s convencional, posee mayor energía liberada con rangos de 25,000 J/m<sup>3</sup> a 35,000 J/m<sup>3</sup>, mejor resistencia al agua a bajas densidades 1.09 g/cc, menor generación de humos naranjas (<4%), resistencia a bajas temperaturas (-3°C), tiene una resistencia de hasta 5 días antes de perder sus propiedades principales.
3. Empleando agente de voladura gasificado se registró una reducción en la carga lineal (Kg/m) y factor de potencia (Kg/tn) de 8% y 36% respectivamente en comparación al agente de voladura convencional.

4. Los procesos para la gasificación y control de resultados se realizan de forma correcta siguiendo el procedimiento escrito de trabajo seguro (PETS).

## **2.2. Bases teóricas - científicas.**

**2.2.1. Perforación.** Operación primaria, en la preparación de voladura, con el propósito es abrir en la roca huecos cilíndricos consignados alojar explosivo y accesorios iniciadores, denominados taladros, barrenos, hoyos o blast holes.

La perforación se basa en principios mecánicos de percusión y rotación, los efectos de golpes y fricción producen astillamiento y trituración de la roca en un área parecido al diámetro de la roca hasta una profundidad de la longitud del barreno utilizado. La eficiencia reside en obtener la máxima penetración al menor costo (Karlinski et al, 2009).

La resistencia de la roca determina el método o medio de perforación a emplear: rotación simple o rotopercusión. Cuanto más blanda sea la roca mayor debe ser la velocidad de perforación y cuanto más resistente sea la compresión, para perforar serán necesarias mayor fuerza y torque.

- **Perforación en línea.** La perforación en línea envuelve la creación de un plano de debilidad el cual es obtenido mediante el uso de una serie de taladros cercanamente espaciados pero que no son cargados y que se encuentran en el límite de la excavación.

**2.2.1.1. Perforación en tajo abierto.** En la perforación en tajos a cielo abierto (tajo abierto) se debe tener en cuenta lo siguiente:

**2.2.1.1.1. Diámetro de taladro ( $\emptyset$ ).** Para determinar el diámetro consideran:

- a) La disponibilidad y aplicabilidad del equipo de perforación en el trabajo proyectado.

b) La altura de banco proyectada y la amplitud o envergadura de las voladuras.

c) La distancia límite de avance proyectado para el banco.

Si el diámetro es diámetro pequeño los costos de perforación y de preparación del disparo habitualmente son altos y se emplea mucho tiempo y personal, pero se obtiene mejor distribución y consumo específico del explosivo, permitiendo también efectuar voladuras selectivas.

El aumento de diámetro acrecienta y mantiene estable la velocidad de detonación de la carga explosiva, incrementa el rendimiento de la perforación y de los equipos de acarreo, disminuyendo el costo global de la voladura. Asimismo, facilita el empleo de camiones cargadores de explosivos.

**2.2.1.1.2. Longitud o profundidad de taladro (L).** Es la suma de altura de banco más la sobre perforación necesaria por debajo del nivel del piso para garantizar su buena rotura y evitar que queden lomos o resaltos, que perturban al trabajo del equipo de limpieza y deben ser eliminados por rotura secundaria.

**2.2.1.1.3. Sobre perforación (SP).** Es necesario realizar en los taladros verticales para mantener el nivel del piso. Si es corta normalmente originarán lomos, si es excesiva se produciría sobre excavación con incremento de vibraciones y costos de perforación.

**2.2.1.1.4. Altura de banco (H).** Distancia vertical desde la superficie horizontal superior (cresta) a la inferior (piso). La altura es función de: equipo de excavación y carga; diámetro de perforación, resistencia de la roca, estructura geológica y estabilidad del talud; mineralización y seguridad.

Si la altura de banco es igual al burden (1:1) la fragmentación resultará gruesa, con sobre excavación y lomos al piso, porque la cara libre no se podrá flexionar. Si la altura es el doble del burden (2:1) la fragmentación mejora y los lomos disminuyen. Si la altura de banco es tres o más veces mayor (3:1) la relación H/B permitirá la flexión, lográndose fragmentación menuda y eliminación de los otros efectos.

**2.2.1.1.5. Burden (B).** Distancia desde el pie o eje del taladro a la cara libre perpendicular más cercana o distancia entre filas de taladros en una voladura.

Depende del diámetro de perforación, propiedades de la roca, altura de banco y las especificaciones del explosivo a emplear. Se establece en razón del grado de fragmentación y al desplazamiento del material volado que se quiere obtener.

Si el burden es excesivo, la explosión del taladro encontrará mucha resistencia para romper adecuadamente al cuerpo de la masa rocosa, los gases generados tenderán a soplarse y a craterizar la boca

del taladro. Si es reducido, habrá exceso de energía, la misma que se traducirá en fuerte proyección de fragmentos de roca y vibraciones.

**2.2.1.1.6. Espaciamiento (E).** Distancia entre taladros de una misma fila que disparados con un mismo retardo o retardos diferentes y mayores en la misma fila. Se calcula en relación con la longitud del burden, a la secuencia de encendido y el tiempo de retardo entre taladros. Semejante con el burden, espaciamientos pequeños producen exceso de trituración y craterización en la boca del taladro, lomos al pie de la cara libre y bloques de gran tamaño en el tramo del burden. Espaciamientos excesivos producen fracturación inadecuada, lomos al pie del banco y una nueva cara libre frontal muy irregular.

**2.2.2. Voladura.** Es la ignición de una carga masiva de explosivos. Comprende el carguío de los huecos realizados en la perforación con una sustancia explosiva, que al entrar en acción origina una onda de choque que, mediante una reacción, liberando gases a alta presión y temperatura en forma instantánea con la finalidad de arrancar, fracturar o remover cierta cantidad de material según los parámetros de diseño de la voladura.

La finalidad de la voladura es la fragmentación del macizo rocoso causada inmediatamente después de la detonación.

El efecto de impacto de la onda de choque y de gases en rápida expansión sobre la pared del taladro, se transfiere a la roca circundante, difundiéndose a través de ella en forma de ondas o fuerzas de compresión, provocándole solo deformación elástica, ya que las rocas son resistentes a la compresión. (Exsa, S.A., 2009).

Al llegar las ondas a la cara libre en el frente de voladura causan esfuerzos de tensión en la masa de la roca, entre la cara libre y el taladro. Si la resistencia a la tensión de la masa rocosa es excedida, esta se rompe en el área de la línea de menos resistencia (burden).

Casi juntamente, el volumen de gases liberados y en expansión penetra en las grietas iniciales ampliándolas por acción de cuña y creando otras nuevas, produciendo la fragmentación efectiva de la roca. Los gases remanentes desplazan rápidamente la masa de material triturado hacia adelante, hasta perder su fuerza por enfriamiento y por aumento del volumen de la cavidad formada en la roca.

La voladura concluye cuando los fragmentos o detritos caen y se acumulan para formar la pila de escombros o material volado. (Exsa, S.A., 2009).

**2.2.2.1. Voladura controlada.** También denominada voladura controlada de contorno o perimetral, que sirve para mejorar la competitividad de macizo rocoso circundante en la labor minera.

El objetivo es evitar la sobre rotura fuera de los límites establecidos. Así mismo, permite la obtención de superficies lisas y definidas, evita el agrietamiento excesivo de la roca residual, con lo que se logra mejorar la estabilidad del talud. Esta voladura es esencial en trabajos subterráneos, para prevenir el desplome de techos y otros riesgos, y en tajos a cielo abierto para la estabilidad de taludes. (Mendoza, 2014).

**2.2.2.1.1. Voladura de pre corte.** El propósito de la voladura de pre corte es desarrollar un plano de debilidad tras la voladura, a causa de una sucesión de taladros en una sola fila de excavación con el fin de originar un plano

de fractura. Los taladros son generalmente del mismo diámetro y con un espaciamiento menor.

Con una óptima voladura de pre corte se tiene:

- Formación de una pared estable.
- Generar un límite de penetración para la pala.
- Desarrollar las bermas programadas.
- Generar en el trabajo un ambiente de seguridad.

(Tovar, 2015)

El objetivo de la voladura de pre corte es disminuir las presiones que se originan en el taladro, lo suficiente para generar grietas entre taladros consecutivos de la línea del pre corte. Para obtener buenos resultados se deben tener en cuenta:

- Una línea de taladros con espaciamientos pequeños
- Baja densidad lineal de carga del explosivo
- Iniciación de los taladros en simultaneo.

**2.2.2.1.2. Voladura de Recorte.** La voladura de recorte consiste en la detonación de una sola fila de taladros con cargas explosivas desacopladas, donde la salida de la roca es hacia una cara libre. En el caso en que los taladros de recorte tienen el mismo diámetro que los de producción esta técnica es llamada de afinamiento o ribete.

El objetivo de este tipo de voladura es desquincar el material excedente de las paredes del banco hasta límites finales de excavación mejorando así la limpieza, el acabado y su estabilidad.

**2.2.2.1.3. Voladura amortiguada.** Es una técnica simple, que consiste en modificar la última fila de la voladura de producción, reduciendo el burden y el espaciamiento, así como las cargas explosivas. Generalmente es utilizada con el pre corte, pero este método sólo puede ser utilizado cuando el macizo rocoso es muy competente.

Con este método minimizamos el fracturamiento excesivo de la roca remanente en los límites de la excavación, mejoramos la estabilidad y el acabado de las paredes finales de la excavación, además que limitamos el ingreso de la energía que se produce al detonar las cargas a las paredes finales de la excavación.

*Ventajas:*

- Evita dilución del mineral.
- Evitar la sobre excavación.
- Genera una pared lisa y resistente en el talud del banco.
- Generan una geometría en el tajo, de importancia económica. (López, 1998).

*Desventajas:*

- Elevado costo en comparación a la voladura convencional.
- Demanda de mayor tiempo en la elaboración.
- En material detrítico incompetente puede no tener resultados efectivos (Hidalgo, 2004).

**2.2.2.2. Sistema DECK.** Sistema utilizado para espaciar la carga, de tal forma de reducir los efectos vibracionales, obteniendo un buen fracturamiento, reduciendo la presión dentro del taladro.

**2.2.2.2.1. Presión del taladro del Sistema DECK.** Como venimos trabajando con sistema deck, utilizando material inerte (detritus de la perforación) entre cargas, entonces usamos el factor de acoplamiento del explosivo y la presión de detonación sólo en la longitud cargada del taladro, asumiendo que la presión en el taladro no se extiende en el material inerte.

$$P_t = P_d * \left(\frac{V_e}{V_t}\right) * 0,5$$

Presión en el taladro = Presión de detonación

\* (vol. Explosivo / vol. Taladro)

**2.2.2.3. Vibraciones.** Las voladuras generan vibraciones del terreno que pueden tener diferentes efectos sobre las estructuras de la masa rocosa (discontinuidades como fallas, diaclasas, juntas, contactos), pudiendo ocasionar deslizamientos, causando en consecuencia, efectos graves, como por ejemplo el cierre de acceso hacia otras zonas de la mina y/o afectar equipos o personal. Esto en algunos casos puede llevar a una paralización de las operaciones.

Las vibraciones se caracterizan por ser generadas por dos tipos de ondas: Ondas de superficie, y de Cuerpo.

**Las ondas de superficie.** Se caracterizan por tener grandes amplitudes, bajas frecuencias y bajas velocidades de propagación. En muchos casos, estas ondas contienen

significativamente más energía que las ondas de cuerpo, (no obstante, se generan cuando las ondas de cuerpo llegan a una superficie libre) decayendo además más lentamente con la distancia.

Las ondas de superficie son las que causan daños a estructuras en general, y a los bancos en minas a cielo abierto.; es por ello que, para evaluar los daños por efecto de las vibraciones del terreno, son estas las ondas que se miden y se evalúan.

*Las ondas de cuerpo. Están compuestas a su vez por dos tipos de ondas:*

- Ondas “P” o primarias.
- Ondas “S” o secundarias.

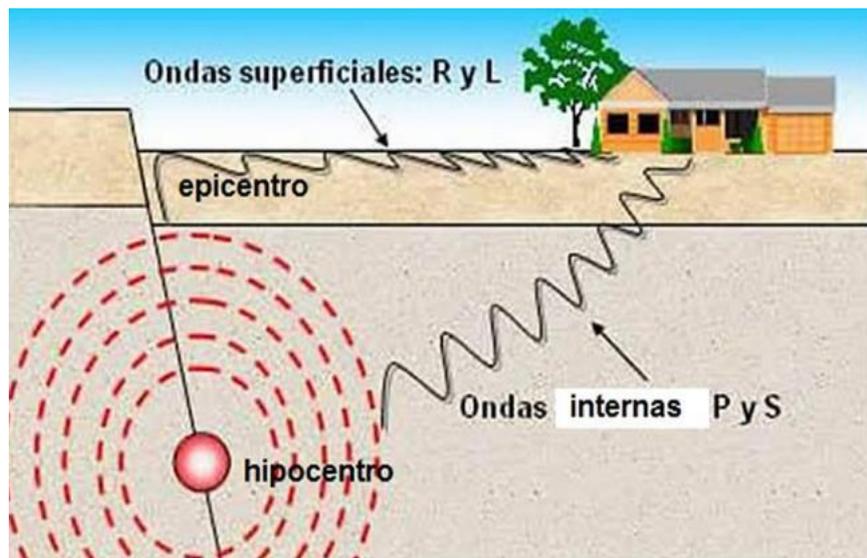


Figura 1. Ondas superficiales e internas

Fuente: Geoxnet.com.

En el cuadro ondulatorio están presentes: onda longitudinal transmitidas por la presión de detonación y por la presión de los gases, ondas transversales generadas en el proceso de rotura y por la fricción del régimen turbulento de los gases, ondas de distintos tipos reflejadas, refractadas y difractadas no sólo por la

estructura geológica existente, sino por las juntas y grietas durante los procesos de arranque y fragmentación y por los cimientos de los objetos cercanos.

**2.2.2.3.1. Velocidad Pico Partícula (VPP).** Para la medición de las vibraciones se emplea el criterio de la Velocidad Pico de Partículas (VPP), que es el mejor parámetro que correlaciona los daños en general con la intensidad de la vibración, en el caso de cargas cilíndricas (longitud del taladro mucho mayor que la longitud de la carga) es recomendable el empleo de la escala de raíz cuadrada ( $W \wedge 1/2$ ) por ser más precisa, describiendo el amplio rango de condiciones de campo y técnicas de voladura que cualquier otra escala.

Uno de los parámetros de las vibraciones generadas por la voladura es la velocidad pico partícula, en esta investigación se tomó como estudio la velocidad pico partícula generada por la voladura de rocas y su influencia en el daño al macizo rocoso, La Secuencia de retardos usados en la voladura tienen una influencia directa a la velocidad pico partícula generada, cuando el tiempo de retardos entre cargas explosivas es inferior a 26 ms aproximadamente generan valores altos de velocidad pico partícula, por lo que el daño al macizo rocoso será mayor; modificando la secuencia de retardos a tiempos de retardos mayor a 49 ms entre cargas explosivas los valores de velocidad pico partícula disminuyen significativamente por lo que el

daño al macizo rocoso se disminuye. Con las pruebas realizadas se ha conseguido disminuir la velocidad pico partícula usando retardos secuenciados adecuadamente.

**A. Frecuencia.** El criterio de la VPP, como método de control de las vibraciones, es reconocido, sin embargo, en muchos casos, se vienen recibiendo reclamos de vecinos cercanos a la operación, por ello este criterio se encuentra limitado, debido a que este criterio no está orientado a enfrentarse a las vibraciones de frecuencias bajas y que son dañinas.

El objetivo del análisis de frecuencias no es sólo controlar, sino de predeterminedar la intensidad de las vibraciones, interfiriendo entre sí las ondas sísmicas producidas por cada carga explosiva, mediante la utilización de retardos apropiados en dichas cargas, los que se encuentran en decks de un mismo taladro, entre taladros de una misma fila y entre filas de taladros.

Notamos que las mayores amplitudes de vibración suelen ocurrir en el sector de frecuencias bajas, ya que las frecuencias resonantes más destructivas de la mayoría de las instalaciones están en el rango de 5 a 20 Hz.

**2.2.2.4. Distancia escalada.** La distancia entre el sitio de la voladura y el punto de interés, así como la cantidad de explosivos son dos variables que afectan la amplitud de las ondas vibratorias, sin importar el criterio que se utilice para el control de las vibraciones.

En unidades donde la vibración no es un serio problema, es permitido emplear la ecuación de distancia escalada en lugar de las mediciones con un sismógrafo, donde:

$$D_s = D_i / (W^{1/2})$$

Donde:

$D_s$ = Distancia escalada

$D_i$ = Distancia del área de disparo a la estructura a proteger  
(pies)

$W^{1/2}$ = Máxima carga explosiva en libras por cada período  
de retardo en 8ms.

**2.2.2.5. Factor de energía.** Antes de la aparición de los hidrogeles y las emulsiones, el consumo específico se consideraba un buen indicador de la energía utilizada para fragmentar un volumen de roca dado, ya que normalmente la energía explosiva aumentaba con la densidad del propio explosivo. Sin embargo, en los agentes explosivos mencionados la energía puede variar enormemente, aun cuando la densidad del explosivo sea la misma. En consecuencia, era aconsejable utilizar un nuevo procedimiento para relacionar la energía explosiva necesaria para volar un volumen de roca dado.

Este parámetro es el denominado Consumo Energético, o también llamado Factor de Energía, que se define como la cantidad de energía explosiva en kilocalorías (kcal) por unidad de roca volada (m<sup>3</sup>/t).

La relación entre el Consumo Específico y el Factor de Energía puede entenderse fácilmente si se comparan dos agentes explosivos que tengan la misma densidad pero que se diferencian

en sus energías explosivas, expresadas en términos de Potencia absoluta por peso (PAP) y Potencia absoluta por volumen (PAV). Considerando el ejemplo de dos voladuras en la que se utilicen 1000 kg de explosivo para volar 2000 m<sup>3</sup> de roca, en la tabla se indica las características energéticas de los dos explosivos considerados.

El consumo Específico en ambas voladuras es el mismo, es decir:

$$CE_A = CE_B = 1000 \text{ kg}/2000 \text{ m}^3 = 0.5 \text{ kg/m}^3$$

Sin embargo, si se calculan las energías termoquímicas total, multiplicando las PAP por la cantidad de explosivo indicada, se obtiene los siguientes valores:

$$ET_A = PAP_A \times Q_A = 753 \times 1000 = 753000 \text{ kcal}$$

$$ET_B = PAP_B \times Q_B = 1000 \times 1000 = 1000000 \text{ kcal}$$

Tabla 1.

Características energéticas de dos explosivos.

AGENTE EXPLOSIVO	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	PAP (cal/g)	PAV (cal/cm <sup>3</sup> )
Explosivo A	1.18	753	902
Explosivo B	1.18	1000	1200

Fuente: EXSA, S.A, s.f.

Los Factores de Energía que resulta para cada tipo de agente explosivo son:

$$FE_A = 376.5 \text{ kcal/m}^3$$

$$FE_B = 500 \text{ kcal/m}^3$$

Se ve que el consumo de energía es casi 33% mayor con el segundo explosivo que con el primero. Obviamente los resultados en cuanto a granulometría y esponjamiento serán diferentes, aunque el consumo específico sea igual.

**2.2.3. Explosivos.** Son sustancias o mezclas químicas, con la propiedad de cambiar a un estado más estable, mediante una reacción química

exotérmica en un instante de tiempo, liberando toda la energía que contienen en forma de gases, sonido y calor de una manera violenta. Parte de esta energía liberada es utilizada en la fragmentación de roca, especialmente la producción de gases a gran presión y temperatura. Existe una variedad de clasificaciones para los explosivos en base a sus distintas características o aplicaciones. (EXSA, S.A., s.f.).

**2.2.3.1. ANFO.** Es un agente explosivo granular compuesto con nitrato de amonio en prills grado ANFO, un combustible líquido y un colorante. La mezcla se realiza en equipos modernos de alta precisión que, sumados a la alta calidad de los componentes, permite producir un agente de voladura de óptima calidad.

**2.2.3.2. Nitrato de amonio.** En la forma químicamente pura, está compuesta de: 60% de Oxígeno, 33% de Nitrógeno y 7% de Hidrógeno; en peso.

El nitrato de amonio es un compuesto químico, que tiene dos usos diferentes: como fertilizante e ingrediente básico de 25 mezclas explosivas. Esta sustancia es producida por la neutralización del ácido nítrico con amonio. La solución resultante es evaporada y convertida en forma de escamas densas o granos tipo prills.

Los prills de nitrato de amonio producido se pueden clasificar en grado agrícola y grado voladura (EXSA, S.A. s.f.)

**2.2.3.3. Performance del ANFO.** El ANFO, genera una presión de detonación, y una buena presión de taladro que mayormente, da como resultado un buen lanzamiento del burden. La liberación de energía disponible del ANFO es afectada por:

- Tamaño de las partículas del AN.
- Distribución de las partículas del AN

- Contenido de petróleo.
- Grado de confinamiento
- Diámetro de la columna explosiva.
- Sistemas de iniciación.
- Humedad.
- Líneas descendentes de cordón detonante.

La velocidad de detonación es un indicador de la calidad de la mezcla explosiva.

A mayor velocidad de detonación, la liberación de la energía disponible es alta (EXSA, S.A. s.f.).

**2.2.3.4. Emulsión.** Las emulsiones explosivas son agentes de voladura del tipo denominado “agua en aceite” en las que la fase acuosa está compuesta por sales inorgánicas oxidantes disueltas en agua y la fase aceitosa por un combustible líquido inmiscible con el agua del tipo hidrocarbonado, comúnmente diésel 2.

El tamaño de los componentes de esta mezcla (oxidante y combustible) tiene influencia directa en la velocidad de detonación y en general en el performance del explosivo.

La emulsión pura no es un agente de voladura, debido a que no es sensible ni siquiera al booster porque su densidad es muy alta. Para sensibilizarla, se puede utilizar un mecanismo físico como la generación de burbujas de gas, las cuales al ser comprimidas adiabáticamente se comportan como puntos calientes o hot spots, favoreciendo tanto la iniciación como la propagación de la detonación. (Lopez, C. 2003).

**2.2.3.5. Emulsión gasificable.** La solución acuosa de Nitrato Gasificable es una emulsión gasificable formada por una solución

microscópica oxidante dispersa en una fase combustible continua y estabilizada por un emulsificante.

Es sensibilizada en las operaciones mineras antes de su carguío en los taladros, mediante la dosificación de una solución gasificante produciendo una mezcla explosiva de menor densidad, resistente al agua, muy viscosa y de mayor velocidad de detonación que el ANFO pesado. Una vez cargado los taladros se deja transcurrir unos 20 minutos para la colocación del “taco” en el taladro. (Famesa, 2017).

**2.2.3.6. ANFO pesado.** El ANFO pesado es la mezcla de dos agentes explosivos, el ANFO y la emulsión en diferentes proporciones, donde la emulsión envuelve los prills de ANFO, formando una matriz energética con propiedades específicas. (López, 2003)

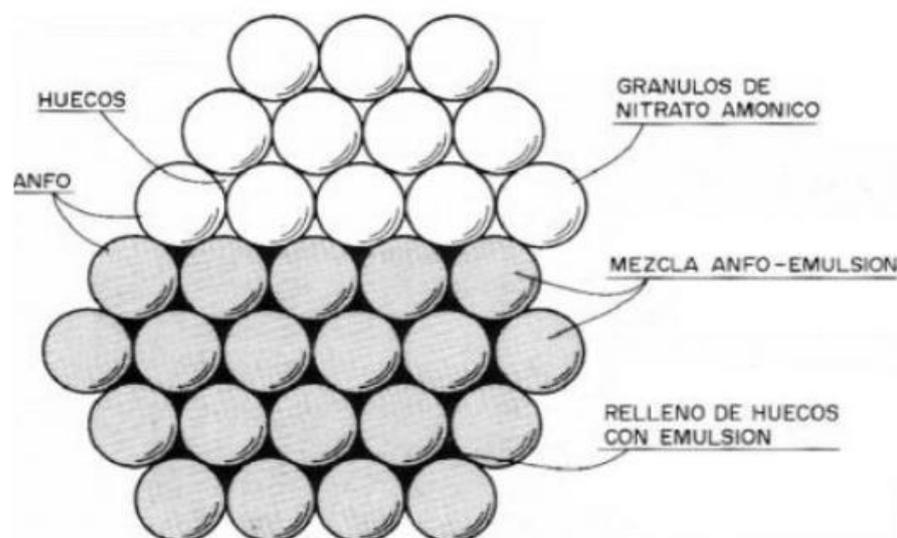


Figura 2. Estructura del ANFO pesado.

Fuente: FAMESA, Asistencia Técnica – UNACEM 2014

Tabla 2.

Características principales de diferentes mezclas de ANFO pesado

Mezclas Explosivas	Composición (%)		Densidad (gr/cc)	VOD (m/s)	Resistencia al Agua
	Emulsión	ANFO			
HA-37	30	70	1.05 ( $\pm 0.01$ )	4800 - 5000	Nula
HA-46	40	60	1.15 ( $\pm 0.01$ )	5000 - 5200	Baja
HA-55	50	50	1.27 ( $\pm 0.01$ )	5200 - 5400	Buena
HA-64	60	40	1.29 ( $\pm 0.01$ )	4500 - 4800	Excelente

Fuente: FAMESA, Asistencia Técnica – UNACEM 2014

**2.2.3.7. Fragmentación de la roca.** En el proceso de rompimiento y desplazamiento del material, que sucede durante y después de la detonación completa de una carga confinada. Etapas:

**2.2.3.7.1. Detonación.** Es la fase inicial de un proceso de fragmentación, en la cual los ingredientes básicos de un explosivo (combustible y comburente), se convierten inmediatamente en gases de altas presiones y temperaturas. Cercana a una reacción nuclear, es la reacción química más rápida que se conoce.

El marco de tiempo necesario para completar la detonación, es de pocos microsegundos para una carga pequeña esférica y milisegundos para una carga cilíndrica larga. Otros factores que afectan el tiempo de detonación son las formas geométricas, dimensiones y la VOD de la carga.

**2.2.3.7.2. Propagación de ondas de choque y de esfuerzo.** Es la fase que continua a la detonación. Esta alteración u onda de presión, transmitida a través del macizo rocoso, es resultado, en parte, de la rápida expansión

del gas y las altas presiones, lo cual produce el impacto en las paredes del pozo y la presión de detonación.

La geometría de la dispersión depende de varios factores, tales como ubicación del punto de iniciación (o puntos) VOD y velocidad de la onda de choque en la roca.

**2.2.3.7.3. Expansión del gas.** Durante, y/o después de la propagación de la onda de esfuerzo, los gases a alta temperatura y presión, producen un campo de esfuerzo alrededor del pozo que puede expandir el pozo original, extendiendo grietas radiales y penetrando en cualquier discontinuidad.

**2.2.3.7.4. El movimiento del material.** Es la última etapa en el proceso de voladura. La mayor parte de la fragmentación ya se ha completado a través de ondas compresionales y de tensión, de la presurización del gas o una combinación de ambos. Sin embargo, algún grado de fragmentación ocurre a través de colisiones en el aire y cuando el material impacta al suelo. Generalmente, mientras más alto es el banco mayor es la fragmentación, debido al aumento de la velocidad de impacto de los fragmentos individuales cuando caen al piso del banco.

**2.2.4. Desprendimiento de rocas.** Es el tipo de falla más simple y sucede cuando una o varias rocas se movilizan a causa de una pequeña perturbación que hace cambiar su estado de reposo.

El desprendimiento de rocas o planchoneo es el desplome o deslizamiento de la masa rocosa, producido por el desequilibrio al realizar una abertura en el macizo rocoso; esta masa inestable obedece a la ley de gravedad de caída libre.

**2.2.4.1. Factores.** Mencionamos algunos factores que contribuyen al desprendimiento de rocas:

1. **Factor Geológico.** Influye la intersección de planos estratigráficos, diaclasas, fallas, fisuras; los que forman blocks que se desplazan o se deslizan a lo largo del macizo rocoso.
2. **Factor ambiental.** Los factores que contribuyen a debilitar la masa rocosa se refieren a la filtración de agua subterránea, la humedad, cambios de temperatura, la humedad entre otros.
3. **Factor de altas presiones.** Se originan grandes esfuerzos en el macizo rocoso (verticales y laterales), cuando la excavación alcanza grandes profundidades, originando fracturas posteriormente el desprendimiento de roca.
4. **Factor de minado.** El método de minado a tajo abierto inapropiado en cuanto al tipo y la calidad de la masa rocosa, contribuye en la inestabilidad del macizo.
5. **Factor de voladura.** La sobrecarga de explosivos, falta de control en la calidad de voladura.

**2.2.5. Tajo Norte.** La mina Tajo Norte, es una operación a tajo abierto que explota minerales de contenido polimetálico, conformado principalmente por sulfuros de plata, plomo, zinc y cobre; constituido principalmente por galena, esfalerita y en menor proporción por galena argentífera, y enargita; y la ganga está constituida por piritita, baritina, hematina y siderita. La mineralización se presenta en capas paralelas a la estratificación,

alternando con horizontes de calizas, margas y tufos que forman un sinclinal (Flanco Principal) y un anticlinal (Flanco Mercedes Chocayoc). La producción diaria de mineral es de 18.000 tms /día, y desmonte de 42.000 lo cual lleva a una relación mineral/desmonte de 2/3.



*Figura 3.* Vista general del Tajo Norte  
Fuente: Planeamiento Sociedad Minera El Brocal.

#### **2.2.5.1. Estabilidad física del Tajo Norte.** En su condición final el flanco

Este del Tajo Norte mantendrá como mínimo una distancia de amortiguamiento que puede ser de 50 a 100 metros, entre el límite del Tajo y el área urbana de Colquijirca. Para ello, deben realizarse estudios de vibraciones con voladuras tipo a fin de determinar esta distancia óptima de amortiguamiento en función a la velocidad pico de partícula y la carga explosiva en las voladuras, además de programar un monitoreo permanente de control de vibraciones durante la etapa operativa de la mina.

Para garantizar la estabilidad de los taludes finales del tajo, el criterio adoptado es considerar un factor de seguridad (FS) mínimo de 1,0; considerando el efecto de la presencia de agua

subterránea y el efecto sísmico, es decir se trata de un factor de seguridad pseudo estático no drenado (condiciones críticas). En términos del factor de seguridad estático drenado, el factor de seguridad mínimo resultaría alrededor de 1,3.

## 2.2.5.2. Perforación y voladura.

### 2.2.5.2.1. Perforación.

Parámetros:

- Altura de bancos: 7 m.
- Diámetro de taladro: 6  $\frac{3}{4}$  de pulgada, con brocas triconicas
- Burden: 4 m.
- Espaciamiento: 5 m.



*Figura 4.* Perforación con DML Tajo Norte  
Fuente: Sociedad Minera El Brocal

**2.2.5.2.2. Voladura.** El tajo se ubica cerca de las viviendas de los pobladores de la comunidad, cuya vegetación y fauna merecen cuidado para preservarlo. Por ello, se está haciendo controles estrictos en la voladura para

no alterar el medio ambiente y cumplir con los compromisos asumidos con las comunidades vecinas.

Cuidando el medio ambiente, se tomaron en cuenta los controles necesarios para no impactar zonas intangibles cercanas a la operación. Consiguiendo un equilibrio entre manejo ambiental y resultados de fragmentación; minimizando el impacto al medio ambiente y logrando una fragmentación de 90% debajo de 6 pulgadas, implementado el uso de detonadores electrónicos.

- Sistema mecanizado de carga: Camión fabrica Quadra
- Explosivo: ANFO Pesado 30/70 - 40/60
- Sistema de iniciación No eléctrico
- Sistema silencioso de voladura.
- Reducción del burden teórico
- Secuencia de salida: taladro por taladro
- Factor de Potencia: 0,28 Kg/t

Debido a la cercanía de las viviendas de la población de Colquijirca a las operaciones en el tajo, se tiene previsto el control del nivel vibraciones mediante técnicas de voladura controlada con aplicación de voladuras de recorte y pre corte, además del seccionado de las cargas en los taladros en las voladuras del lado Este del tajo.

Para el control de las vibraciones en las voladuras el factor de carga será de 0,09 kg/ton y en taladros de producción 0,12 kg de explosivo/ton. Sociedad Minera El Brocal

cuenta con el equipamiento de dos Sismógrafos (INSTANTEL) para el monitoreo de la estabilidad física de los taludes del tajo y las posibles afecciones por efecto de las vibraciones a edificaciones ubicadas cerca del tajo.



*Figura 5.* Voladura Tajo Norte Nv. 4198  
Fuente: Sociedad Minera El Brocal.



*Figura 6.* Agentes de voladura  
Fuente: Sociedad Minera El Brocal.



*Figura 7. Detonadores electrónicos*  
Fuente: Sociedad Minera El Brocal.

#### **2.2.5.2.3. Carguío, acarreo y servicios auxiliares.**

El carguío se realiza con 03 excavadoras CAT 374 y CAT 390 una excavadora en Stand By, cuyo rendimiento promedio es de 900 tms/hr.

El transporte se ejecuta con volquetes de 22 m<sup>3</sup> de capacidad de tolva. Para los servicios auxiliares de operaciones tales como empuje de material en el botadero se cuentan con 04 tractor Caterpillar D8T y para el mantenimiento de vías se cuenta con dos motoniveladoras (02 Cat 140 H, 02 rodillo de 15 t”).



*Figura 8. Carguío.*  
Fuente: Sociedad Minera El Brocal.



*Figura 9. Acarreo.*  
Fuente: Sociedad Minera El Brocal.

**2.2.6. Sociedad Minera El Brocal S. A.** La mina El Brocal, S.A., es una empresa minera dedicada a la extracción, concentración y comercialización de minerales polimetálicos: zinc, plomo, cobre y plata. La

empresa realiza sus operaciones en las Unidades Mineras de Colquijirca y la Planta Concentradora de Huaraucaca.

El Brocal explota minerales de plata, plomo y zinc en su mina a tajo abierto denominada Tajo Norte y minerales de cobre en su mina subterránea denominada Marcapunta Norte.

El mineral extraído se procesa en una planta de concentración de minerales, con una capacidad de tratamiento de 18,000 toneladas métricas por día y cuenta con toda la infraestructura asociada como centrales hidroeléctricas, sub estaciones, talleres, almacenes, canchas de relaves, planta de tratamiento de aguas ácidas, viviendas y oficinas administrativas.

La estructura de la empresa está conformada al más alto nivel por su Gerencia General y comprende las siguientes Gerencias y Superintendencias:

**Operacionales:**

- Gerencia de Operaciones
- Superintendencia General de Operaciones
- Superintendencia de Mina
- Superintendencia de Procesos Metalúrgicos

**Que promueven el crecimiento de la organización:**

- Gerencia de Proyectos
- Asistencia de Gerencia de Proyectos
- Superintendencia de Exploraciones
- Superintendencia de Geología

**De soporte:**

- Gerencia de Finanzas y Administración

- Gerencia de Logística
- Gerencia de Recursos Humanos
- Gerencia del Programa de Seguridad y Salud Ocupacional
- Gerencia de Relaciones Institucionales
- Contabilidad General
- Superintendencia de Logística
- Superintendencia de RRHH
- Superintendencia de Energía y Mantenimiento
- Superintendencia de Seguridad y Salud Ocupacional
- Superintendencia de Asuntos Ambientales
- Superintendencia de Asuntos Sociales
- Superintendencia Legal
- Superintendencia de Contabilidad
- Auditoría Interna

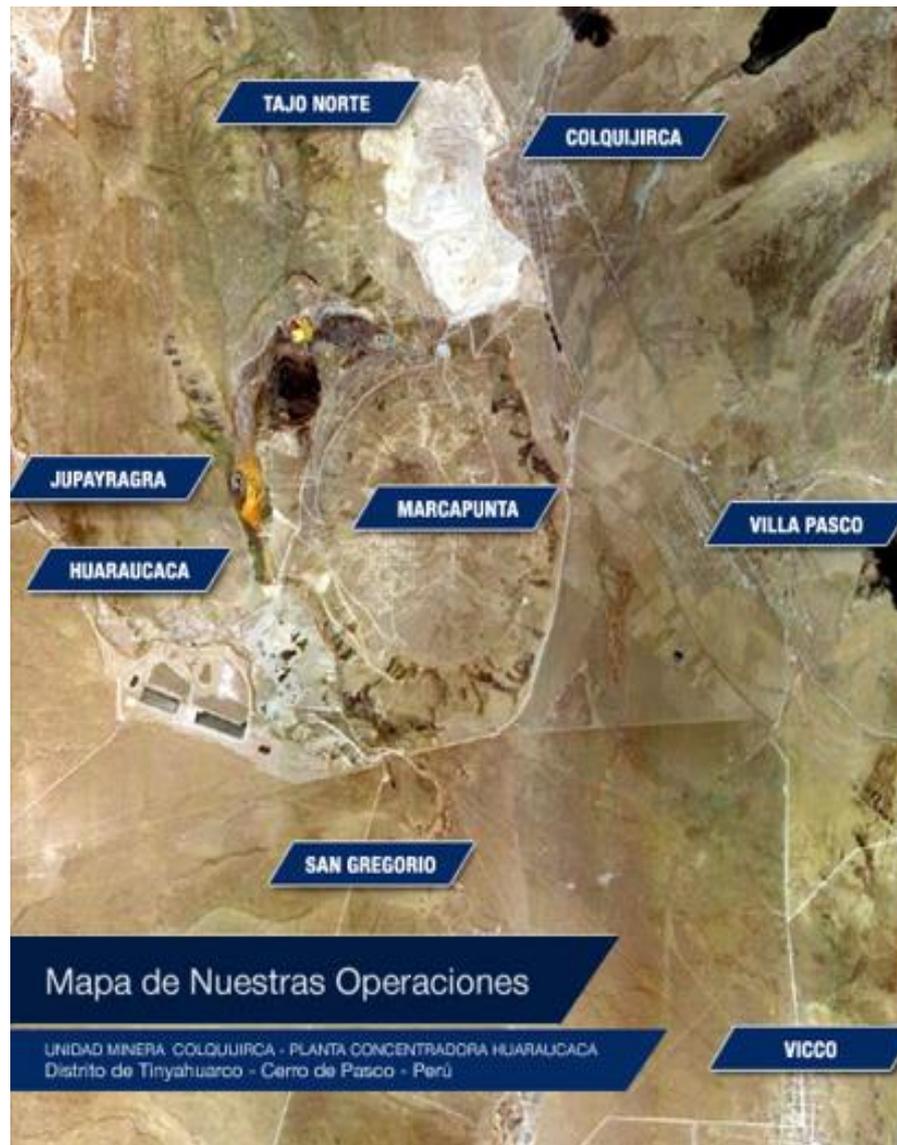


Figura 10. Mapa de operaciones. Mina El Brocal  
Fuente: Sociedad Minera El Brocal.

- A. **Ubicación.** La Mina el Brocal se halla ubicada en el distrito de Tinyahuarco, provincia Pasco y Región Pasco, a 295 kilómetros al Este de la ciudad de Lima y a 10 kilómetros al sur de la ciudad del Cerro de Pasco, a una cota promedio de 4340 msnm, sobre las estribaciones occidentales de la Cordillera Central. Coordenadas geográficas:

76° 16' 24" Longitud Oeste y

10° 46' 24" Latitud sur.

- B. **Accesibilidad.** Es accesible por:

Lima – La Oroya – Colquijirca: 295 km

Lima – Canta – Huayllay – Colquijirca: 265 Km.

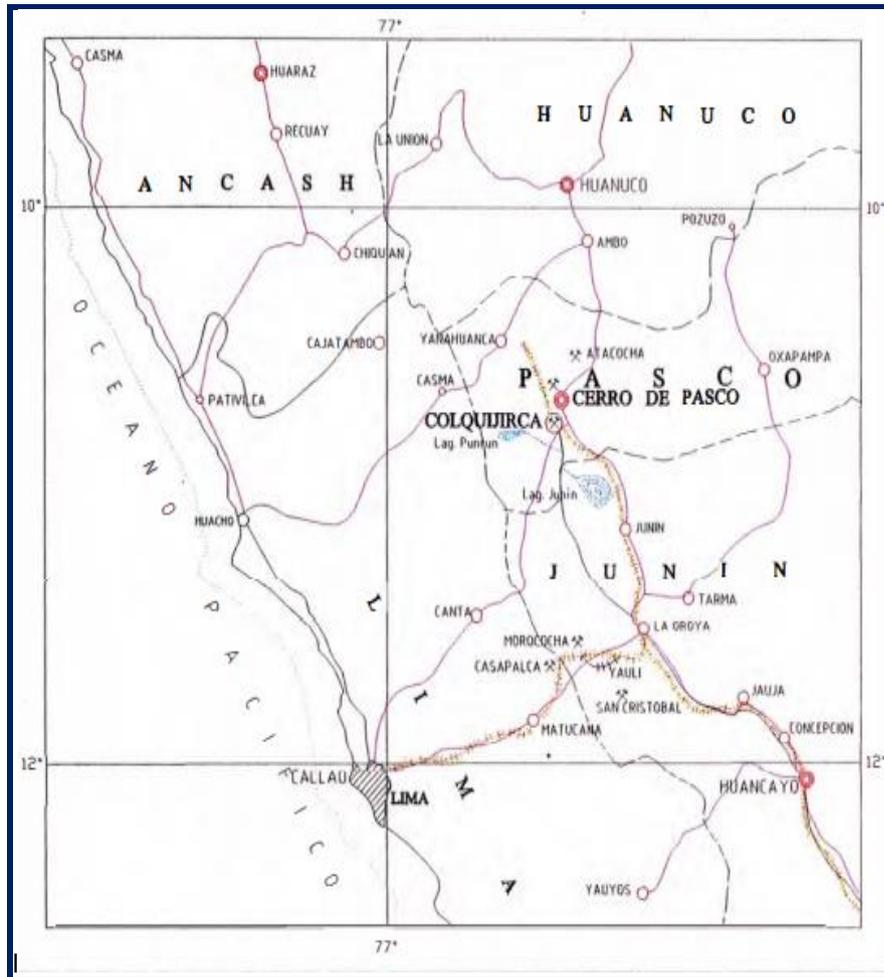


Figura 11. Ubicación Mina Colquijirca.  
Fuente: Sociedad Minera El Brocal.

C. **Clima.** El clima presenta dos estaciones bien definidas:

El invierno, comienza en noviembre y termina en abril con abundantes precipitaciones pluviales granizo y nevada.

El verano, comienza en abril y se prolonga hasta noviembre, se caracteriza por ser seco en el día, con temperaturas entre 10° - 15° C en el día y en las noches llega a 10 °C bajo cero, siendo muy frecuente las heladas.

D. **Fauna y Vegetación.** Tinyahuarco ocupa zonas de puna y jalca cuenta con escasa vegetación, pero con pajonales de ichus, la champa estrella

(variedad de las gramíneas), que enraíza abundantemente, y que los pobladores la extraen del suelo para utilizarlos como combustible.

Entre las aves que habitan se tiene: gaviotas, yanavicos, garzas, patos silvestres, guachuas, pájaros pito, el cernícalo, la bandurria, gallareta americana, garza blanca pequeña, gallareta andina, huaco, liclish, fraylisco, garza bueyera, pato media luna, pato jerga, pariona o parihuana, pato cordillerajno, pato colorado, pato puna, pato sutro, pato rana, perdiz de puna, polla de agua, zambullidor blanquillo, zambullidor pimpollo, zambullidor de Taczanowiski. También, se crían auquénidos como: llamas, alpacas y vicuñas.

**2.2.6.1. Marco Geológico.** La geología regional está conformada predominantemente por unidades lito-estratigráficas y en forma local por rocas ígneas. (Grupo Excelsior, Grupo Mitu, Grupo Pucará, Formación Chambará, Formación Pocobamba-Formación Calera, Volcánico Rumiallana, Rocas Intrusivas, Depósitos Cuaternarios). Dentro de la formación Pocobamba, se encuentra la unidad diferenciada y denominada como formación Calera, en cuyas rocas se encuentran los yacimientos minerales que actualmente se encuentran en explotación. Las rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas se hallan cubiertas por los depósitos cuaternarios de diverso origen, naturaleza, espesor y propagación.

El área de la mina Colquijirca, según la esquematización geotécnica de Cobbing, se halla en la “Cuenca Peruana Occidental”, que fue afectada por varias fases tectónicas. Uno de los componentes principales de esta cuenca es el Miogeosinclinal, con la disposición de gruesas secuencias

sedimentarias en el Geoanticlinal del Marañón que se halla al Este del área de interés; estas macroestructuras gradan unas a otras en forma de interdigitación o gradualmente.

El yacimiento de Colquijirca se localiza al lado Este de la chimenea volcánica y la falla longitudinal que separa las calizas Jurásicas de las filitas devonianas. La chimenea volcánica (aglomerado volcánico) compuesta por fragmentos de filitas, cuarcitas, calizas y pórfidos monzoníticos, dentro de una matriz fina conformada por los mismos elementos, vidrio volcánico y cristales de rocas intrusivas, ha sido instruido al Sur y Noreste por masas de monzonita cuarcífera. También es importante notar la presencia de diques de cuarzo monzonita albitizada atravesando la chimenea en la parte Norte.

La geológica se inicia en el triásico y revela una sucesión de eventos de depósitos minerales, tectónicos y volcánicos controlados por una estructura de dirección Norte-Sur, denominada Falla Longitudinal.

Falla Longitudinal es la estructura más importante, controló la sedimentación del Terciario, los complejos volcánicos de Cerro de Pasco y Marcapunta. Numerosas fallas y estructuras subordinadas de dirección NW- SE, E-W y NE-SW también han sido mapeadas en la región y en conjunto son importantes para el emplazamiento de la mineralización en Colquijirca y Cerro de Pasco.

En Marcapunta Norte, en interior Mina, también se ha mapeado gran cantidad de estructuras EW, principalmente en forma de fallas con poco desplazamiento, diaclasas y zonas de

cizallamiento que cortan al Manto Mineralizado, por lo tanto, de edad postmineral.

De igual modo en interior mina, adicional al manto mineralizado de Enargita Pirita; Oro-Alunita, se ha identificado un control estructural secundario en la mineralización, el sistema de microfracturas verticales, E-W pre mineralización, en microvetillas

#### **2.2.6.1.1. Geología estructural.**

Los estratos sedimentarios están fuertemente plegados en el área de Colquijirca, dando lugar a la presencia de varios anticlinales y sinclinales. Los ejes de los pliegues tienen un rumbo NNW a una extensión de unos 35 km desde Goyllarisquizga hasta Colquijirca por SSE y un buzamiento suave del eje hacia el Sur.

A. **Pliegues.** En el área de explotación minera de Colquijirca se presentan algunas estructuras geológicas como un anticlinal volcado asimétrico, de rumbo  $N20^{\circ}W/60^{\circ}NE$ . Estas dos estructuras han sido afectadas por dos fallas normales principales una con orientación  $N30^{\circ}W/75^{\circ}NE$  y la otra con orientación  $N55^{\circ}W/80^{\circ}NE$ .

B. **Fallas y fracturamientos.** A lo largo de la región Colquijirca existen tres fallas longitudinales: Huachuacaja (con desplazamiento aparente de rumbo), Cerro de Pasco de rumbo N-S (falla inversa) y una tercera que sigue al plano axial del anticlinal Mercedes-Chocáyoc con desplazamiento aparente del bloque Este hacia el Sur (falla dextral).

#### **2.2.6.1.2. Estratigrafía.**

- A. **Formación Cacuán.** El extremo NO del Sinclinal de Cacuán expone una de las columnas más completas de 100 - 150 m de potencia. En el Río San Juan, al E de Sacra Familia una potencia de 100 m de capas rojas, descansan sobre el Pucará, Occidental, formada por secuencias grano crecientes de unos 10 a 25 m de espesor cada una, sus partes inferiores consisten de argilitas limosas y limolitas rojas, laminadas.
- B. **Formación Shuco.** En la región de Colquijirca - Cerro de Pasco esta formación se compone sobre todo de brechas sedimentarias y conglomerados, con escasos lentes de limolitas arenosas y aún más escasas areniscas muy gruesas con guijarros. La composición, calibre y morfometría de los elementos varía notablemente en función de la distancia, en primer lugar, a la FL (Jenks.1951), y subsidiariamente a la FRSJV. Así a proximidad de la primera estructura se trata de una brecha casi monolitológica, consistente de clastos de calizas y sílex Chambará.
- C. **Formación Calera.** La primera mención de este intervalo la encontramos en Mc Laughlin (1924), donde se le llama "caliza Calera", Mc Kinstry (1936) la llamó Formación Calera, Noble (1992), en vista de la aparición de una considerable fracción de material volcánico desde la base de la unidad, encontró aconsejable referirse a ella como formación.
- Si bien este intervalo es grosso modo concordante, aunque disarmónico en los pliegues con la Fm Shuco

en la mayor parte de la región, su superposición directa sobre el paleorelieve de Pumagaga refuerza esta opción.

D. **Grupo Excelsior (Devónico).** Afloramientos del Perú Central (Devónico inferior y medio). Los escasos afloramientos se encuentran al NE del Distrito de Colquijirca, donde lo conforman filitas y pizarras gris parduscas, rara vez se encuentran estratos delgados de cuarcitas que forman el núcleo del anticlinal de Cerro de Pasco.

E. **Grupo Mitu (Pérmico superior – Triásico inferior).** La presencia del Grupo Mitu en la zona, fue plenamente establecido, por la presencia de fragmentos de fósiles como las Chaetetes of Radians Fisher – Lonodaleiasp Ripidonella. Las capas rojas del Mitu fueron reconocidas como Pérmicas.

En Colquijirca estas capas están conformadas por conglomerados polimícticos con una matriz areniscosa que se intercala con delgados estratos de areniscas limolíticas; por lo tanto, se distingue unidades del Grupo Mitu: unidad inferior conglomerádica y la superior donde predominan las areniscas.

**2.2.6.1.3. Geología económica.** La mineralización del Tajo Norte se encuentra emplazada dentro de la secuencia sedimentaria plegada de la Formación Calera Miembro Medio o Colquijirca y superior. La mineralización presenta un Rumbo NE aproximadamente abarcando los flancos: Principal, Mercedes, Chocayoc, La llave y

la Pampa. La mineralización aproximadamente cubre unos 4 Km de longitud y de 0.70 Km de ancho.

Los trabajos de reinterpretación de los testigos de perforación diamantina, definen los siguientes tipos de mineralización.

**A. Asociación mineralógica en el Tajo Norte.** En el tajo

Norte se definen los siguientes tipos de mineralización:

*Tipo I (Núcleo de Cobre: Cu + Ag + Bi).* Este tipo de mineralización está emplazada casi siempre en horizontes completamente silicificados de chert negro con una extensión aproximada de 1500 m y pudiendo alcanzar 150 m de ancho. Este núcleo de cobre con el fin de explotación y tratamiento se subdividen en:

*Tipo IA.* Es la parte más interna de este núcleo que consiste de enargita – pirita – alunita, aquí se puede presentar la pirita en abundancia presentándose generalmente como reemplazamiento masivo. La ganga asociada está constituida por alunita, baritina, cuarzo. Entre los minerales secundarios están presentes en aquellas zonas de alteración supérgena malaquita, azurita y calcantita.

*Tipo IB.* Es la parte más externa del núcleo de cobre y que está constituido principalmente por calcopirita, extendiéndose 800 m al N de los límites del tipo IB, la calcopirita se presenta a manera de venillas y como reemplazamiento masivo y disseminado; la baritina, dickita, caolín relleno de fracturas y cavidades, este

tipo también está emplazado en chert negro albergando importantes valores de plata y bismuto.

*Tipo II.* (zona de transición: Cu +Ag + Bi, Zn, Pb) Este tipo de mineralización se caracteriza por su alto contenido de Ag, Cu, Bi, Zn y Pb, la que la hace una zona compleja por la gran variedad de especies mineralógicas. En composición mineralógica comprenden calcopirita, esfalerita y galena, acompañado por caolín, baritina y en menor proporción pirita y hematita. La ocurrencia de estos minerales se da como relleno de fracturas en oquedades y como reemplazamiento masivo, se subdivide en:

*Tipo IIA.* Esta zona está caracterizada por una completa decarbonatización cuya mineralogía consiste de caolín, pirita, dickita y alunita; este tipo de mineralización coincide con el Tipo IA en posición.

*Tipo IIB.* Emplazado en chert negro y conformando zonas de "Roca Sulfurosa", presentan importantes valores de Cu, Ag, Bi, Zn y Pb; este tipo se encuentra en las partes más distales del núcleo de cobre y coincide en posición con el tipo IB.

*Tipo III.* (Zona de metales base: Zn, Pb, Ag). Es el halo más externo de mineralización que por su volumen es de mayor importancia económica, se encuentra emplazada en rocas dolomíticas y en menor proporción en niveles de chert negro. Entre los minerales de mena tenemos la esfalerita y galena; presentándose como relleno de fracturas y muchas veces llegando a

constituir zonas de reemplazamiento masivo, como minerales secundarios tenemos la anglesita, cerusita y smithsonita, todas ellas presentes en la zona de alteración supérgena.

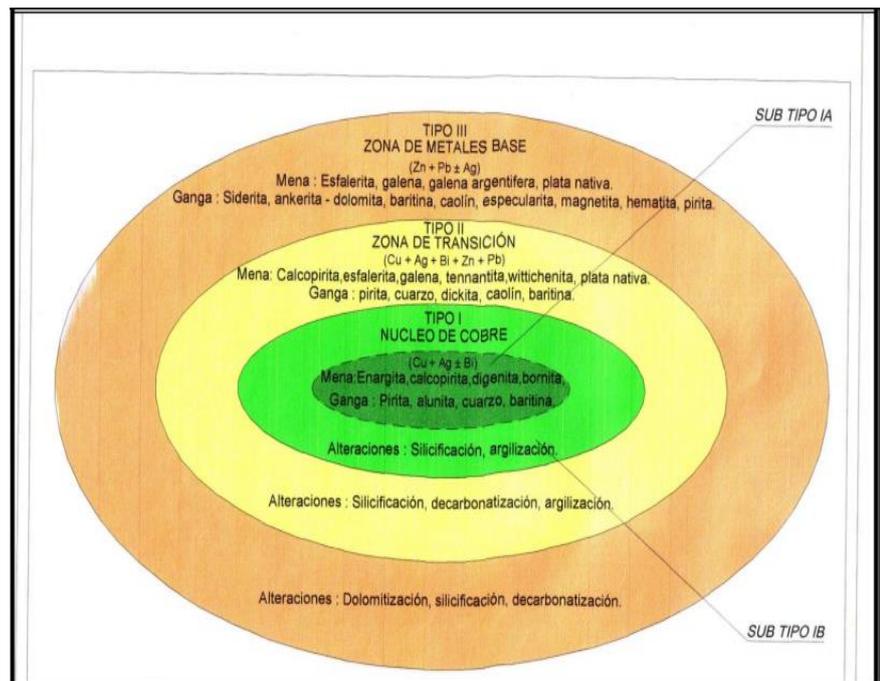


Figura 12. Asociación mineralógica.  
Fuente: Oficina de Geología SMEB.

### B. Yacimientos minerales.

**Manto V - Cuerpo Nuevo.** Las secuencias litológicas son secuencias litológicas del Grupo Pucará (Triás-Jurásico) consta de dolomías, intercaladas con calcarenitas y dolomías oxidadas en la parte superior, con suaves plegamientos, disturbados por los sistemas Manto V (N 65° – 70° W) sistema Cuerpo Nuevo (N 45° – 55° W) la mineralización está restringida a éstos sistemas en forma de cuerpos que se interdigitan en profundidad hasta llegar a delgados Feeders (raíces), persisten hasta los bancos Norte y Manto Noreste en Cuerpo.

Es importante indicar que la mineralización consta de esfalerita-galena-py, de grano fino en la parte central Cuerpo Nuevo y grano grueso hacia los bordes (cuerpo Rosita) en general es del tipo disseminado donde la presencia de sulfuros, está en forma disseminada-venillas y alojadas en cavidades de disolución cárstica. Predomina la ankeritización, caolín, pirita disseminada y halos bien silicificados.

**Cuerpo oxidado Argentífero (Pacos).** Las zonas de alteración supérgena constituyen los denominados “pacos”, se ha desarrollado impresionantes sombreros de Fe, que profundizan desde pocos cms a más de 100 m de profundidad, aprovechando el sistema de fracturamiento principal, contactos y paquetes favorables brechadas, ubicados inmediatamente encima de los cuerpos mineralizados de Pb-Zn, Silica-pirita y Ag-Bi.

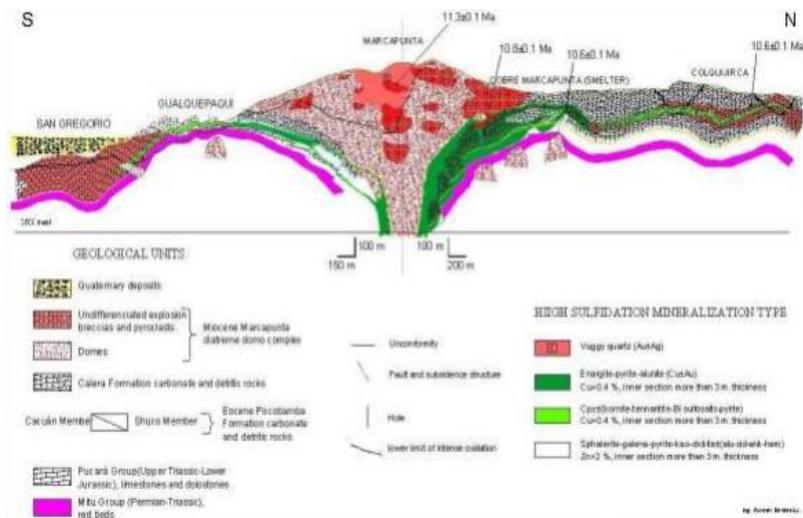


Figura 13. Mina Colquijirca. Sección longitudinal S – N. Fuente: Departamento Geología. SMEB.

**C. Mineralización.** Con la finalidad de entender mejor la asociación de minerales se ha efectuado estudios mineragráficos en secciones pulidas con los cuales se ha identificado los siguientes minerales en el yacimiento de Colquijirca:

*Enargita* ( $Cu_3AsS_4$ ). Mineral de mayor cantidad junto a la pirita.

*Pirita* ( $Fe_2S$ ). Se halla en forma masiva y reemplazando casi totalmente a la roca original.

*Calcopirita* ( $CuFeS_2$ ). Se observa en diminutos cristales subhedrales y en forma masiva, la calcopirita está asociada a la enargita.

*Tennantita* ( $Cu_{12}As_4S_{13}$ ). Se encuentra como inclusiones granulares dentro de la pirita.

*Esfalerita* ( $ZnS$ ). Este mineral es muy común hacia el norte donde se puede encontrar en forma cristalizada pero en tramos muy aislados.

*Galena* ( $PbS$ ). Se puede encontrar en cristales pequeños a veces maclados y en finas venillas.

*Covelita* ( $CuS$ ). Se han formado como producto de la incipiente alteración supergénica de enargita y calcopirita.

*Hematita Especularita* ( $Fe_2 O_3$ ). Se encuentra en cristales en forma de escamas y masivas, la hematita es común encontrarla en impregnación como productos de la alteración de la pirita y de specularita.

*Azufre Nativo (S.)*. Se han encontrado pequeños cristales bordeando a los fenocristales de feldespatos alterados.

*Calcita (CaCO<sub>3</sub>)*. Se encuentran formando venillas y como parte de la matriz de tobas y brechas.

*Caolin (Al<sub>2</sub>S [Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>] [OH]<sub>8</sub>)*. Se encuentra relleno de cavidades de lixiviación y de algunas fracturas.

*Siderita (FeCO<sub>3</sub>)*. Se presenta como relleno de fracturas junto a la hematita, y en algunas geodas.

*Baritina (BaSO<sub>4</sub>)*. Se presenta en pequeños cristales tabulares en algunas vetillas asociados a la pirita.

*Pirolusita (MnO<sub>2</sub>)*. Se encuentra en fracturas a manera de impregnaciones y como parte de la alteración supergénica.

*Malaquita (Cu<sub>2</sub> [CO<sub>3</sub>] [OH]<sub>2</sub>)*. Resultado de la alteración supérgena de minerales primarios de cobre.

**2.2.6.1.4. Alteraciones.** La alteración supérgena está asociada por la oxidación, asimismo ocurre en las paredes de antiguas labores subterráneas. Entre las principales se tiene:

*Silicificación.* Presente en casi todo el yacimiento, principalmente en el núcleo de cobre, donde la silicificación es avanzada en donde ciertos tramos presentan un intenso brechamiento, esta alteración presenta mayor extensión con respecto a las demás.

*Dolomitización.* Característica del halo exterior y la de mayor desarrollo alrededor de la zona de transición. La

intensidad de esta alteración va disminuyendo hacia los límites más externos; las zonas con esta alteración frecuentemente suelen presentar siderita botroidal, rellenando cavidades y fracturas.

*Argilización.* Representado por el ensamble caolín - dickita y caolín -alunita principalmente en el núcleo de cobre, acompañado de enargita – pirita, esta alteración es típica en la zona de transición y menos común en la zona de metales base. Las rocas afectadas por esta alteración presentan colores claros bastante blandas, salvo en aquella en donde está presente una silicificación avanzada a moderada (núcleo de cobre).

*Decarbonatización.* La roca resultante por este tipo de alteración presenta una apariencia detrítica y colores que varían entre gris a gris claro. Estas zonas de decarbonatización se ubican usualmente en las zonas de transición y también en las zonas de metales base. Cuando la decarbonatización ocurre en la zona de transición (cerca del tipo IA) suele ir acompañada de una moderada argilización y trazas de pirita.

*Oxidación.* Es de naturaleza supérgena y por consiguiente, más desarrollada cuando la estructura mineralizada se encuentra en o cerca de la superficie. La percolación de aguas meteóricas origina la formación de óxidos, hidróxidos, sulfatos y carbonatos a partir de sulfuros primarios tales como: limonita, hematita, smithsonita, anglesita, cerusita, etc.

**2.2.6.1.5. Zoneamiento.** El cono volcánico Marcapunta ha sido la fuente principal de las alteraciones hidrotermales y la posterior mineralización cuya geometría horizontal forma una franja en dirección N – S de 4 km de longitud y 700 m de ancho, las observaciones insitu presentan 4 zonas con sulfidización decreciente desde el centro hacia el norte y estos son:

**Zona Central.** Aquí se distingue la mineralización diseminada de Au cuyas características muestran un ambiente epitermal que se encuentran emplazados en lavas dacíticas, piroclastos y brechas volcánicas con ensambles de Cuarzo – Alunita – Au, el Cuarzo ocurre como reemplazamientos en granos finos y comúnmente como Vaggy Sílica y sílice residual en rocas ácidas lixiviadas.

**Zona de Marcapunta Norte.** Se caracteriza por los minerales de Cu cuya ocurrencia es la enargita y trazas de Au que reemplazan hidrotermalmente a las capas de Calera inferior y Medio lugares de alta temperatura que se encuentran adyacentes al cono volcánico Marcapunta. El ensamble mineralógico en esta zona consta de enargita – luzonita, pirita principalmente, calcopirita y covelita.

**Zona de Smelter.** Entre la zona de Smelter y el lado sur del Tajo Mercedes – Chocayoc se tiene una gradación de la zona anterior (enargita – pirita) como

una súper imposición al ensamble de Zn y Pb- Ag que ocurre en el tajo abierto.

**Zona de Tajo Abierto.** Aquí predomina la mineralización polimetálica de Zn, Pb, y Ag, cuya alteración en esta zona es la silicificación, caolinización y sideritización y al lado sur del Tajo en operación la ocurrencia de enargita y cobres grises en traza.

**2.2.6.2. Marco Geomécánico.** Para la Caracterización del Macizo rocoso (Roca Intacta + Discontinuidades) y para la estabilización del Macizo Rocosos (Equilibrio de los Esfuerzos In-Situ + Esfuerzos Inducidos) en toda la periferia de la excavación, se han generado medidas de control o sostenimientos que puedan dar seguridad en nuestras operaciones, teniendo en cuenta los trabajos cuyos impactos puedan afectar el macizo rocoso.

Para el control de estabilidad de nuestras labores se realizan los siguientes trabajos geomecánicos:

- Mapeo geomecánico RMR (Bieniaswski 1989).
- Calidad de la instalación de los elementos de sostenimiento.
- Sostenimiento oportuno de las labores.

**Procedimientos de la geomecánica.** Son las siguientes:

- Evaluación geomecánica de labores y recomendaciones en labores mineras y labores de riesgo.
- Recomendación In-situ de labores.
- Mapeo RMR, mapeo estructural, zonificación geomecánica.
- Elaboración de informes de estabilidad de labores.
- Controles operativos geomecánicos diarios por guardia.
- Control de calidad de trabajos de sostenimiento.

- Valorización de sostenimiento.
- Capacitación del personal.

### 2.2.6.2.1. Clasificación de Bieniawski.

Para determinar la clasificación geomecánica se ha evaluado con los 5 parámetros básicos de Bieniawski.

*Tabla 3.*

Clasificación de rocas según el total de valuación

<b>VALUACIÓN</b>	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
<b>CLASIFICACIÓN (TIPO)</b>	I	II	III	IV	V
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Muy buena roca	Buena roca	Roca regular	Roca mala	Roca muy mala

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.

Clasificación de Bieniawski (RMR 89)

CLASIFICACIÓN DE BIENIAWSKI (RMR 1989)											
VALORIZACIÓN DE PARÁMETROS											
SECTOR	1	2	3	4					5	R M R	CLASE
				4.1	4.2	4.3	4.4	4.5			
CH-N	9	9	8	2	4	5	2	3	15	57	III
CH-N	9	8	8	2	4	5	2	3	15	56	III
CH-N	9	9	8	2	4	5	2	3	15	57	III
P A R A M E T R O	1		Resistencia de la Roca Inalterada								
	2		Rock Quality Designation Index (RQD)								
	3		Espaciamiento de Discontinuidades								
	4		4.1		Longitud de Discontinuidad						
			4.2		Separación						
			4.3		Rugosidad						
			4.4		Relleno						
			4.5		Alteración						
5		Condición de Agua Subterránea									

Fuente: Elaboración propia.

### 2.3. Definición de términos básicos.

- ✓ **Afloramiento:** Porción de un yacimiento mineral que aparece sobre la superficie de la tierra.
- ✓ **Ancho Mínimo de explotación:** Es la distancia mínima permisible para romper el cuerpo determinado antes de la perforación y voladura que nos permite controlar la potencia de la veta y no ser diluido el mineral más allá de lo permitido.
- ✓ **Ángulo de Reposo:** Máximo ángulo de talud, en el que materiales sueltos tales como, tierras y rocas fragmentadas permaneces estables.
- ✓ **Azimut:** Ángulo que forma una línea con la dirección Norte-Sur, medido de 0° a 360°, a partir del norte, en sentido del movimiento del reloj.
- ✓ **Banco:** Cortes escalonados propios de una explotación a cielo abierto, sobre el yacimiento, en los cortes se ven dos caras libres, una vertical lateral y otra horizontal.
- ✓ **Berma:** Es la cara superior del banco, se utiliza para el transporte y traslado de minera, desmonte y materiales para la consecuente operación de explotación del material.
- ✓ **Booster:** Alto explosivo utilizado para mejorar la detonación de la columna explosiva aumentando la velocidad de detonación utilizando explosivos de alta velocidad como el ANFO y APD.
- ✓ **Botadero:** Son lugares especialmente destinados y preparados para recibir material estéril de la mina a cielo abierto.
- ✓ **Burden:** Distancia más próxima desde la línea de perforación hacia la cara libre del banco de explotación.
- ✓ **Cara libre:** Superficie creada que por lo general se relaciona con el frente de un banco que sirve como primera fila que se detona en la secuencia de explotación.

- ✓ **Carguío:** Etapas del proceso de explotación a cielo abierto, especialmente al proceso del material mineralizado roto en las bermas del tajo lugar especialmente preparado para esta actividad.
- ✓ **Conservación Minera:** Los concesionarios mineros deberán presentar las declaraciones de patentes de conservación minera mediante el formulario 117 debiendo realizar una declaración por cada concesión.
- ✓ **Cut-Of:** Es la concentración mínima que debe tener un elemento en un yacimiento para ser económicamente explotable, es decir, la concentración que hace posible pagar los costes de su extracción, su tratamiento y su comercialización. Es un factor que depende a su vez de otros factores, que pueden no tener nada que ver con la naturaleza.
- ✓ **Densidad de carguío:** Da la medida de llenado de un taladro. En el caso de un llenado perfecto sin dejar el menor espacio desocupado tendremos por definición una densidad de carguío = 1.
- ✓ **Desmante:** Roca que no tiene suficiente ley ni otras características de mineral necesarios a minarse.
- ✓ **Diámetro de carga:** Elemento de diseño que influye directamente sobre el rendimiento del explosivo y la amplitud de la malla de perforación.
- ✓ **Diseminado:** Depósito formado por cristalización dispersa de valores minerales sin concentración local, Mena que contiene pequeñas partículas de minerales valiosos, diseminados en forma más o menos uniforme dentro de material estéril; diferente de la mena masiva, en la que los minerales valiosos ocurren en forma casi sólida con muy poco material estéril incluido.
- ✓ **Geometría de carga:** Relación entre el largo de la carga con su diámetro y el punto donde es iniciada. Se refleja en el proceso de rompimiento y en la formación de “zonas de fracturación” en las cargas cilíndricas de los taladros de voladura.

- ✓ **Grado de Acoplamiento:** Radio del diámetro de carga al diámetro del taladro.  
El acoplamiento físico entre la carga explosiva y la roca permite la transferencia de la onda de choque entre ellas, teniendo un carácter muy significativo sobre el rompimiento.
- ✓ **Grado de confinamiento:** Depende del acoplamiento, del taqueo o acabado, del uso de taco inerte para sellar el taladro y de la geometría de la carga (burden y distancia entre los taladros). Un confinamiento demasiado flojo determinará un pobre resultado de voladura. Por otro lado, un alto grado de confinamiento (por excesivo atacado del explosivo) puede incrementar tanto su densidad que lo puede hacer insensible a la transmisión de la onda de detonación y fallar. Los explosivos a granel (ANFO, emulsión) en bancos se confinan por sí solos.
- ✓ **Ley mínima explotable:** Se determina por consideraciones económicas y se denomina ley de corte.
- ✓ **Malla de perforación:** Plano que identifica la disposición de la perforación en una zona determinada del tajo este plano sirve para realizar la perforación, contiene la siguiente información básica: Zona número de taladros, profundidad de columna, sobre perforación, diámetro de perforación, espaciamiento.
- ✓ **Método de Minado:** Es función del nivel de selectividad a aplicar en la explotación de un yacimiento, este también dependerá del método de explotación a utilizar subterráneo o superficial.
- ✓ **Minado:** Es el conjunto operaciones, a cielo abierto, con técnicas para aprovechar un yacimiento mediante minería se conoce como laboreo de minas. La zona de la labor en que se trabaja para su excavación se denomina frente, corte o testero.
- ✓ **Minería a cielo abierto:** Extracción minera que se realiza sobre la superficie por medio de maquinaria y movimiento de tierras.

- ✓ **Minería:** Actividad de explotar las minas, extraer minerales.
- ✓ **Operaciones mineras:** Toda y cada uno de las actividades que tengan por objeto el desarrollo de la minería.
- ✓ **Plan de minado:** Programa de minado contemplando el plan de perforación y voladura, producción de mineral y estéril en toneladas.
- ✓ **Planeamiento minero:** Planeamiento y Control de Producción en Operación del área de Minas, se aplica para lograr las metas u objetivos que se trazan en una unidad de producción de una Empresa Minera y ello va depender del tipo de organización con que cuenta la Empresa Minera.
- ✓ **Precorte:** Voladura de inicio diseñado para disparos de producción o voladura principal en la fila de iniciación.
- ✓ **Recorte:** Disposición de los taladros diseño de salida de disparos para no dañar los taludes aledaños del tajo.
- ✓ **Tiempos de retardo:** Tiempos medidos en milisegundos (ms), que determina la secuencia de encendido en una voladura, el tiempo de retardo queda determinado en el detonador de acuerdo con los tiempos definidos previamente en el diseño de malla.
- ✓ **Transporte en tajo:** Movimiento de equipos por la berma diseñada, y acondicionada más o menos de 25 metros de ancho que permitan el cruce de camiones de alto tonelaje.
- ✓ **Veta:** Cuerpo tabular, o en forma de lámina, compuesto por minerales que han sido introducidos en las rocas por una diaclasa o fisura, o por sistemas de diaclasas y fisuras.

## 2.4. Formulación de Hipótesis:

### 2.4.1. Hipótesis General.

El diseño de malla de perforación y la carga explosiva influye en la optimización de la voladura para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el tajo Norte. Mina El Brocal S.A.

### 2.4.2. Hipótesis Específica.

Con el diseño de malla de perforación, optimización de voladura y carga explosiva se conseguirá disminuir la fragmentación del material, vibraciones del terreno y cuidado del medio ambiente.

## 2.5. Identificación de Variables:

**2.5.1. Variables independientes:** Perforación y voladura

**2.5.2. Variables dependientes:** Desprendimiento de rocas

## 2.6. Definición Operacional de variables e indicadores.

Tabla 5.

Operacionalización de variables e indicadores

VARIABLES	DEFINICIONES	DIMENSION	INDICADORES
<b>Variables Independientes :</b>	<b>Perforación.</b> Primera operación en la preparación de una voladura, cuyo propósito es abrir en la roca huecos cilíndricos.	Tipo de roca Parámetros de perforación Diseño de malla.	Tipo de malla. Equipo Cantidad de taladros. Costos
Perforación y voladura	<b>Voladura.</b> Ignición de carga masiva de explosivos. Carguío de los huecos realizados en la perforación con explosivos.	Geometría del tajo  Parámetros de voladura. Cantidad y calidad de explosivos	Seguridad en el trabajo  Velocidad de detonación del explosivo. Presencia de gases nitrosos. Factor de carga Factor de potencia.

Costos

**Variables**      **Desprendimiento de rocas.**

**Dependientes**  
:

Es el tipo de falla más simple y sucede cuando una o varias rocas se movilizan a causa de una pequeña perturbación que hace cambiar su estado de reposo.

Grado de sismicidad y movimiento de rocas en bancos circundantes del tajo.

Fragmentación de roca.

Propiedades físico mecánicas del macizo rocoso.

Desprendimiento de rocas.

Fuente: Elaboración propia,

### CAPÍTULO III

#### METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

##### 3.1. Tipo de investigación.

- **Por su Propósito.** Es básica y aplicada; porque definimos conceptos y principios teóricos, asimismo, es aplicada porque, usaremos experiencias técnicas de interés para nuestro estudio.
- **Por los medios de obtención de datos.** Usaremos algunos reportes de mina y elementos como los informes de producción en la mina.
- **Por el nivel de conocimientos.** Es descriptiva por alguna experiencia utilizada para su desarrollo y es descriptiva, porque, en su proceso se debe seguir un orden sistemático de procesos de trabajo en la explotación.
- **Es Cualitativo y Cuantitativo.** Porque se utilizan términos conocidos dentro del mundo de la minería que se cuantificaran con los resultados de producción.

### 3.2. Método de investigación.

El método de investigación es descriptivo, consiste en referir, examinar y descifrar sistemáticamente un conjunto de hechos o fenómenos y sus variables que los caracterizan. (Sánchez, 2006).

Enmarcado en el estudio de mejora continua en los procesos de producción en la empresa, y preocupados por mejorar la calidad y cantidad de producción seguimos un proceso metódico sensible a variaciones y modificaciones que merezcan sin desviarse de sus objetivos planteados

### 3.3. Diseño de investigación.

Para el diseño del estudio de investigación se realizan los siguientes análisis en función al tipo de estudio estos son:

- **Exploratorios:** Control geológico, caracterización geomecánica de los tajos, saneamiento específico.
- **Correlacionales:** Se relaciona con otras formas de ventilación de minas en otras unidades aledañas a la Unidad de Colquijirca.
- **Explicativa:** Las vibraciones dependen de la capacidad y energía de los explosivos y el diseño de perforación y voladura.

### 3.4. Población y muestra.

**3.4.1. Población:** La población está compuesta por todos los bancos del Tajo Norte, Mina Colquijirca.

**3.4.2. Muestra:** Chocano Sur. Tajo Norte. Banco 4390. Disparo 835.

- **Métodos de Muestreo:** Es la capacidad de determinar la cantidad taladros de corte y pre corte de banco con experiencias y criterios de juicio que puede en algún momento ser aleatoria a otros procesos de mejoramiento del disparo.

- **Tipos de Muestras:**
  - ✓ **Muestra Aleatoria Simple:** Se utilizarán comparaciones con otros sistemas de perforación de otros tajos similares y poder diferenciarlo mediante el criterio costo/beneficio y que se cumpla con los parámetros exigidos.
  - ✓ **Muestra estratificada:** Se han realizado mediciones en pruebas de campo para determinar y establecer los cálculos requeridos que cumplan y satisfagan al objetivo del proyecto.
  - ✓ **Muestra No probabilística:** Se emplearán criterios, habilidades del personal a cargo, calidad técnica del ingeniero de minas y diseño de perforación y voladura de bancos.

### 3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

- **Observaciones.** Se ha realizado observaciones y comparaciones de unos con otros sistemas de perforación y voladura en tajos en el País y en el extranjero.
- **Entrevistas.** Se han tomado en cuenta criterios de experiencias de los cuales se han determinado conclusiones, de personas con experiencias que han sido valoradas para establecer el sistema perforación y voladura.

### 3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.

Se orientó principalmente en analizar y estudiar los reporte e informes de las pruebas de perforación y voladura realizadas durante el tiempo de estudio que fue comparado con informaciones provenientes de perforación y voladuras antiguas en el Tajo Norte, así mismo se realizó la evaluación y análisis de los resultados apoyados de herramientas tecnológicas digitales. Se realizó un análisis estadístico de la información obtenida, verificando la contrastación de las variables y las pruebas estadísticas para su interpretación respectiva.

### **3.7. Tratamiento Estadístico.**

Se realizó un análisis estadístico de la información obtenida, verificando la contrastación de las variables y las pruebas estadísticas para su interpretación respectiva. Se efectuó el análisis de datos de los resultados post-voladura, considerando principios de estadística descriptiva, realizando la agrupación de datos empleando herramientas de soporte estadístico que permita visualizar, analizar y cotejar los datos que conforman la muestra en estudio llevado a efecto en el Tajo Norte. Mina Colquijirca.

### **3.8. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.**

- **Selección.** La compilación y selección de los datos empleados en el presente estudio, se realizó a partir de los informes y reportes de perforación y voladura presentados por la empresa especializada que presta servicios en el Tajo Norte Mina Colquijirca.
- **Validación.** Los informes y reportes son presentados y sustentados al departamento de operaciones mina. Mina Colquijirca..Sociedad Minera El Brocal., S.A., por consiguiente, se valida su autenticidad.
- **Confiabilidad.** Se garantiza la veracidad de los informes y reportes empleada en los estudios, ya que se obtuvo a partir de la recolección de datos en el área de estudio y apoyados por las fotografías tomadas en el campo.

### **3.9. Orientación ética.**

La ética es considerada un saber racional, esto la convierte en una herramienta para el estudio fundamentado y objetivo de los valores morales. Por ello que se considera de gran importancia que el investigador demuestre sus más altos principios morales cuando este va a desarrollar algún tipo de estudio (Pérez & Cardona, 2004).

El presente estudio se realizó en forma ética, poniendo en conocimiento al personal de la Mina Colquijirca Sociedad Minera El Brocal S.A. la finalidad de nuestro estudio resguardando el anonimato de los participantes y respetando las opiniones vertidas durante el proceso de investigación.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. Descripción del trabajo de campo.**

##### **4.1.1 Procedimiento de trabajo.**

1. Planteamiento de la tarea técnica de la investigación, basándose en dar solución necesaria y suficiente para el diseño y ejecución de la voladura controlada.
2. Visita preliminar al terreno para una inspección visual de:
  - ✓ Lugar de la voladura.
  - ✓ Macizo rocoso.
  - ✓ Posición y características de las construcciones y objetos a proteger.
3. Recopilación de datos de archivo de investigaciones existentes.
4. Confección de un programa de investigación según a la complejidad de la tarea técnicas y las condiciones de protección del entorno.
  - ✓ Adopción de umbrales de protección, según los requerimientos.
  - ✓ Control de los disparos programados con el sismógrafo con que cuenta la Compañía.

5. Procesamiento de datos e interpretación de resultados.
6. Entrega de resultados y sugerencias al jefe de perforación y voladura del área.

**4.1.2 Zona de estudio.** Chocano Sur. Tajo Norte. Banco 4390. Disparo 835.

Distancia horizontal a 64 m., de la población y 10 m de distancia vertical.

**4.1.2.1 Propiedades del macizo rocoso.** Mencionamos las

características físicas y condiciones del macizo rocoso de la zona de estudio.

*Tabla 6.*

Propiedades del macizo rocoso

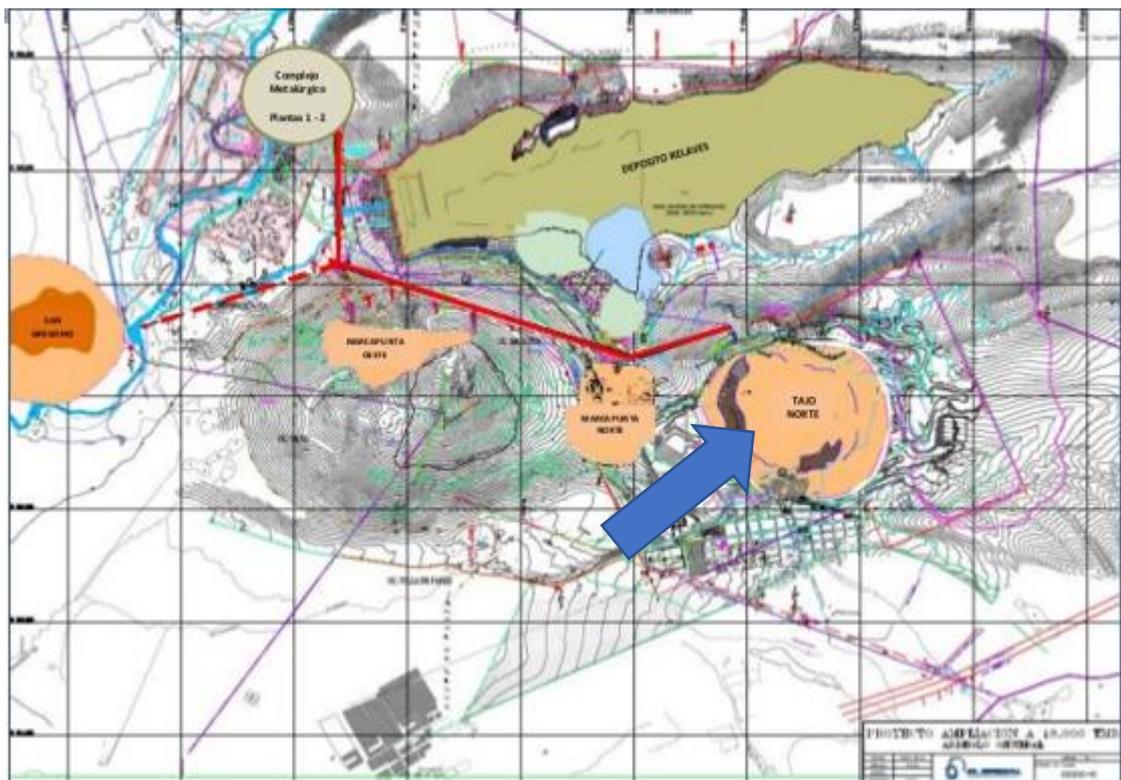
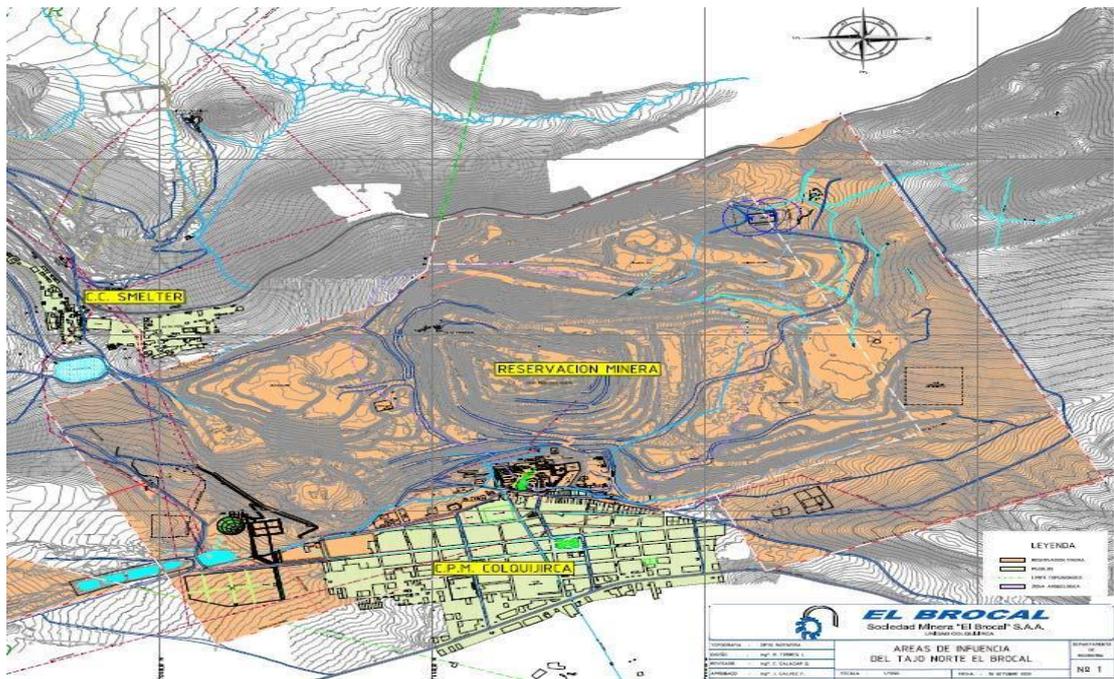
<b>Resistencia a la Compresión Simple.</b>	<b>Dolomias : 40 – 45 Mpa</b>
Grado de Homogeneidad y Competencia.	La cohesión del macizo, desde la cresta del talud al piso del talud es de 200 a 300 Kpa. Con un ángulo de fricción de 25 a 35°
Nivel de alteración de la roca.	Dolomitización; por la recristalización de carbonatos, calcio y magnesio.
Grado de fracturamiento.	Roca muy fracturada (6 a 10 fracturas)
Espaciamiento de las discontinuidades.	De 6 a a10 fracturas por metro lineal.
Orientación de las fracturas.	La orientación principal de las fracturas es de S 45° a 60° E. La orientación de los sistemas secundarios es de N 60° a 70°W, son fracturas de tensión.
Relleno de las fracturas.	Las fracturas están rellenas de Carbonatos (calcita, dolomita) y limonitas (óxido de hierro), las fallas principales están rellenas por panizo, arcilla y re cristalización que pasa a veta falla.
Tensión Residual del Macizo Rocosos.	La tensión sísmica donde se enclava el yacimiento es 0.15 para el estático y pseudo estático.
Naturaleza de los Rasgos Estructurales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las estructuras primarias son sub verticales con un buzamiento de 80° a 85° hacia el sur este.</li> <li>• Las formas de la estructura mineralizada son en vetas rellenas por mineral</li> </ul> Las rocas son las dolomías intercaladas por calcarenitas y los pacos, al este compuesto por calizas y tramos con presencia de caolín.
Frecuencia de los rasgos estructurales.	En la zona de Chocano Sur “Pacos, dolomias etc.” las estructuras son predominantes (muy fracturada a triturada) y con respecto a resistencia son de pobres a muy pobres (de 5 a 50 Mpa) Al este de la zona de trabajo se observan Calizas Frescas, Fracturadas de moderadamente resistentes a muy resistentes, con una estratificación delgada a moderado.
Módulo de Young.	Calizas-Dolomías: 3000 a 9000Mpa
Densidad de la Roca.	Caliza-Dolomías: 2.2 a 2.4 Ton/m3
Relación de Poisson.	Caliza 0.20 - 0.27

#### **4.1.2.2 Tecnología utilizada.** Mostramos un disparo en el Plan

Chocano, banco 4390, disparo 835, a una distancia horizontal de 64 m., de la población, y 10 m de distancia vertical.

Se dispararon 13 taladros de 14 m con diámetros de 7 7/8", distribuidas en 3 filas, cuya voladura ha sido controlada con taladros en perforación en línea, es decir se han perforado una fila de taladros de menor profundidad, en la parte posterior, pero no se cargan, además se está utilizaron el sistema de 3 decks. Todas estas medidas tomadas para reducir las vibraciones, además para evitar la sobre rotura posterior del talud. Cada taladro fue cargado con ANFO, con una carga de fondo de 30 Kg., carga intermedia de 20 Kg y carga superior de 12 Kg.

Los retardos superficiales han sido de 42 ms entre taladro, y de 75 ms entre fila y fila. La Velocidad Pico Partícula (VPP) resultante fue de 0.42 pulg/ seg, y con un rango de frecuencias entre 6.9 Hz. y 13.1 Hz. En este caso notamos que estamos por debajo de lo permisible, respecto al análisis de frecuencias, para evitar daño.



Figuras 14– 15. Ubicación del disparo.  
 Fuente: Planeamiento Sociedad Minera El Brocal.

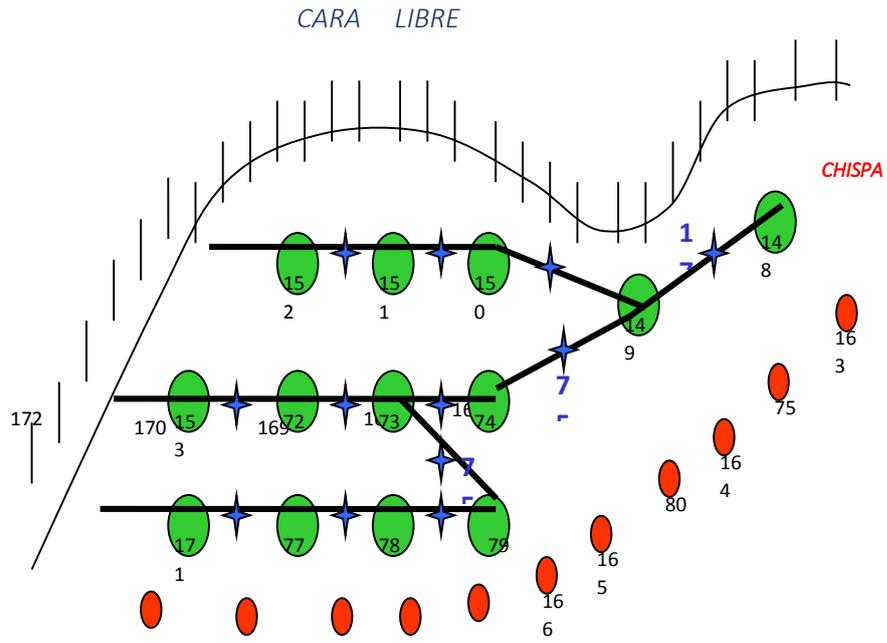
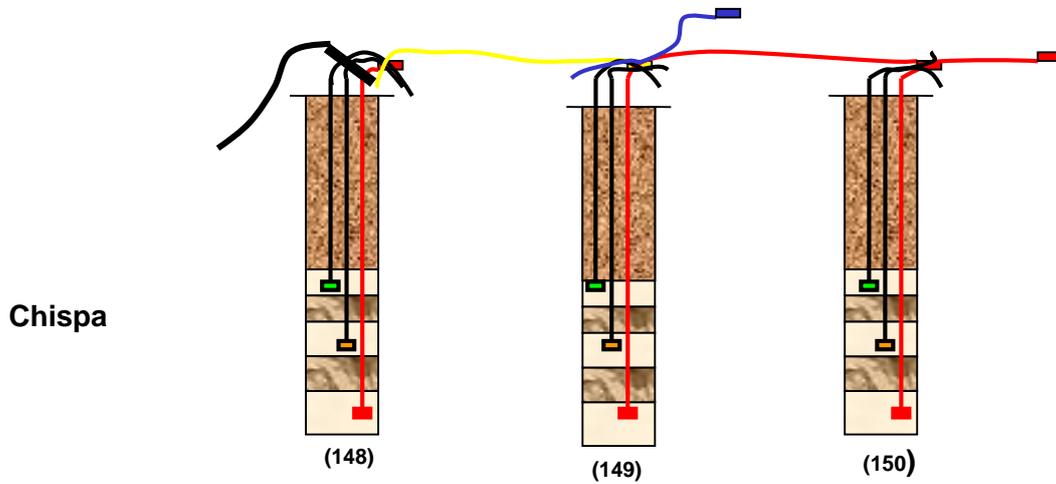


Figura 16. Distribución de malla.  
Fuente: Departamento Planeamiento. Sociedad Minera El Brocal.



Figuras 17. Distribución de la carga explosiva en el taladro  
Fuente: Departamento Planeamiento SMEB.



Figuras 18. Vista del preparado disparo de perforación en línea y uso de 3 decks  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 19. Vista del disparo con perforación en línea y uso de 3 decks  
Fuente: Elaboración propia.



Figuras 20. Disparo resultante. Se observa la cercanía de las viviendas  
Fuente: Elaboración propia.



Figuras 20 – 21. Zona de afectación. Se observa la cercanía de las viviendas  
Fuente: Elaboración planeamiento mina.

#### 4.1.3 Sistemas de iniciación.

Tabla 6  
Parámetros de perforación y voladura

Diámetro del explosivo(mm)	200	200
Densidad del explosivo(gr/cc)	0,8	0,8
Energía de Explosivo(J/gr)	3872,8	3872,8
Densidad de la roca (gr/cc)	2,3	2,3
Altura de banco (m)	10	10

	CASO 1	CASO 2
Longitud de Taco (m)	6	6
Distribución de Energía (%)	40	40
Sobreperforación (m)	4	4
Longitud del taladro (m)	14	14
Longitud de Carga (m)	8	8
Densidad de Carga (kg/m)	25,12	25,12
<b>Peso de carga (kg)</b>	<b>30</b>	<b>62</b>
Energía de Carga (kJ)	116184	240113,6
Burden (m)	4,0	4,0000
Factor de rigidez	2,500	2,500
Espaciamiento (m)	4,0	4,000
Volumen de voladura (m <sup>3</sup> /tal)	160,000	160,000
Masa volada (Ton/tal)	368,000	368,000
Factor de carga ( kg/m <sup>3</sup> /tal)	0,188	0,388
Factor de carga ( kg/Ton/tal)	0,082	0,168
<b>Factor de energía (kJ/Ton)</b>	<b>315,72</b>	<b>652,483</b>

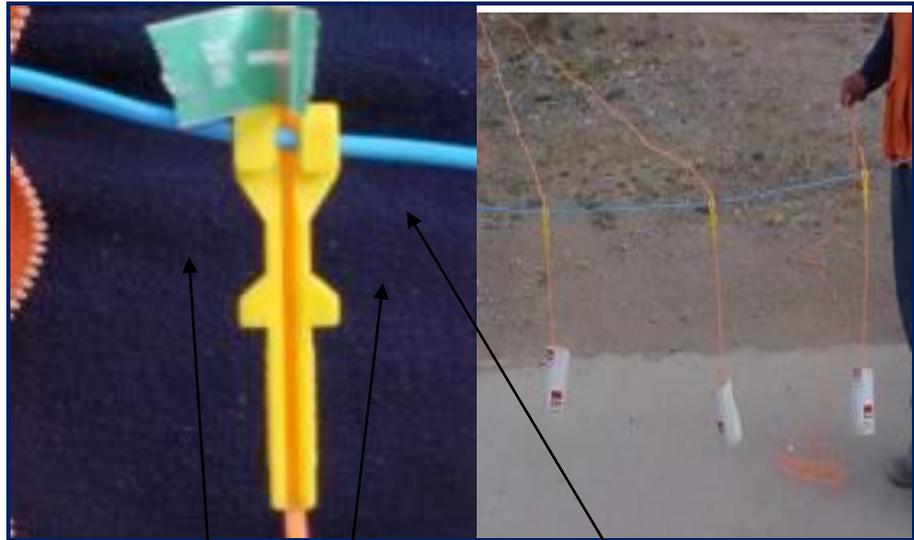
**4.1.3.1 Sistema no eléctrico.** La iniciación se propaga a través del cordón detonante, tubos de choque o una combinación de ambos.

Este sistema se divide en dos subgrupos: Tradicional y Silencioso

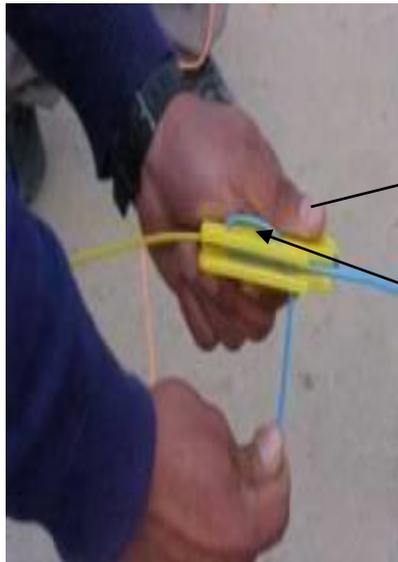
**4.1.3.1.1 Sistema tradicional.** Sistema mixto, compuesto

principalmente por dos partes:

- a) Cordón detonante en superficie, en conjunto con conectores de retardo de superficie.
- b) Tubo de choque en el pozo, en conjunto con cápsula de retardo.



Conector J      Booster 450 (1 Lb)      Cápsula de retardo  
Hook



Cordón



**Conector de retardo de superficie**

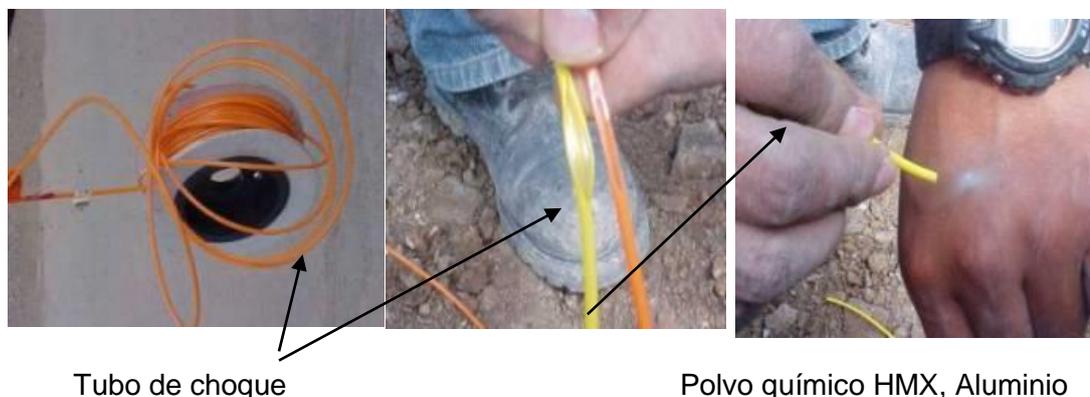
*Figuras 22 – 23. Sistemas de iniciación.*  
Fuente: Elaboración propia.

**4.1.3.1.2 Sistema silencioso.** Es un accesorio del sistema de iniciación no eléctrico de cargas explosivas, que permite reemplazar el uso de cordón detonante, como líneas troncales, en disparos de minería a cielo abierto y subterráneo.



Figuras 24 – 25. Sistema silencioso  
Fuente: Elaboración propia.

**Partes.** El Sistema silencioso está constituido por: Un trozo de tubo de choque, de un largo determinado por la Geometría del disparo y que transmite una señal de baja energía. Este tubo de choque es laminado, de pequeño diámetro y con una capa de material reactivo en su interior (HMX, aluminio una vez iniciado) genera una onda de choque que se propaga a una velocidad de 2000mts/seg.



Tubo de choque

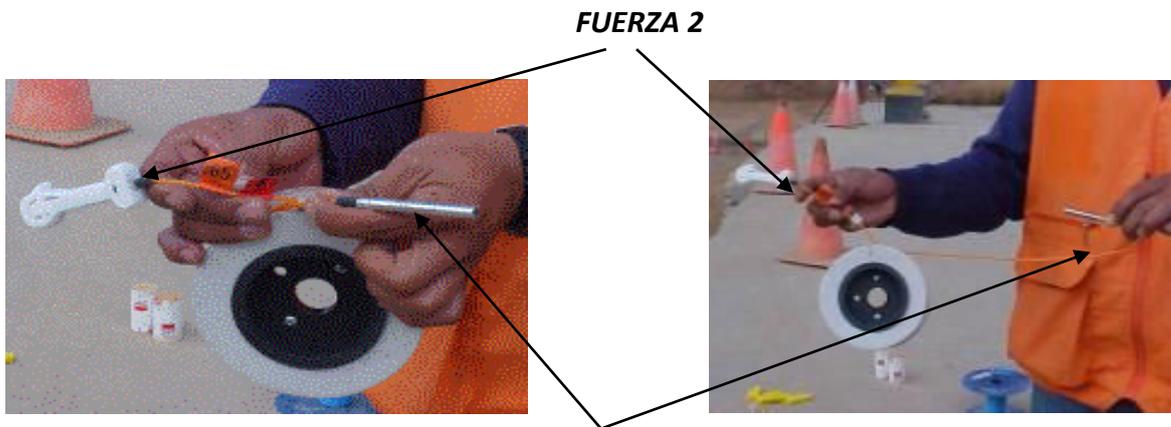
Polvo químico HMX, Aluminio

Figura 26. Partes del sistema silencioso.  
Fuente: Elaboración propia.

Un detonador no eléctrico PRIMADET colocado en uno de los extremos del tubo de choque, de un tiempo de retardo adecuado a la aplicación y destinado a iniciar la carga de fondo del taladro.

Un detonador no eléctrico PRIMADET colocado en el otro extremo del tubo, pero de baja potencia y alojado en un conector plástico. Este conector permite insertar hasta 6 tubos de choque lo que son iniciados en ambas direcciones.

### **DETONADOR DE BAJA POTENCIA CON ALOJAMIENTO PLASTICO**



### **DETONADOR DE ALTA POTENCIA FUERZA 12**

Figura 27. Detonadores de alta y baja potencia.  
Fuente: Elaboración propia.

Etiquetas de identificación las que indican el largo del tubo de choque y el tiempo nominal de retardo de ambos detonadores (de superficie y de fondo).



Figura 28. Tiempo nominal de retardo  
Fuente: Elaboración propia

**Líneas troncales.** Son líneas usadas para crear puentes entre taladros y para cerrar circuitos en superficie. Las líneas troncales son similares a los detonadores EZ-DET pero sin el detonador de fondo.



**LINEAS TRONCALES**

**LÍNEA DESCENDENTE TECNOL**

**PRIMADET LÍNEA TROCAL**

*Figura 29. Líneas troncales.*  
Fuente: Elaboración propia

**4.1.3.1.3 Ventajas del sistema**

- Este sistema es muy flexible que permite diseñar o modificar disparos en el mismo terreno, por medio de conexiones simples y versátiles.
- Elimina el cordón detonante y los conectores de retardo en superficie y con ello la onda expansiva área asociada a la detonación de estos accesorios. Por esta razón es silencioso.
- Elimina el uso de series de detonadores reemplazándolas por un elemento único, el que es el que es introducido en todos los taladros por igual. Por

tal motivo se obtiene una considerable reducción del costo de inventario al reducir los ítems normalmente usados en el sistema tradicional.

- En el sistema tradicional, se no logra un buen aprovechamiento del explosivo dado que las actuales series de retardo, en voladuras muy grandes se debe repetir algunos números, con el consecuente aumento de los kg. de explosivo por un mismo retardo.

Lo anterior se traduce además en un aumento de los niveles de vibraciones, afectando la estabilidad de los taludes y pilares.

Con el sistema **EZ-DET** en cambio, se logra obtener una voladura tiro a tiro indefinido y un óptimo control de las vibraciones.

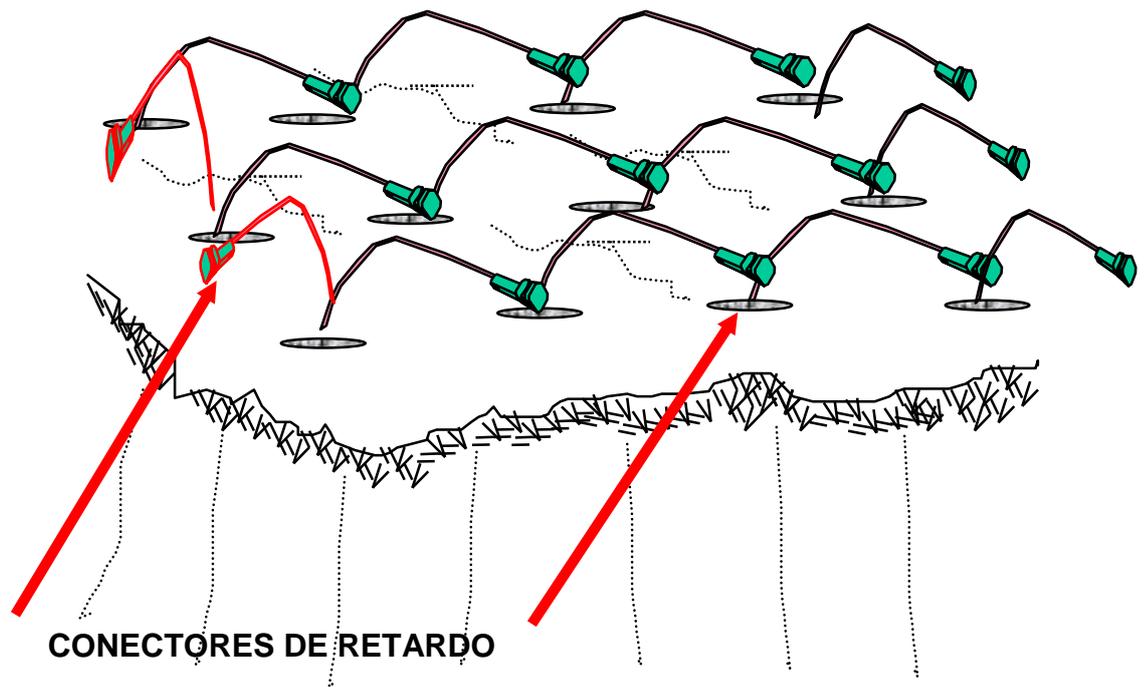
#### **4.1.4 Aplicación del sistema silencioso en la mina El Brocal S.A.**

Debido a la cercanía del tajo abierto alrededor de la localidad de Colquijirca, se optó por implementar este sistema de voladura silencioso ya que se tenían constantes quejas de la población, ya que confundían el sonido de las voladuras con las vibraciones generadas.

El sonido generado por este sistema silencioso es imperceptible a una distancia de 300 m, al oído humano.

Este sistema se hace silencioso debido el detonador de superficie tienen una carga explosiva de 1 a 2 mg de ácido de Pb, mientras que cordón detonante lleva 3 gr/m (3g) a 5 gr/m (5G), por tal razón el sonido generado por el cordón detonante es mayor a la del fulminante del sistema silencioso.

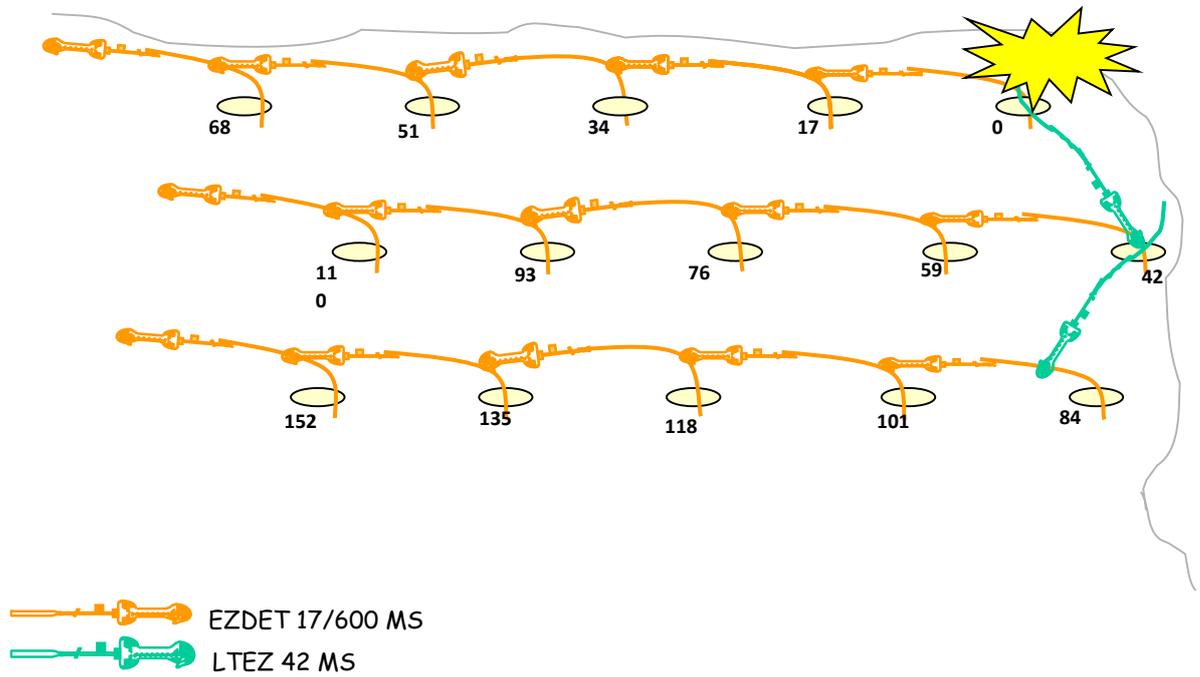
**4.1.4.1 Instalación del sistema silencioso.** La instalación se inicia con la verificación de los taladros de 6  $\frac{3}{4}$ " , esta inspección consiste en determinar si los taladros contienen agua o no para determinar qué tipo de explosivo se empleará, luego se distribuye los accesorios.



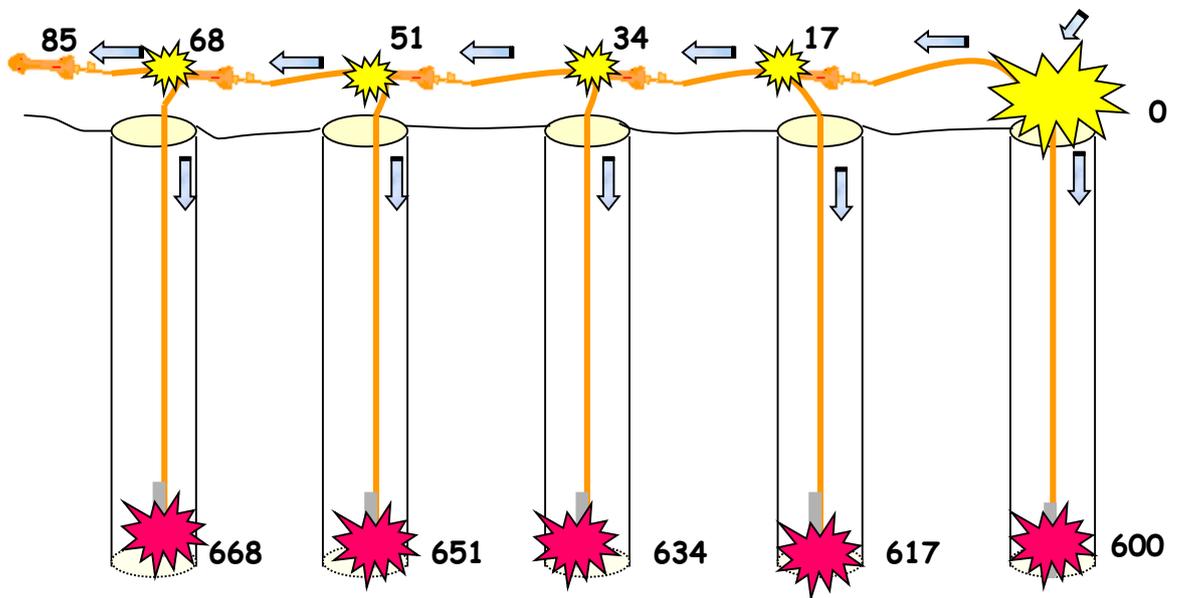
*Figura 30.* Instalación del sistema silencioso.  
Fuente: Elaboración propia.

**4.1.4.2 Iniciación del sistema silencioso.** El inicio del sistema silencioso, es con el encendido de la guía de seguridad, para luego dar paso a la iniciación del tubo silencioso, taladro por taladro y fila por fila hasta completar toda la malla.

La onda de choque se transmite en dos direcciones, una hacia el detonador de fondo del taladro y la otra hacia el detonador de baja potencia en superficie.



Figuras 31. Iniciación del sistema silencioso.  
Fuente: Elaboración propia.



Figuras 31 – 32. Iniciación del sistema silencioso.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 33. Instalación del sistema silencioso.  
Fuente: Planeamiento de mina. SMEB.

#### 4.2. Presentación, Análisis e Interpretación de Resultados

Las técnicas de voladura controlada se usan en el tajo de Colquijirca, Sociedad Minera el Brocal para diferentes propósitos, pero el objetivo común es el de mejorar la distribución de la energía producida por la detonación de las mezclas explosivas comerciales, la que se transmite dentro del macizo rocoso y cuyos efectos tienen como resultado la acción de la presión de los gases actuando sobre las paredes de los taladros.

Para llevar a cabo el planeamiento de la voladura se debe contar con la siguiente información:

- ✓ Plano geológico.
- ✓ Planos geomecánicas o geotécnicos.
- ✓ Plano hidrogeológico.
- ✓ Especificaciones técnicas de la perforadora a usarse.
- ✓ Entrenamiento y capacitación al personal.
- ✓ Propiedades físico-mecánicas del macizo rocoso donde se efectuará la perforación.
- ✓ Cantidad y calidad de la mezcla explosiva a usarse.

Todo esto debe ser plasmado en un diseño que representa el plano de perforación y voladura.

Con el cambio del ANFO PESADO por el ANFO se logró obtener resultados satisfactorios en el aspecto técnico, ya que se puede apreciar que en la primera prueba el 69% de los fragmentos tenían dimensiones menores a 0,15 m y en la segunda prueba el 90,7% de los fragmentos eran menores que dicho tamaño, los cuales son adecuado para el tratamiento por lixiviación del mineral fragmentado. Referente a los resultados de la fragmentación, después de las pruebas de voladura se realizó la toma de fotografías, donde se aprecia las pilas de escombros para el respectivo análisis granulométrico. Los resultados fueron analizados por el programa Wip Frag. Luego del análisis del grado de fragmentación que produjo cada una de las pruebas se puede resumir y concluir en los siguientes:

1. Tamaño de los fragmentos primera prueba:

Tamaño mínimo 0,008 m. Tamaño máximo 0,276 m.

Distribución de los fragmentos:

El 100 % < a 0.30 m

El 69 % < a 0.15 m

El 57,3 % < a 0.125 m

2. Tamaño de los fragmentos segunda prueba:

Tamaño mínimo 0,006 m Tamaño máximo 0,215 m.

Distribución de los fragmentos:

El 100 % < a 0.30 m

El 90,7 % < a 0.15 m

El 83,0 % < a 0.125 m.

Respecto a los resultados económicos la diferencia de US\$/ton es 0,014 a favor del ANFO PESADO y si el movimiento de material es 36 500 TM/día el ahorro

sería de US\$ 183 960 y en lo referente a la evaluación ecológica se tendrá que implementar un programa riguroso para las inspecciones semanales de los kits anti derrames y otros para evitar el impacto del uso del ANFO PESADO.

#### **4.3. Prueba de hipótesis.**

A medida que se iba mejorando el diseño de malla de perforación y la carga explosiva en la voladura en cada prueba que se hizo iba mejorando la granulometría del material

Luego del análisis del grado de fragmentación que produjo cada una de las pruebas se puede resumir y concluir:

1. Tamaño de los fragmentos primera prueba:

Tamaño mínimo 0,008 m Tamaño máximo 0,276 m.

Distribución de los fragmentos:

El 100 % < a 0.30 m

El 69 % < a 0.15 m

El 57,3 % < a 0.125 m

2. Tamaño de los fragmentos segunda prueba:

Tamaño mínimo 0,006 m Tamaño máximo 0,215 m.

Distribución de los fragmentos: El 100 % < a 0.30 m

El 90,7 % < a 0.15 m

El 83,0 % < a 0.125 m.

En esta investigación se tomó como estudio la velocidad pico partícula (VPP) generada por la voladura de rocas y su influencia en el daño al macizo rocoso.

Con las pruebas realizadas se consiguió disminuir la velocidad pico partícula usando retardos secuenciados adecuadamente.

La velocidad pico partícula (VPP) resultante fue de 0.42 pulg/ seg, y con un rango de frecuencias entre 6.9 Hz. y 13.1 Hz. Observando que estamos por debajo de lo permisible, en relación al análisis de frecuencias.

#### **4.4. Discusión de resultados.**

La aplicación de voladuras controladas a corto, mediano y largo plazo, es la opción más rentable y sostenible en el tiempo para una empresa minera. Superponiendo el cuidado del entorno social y el sólido desarrollo de las propias operaciones.

La aplicación de voladuras controladas permite desarrollar los trabajos de profundización con factores de seguridad. La utilización de emulsiones gasificadas elimina la generación de gases nitrosos en el proceso de voladura.

La utilización de los detonadores electrónicos permite diseñar las secuencias de detonación entre 1ms y 30,000 ms con 0.0000001% de dispersión. Es decir, siempre sale 1 taladros a la vez.

La secuencia de retardos usados en la voladura tienen una influencia directa a la velocidad pico partícula generada, cuando el tiempo de retardos entre cargas explosivas es inferior a 26 ms aproximadamente generan valores altos de velocidad pico partícula, por lo que el daño al macizo rocoso será mayor; modificando la secuencia de retardos a tiempos de retardos mayor a 49 ms entre cargas explosivas los valores de velocidad pico partícula disminuyen significativamente por lo que el daño al macizo rocoso se disminuye.

## CONCLUSIONES

1. Seleccionar el taladro o los taladros para la medición; ya que, si nos encontramos en zonas cercanas a las viviendas, va a ser representativo cada salida de taladro, y no se evalúa como conjunto, como se realiza si nos encontramos a distancias mayores a 100 m. horizontales.
2. El patrón de radiaciones de la voladura en su conjunto es muy irregular pues en él no sólo interviene la distribución de la carga del barreno y el tipo de onda sísmica predominante, sino el sistema de grietas y fisuras que surgen en todo el volumen del macizo durante el proceso de rotura de la roca.
3. En la zona de la onda de tensión se desarrolla una fuerte fricción interna entre las partículas, absorbiéndose una cantidad de energía que no se puede despreciar, por lo que el comportamiento del macizo es inelástico, lo que provoca que la amplitud de la onda decrezca no solo por la divergencia geométrica sino también por absorción.
4. La necesidad de disminuir la carga máxima instantánea por la cercanía de los objetos, obliga a una mayor secuenciación del encendido combinado detonador de micro retardo y retardador de superficie.
5. Las detonaciones repetidas también ejercen influencia sobre el efecto sísmico, debido a que el tiempo que estarán sometidas los objetos a las vibraciones ya no será despreciable.
6. Las estructuras situadas en las proximidades de un disparo son afectadas generalmente por las ondas de compresión y de cizallamiento, que son las más rápidas. Las ondas superficiales pueden ser el origen de daños cuando se disparan grandes voladuras y a gran distancia.

7. Determinamos que, si trabajamos con sistema deck, reducimos la presión en el taladro, ya que se sabe que cuanto más baja sea la presión del taladro, menor será el nivel de vibraciones producido por la detonación del explosivo.
  - a. Sin sistema deck:
  - b. Presión en el taladro =  $35.2 \text{ kb} * (0.0775 \text{ m}^3 / 0.0775 \text{ m}^3) * 0.5 = 17.6 \text{ kb}$
  - c. Con sistema deck:
  - d. Presión en el taladro =  $35.2 \text{ kb} * (0.0775 \text{ m}^3 / 0.188496 \text{ m}^3) * 0.5 = 7.23 \text{ kb}$
8. Comprobamos que el factor de energía en caso de utilizar el sistema deck es menor que si consideramos la carga sin espaciar, y consecuentemente se reduce el nivel de vibraciones. Para este análisis se ha considerado la carga por retardo.
9. Se disminuyó en un 100% los reclamos de la población por las voladuras realizadas en bancos cercanos al centro poblado.
10. Se mejoró en un 20% la fragmentación debido a la iniciación se realiza taladro a taladro, haciendo que no se desperdicie la energía explosiva.
11. Las vibraciones no exceden de 12 mm/seg en la velocidad pico partícula, lo cual a 500 m que se encuentra la población no se registra vibraron alguna.
12. El costo del sistema silencioso es 5% más que el sistema tradicional, razón por la cual solo es empleado en los bancos cercanos a la población.
13. El perfilado de taludes es más controlado debido a la poca vibración generada en la voladura.

## RECOMENDACIONES

1. Las vibraciones en los procesos de voladura necesita control y medidas de eficiencia por lo que se debe proseguir con la mejora continua de procesos.
2. No se debe confiar por completo en los modelos matemáticos se recomienda paralelamente realizar pruebas insitu en cada banco del tajo.
3. Siendo la perforación y voladura una etapa importante en el minado superficial se debe Analizar siempre el costo global de toda la operación.
4. Se debe establecer procedimiento de capacitación al personal encargado y establecer talleres de entendimiento con la población para explicarles los riesgos de los disparos.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. AFENI, T. OSASAN, S. (2009) Assessment of noise and ground vibration induced during blasting operations in an open pit mine. A case study on Ewekoro limestone quarry, Nigeria. Mining science and technology. Nigeria.
2. BUSUYI, T. (2009). Optimization of drilling and blasting operations in an open pit mine the SOMAIR experience. Mining Science and Technology. South Africa.
3. CAMARENA, A. M. (2019) Optimización de los rendimientos de perforación a partir del modelo geotécnico con fines de minimizar costos de perforación en la Compañía Minera Antamina. Tesis. UNCP. Huancayo.
4. CÁRDENAS, M. Y REINA, M., (2008). La minería en Colombia: Impacto Socioeconómico y Fiscal. 1st ed. Colombia: Fedesarrollo
5. CORREA, A. (2009). La geomecánica en la perforación y voladura de rocas. Información Minera de Colombia. Colombia.
6. CUEVA, O. (2014). Técnicas modernas en Voladura controlada en Minería a cielo abierto,» de 32 Convención Minera, Arequipa.
7. EXSA (2001): "Manual de voladura".
8. EXSA, S.A. (2009). Voladura Controlada, Lima
9. EXSA, S.A. (2009). Centro Tecnológico de Voladura.
10. EXSA, S.A. (2009). Manual Práctico de Voladura, 3er ed., Lima.
11. FRANCA, L. (2010). A bit-rock interaction model for rotary-percussive drilling. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Australia.
12. GHASEMI, E. SARI, M. ATAEI, M. (2012). Development of an empirical model for predicting the effects of controllable blasting parameters on flyrock distance in surface mines. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Turkey.

13. HIDALGO, T. LÓPEZ, I. PINCHEIRA Y A. TRONCOSO, A. (2004). Minería a Cielo abierto, Métodos de Voladura, Chile.
14. HOEK and BROWN (1990). Mecánica de Rocas Aplicada.
15. LOPEZ, C. Et al. (1994). Manual de Perforación y Voladura. ITGE. España.
16. LOPEZ, C.J. M. PERNIA, J.M. ORTIZ, F.P.(1988). Manual de Perforación y Voladura de Rocas, España
17. OVIEDO, L. F. (2017). Diseño de mallas de Perforación y Voladura haciendo uso del Software Drill and blast Vulcan 8.0 para obtener una Óptima Fragmentación en E.E. AJANI Unidad Minera ANABI, Arequipa.
18. SOCIEDAD MINERA EL BROCAL (s.f.). Departamento de Geología.
19. SOCIEDAD MINERA EL BROCAL (s.f.). Departamento de planeamiento.
20. SOTO, C. (2001). Estudio Geomecánica de la Pared Este del Tajo Raúl Rojas. ARCADIS.
21. ZAVALA, K. S. (2017). Empleo de Agente de Voladura Gasificado para minimizar costos de Voladura en la Compañía Minera Antamina S.A. - año 2017. Tesis. Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo. Huaraz.

## **ANEXOS**

# ANEXOS

## I. MATRIZ DE CONSISTENCIA

### “Estudio de la Perforación para evitar la caída de Rocas en el Tajo Norte Mina El Brocal S.A. Región Pasco”

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS
<b>PROBLEMA GENERAL</b>	<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>HIPÓTESIS GENERAL</b>
1. ¿Cómo optimizar la perforación y voladura para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el tajo norte Mina el Brocal S.A., región Pasco?	Optimizar la perforación y voladura, para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el tajo norte Mina el Brocal S.A. Región Pasco.	El diseño de la malla de perforación y la carga explosiva influye en la optimización de la voladura para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el tajo Norte. Mina El Brocal S.A.
<b>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>HIPÓTESIS ESPECIFICA</b>
4. ¿Como diseñar la malla de perforación para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el Tajo Norte, Mina el Brocal S.A., región Pasco?	1. Diseñar la malla de perforación para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el tajo Norte, Mina el Brocal S.A, Región Pasco.	Con el diseño de malla de perforación, optimización de la voladura y el diseño de la carga explosiva, se conseguirá disminuir la fragmentación del material, y reducirá el nivel de las vibraciones del terreno contiguo al centro poblado, y el control ambiental.
5. ¿Como optimizar la voladura para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el Tajo Norte, Mina el Brocal S.A., región Pasco?3.	2. Optimizar la voladura para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el Tajo Norte, Mina el Brocal S.A. Región Pasco.	
6. ¿Cómo relacionar la malla de perforación y la optimización de voladura para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el Tajo Norte, ¿Mina el Brocal S.A., región Pasco?	3. Relacionar la malla de perforación y la optimización de la voladura para evitar el desprendimiento de rocas y vibraciones del terreno en el tajo Norte Mina el Brocal S.A. Región Pasco.	

## **II. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.**

### **A. Evaluación de Voladura.**

- Equipo InstanTEL, Geófono, Microtrap, Cámara de alta velocidad, Cámara digital.
- Tripode, batería.
- Regletas, cajas metálicas, sacos de arena.
- Radio.
- Pico, lampa, alicate, cuchilla.

### **B. Medición de vibraciones producidas por voladura**

- Monitor Sismógrafo INSTANTEL.
- Geófonos de superficie INSTANTEL.
- Caja metálica de protección del monitor.
- Sacos de arena, picos, conos y cinta delimitadora roja.

### **C. Medición de velocidad de detonación**

- Monitor Microtrap.
- Cable Resistivo (10.8 Ohmios/m).
- Cable coaxial RG-58.
- Multitester.
- Alicate de corte y cuchilla.
- Cinta aislante.
- Caja metálica de protección del monitor Microtrap.

- Lampa.



*Figura 34.* Monitor Microtrap.  
Fuente: Elaboración propia

#### **D. Análisis de fragmentación.**

- Cámara fotográfica digital.
- Regleta cuadrada de 0.5 m. de lado escaladas cada 10 cm. en colores rojo y blanco.

### III. OTROS.

Tabla 7.

Costos de perforación y voladura con ANFO pesado.

#### AREA DE PERFORACION Y VOLADURA

##### CALCULO DE COSTOS DE PERFORACION Y VOLADURA CON ANFO PESADO

FECHA:

TAJO:

PROYECTO: SA05-017

BANCO: 340

TIPO DE ROCA: MEDIA

PERFORADORA: DM45E

PERFORACION			
Perforación:	9.00	US\$/m	
Altura Banco	8.00	m	
Sobre Perforación	0.50	m	
Long. Taladro	8.50	m	
<b>Malla</b>			
Espaciamiento:	6.00	m	
Burden:	5.30	m	
Densidad Material	2.55	ton/m <sup>3</sup>	
Nro de Taladros	20	tal	
Diametro de Taladro	5.75	ulg	0.146
Altura de Carga en Taladro	6.50	m	
Taco	2.00	m	
<b>TONELADAS/TALADROS:</b>	<b>649</b>	<b>ton/tal</b>	

Radio de Perforación	76.32	l m/m
Costo Perforación/tal	77	US\$/tal

**Costo Perforación/ton 0,118 US\$/t**

DISEÑO DE CARGA				
Explosivo Heavy Anfo	50	50%	50%	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1300	Kg/m <sup>3</sup>	1.30	g/cc
Explosivos/Taladro	142	Kg/tal		
Emulsión	71	Kg/tal		
ANFO	71	Kg/tal	100%	
Nitrato de Amonio	67	Kg/tal	94%	
Petroleo	4	Kg/tal	6%	

**Factor de Potencia 0.22 Kg/ton**

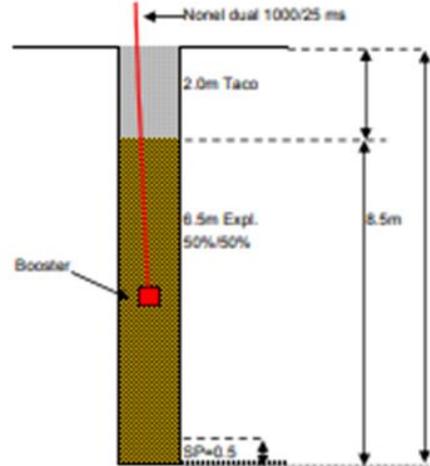
AGENTE DE VOLADURA	Uni		\$/Uni.	Cant.	Total US\$
Nitrato de Amonio	kg.		0.4400	67	29.292
Combustible D-2	gl.	3.21	1.0250	4	4.356
Emulsión	kg.		0.3800	71	26.912
<b>Costo Total Explosivo/Tal</b>				<b>US\$/tal</b>	<b>60,560</b>

**Costo Explosivo/ton US\$/ton 0,093**

ACCESORIOS	Uni	\$/Uni.	Cant.	Total US\$
Booster de 1 Lb.	Pza	2.1000	1.00	2.100
Nonel dual 1000ms/17ms	Pza	3.4000	0.00	0.000
Nonel dual 1000ms/25ms	Pza	3.4000	1.00	3.400
Linea CTD N° 0 (1m)	Pza	1.0200	0.01	0.009
Linea CTD N° 65 (6m)	Pza	1.9400	0.03	0.053
Linea CTD N° 109 (6m)	Pza	1.7000	0.05	0.078
Fulminante Nro 08	Pza	0.0880	0.02	0.002
Mecha de Seguridad	m	0.0900	0.02	0.002
Cordon Detonante 5G	m	0.1160	0.00	0.000
<b>Costo Accesorios/tal</b>			<b>US\$/tal</b>	<b>5,644</b>

**Costo Accesorios/ton US\$/ton 0,009**

**COSTO PERFORACION VOLADURA US\$/TON. 0,220**



Fuente: Área de perforación y voladura. S.M.E.B.

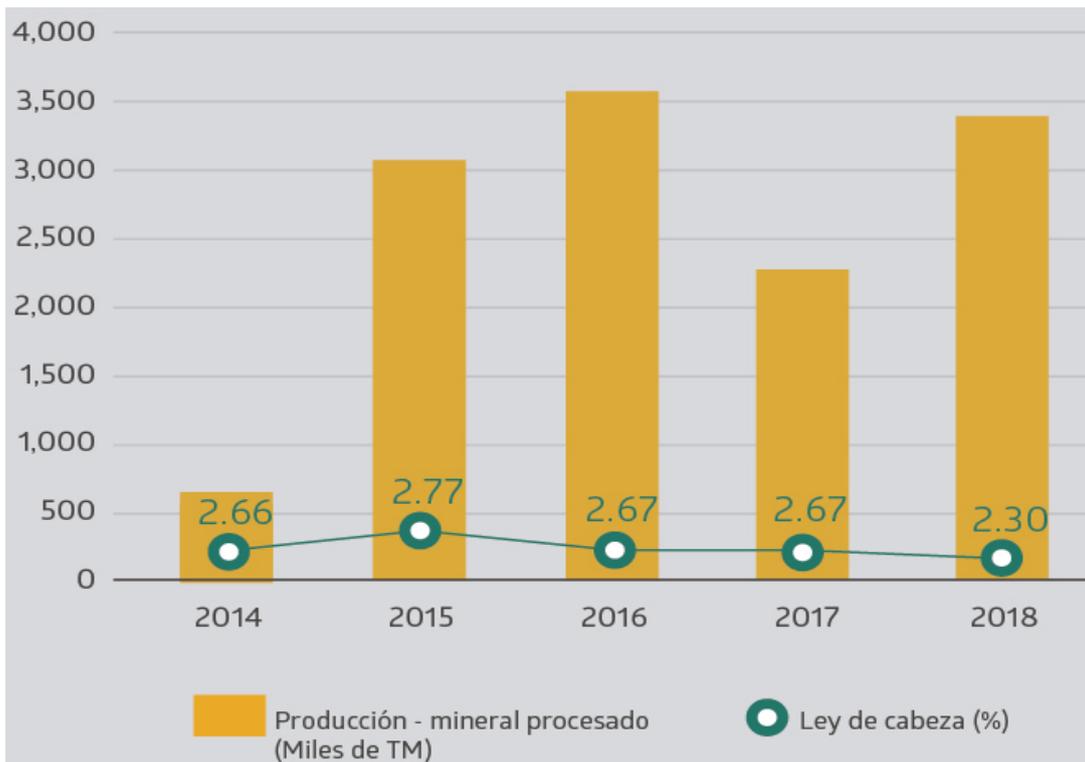


Figura 34. Producción de mina.  
Fuente: Planeamiento SMEB

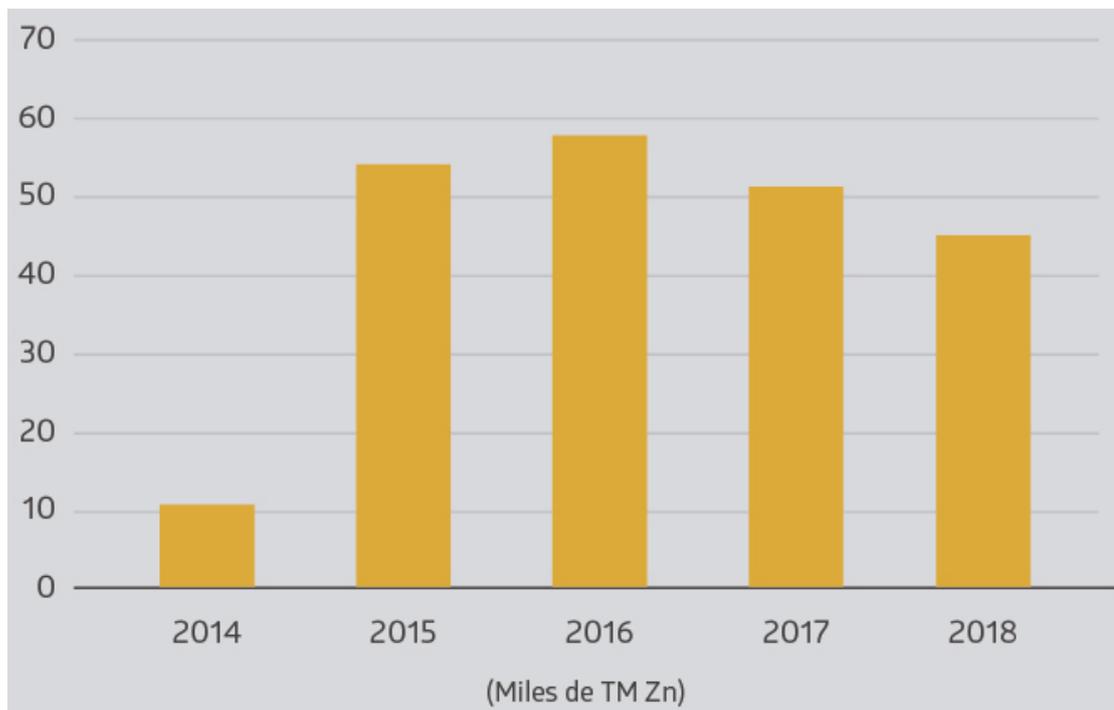


Figura 35. Producción de Zn.

Fuente: Planeamiento SMEB.

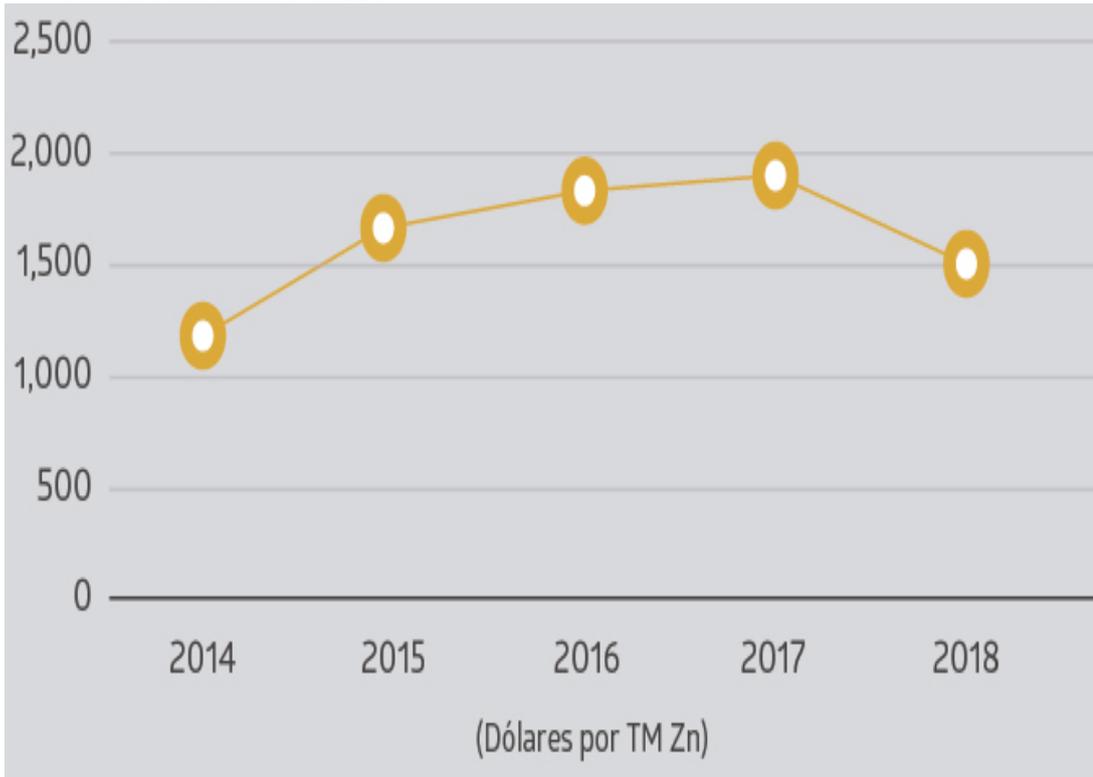


Figura 36. Costos a las ventas.  
Fuente: Planeamiento SMEB.

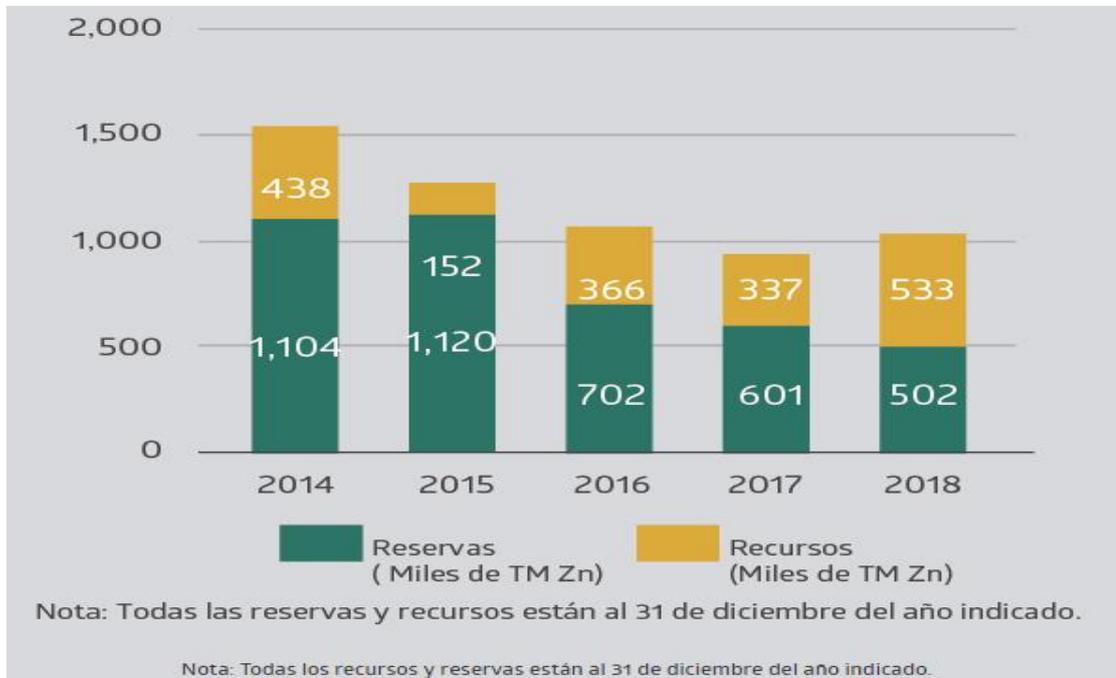


Figura 37. Reservas minerales  
Fuente: Planeamiento SME