

**Universidad Nacional de Ingeniería**  
**Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica**



TESIS

**Reducción de la fragmentación y atenuación de las vibraciones  
producto de la voladura mediante el uso del detonador  
electrónico en minería subterránea**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Eber Rosmel Torres Tarazona

 [0009-0000-6809-2317](https://orcid.org/0009-0000-6809-2317)

Asesor

Dr. Jimmy Aurelio Rosales Huamaní

 [0000-0002-3737-8694](https://orcid.org/0000-0002-3737-8694)

LIMA – PERÚ

2023

---

Citar/How to cite	Torres Tarazona [1]
Referencia/Reference	[1] E. Torres Tarazona, " <i>Reducción de la fragmentación y atenuación de las vibraciones producto de la voladura mediante el uso del detonador electrónico en minería subterránea</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2023.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

---



---

Citar/How to cite	(Torres, 2023)
Referencia/Reference	Torres, E. (2023). <i>Reducción de la fragmentación y atenuación de las vibraciones producto de la voladura mediante el uso del detonador electrónico en minería subterránea</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

---

***Dedicatoria***

*A Dios por las oportunidades que me brinda y  
A mis padres, Roberto y Teodora por siempre estar  
conmigo y por la confianza depositada en mí.*

### **Agradecimientos**

Quiero agradecer a la empresa FAMESA Explosivos S.A.C por brindarme la oportunidad en continuar con mi formación profesional, así también agradezco a todo el personal de Compañía Minera Condestable, porque han aportado mucho en mi formación profesional y como humano.

## Resumen

El trabajo de investigación está enfocado en el uso de nuevas tecnologías en el ámbito de la perforación y voladura de rocas en una mina subterránea, esta nueva tecnología son los detonadores electrónicos, los cuales tienen un diseño y composición más seguro y preciso que los detonadores no eléctricos que son los más utilizados actualmente en las minas subterráneas.

El uso de detonadores electrónicos genera menor daño al macizo rocoso y por consiguiente mayor estabilidad a los tajos minados mediante el método de sub level stopping y mayor seguridad durante la limpieza de estos tajos. Además, permite obtener una granulometría post voladura más uniforme y pequeña (52% más pequeña), lo cual genera ahorros en el uso de la energía en la chancadora y puede generar ahorros anuales de \$ 147000.

El método utilizado es un enfoque experimental que implica formular un problema y formular una hipótesis para el problema y probarlo para confirmar la hipótesis. También se realizó un análisis con el objetivo de cuantificar económicamente los beneficios de implementar la tecnología.

Palabras claves — Análisis, procesamiento, fragmentación, atenuación.

## **Abstract**

The research work is focused on the use of new technologies in the field of drilling and blasting rocks in an underground mine. This new technology is electronic detonators, which have a safer and more precise design and composition than non-metallic detonators. electrical devices that are currently most used in underground mines.

The use of electronic detonators generates less damage to the rock mass and consequently greater stability to the mined pits through the sub level stopping method and greater safety during the cleaning of these pits. In addition, it allows obtaining a more uniform and smaller post-blast granulometry (52% smaller), which generates savings in energy use in the crusher and can generate annual savings of \$147,000.

The methodology used was an experimental methodology that consists of stating the problem, after which the hypothesis of the problem is formulated and tests are carried out with the objective of validating the hypothesis. An analysis was also carried out with the objective of being able to economically quantify the advantages obtained through the implementation of this technique

Keywords — Analysis, processing, fragmentation, attenuation.

## Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen .....	v
Abstract .....	vi
Introducción .....	xii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo .....	1
1.1 Generalidades .....	1
1.1.1 Unidad de estudio .....	1
1.1.2 Ubicación y acceso .....	2
1.1.3 Geografía .....	2
1.2 Descripción del problema de investigación .....	3
1.3 Objetivos .....	6
1.3.1 Objetivo general .....	6
1.3.2 Objetivo específico .....	6
1.4 Hipótesis y variables .....	6
1.4.1 Hipótesis general .....	6
1.4.2 Hipótesis específica .....	7
1.4.3 Prueba de hipótesis .....	7
1.5 Antecedentes investigativos .....	9
1.6 Metodología .....	9
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual .....	11
2.1 Marco teórico .....	11
2.1.1 Geología distrital .....	11
2.1.2 Geología local .....	14
2.1.3 Geología estructural .....	15
2.1.4 Estratigrafía local .....	16
2.1.5 Estratigrafía local del área de condestable .....	16
2.1.6 Mineralización .....	22

2.1.7	Mina .....	24
2.2	Marco conceptual.....	25
2.2.1	Evolución de los detonadores.....	25
2.2.2	Tipos de detonadores .....	26
2.2.3	Accesorios de Voladura .....	26
2.2.4	Sistemas de Iniciación .....	29
2.2.5	Tipos de explosivos .....	39
	Capitulo III. Desarrollo del trabajo de investigación.....	49
3.1	Pruebas realizadas con detonador electrónico.....	49
	Capitulo IV. Análisis y discusión de resultados .....	54
4.1	Análisis del tamaño de granulometría .....	54
4.2	Comparación de costos.....	55
4.3	Análisis de vibraciones.....	56
4.4	Validación de hipótesis.....	59
	Conclusiones .....	62
	Recomendaciones .....	63
	Referencias bibliográficas.....	64
	Anexos .....	1



## Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Matriz de consistencia.....	8
Tabla 2: Parámetros de Perforación y voladura .....	49
Tabla 3: Pruebas realizadas 1 .....	50
Tabla 4: Pruebas realizadas 2 .....	51
Tabla 5: Pruebas realizadas 3 .....	52
Tabla 6: Analisis de costo .....	55
Tabla 7: Pruebas de vibraciones.....	56
Tabla 8: Modelo de daño .....	58
Tabla 9: Datos de granulometria.....	59
Tabla 10: Analisis de varianza .....	61

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Rutas de Acceso.....	2
Figura 2: Ubicación geográfica de mina Condestable .....	3
Figura 3: Diagrama de ISHIKAWA del Proceso de Perforación y Voladura.....	5
Figura 4: Metodología implementada en el desarrollo de la investigación.....	10
Figura 5: Secuencia volcanoclástica del área de Condestable y Raúl .....	19
Figura 6: Intercalación lavas, tufos y el contacto de la diorita media con la arenisca .....	19
Figura 7: Secuencia clástica formada por arenisca, limolita, lutitas y remanentes de lava andesítica .....	20
Figura 8: Columna estratigráfica del área de Condestable.....	21
Figura 9: Diseño de sub level stoping .....	25
Figura 10: Principales tipos de detonadores que se usan en la actualidad .....	26
Figura 11: Esquema de un sistema de transmisión de un detonador .....	29
Figura 12: Característica de un detonador o fulminante común .....	30
Figura 13: Fulminante común (FAMESA).....	30
Figura 14: Mecha de seguridad (FAMESA).....	31
Figura 15: Conector para cordón de ignición (FAMESA).....	32
Figura 16: Carmex (FAMESA) .....	32
Figura 17: Mecha rápida o cordón de ignición (FAMESA).....	33
Figura 18: Detonadores eléctricos. Instantáneos y de retardo .....	34
Figura 19: Sección longitudinal de un tubo de choque.....	34
Figura 20: Componentes de un detonador no eléctrico.....	35
Figura 21: Componentes de un detonador electrónico.....	37
Figura 22: Componentes de un conector electrónico .....	38
Figura 23: Unidad de registro.....	38
Figura 24: Unidad de disparo.....	39
Figura 25: Control remoto inalámbrico CRI .....	39

Figura 26: Dinamita sensible al fulminante común n° 6.....	41
Figura 27: Boosters en sus distintos pesos.....	43
Figura 28: Emulsiones encartuchadas en sus distintas presentaciones .....	44
Figura 29: Agente de voladura Anfo.....	45
Figura 30: Agente de voladura Anfo pesado .....	46
Figura 31: Emusión matriz .....	47
Figura 32: Solución sensibilizante N-30 .....	48
Figura 33: Granulometría.....	54
Figura 34: Modelo de Devine .....	57
Figura 35: Distribución probabilística de Fisher.....	60

## Introducción

“Perú, la tierra de la minería”, hemos escuchado esta frase más de una vez. Esto no es ni mucho menos un simple eslogan, pero tiene una realidad. Para entender esto sólo hay que mirar atrás en la historia de nuestro país. Esta actividad productiva existió socialmente desde la cultura preincaica hasta el período republicano, cuando el progreso de la minería fue acompañado de un progreso económico basado en la riqueza geológica y el capital humano en el que se contaba.

El avance de nuestro ha ido también de la mano con el avance de la tecnología, ya que como país minero que somos, muchas técnicas y tecnologías nuevas se han probado aquí, una de ellas son los detonadores electrónicos, los cuales son un reemplazo de los detonadores no eléctricos quienes en su momento fueron el reemplazo de los detonadores ensamblados, estos avances siempre han buscado garantizar mayor seguridad para el personal, tener beneficios en productividad y económicos.

El siguiente trabajo de investigación se ha enfocado en la aplicación de los detonadores electrónicos y se divide de la siguiente manera:

En el primer capítulo del planteamiento del problema, discutiremos la unidad de estudio, ubicación geográfica, ubicación y transporte en general. Luego se describen las preguntas de investigación, objetivos, hipótesis, variables involucradas e indicadores utilizados, antecedentes del estudio y métodos de investigación utilizados.

En el segundo capítulo de Marco Teórico y Conceptual, se expresa en Marco Teórico la Geología distrital, local y estructural, la mineralización de la unidad minera, los principales minerales mena y ganga presentes y los aspectos geológicos de la unidad minera. En el marco conceptual se describe a los detonadores electrónicos y como es su funcionamiento.

El capítulo III de Levantamiento de Información, se muestran las pruebas realizadas junto a la información recabada en cada prueba.

El capítulo IV de Procesamiento de Información se muestran los beneficios que se pueden obtener con el uso de los detonadores electrónicos, así como el análisis de costo / beneficio del uso de estos.

La tesis finaliza con las conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

## Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

### 1.1 Generalidades

#### 1.1.1 *Unidad de estudio*

A la fecha las operaciones mineras tienen 60 años de antigüedad, desde el año 1962 cuando la Nippon Mining de Japón comenzó las operaciones. Por muchos años las actividades mineras del distrito fueron realizadas simultáneamente por la Nippon en el yacimiento de Condestable y Minera Hochschild en la mina Raúl. En 1976 la Nippon dona el yacimiento al gobierno peruano, hasta su privatización en 1992 (ingreso del Grupo SERFIN - CORMIN). Trafigura inicia la administración en 1997, operando en 1999 en la mina Raúl (en cesión), luego ejerce la compra de los derechos mineros en el 2010. Souther Peaks Mining adquiere el 98.68% de la participación en julio 2013.

El ritmo actual de explotación es de 7,000 TMD con 0.895% Cu, se estima que el distrito viene produciendo a lo largo de su historia más de 43 Mt con 1.5% Cu, 0.34 g/t Au y 7.97g/t Ag. La mena que se explota es calcopirita, asociada a pirita, pirrotita, magnetita y actinolita. La continuidad de la mineralización en Raúl esta verificada con perforación diamantina hasta la cota -1000, En Condestable hasta el -130 y Vinchos hasta el -255.

Interpretaciones previas sobre el tipo de yacimiento han sido realizadas por Ripley & Ohmoto, 1977, mantos mineralizados depositados en o cerca al piso del mar. Cardozo, 1983, sulfuros masivos Volcanogénicos VMS. Vidal et al., 1990 "skarn". El trabajo más reciente corresponde a Antoine de Haller, 2006, que lo clasifica como del tipo de los depósitos de óxidos de Fe-Cu-Au (IOCG), cuya mineralización en posición subvolcánica está relacionada a intrusivos intermedios – ácidos de edad Aptiana. Las edades U-Pb sobre titanita y zircón demuestran que el emplazamiento de la mineralización fue contemporáneo con un sistema magmático volcánico, dan valores de -113 y -116 Ma tanto para el sistema hidrotermal, como para el magmatismo intermedio – ácido.

### 1.1.2 Ubicación y acceso

La Mina Condestable y Raúl, se ubican en el distrito de Mala, provincia de Cañete, departamento de Lima, las propiedades mineras comprenden terrenos de las comunidades campesinas de Mala y Asia, limítrofes en la quebrada Calicantro.

La zona industrial tiene las siguientes coordenadas geográficas:

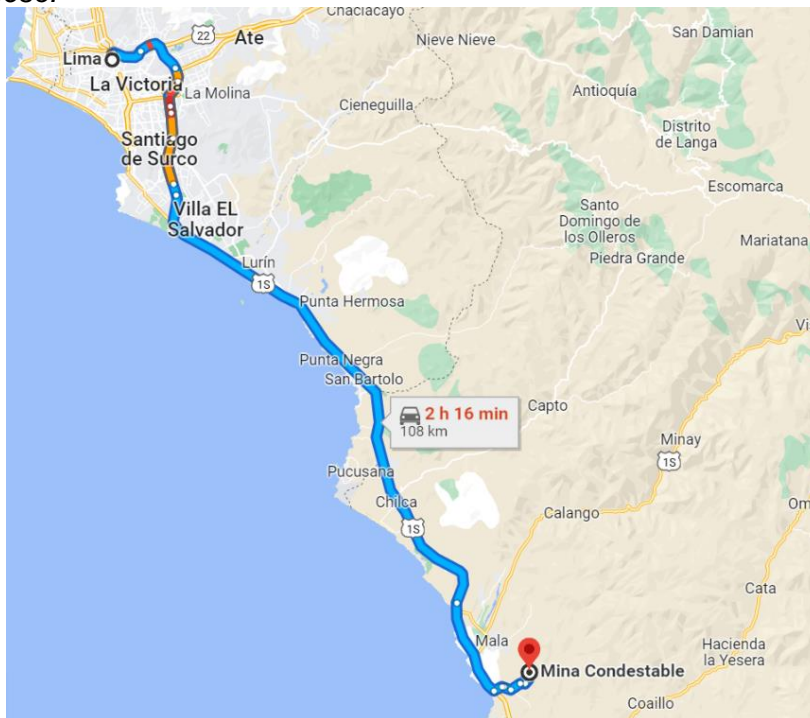
- 76° 35' 30" de longitud W.
- 12° 42' 02" de latitud Sur.

Su acceso desde la ciudad de Lima se efectúa utilizando la siguiente ruta:

- Autopista Lima – Bujama 90 Km. 1.20Hrs
- Trocha afirmada Bujama – Mina 05 Km. 0.10Hrs

**Figura 1**

*Rutas de acceso.*



*Nota:* Fuente Google maps.

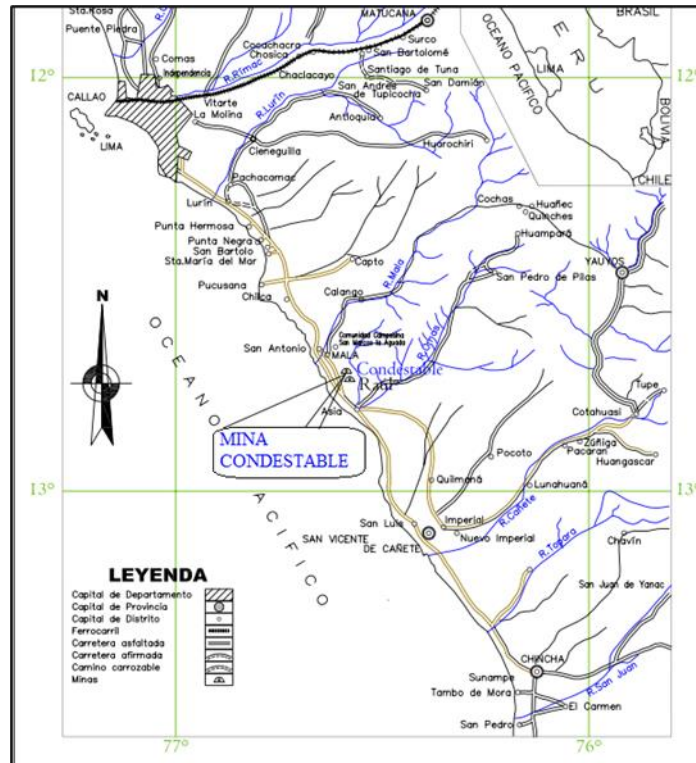
### 1.1.3 Geografía

El área se ubica en la franja de la Costa Peruana, donde las alturas máximas llegan a 800 m.s.n.m (C° Marqueza), las alturas más bajas llegan a 80 m.s.n.m. Geomorfológicamente se reconocen depósitos eólicos que cubren las antiguas llanuras de inundación y flancos más bajos de los cerros; depósitos fluvioaluvionales en las quebradas,

testigos de períodos de avenidas de agua torrenciales y depósitos coluviales o de piedemonte que se extienden a manera de abanicos en los flancos escarpados de cerros pedregosos y que en el invierno se cubren de un musgo verde y alojan vegetación de lomas.

**Figura 2**

*Ubicación geográfica de mina Condestable.*



Nota: Fuente inventario Recursos Raúl y Condestable 2017.

El clima del área es típico de la Costa Peruana, cálido y húmedo en verano con temperaturas que oscilan durante el día entre 20° y 30° C con medias de 75 % de humedad relativa, mientras que en el invierno la temperatura oscila entre 11° y 18°, con humedad relativa de hasta 100 % que sumada a la precipitación de llovizna estacional, favorecen el desarrollo de vegetación de pastizales en las lomas, situación que es aprovechada por pastores nómades que bajan de la cordillera con ganado caprino y vacuno.

## 1.2 Descripción del problema de investigación

El futuro de la minería en el Perú es desarrollar a mediano y largo plazo nuevas tecnologías y métodos de trabajo en la extracción del mineral, por lo tanto, las compañías



mineras están sujetas a cambios que puedan generar mayores ganancias y reducción en los costos de sus operaciones.

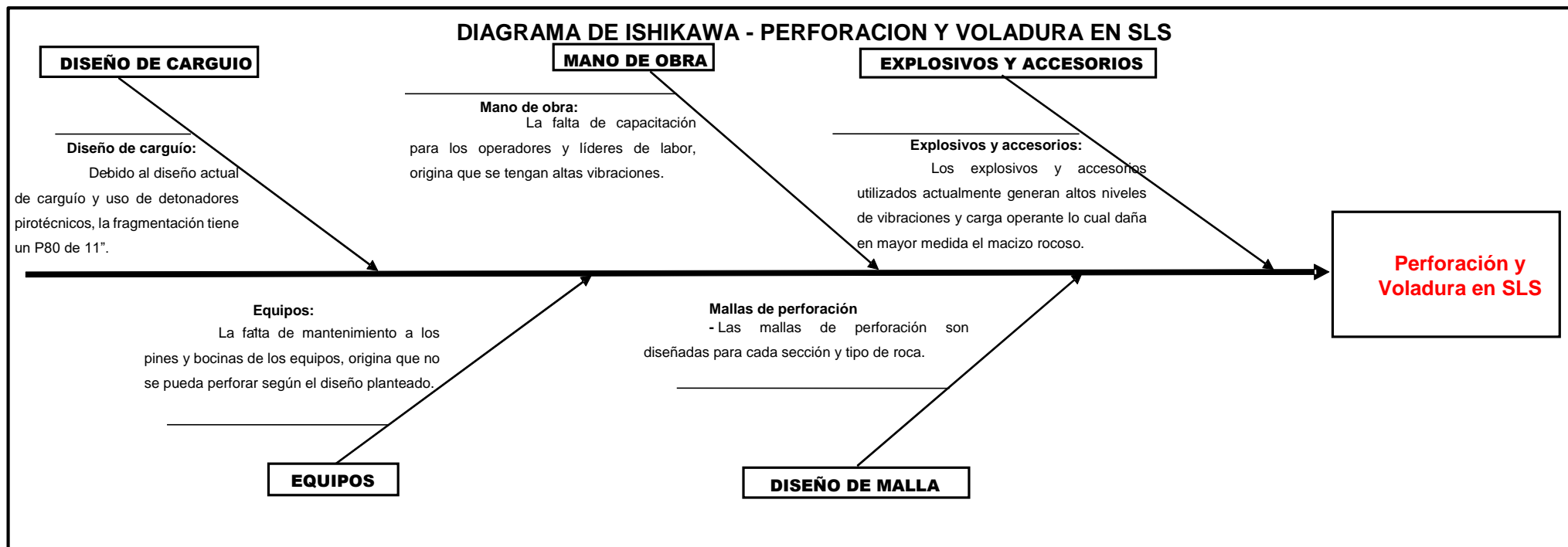
La misión principal de Operaciones Mina es proveer a Planta un mineral en las condiciones óptimas para su chancado y molienda, al menor costo posible desde el punto de vista del Negocio de la Compañía, en el corto y largo plazo, propendiendo al bienestar de toda la Comunidad y respetando el Medioambiente.

Actualmente la preparación, desarrollo y explotación, de las minas lleva a recurrir a producir un mayor tonelaje para así reducir sus costos fijos dentro de la variable costos de las empresas, con la finalidad de poder incrementar la cantidad de sus reservas. Es la razón por las cual este Plan de Tesis busca dar respuesta a esta interrogante mediante la obtención de los siguientes resultados:

Optimización de la fragmentación y reducción del efecto de las vibraciones en la Unidad Minera Condestable, entregados por el uso de las nuevas tecnologías disponibles en el campo de la voladura. Realizando un proceso comparativo de los resultados medidos en las etapas de Levantamiento Línea Base: Disparos con Detonadores No Eléctricos y Pruebas con Detonadores Electrónicos. Los cuáles serán representados mediante los indicadores más representativos del proceso de Perforación y Voladura como la granulometría (P80), carga operante, VOD, sobrerotura y sobredilución de todos los disparos ejecutados en mina, adicionalmente se cuantificará los costos asociados al proceso

Figura 3

Diagrama de ISHIKAWA del Proceso de Perforación y Voladura en SLS.



Nota: Fuente Compañía Minera Condestable S.A.

Del diagrama de ISHIKAWA del Proceso de Perforación y Voladura; Figura 3; se concluye que:

Diseño de carguío: Se puede cambiar el diseño del carguío y realizar una distribución de detonadores a fin de evitar generar mayor cantidad de vibraciones.

Mano de obra: Se puede capacitar al personal en la importancia de la carga operante a fin de evitar generar mayores vibraciones.

Explosivos y accesorios: El uso de detonadores electrónicos permite que cada taladro detone en un tiempo diferente, lo cual genera menor cantidad de vibraciones y mejor fragmentación.

Equipos: Se deben de realizar de forma oportuna los mantenimientos a los equipos de perforación para que se garantice el cumplimiento de los diseños planteados.

Diseño de malla: Se cuentan con diseños exclusivos para cada sección perforada.

Durante la investigación nos hemos centrado en el tercer aspecto “Explosivos y accesorios”, enfocándonos en el uso de detonadores electrónicos como una nueva tecnología.

### **1.3 Objetivos**

#### ***1.3.1 Objetivo general***

Reducir la fragmentación y el daño al macizo rocoso producto de la voladura.

#### ***1.3.2 Objetivo específico***

- Minimizar el daño al macizo rocoso inducido por las vibraciones por efectos de voladura.
- Disminuir la carga operante empleando detonadores electrónicos.
- Disminuir el costo por tonelada minada y tratada en planta.

### **1.4 Hipótesis y variables**

#### ***1.4.1 Hipótesis general***

La implementación de detonadores electrónicos permite obtener una menor fragmentación y menor daño al macizo rocoso.

### **1.4.2 Hipótesis específica**

- El uso de detonadores electrónicos reduce las vibraciones producto de la voladura.
- El uso de detonadores electrónicos permite que cada taladro detone en un tiempo diferente y por consiguiente se reduzca la carga operante.
- Disminuir la fragmentación del mineral en los tajos permite reducir los costos de minado y tratamiento en planta.

### **1.4.3 Prueba de hipótesis**

**Hipótesis Nula:** El uso de detonadores electrónicos no permite obtener una menor fragmentación y menor daño al macizo rocoso.

**Hipótesis Alternativa:** El uso de detonadores electrónicos permite obtener una menor fragmentación y menor daño al macizo rocoso.

#### **Variables**

**Variable independiente:** Técnicas de voladura (Burden, espaciamiento, carga operante, factor de potencia, secuenciamiento de voladura).

**Variable dependiente:** Daño al macizo rocoso, tamaño de la fragmentación, costo de minado y tratamiento.

**Tabla 1**

*Matriz de consistencia.*

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES
<p>PROBLEMA PRINCIPAL</p> <p>¿Cómo podemos reducir la fragmentación del mineral y dañar menos el macizo rocoso luego de la voladura?</p>	<p>OBJETIVO GENERAL</p> <p>Reducir la fragmentación y el daño al macizo rocoso producto de la voladura.</p>	<p>HIPOTESIS GENERAL</p> <p>La implementación de detonadores electrónicos permite obtener una menor fragmentación y menor daño al macizo rocoso.</p>	<p>VARIABLE INDEPENDIENTE</p> <p>Técnicas de voladura (Burden, espaciamento, carga operante, factor de potencia, secuenciamiento de voladura).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Factor de potencia (kg./ tn).</li> <li>• Carga operante (Kg/ tiempo).</li> <li>• VPP (mm.).</li> <li>• P80 de la fragmentación (Pulgadas).</li> </ul>
<p>PROBLEMAS SECUNDARIOS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cómo disminuir las vibraciones producto de las voladuras?</li> <li>• ¿Cómo disminuir la carga operante?</li> <li>• ¿Cómo disminuir el costo por tonelada?</li> </ul>	<p>OBJETIVOS ESPECIFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimizar el daño al macizo rocoso inducido por las vibraciones por efectos de voladura.</li> <li>• Disminuir la carga operante empleando detonadores electrónicos.</li> <li>• Disminuir el costo por tonelada minada y tratada en planta.</li> </ul>	<p>HIPOTESIS ESPECIFICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El uso de detonadores electrónicos reduce las vibraciones producto de la voladura.</li> <li>• El uso de detonadores electrónicos permite que cada taladro detone en un tiempo diferente y por consiguiente se reduzca la carga operante.</li> <li>• Disminuir la fragmentación del mineral en los tajos permite reducir los costos de minado y tratamiento en planta.</li> </ul>	<p>VARIABLE DEPENDIENTE</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Daño al macizo rocoso.</li> <li>• Tamaño de la fragmentación.</li> <li>• Costo de minado y tratamiento.</li> </ul>	

Nota : Fuente elaboración propia.

## **1.5 Antecedentes investigativos**

José Tomas Morel (2018), en su investigación titulada “Impacto de las Nuevas Tecnologías en las Competencias Requeridas por la Industria Minera Peruana” concluye que el proceso de avance en el nivel tecnológico y Transformación Digital dependerá de las condiciones de explotación de cada operación productiva, sus características geológicas, horizonte de explotación, prioridades de inversión, etc., por lo que se espera una evolución no homogénea, donde coexistirán los diferentes escenarios tecnológicos. Esto implica que toda estrategia de desarrollo de capital humano debe considerar disponer de una fuerza laboral capaz de adaptarse a diversos escenarios tecnológicos.

Rodrigo Valdez (2017), en su investigación titulada “Impacto del uso de Tecnología de Voladura en la Geometría y Costos en Tunelería Peruana” concluyo que el uso de tecnología ayuda a reducir el impacto de los riesgos más comunes presentado en las operaciones, así mismo logra que el equilibrio técnico - económico modelable sea aplicable a varias dimensiones de secciones, dado que el beneficio de ajustarse a la geometría del diseño no solo es explícito en seguridad, sino aumenta de manera proporcional la dimensión de la sección.

Juan Manuel Pérez (2012) en su presentación de “Voladura y el Negocio Minero Chileno” concluyo que si realmente deseamos mejorar el impacto de la Voladura en el Negocio Minero, y entendemos la Minería como una actividad creadora de valor de riqueza económica para los accionistas o dueños, debemos estar alineados con este enfoque y que el representante de los accionistas vea nuestra gestión no sólo desde un punto de vista técnico que es insuficiente, sino más bien como un conjunto de estrategias de largo y corto plazo que se traducen en planes de acción que se orientan claramente a mejorar la rentabilidad de su negocio.

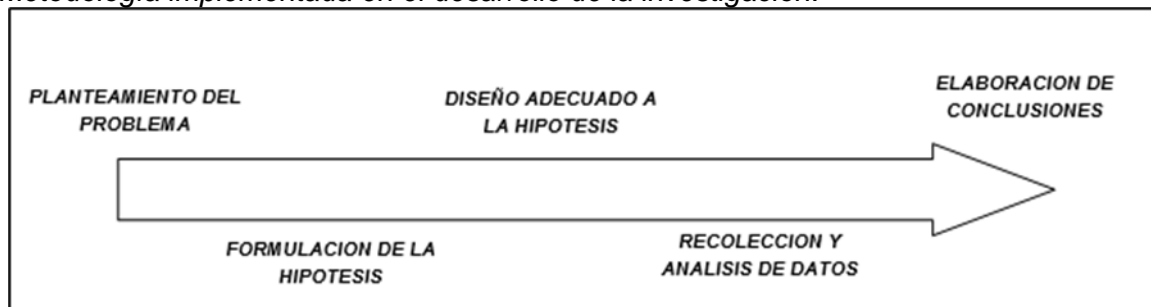
## **1.6 Metodología**

La metodología utilizada en esta investigación fue una metodología experimental que consiste inicialmente en el Planteamiento de un problema de conocimiento, que en este caso es el alto nivel de atenuación producto de las voladuras empleando detonadores

pirotécnicos, posterior a ello se procede a formular la Hipótesis del problema y se realiza un Diseño adecuado a la Hipótesis. En la cuarta parte de la investigación se procede a recolectar y analizar datos, en esta etapa recogimos los datos que tenemos a nuestro alcance mediante técnicas de medición en campo. Finalmente se elaboran conclusiones con los datos recolectados y se realizan sugerencias para posteriores.

#### **Figura 4**

*Metodología implementada en el desarrollo de la investigación.*



Nota: Fuente <https://www.postgraduone.edu.pe/pdf/documentos-academicos/ciencias-de-la-educacion/10.pdf>

## Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

### 2.1 Marco teórico

#### 2.1.1 *Geología distrital*

El área estudiada forma parte de occidente peruano (Wilson, 1963; Cobbing, 1985; Jaillard et al., 1990), que es mayormente una franja volcánico sedimentaria Cretácea que aflora a lo largo de la costa central del Perú. Cobbing (1978) divide el occidente peruano en 5 cuencas, estando el área de Condestable en la parte norte de la cuenca Cañete, cerca al límite sur de la cuenca Huarmey. Esta secuencia volcánico-sedimentaria incluye lavas basálticas a riolíticas, depósitos piroclásticos, tufos, caliza, lutita, arenisca, y localmente, evaporitas. La geología del occidente peruano es compleja, con fuertes cambios laterales de facies, y la literatura dedicada a esta secuencia está fragmentada y frecuentemente contradictoria (Wilson, 1963; Rivera et al., 1975; Guevara, 1980; Osterman et al., 1983; Atherton et al., 1985; Jaillard et al., 1990; Palacios et al., 1992; Salazar and Landa, 1993; Vela, 1997; Benavides-Cáceres, 1999).

Como reconoce De Haller, 2006, permanecen sin solucionarse muchos problemas concernientes a la nomenclatura de unidades litoestratigráficas y sus respectivas edades, las cuales están esencialmente basadas en escasos datos macropaleontológicos (de Rivera et al., 1975; Palacios et al., 1992; Salazar and Landa, 1993) que corresponden al intervalo entre el Thitoniano tardío a Cenomaniano (aprox. 147 a 93.5 Ma: Gradstein et al., 1995).

Toda esta franja volcánico sedimentaria está incluida en el Batolito de la Costa, el cual tiene una longitud de afloramiento de 1,600 km y un ancho de 65 km (Pitcher et al., 1985; Mukasa, 1986; Haederle & Atherton, 2002). El Batolito de la Costa consiste de una serie de intrusiones tabulares telescopeadas que fueron emplazadas en un nivel alto de la corteza (Pitcher et al., 1985). Está hecho de un compósito de múltiples intrusiones calco-



alcalinas a tholeíticas, compuestas predominantemente de tonalita y granodiorita y subdividido en unidades y superunidades (Pitcher, 1985).

El área estudiada está localizada dentro de la parte norte del segmento Arequipa, cercano al límite con el segmento Lima. Común a estos dos segmentos, es la superunidad Patap (comprendiendo intrusiones básicas tempranas: Regan, 1985) la más antigua superunidad descrita en el batolito hasta antes del trabajo de Haller (2006). La existencia de datos U-Pb de zircon y K-Ar en hornblenda y plagioclasa = 92 +/- 2 Ma) para la superunidad Patap son problemáticos desde algún punto de vista (Beckinsale et al., 1985; Mukasa & Tilton, 1985a) como relaciones de corte a favor de 106 a 101.4 Ma de edad (Mukasa, 1986a). De Haller demuestra que la actividad plutónica en el flanco occidental del Batolito de la Costa Peruana es más antigua que la misma superunidad Patap.

Los resultados de datación del trabajo de Haller (2006), con el método U-Pb en zircon indican que en el área del depósito Raúl-Condestable, la actividad magmática félsica tuvo lugar entre 116.7 +/- 0.4 y 114.5 +/- 1 Ma, definiendo una nueva superunidad, de lejos, la más antigua del Batolito de la Costa Peruana. Esta superunidad está localizada al oeste del núcleo principal del batolito e incluye domos volcánicos de dacita-andesita y complejos de pórfidos subvolcánicos, diques y sills cuarzo-diorita que fueron emplazados entre 116.7 +/- 0.4 y 116.4 +/- 0.3 Ma respectivamente, seguido por stocks y diques de tonalita emplazados entre 115.1 +/- 0.4 y 114.5 +/- 1 Ma.

Todas estas rocas contienen hornblenda y/o biotita, pero no piroxeno y corresponden a magmas ricos en sílice y agua siguiendo una tendencia a la diferenciación cálcica. Los datos isotópicos de Hf en zircones (Hf 115 Ma) y datos de isótopos de Pb en roca total, combinado con resultados litogeoquímicos, sugieren que los magmas fueron generados por fusión parcial del manto superior, enriquecido durante la hidratación del metasomatismo y/o fusión de sedimentos pelágicos subductados. La falta de zircon heredado sugiere que no estuvo directamente implicada la corteza continental.

Según De Haller, el depósito IOCG Raúl-Condestable está conectado en el espacio y tiempo con el magmatismo de la superunidad Raúl-Condestable. La mineralización fue emplazada en el núcleo del domo volcánico dacita-andesita a una paleoprofundidad de 2 a 3 km, alrededor de dos intrusiones tonalíticas formadas hace 115.1 +/- 0.4 y 114.8 +/- 0.4 Ma. La edad U-Pb de la titanita hidrotermal de las vetas IOCG de 115.2 +/- 0.3 Ma indica que la mineralización fue coetánea con (o más probablemente enseguida) el emplazamiento de la tonalita.

La mina de cobre está asociada con un patrón de alteración zonada, que rodea las intrusiones de tonalita. Consiste de un núcleo de alteración de biotita y stockwork de cuarzo, gradando externamente a actinolita (+/- magnetita, +/- clorita, +/- titanita, +/- escapolita, +/- albita, +/- epidota) y hacia arriba a alteración de sericita + clorita Fe. Un halo de alteración distal superior consiste de hematita-clorita alrededor de la alteración lateral de sericita + clorita Fe y actinolita.

La mayor parte de la mena está espacialmente asociada con la alteración de actinolita y, menos extensamente, con la alteración de sericita + clorita Fe. Los resultados de este estudio confirman que en un rango entre los 110 a 120 Ma fue un periodo de tiempo productivo para los depósitos andinos IOCG.

Anteriores trabajos de campo fueron realizados por Ripley & Ohmoto (1977, 1979), Cardozo (1983), Atkin et al. (1985), Injoke (1985), y Vidal et al. (1990). La secuencia estratigráfica en Raúl-Condestable, alcanza un total de más de 6 km, y buza al oeste-suroeste con un ángulo de alrededor de 40°. De Haller la divide en 5 unidades (unidad I a V de la base al tope), con rangos de edad interpretados de Jurásico Tardío (comienzos del Titoniano: 150.7 +/- 3 Ma, Gradstein et al., 1995) a fines del Cretáceo Temprano (fin de Albiano: 112.2 +/- 1.1 Ma, Gradstein et al., 1995). Toda la secuencia volcano-sedimentaria es cortada por un conjunto de stocks félsicos a máficos, diques y sills. Los rápidos cambios de facies y de espesores, así como la ocurrencia de volcanismo documentan múltiples episodios de extensión y volcanismo a lo largo y ancho de la cuenca (A. Aleman et al.,

2006). Para este trabajo nosotros hemos utilizado la nomenclatura de Ingemmet (2006) y Cardozo (1983).

### **2.1.2 Geología local**

El área de estudio se encuentra dentro de la secuencia volcano sedimentaria del Cretácico Inferior, en la Formación Copara de la región Lima-Cañete y que incluye a las formaciones Pamplona, Atocongo y una parte de la base de la formación.

Además, existen varios procesos geológicos relacionados a este periodo:

- La depositación de secuencias relativamente potentes de sedimentos clásticos.
- Una intensa actividad volcánica a lo largo del eugeosinclinal andino.
- La formación y emplazamiento del Batolito de la Costa.
- La primera deformación cordillerana andina de carácter regional (Plegamiento Peruano).
- Un problema adicional es que el contenido faunístico peculiar de los sedimentos depositados entre el Valanginiano y el Aptiano en el eugeosinclinal andino (Piso Lima, Rivera et al 1975) impide la asignación de estas formaciones a los diferentes niveles estratigráficos reconocidos internacionalmente, y dificulta a la vez, la correlación precisa de los volcanoclásticos con los sedimentos miogeosinclinales. (G. Osterman, M. Cardozo & Wauschkuhn-1983).

Concordante y transicional sobre la secuencia clástica (volcanoclástica), se inicia el ciclo de sedimentación.

Las intercalaciones volcánicas en la secuencia aumentan rápidamente hacia el sur e incluso los propios horizontes sedimentarios experimentan notorios cambios de facies, de tal manera que fuera de las localidades típicas es prácticamente imposible mantener una subdivisión formacional postulada para el área de Lima. El equivalente volcano sedimentario de las formaciones Pamplona y Atocongo en la región Ica, es conocido con el nombre de Fm Copará, la cual está conformada por sedimentos clásticos gruesos y tufos en la base, seguidos de calizas bituminosas con nódulos de chert y equinoideos mal conservados, lutitas y cuarcitas, con intercalaciones de flujos brechosos y piroclásticos que

aumentan notablemente hacia el techo (Caldas, 1978; INGEMMET, 1980). Los fósiles albianos contenidos en los sedimentos de la parte superior de la formación. Copará indican que la serie calcárea-volcánica alcanza niveles estratigráficos más altos que sus equivalentes en la zona de Lima. Esto mismo puede afirmarse para la secuencia aflorante en los alrededores de Mala. El contacto con los volcánicos "albianos" suprayacentes de la formación.

### **2.1.3 Geología estructural**

Los sistemas de fallamiento frágil longitudinales extensivos y/o zonas dúctiles de corte, incluyendo la falla de Atacama en el norte de Chile y las fallas profundas penetrantes localizadas en el basamento Cañete en Perú, estuvieron activas durante el volcanismo y plutonismo mesozoico. La "extensión" ampliamente distribuida indujo a una inclinación de la secuencia volcano-sedimentaria. Inmediatamente al Este del terreno del arco mesozoico de la Cordillera de la Costa en el Norte de Chile y el Sur del Perú, las secuencias sedimentarias acumularon una predominante e interconectada serie de basamento tras-arco marino. (Mpodozis and Ramos 1990).

La distensión cretácea aquí tocada, es probablemente el contexto tectónico no sólo de la sedimentación y vulcanismo post-Morro Solar, y del emplazamiento de las diversas intrusiones (la falla Condestable en particular parece haber guiado la intrusión tanto de volúmenes de los pórfidos andesítico/dacíticos, como de doleritas tardías, tonalitas incluidas, sino también, de la mineralización subcontemporánea con estas últimas. Las observaciones puntuales en interior mina de cataclastitas foliadas inmediatamente adyacentes y paralelas a algunos mantos, sugiere que tales mineralizaciones son en efecto sintectónicas. (Carlos Ángeles 2006, reporte).

A continuación, describimos los diferentes conjuntos de fracturas o fallas registradas:

- Las fracturas y fallas más recientes parecen ser aquellas relacionadas a los intrusivos dioríticos y el emplazamiento de las doleritas que aproximadamente en promedio es N33°W/55°NE. Este sistema está formado por una densidad alta (1

por 10m) de fracturas de corte con desplazamiento de milímetros a centímetros y circunscrita a los intrusivos dioríticos. En este grupo está la Falla Condestable N65°W/45°NE que observada en la proa. 8+2000 tiene 0.2m de potencia, está rellena de sericita y sobre el pórfido cuarzo-diorítico.

- El siguiente grupo es más antiguo y está zonificado dentro de los volcanoclásticos y parte del intrusivo pórfido cuarzo-diorítico, las fracturas están rellenas por arcilla y sericita, tiene una dirección promedio de N35°E/70°SE, potencia entre 20 a 30 cm en superficie y en las de mayor importancia llega hasta los 2m.
- El sistema E-W es un sistema relacionado al pórfido cuarzo diorítico y los volcanoclásticos, un ejemplo es la veta chilena.

#### ***2.1.4 Estratigrafía local***

Se ha realizado una columna estratigráfica en base a los perfiles geológicos levantados. Uno de los perfiles tipo que se puede tomar como referencia es el de la línea L-17.5 ubicado en la parte Norte (área Condestable) y en el caso de la zona Sur (área Raúl).

Toda la formación Copara es un monoclinial con estratos y pseudo estratos (capas de lavas y piro clásticos) que tienen un rumbo NW y buzcan 35 al SW. La base de toda la secuencia sedimentaria se encuentra en el extremo NE de la zona de estudio y está formada por rocas clásticas calcáreas. Luego está la secuencia volcanoclástica en la parte central y hacia el Oeste queda abierta una secuencia clástica con remanentes calcáreos.

#### ***2.1.5 Estratigrafía local del área de condestable***

Usaremos la denominación, Formación Copara, para la unión de las formaciones Pamplona, Atocongo y la base de la formación Chilca.

- **Secuencia clástica-calcárea Este**

La base de la formación Copara está formada por una potente secuencia calcárea y en la zona de mapeo al 2000 está formada por intercalaciones de areniscas calcáreas y caliza gris. La potencia de la secuencia dentro del área es de 304 m y el paquete más potente de arenisca es de 116 m, los estratos de calizas tienen una potencia variable entre

4 y 20 m. En promedio, el rumbo y buzamiento de los estratos es: N10°W / 40°SW. El techo de la secuencia está cortado por un dique de diorita porfirítica levemente cloritizada.

**Arenisca:** De una tonalidad gris clara, de matriz calcárea, hacia el norte es de tonalidad verdosa por la presencia de cloritas. Contiene óxidos de hierro en fracturas y diseminación esporádica de pirita. Alcanza una potencia de 64 m. Inicia en el extremo noreste con una intercalación de arenisca y caliza, seguida de un potente horizonte de arenisca de 200 m. La arenisca es, en gran parte, de tonalidad gris clara, de matriz calcárea. Hacia el norte la arenisca es de tonalidad verdosa por la presencia de cloritas. Contiene óxidos de hierro en fracturas y diseminación esporádica de pirita. En promedio, el rumbo y buzamiento de los estratos es: N10°W/40°SW y en las secciones alcanzan aproximadamente un espesor de 225 metros.

**Caliza:** Generalmente es de color gris, con venillas de calcita, presenta fósiles en algunos horizontes (bivalvos de 1-2cm). En zonas cercanas al contacto con el intrusivo se observan bandeamientos de piroxenos. Sin embargo, no hay formación de granates ni minerales de cobre, sólo óxidos de hierro. Alcanza una potencia de 26 metros.

#### ▪ **Secuencia Volcanoclástica**

Forma la topografía positiva en la zona (466 msnm) e incluimos en ella el conjunto de horizontes intercalados de lavas, tufos, brechas volcánicas, grauwacas y arcosas. Se inicia con un horizonte de lava andesítica porfirítica gruesa en la base. Está ubicado justo en el medio de toda la columna estratigráfica y presenta una variabilidad fuerte en la granulometría y composición de sus unidades. La potencia es variable y llega a 183 m.

Las subunidades litológicas que se distinguen son:

**Lava de andesita porfirítica:** Sobreyace a la intercalación de arenisca con caliza, La andesita es oscura con 75 % de ferromagnesianos alterándose a cloritas y leve actinolitización. Su potencia promedio es de 14 m.

**Sedimentos:** Formado por dos estratos con un total de 34 m de espesor. Arenisca de 15 m de potencia en la base y caliza gris claro de 18 m de potencia con venillas de calcita al tope.

**Piroclásticos:** Son rocas de textura fragmental, matriz tufácea, los fragmentos son angulosos a subredondeados, polimícticos y de granulometría variable (2 cm a 5 cm) y con horizontes de lapillis (<2 cm). Alteración supérgena de Óxidos, algunos fragmentos están actinolitizados. Potencia total promedio de 34 m.

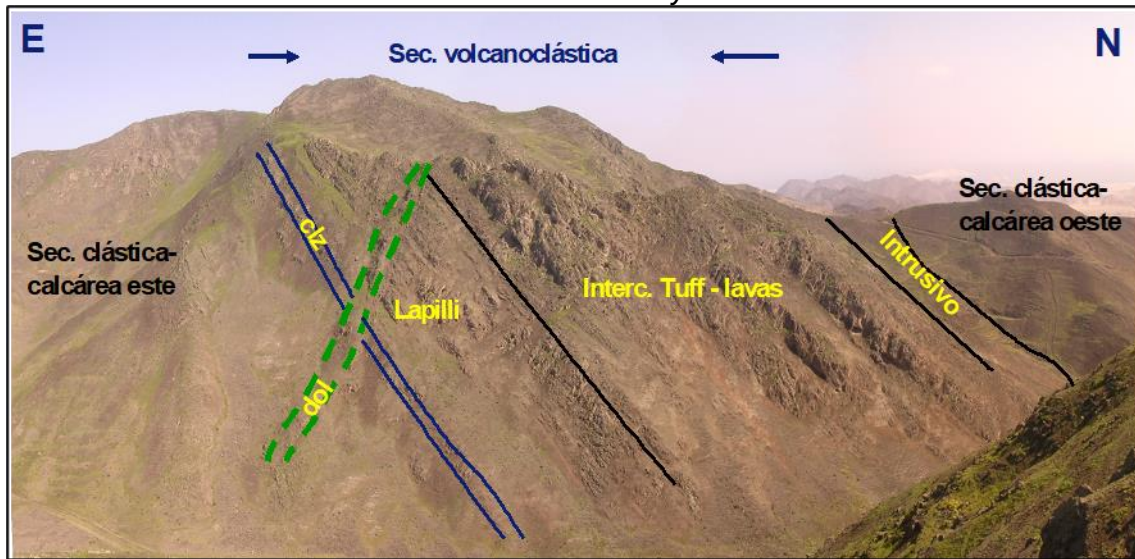
**Tufos y grauwaca:** Formado por una intercalación de tufos y areniscas. Las areniscas son grauwacas y arcosas con espesores que varían desde 3 m de potencia cuando la secuencia es más tufácea y llega a potencias mayores a 50 m en los casos en que la secuencia es más clástica ínterdigitada con los tufos. La grauwaca tiene una tonalidad rosácea y fragmentos subredondeados mientras que la arcosa es verdosa por la actinolitización.

El tufo fino forma el 80% de la secuencia y está alterado por actinolita y magnetita. La oxidación intensa aloja hematita terrosa, hematita especular en venillas y cavidades y fina diseminación de pirita. La potencia de los tufos llega hasta 50 m con horizontes de arenisca intercalados.

**Lavas:** Presenta horizontes potentes de lavas con algunos remanentes de tufos. Las lavas son andesitas con formación de autobrechas y brechas de flujo. Parcialmente forma una brecha clasto-soportada con matriz fragmental de grano medio, < 2mm, con fragmentos de bloques, que podría ser una peperita de lava andesítica depositada en un sedimento de tufo arenoso fino. Está alterada por clinopiroxenos++, actinolita y + magnetita. La potencia es de 43 m. La secuencia tiene un rumbo y buzamiento promedio de N15°W/42°SW.

**Figura 5**

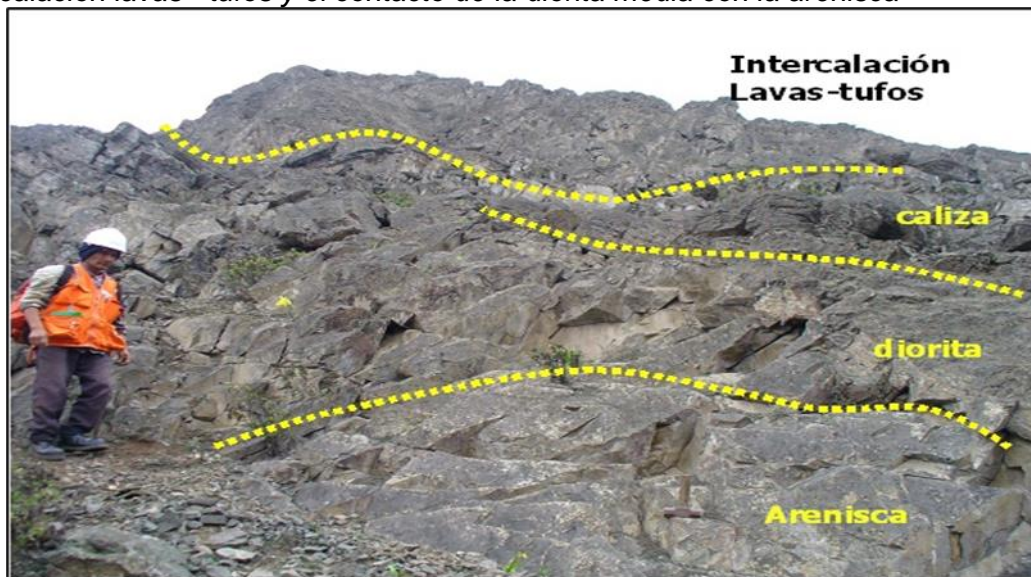
*Secuencia volcanoclástica del área de Condestable y Raúl*



Nota: Fuente Inventario recursos Raúl y Condestable

**Figura 6**

*Intercalación lavas - tufos y el contacto de la diorita media con la arenisca*



Nota: Fuente Inventario recursos Raúl y Condestable

▪ **Secuencia clástica-calcareá-oeste**

Sobreyace al horizonte lávico y está separado de éste por un sill pórfido diorítico. Empieza con estratos de arenisca intercalados con horizontes de limolita. La alteración cerca del intrusivo es actinolita - hematita que disminuye hacia el oeste. La potencia de arenisca tiene un promedio de 291 m con horizontes calcáreos de 27 m y limolitas de 30 m.



El rumbo y buzamiento promedio de los estratos es N30°W/40°SW y tiene una potencia aproximada de 320 metros.

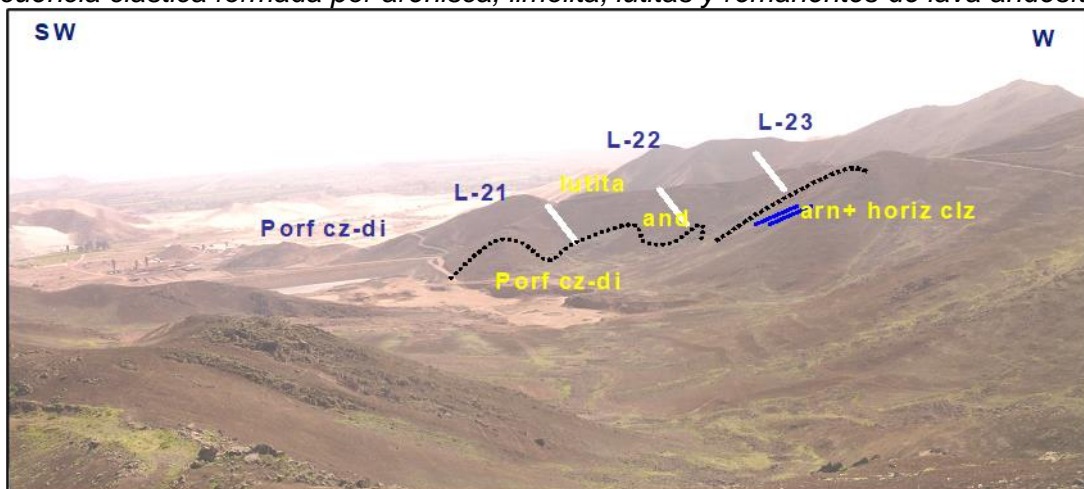
Interdigitación de lavas y areniscas: Son lavas con 5% de vacuolas y venillas de calcita, con textura porfirítica remanente, de color violáceo y tonalidad oscura con alteración a cloritas, sin presencia importante de óxidos de cobre. Interdigitadas con areniscas y limolitas. Presenta remanentes de sedimentos calcáreos en la parte superior y en la zona noroeste es más constante la intercalación con lutitas y limolitas. Potencia promedio de 108 m. Aforamiento típico en la progresiva 15+1350.

#### ▪ Secuencia Clástica Noroeste

Formada por arenisca, lutitas, horizontes delgados de caliza y lentes de lava; además están cortadas por cuerpos de diorita porfirítica de 56 m de ancho. Las areniscas son muy finas y están alteradas a piroxenos, actinolita y cloritas. Los horizontes de lutita son delgados de 2 m de potencia y están encima de las lavas que aparecen en la base de las trincheras de muestreo. Esta se encuentra cubierta en gran parte por material fluvio-aluvional e intruida por la diorita porfirítica y diques de dolerita. Se aprecia una fuerte oxidación en el área correspondiente a las últimas líneas de sección. Su extensión queda abierta hacia el oeste y su potencia promedio es de 52 m.

#### Figura 7

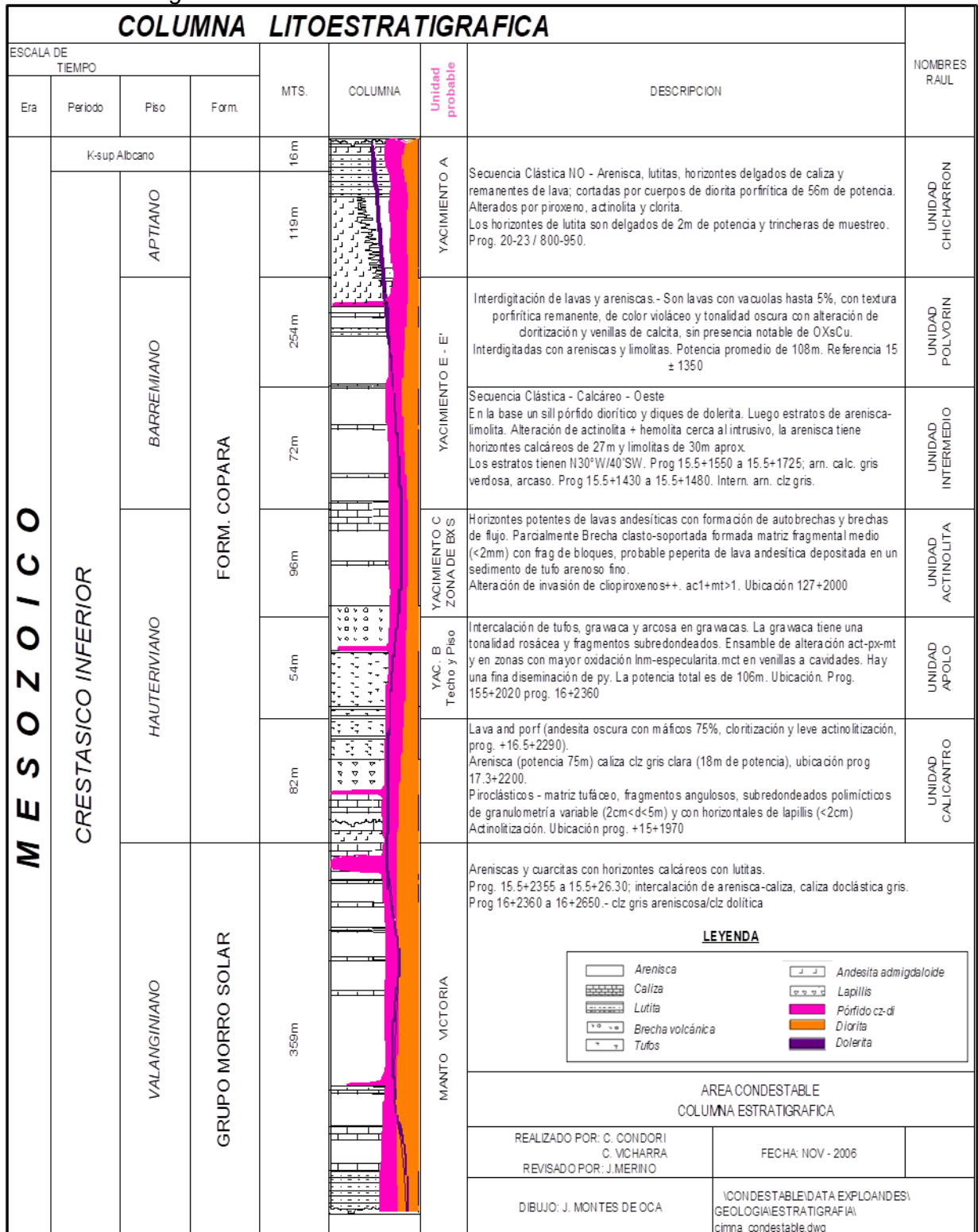
*Secuencia clástica formada por arenisca, limolita, lutitas y remanentes de lava andesítica*



Nota: Fuente Inventario recursos Raúl y Condestable

**Figura 8**

*Columna estratigráfica del área de Condestable*



Nota: Fuente Inventario recursos Raúl y Condestable

### **2.1.6 Mineralización**

Las mineralizaciones metálicas ocurrieron como dos asociaciones. La primera de estas, es la asociación Fe-Cu y consiste básicamente de calcopirita, pirita, magnetita y contenidos menores de pirrotita, galena, esfalerita, illmenita, molibdenita, bornita, mackinawita, valerita, marcasita, electrum y cobalto, siendo la mena de calcopirita con subproductos de Ag y Au. La asociación Pb-Zn es tardía e insignificante y ocurre como vetas y venillas menores de galena y esfalerita con trazas de pirita, calcopirita, tetrahedrita, melnicovita, Au y calcita. No se ha observado formaciones exhalativas de las asociaciones Cu-Fe o Pb-Zn.

La temperatura máxima de formación es alrededor de 320°C A 414°C y los estudios de isótopos (S, H, O) e inclusiones fluidas indican que el azufre y fluidos mineralizantes fueron de origen marino y que no hubo ebullición.

Las menas en mantos constituyen alrededor del 55% de la mineralización en Raúl, mientras que la mineralización en vetillas y diseminados constituyen alrededor del 35%, y las vetas un 10%.

En los depósitos IOCG (pero además en pórfidos de cobre y skarn) es común observar la siguiente secuencia paragenética “de oxidación”: Hematita → magnetita → pirita → calcopirita.

En otros lugares esta secuencia de oxidación puede ser por una secuencia “reductora”: pirrotita → pirita → calcopirita.

La terminología “oxidación” y “reducción” de estas dos secuencias se refiere a su formación mineral (hematita o pirrotita). En la zona de Raúl se destacan las siguientes características para la mineralización:

En la unidad de Calicantro la mineralización es de pirita-calcopirita (py>cpy) muy restringidas a fracturas y venillas. En la pseudo brecha cerca al contacto con el pórfido cuarzo-diorítico hay una concentración de pirita hasta 3% y calcopirita escasa menor a 1%,

podría convertirse en una unidad prospectiva en la medida de encontrar horizontes clásticos.

En la unidad Apolo la mineralización está más definida y restringida a los horizontes de arenisca que forman mantos con una dirección y buzamiento de N50°W/35°SW, el primero tiene de 2 m. de ancho se encuentra en grauwaca y el segundo se encuentra cerca al contacto con las lavas Calicantro. La mineralización está formada por una concentración fina de calcopirita y pirita (30%), asociados a la actinolita y formando horizontes finos discontinuos. La guía superficial es la intercalación de grauwaca con arcosa, que forman una roca verde oscura de óxidos de cobre y óxidos de hierro. La sensibilidad magnética en estos mantos es baja y no se aprecia con el lapicero imantado.

La unidad Actinolita se encuentra muy disturbada y la textura primaria de las lavas andesíticas está obliterada por fuerte actinolitización, presentando una textura de pseudo brecha que se confunden con horizontes tufáceos. La mineralización se caracteriza por alta densidad de venillas y fracturas rellenadas por sulfuros – actinolita - magnetita y disseminaciones de calcopirita y pirita. La mayor mineralización está restringida a los horizontes escasos de tufos.

La unidad Intermedio presenta intercalaciones de arenisca y tufos, que alojan mantos y disseminación de sulfuros en la caja. La pirita y calcopirita también van asociadas a actinolita magnetita y se presentan como disseminaciones, pequeños agregados y reemplazos menores de fases máficas en flujos, llegando a una abundancia máxima de casi 5% en volumen. En la base y en el techo se encuentra cortada por diques o sills del pórfido cuarzo-diorítico inalterado.

En la unidad Chicharrón la mineralización es favorecida por la permeabilidad de las areniscas intercaladas con las limolitas, por lo que la mineralización es del tipo manto con horizontes minerales de sulfuros-magnetita. En superficie muestran una oxidación fuerte formando hematita y limonita con óxidos de cobre. Esta secuencia en Raúl está cortada por sills, diques y lacolito del pórfido cuarzo-diorítico.

### **2.1.7 Mina**

El método de minado aplicado en Mina Condestable fue Sub Level Stopping, este es un método de minado masivo aplicado a cuerpos, mantos y vetas de potencia mayor a 1.5 metros, este método consiste en realizar subniveles entre los niveles principales del cuerpo mineralizado y mediante el uso de equipos de perforación de taladros largos, realizar perforaciones verticales y radiales entre los subniveles para poder romper el mineral. Este método de minado exige un ratio de preparación de 70 Tn/ metro de avance y que el buzamiento del cuerpo mineralizado sea de mínimo entre 60° - 70°.

La sección de los sub niveles es de 4.0 x 4.0 metros, perforación de los frentes se realiza con equipos jumbo de 1 brazo, la perforación de los taladros de producción es de 51 mm. y el rimado es de 102 mm. y el carguío en los subniveles se realiza con ANFO. En los tajos de Sub Level Stopping se realiza la perforación con equipos Epiroc SIMBA S7 y el carguío se realiza con ANFO y booster o cartuchos de emulsión como iniciadores.

La ventilación de tajos se realiza mediante ventilación forzada utilizando ventiladores mecánicos axiales.

Para la limpieza de los subniveles se utilizan scoops de 6.3 yd<sup>3</sup> y para la limpieza de los tajos de sub level stopping a través de las ventanas se utilizan scoops a telemando de 9.0 yd<sup>3</sup>.

El desate en los subniveles de preparación se realiza con un scaler, Los tajos no se desatan.

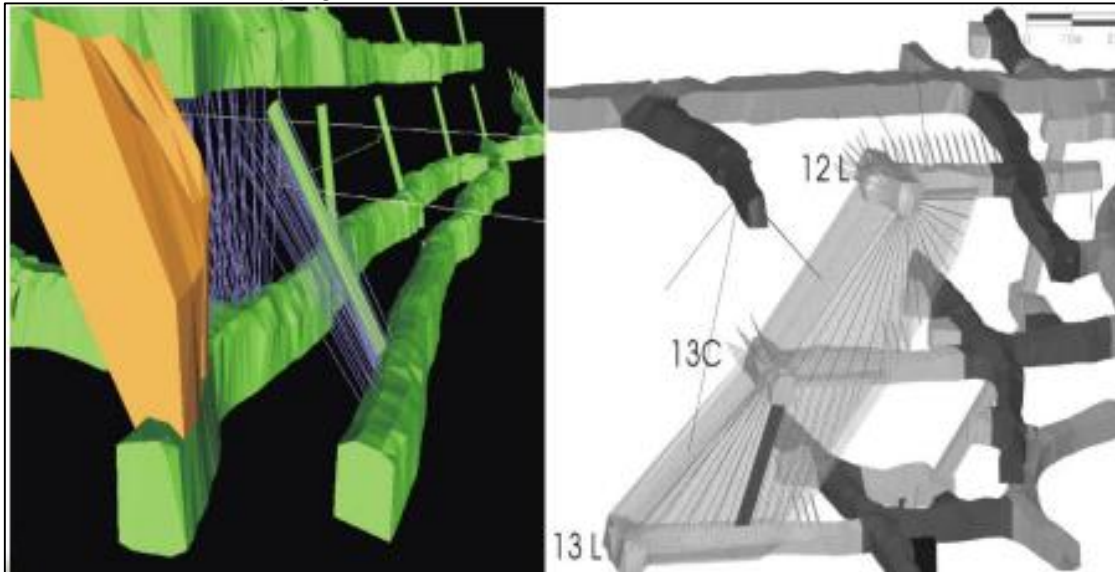
El sostenimiento de los subniveles se realiza con shotcrete 2" + perno swellex 7' a 1.3 x 1.3 m. + malla electrosoldada + shotcrete 1", adicionalmente se refuerzan la caja techo de los tajos de sub level stopping con cable bolting de 8 metros.

La extracción del mineral se realiza mediante volquetes de 35 tn. y 45 tn., estos volquetes sacan el mineral hasta superficie, para posteriormente ser tratado en la planta.

En la siguiente figura se muestra como se realiza la perforación entre los subniveles.

## Figura 9

### *Diseño de sub level stoping*



Nota: Fuente Inventario recursos Raúl y Condestable

## 2.2 Marco conceptual

### 2.2.1 Evolución de los detonadores

Los sistemas de iniciación han experimentado un fuerte desarrollo tecnológico desde mediados del siglo XX intentando alcanza los siguientes objetivos:

La iniciación enérgica de los explosivos de las últimas generaciones, mucho más insensibles que las dinamitas clásicas, pero más seguros.

El control de los tiempos de iniciación para mejorar la fragmentación. la reducción del nivel de vibraciones, ondas aéreas y proyecciones originadas en las voladuras.

El cebado o primado puntual, en diferentes posiciones en el taladro, o el cebado o primado lineal de toda la columna explosiva, mediante cordones detonantes de alto gramaje.

La mayor rapidez y flexibilidad en las operaciones de arranque, que mantienen un elevado grado de seguridad para el personal y las instalaciones.

Los distintos tipos de sistemas de iniciación suelen emplearse tanto en la minería subterránea como en la minería a tajo abierto, aunque algunos tipos de detonadores tienen uso más restringido y específico. La correcta elección del tipo de sistema iniciación está determinada por las necesidades de secuenciación, las características del entorno, la

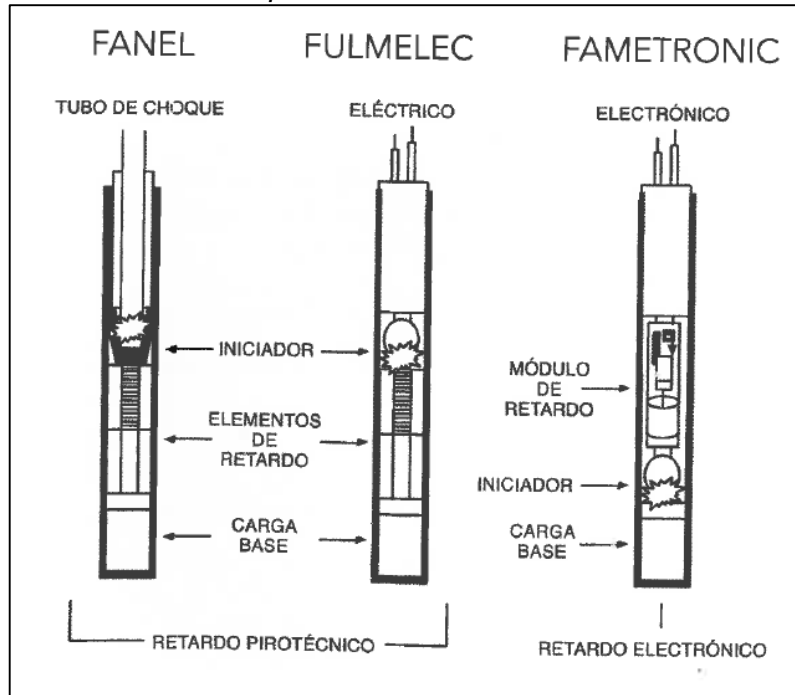
facilidad en la realización de la conexión y la seguridad involucrada en uno y otro sistema, entre otros factores.

### 2.2.2 Tipos de detonadores

Estos son algunos tipos de detonadores:

**Figura 10**

*Principales tipos de detonadores que se usan en la actualidad.*



Nota: Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

### 2.2.3 Accesorios de Voladura

Para que un explosivo pueda detonar es imprescindible activarlo, lo que se ejecuta comúnmente mediante los denominados “accesorios de voladura”, que abarcan a los fulminantes o detonadores, mecha de seguridad y mecha rápida, conectores, retardadores, cordones detonantes, cables, explosores e instrumentos de control como ohmnímetros y otros.

La utilización de estos accesorios precisamente seleccionados y combinados para cada caso da lugar a los métodos usados para iniciar la detonación de una voladura, conocidos como métodos de iniciación o de activación de explosivos, que habitualmente se agrupan en:

- Sistema elemental o convencional de mecha lenta fulminante; renovado actualmente hasta cierto punto con el encendido previo de las mechas de cada taladro por medio de la mecha rápida (ignitercord) y cápsulas conectadoras.
- Sistema eléctrico convencional; con detonadores instantáneos y de retardo estándares adicionado con el sistema de alta resistencia a corrientes estáticas o extrañas y con los sistemas eléctricos especiales, como el Magnadet y los de explosores secuenciales electrónicos.
- Sistemas no eléctricos, del tipo Nonel y parecidos y los cordones detonantes regulados por retardadores.
- Sistemas especiales para aplicaciones descritas, como los detonadores de concusión Dominó para voladura subacuática y otros.

Los elementos básicos de estos iniciadores contienen:

- La pega, son considerados elementos básicos al medio originador del impulso iniciador, que según el procedimiento será la chispa o llama abierta de un fósforo o chispeador de fricción; la descarga eléctrica ocasionada por un explosor, sea de tipo dínamo eléctrico o de condensador; al efecto de impacto de una pistola de arranque para detonadores Nonel y similares, o el de un fulminante convencional para esos mismos detonadores y para los cordones detonantes, que en la práctica se denomina pega, chispeo, encendido, etc.
- Al tren de transmisión del impulso iniciador, va desde el inicio hasta el núcleo sensible del detonador y dependiendo del tipo de sistema:
  - Por medio de alambres conductores (eléctrico),
  - Por medio de mangueras plásticas muy delgadas y flexibles, recubierto por dentro con un compuesto pirotécnico sensible (no eléctrico Nonel),
  - Por medio de cordones detonantes de muy bajo gramaje (Anoline, Detaline),
  - Mediante mangueras muy delgadas abastecidas con un gas inflamable y selladas poco antes del disparo que se realiza con una bombita-explosor



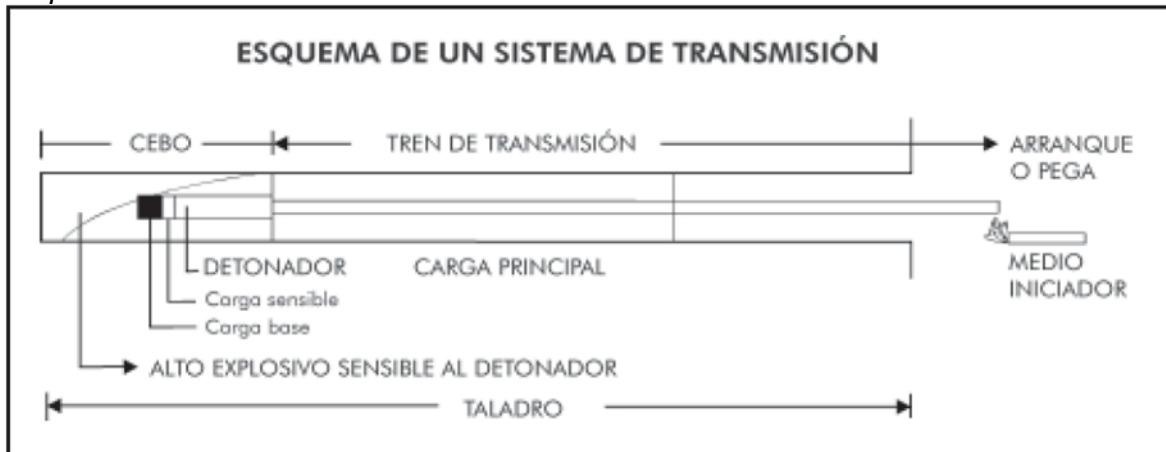
especial (Hercudet). En el sistema básico el tren viene a ser la misma mecha de seguridad.

- Al detonador, que contiene:
  - Al elemento de retardo que, al recibir el impulso iniciador a través del tren de transmisión, lo retiene un tiempo determinado antes de transferirlo a la carga sensible para producir su inflamación (este elemento no existe en el sistema elemental, en el que los retardos de tiempo se dan únicamente con distintas longitudes de mecha y orden de encendido).
  - A su carga iniciadora que incluye a su vez a una carga primaria sensible y a una carga base (secundaria o detonante), distribución que es común a casi todos los detonadores comerciales. La carga primaria (azida de plomo, fulminato de mercurio o similares) al recibir la llama o la onda de impulso iniciador se inflama y hace detonar a la carga base, que es generalmente de pentrita, la que al mismo tiempo hace detonar a la carga explosiva que le rodea (cebo o prima).
- Al cebo, cartucho de dinamita, hidrogel, TNT u otro explosivo sensible que finalmente hace detonar a la carga principal (carga del taladro). Esta serie de acciones se repite en cada taladro de una voladura múltiple; de ahí la trascendencia de las demoras minúsculas de tiempo de encendido entre cada taladro para lograr salidas secuenciales. El cebo o prima, que debe suministrar una energía iniciadora necesaria para que la columna explosiva principal pueda detonar a su régimen, y así entregar su máximo potencial para que la voladura de todo el frente sea completa y eficiente. La activación de cargas explosivas se ejecuta en dos modos:
  - Encendido de cargas individuales aisladas, que pueden ser iniciadas una a una en distintos momentos o todas simultáneamente.
  - Encendido de cargas múltiples que no se activan simultáneamente sino continuando cierta secuencia, en lo posible con períodos precisos de demora entre cada tiro, en forma “rotacional”, como lo veremos más adelante, provee muchas ventajas en cuanto a fragmentación, reducción de vibraciones y menor

consumo específico de explosivo, y que puede hasta cierto punto “sincronizarse” por medio del empleo de detonadores de retardo, eléctricos y otros medios.

**Figura 11**

*Esquema de un sistema de transmisión de un detonador.*



Nota: fuente Manual Práctico de Voladura EXSA.

#### **2.2.4 Sistemas de Iniciación**

Los distintos tipos de sistemas de iniciación se clasifican en cuatro grupos, que abarcan desde los sistemas más antiguos hasta los más recientes:

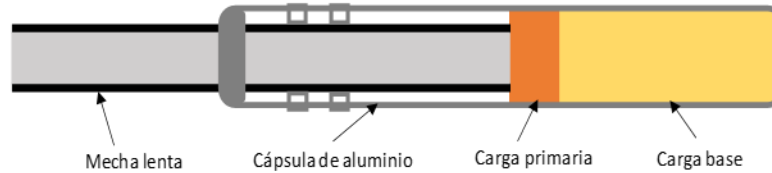
##### **Sistemas de iniciación convencionales**

Se inician mediante mecha lenta. Esta se introduce en el extremo abierto de una cápsula de aluminio que aloja la carga explosiva del detonador y, se engarza mediante unas tenazas especiales, de modo que se evita su salida durante su manipulación. No es posible configurar ningún tipo de retardo en el detonador o fulminante; una vez que la mecha inflamada, propagada por la pólvora, llega a la carga primaria, el detonador se inicia instantáneamente.

El sistema de iniciación convencional se compone de un detonador de mecha o fulminante común y una mecha lenta o mecha de seguridad.

## Figura 12

Característica de un detonador o fulminante común.



Nota: Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

**Fulminante común o detonador:** Está constituido por una cápsula cilíndrica de aluminio cerrada en uno de sus extremos. En su interior se encuentra un explosivo primario muy sensible a la chispa de la mecha de seguridad y otro secundario (carga base) de alto poder explosivo.

## Figura 13

Fulminante común (FAMESA).



Nota: Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

**Mecha de seguridad o mecha lenta:** Se caracteriza por ser flexible. Posee un núcleo central de pólvora, que transmite el fuego hasta el fulminante a una velocidad uniforme. Está recubierta por varias capas de diferentes materiales que garantizan la continuidad de la combustión y la compactación, protegidas a su vez por un recubrimiento de material plástico que asegura una excelente impermeabilidad y resistencia a la humedad, a la abrasión y a los esfuerzos mecánicos, en las condiciones más exigentes.

Este recubrimiento evita también que el fuego se transmita de un tramo a otro y minimiza la producción de chispas laterales. El tiempo de combustión es normalmente de 2.6 minutos por metro, con una cierta tolerancia de  $\pm 10$  segundos por metro.

#### **Figura 14**

*Mecha de seguridad (FAMESA).*



*Nota:* Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

**Conector para cordón de ignición o para mecha rápida:** Es una cápsula de aluminio que contiene en su interior una carga pirotécnica con una ranura paralela a su base de color rojo, para diferenciarla del fulminante común. El conector para mecha rápida es un complemento de la mecha rápida, desarrollado como un elemento de seguridad.

### Figura 15

Conector para cordón de ignición (FAMESA).



Nota: Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

Entre los avances en el sistema de iniciación convencional, se ha desarrollado un detonador ya ensamblado (fulminante común N°8, mecha de seguridad y conector para cordón de ignición), que garantiza mayor seguridad y eficiencia. Este detonador ensamblado, de la gama de productos de FAMESA, es denominado Carmex.

### Figura 16

Carmex (FAMESA).



Nota: Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

Mecha rápida o cordón de ignición: Este sistema tradicional de iniciación de las voladuras se compone de una masa pirotécnica, dos alambres y una cobertura exterior de plástico. Este tipo de mecha produce una llama incandescente durante su combustión,

cuya temperatura activa la masa pirotécnica del conector para mecha rápida, y, a su vez, asegura el eficiente encendido de la mecha de seguridad. FAMESA dispone de dos tipos de mecha rápida, denominadas Z-18 y Z-19, de colores rojo y verde respectivamente y sus tiempos de combustión son de 35 s/m y 26 s/m aproximadamente.

### Figura 17

*Mecha rápida o cordón de ignición (FAMESA).*



*Nota:* Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

### Sistemas de iniciación eléctrica

Los detonadores eléctricos están constituidos por una cápsula de aluminio o cobre en la que se aloja un inflamador, un explosivo iniciador y un explosivo base, como la pentrita. La potencia de los detonadores está determinada por la cantidad de la carga del detonador o cualquier otro explosivo equivalente de que disponen. Si el detonador es de retardo, entre inflamador y el explosivo primario existe un elemento pirotécnico retardador.

Los detonadores eléctricos se clasifican normalmente en función de los intervalos de tiempo de detonación, sus características eléctricas y sus aplicaciones. De acuerdo con el intervalo de tiempo transcurrido entre el momento en que se inicia el detonador (instante en el que se lanza la energía eléctrica) y se produce la detonación de la cápsula, los detonadores eléctricos se dividen en dos grupos:

- Detonadores instantáneos o de número cero; no lleva retardo y la explosión es inmediata.
- Detonadores de retardo; se agrupan en periodo corto, normal y largo.



## Figura 18

Detonadores eléctricos. Instantáneos y de retardo.



Nota: Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

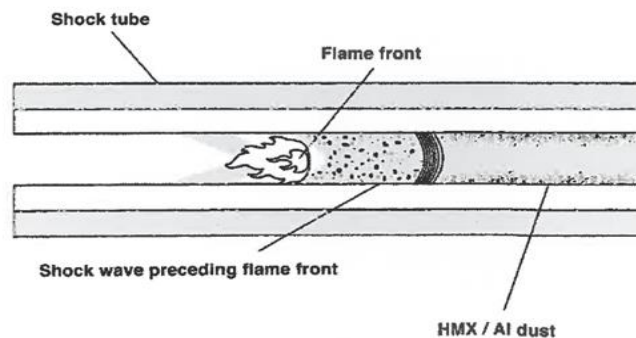
### Sistemas de iniciación no eléctricos

Los sistemas de iniciación con detonadores no eléctricos se basan en la onda de choque de baja velocidad de detonación (2000 m/s). La onda se canaliza a través de un tubo de plástico, denominado tubo de choque, hasta la cápsula de detonador. Ofrecen una variada combinación de tiempos y pueden usarse con todo tipo de explosivos (emulnor, dinamitas, booster y cordón detonante). Las partes de un detonador no eléctrico son:

- **Tubo de choque o manguera fanel.**

## Figura 19

Sección longitudinal de un tubo de choque.

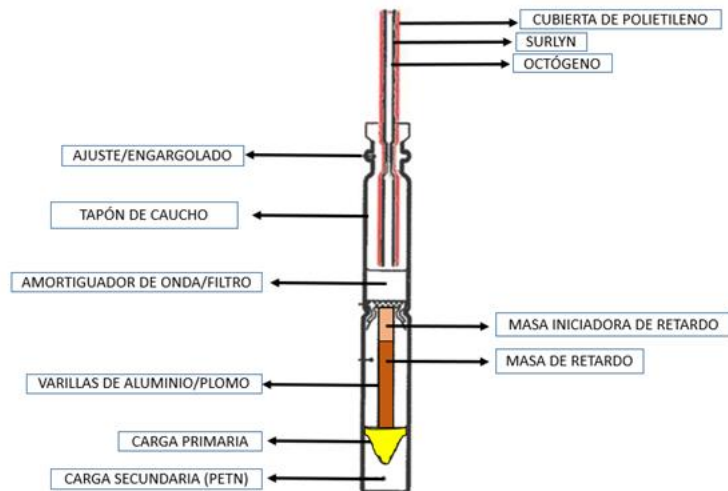


Nota: Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

- **Cápsula del detonador o fulminante no eléctrico.**

## Figura 20

Componentes de un detonador no eléctrico.



Nota: Fuente elaboración propia.

En cuanto a la gama de detonadores no eléctricos, actualmente se tiene las siguientes series de productos: Períodos cortos y períodos largos, retardo fanel (MS conector), duales, CTD, LSEF, NTD y mininel.

### Sistemas de iniciación electrónica

Desde mediados de la década de 1980, diversos fabricantes de explosivos, en conjunto con compañías de tecnologías electrónicas, comenzaron a desarrollar los detonadores temporizados electrónicos. Estos accesorios permiten, por su alta precisión y flexibilidad, un mayor control del proceso de fragmentación, así como de las vibraciones y proyecciones, entre otras variables.

Los componentes principales de un detonador electrónico consisten en una unidad de retardo electrónica y un detonador instantáneo. Se distingue un circuito integrado o chip, que constituye el corazón del detonador, además de un condensador para almacenar energía y circuitos de seguridad conectados a los cables que sirven de protección frente a sobrecargas eléctricas. El propio chip posee circuitos de seguridad internos. La gota pirotécnica, para la iniciación de la carga primaria, proporciona un tiempo de iniciación pequeño con la mínima dispersión.



El sistema de encendido consiste en un condensador y un conmutador electrónico, cuya salida es la gota pirotécnica. La diferencia principal entre los detonadores electrónicos y el resto de detonadores (eléctricos y no eléctricos) es que el tiempo de retardo se programa mediante un chip, en lugar de utilizar un elemento pirotécnico de tiempo de combustión determinado.

El sistema de iniciación electrónico posee detonadores de alta precisión, el tiempo de retardo de cada uno puede ser de hasta 20 segundos, con intervalos de un milisegundo. Es decir, se logran programar retardos desde 0 ms a 20000 ms, lo que permite elegir la secuencia adecuada en cada voladura sin ceñirse a las series estándar de fabricación de los detonadores convencionales. Los microchips proporcionan tiempos de retardo muy precisos, con una exactitud del orden del 0.04 % del intervalo programado.

Las voladuras que cuentan con un gran número de taladros se pueden programar para que las cargas minimicen los acoplamientos de las ondas. De esta manera, la carga operante disminuye y aumenta la longitud de la malla, siendo posible controlar los efectos adversos producidos por las vibraciones. Otras características de los sistemas de iniciación electrónica son:

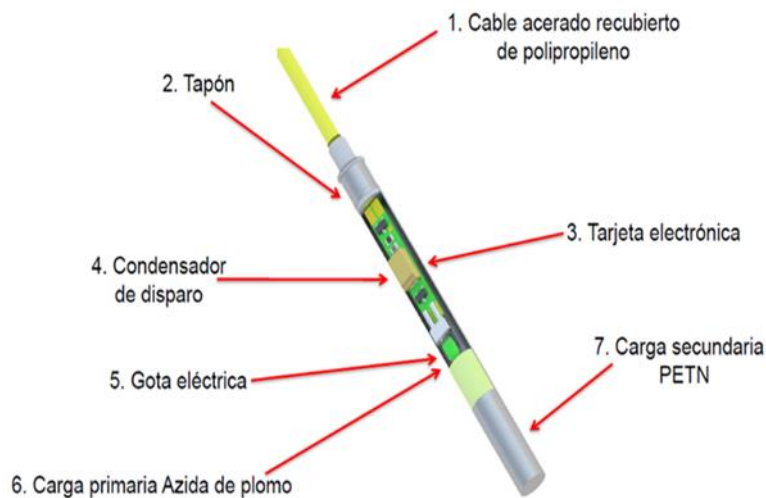
- No pueden detonar sin un código de activación único.
- Reciben la energía de iniciación y el código de activación desde el aparato de programación y mando.
- Están protegidos frente a sobretensiones. Los pequeños excesos de carga se disipan internamente a través de los circuitos de seguridad, mientras que los altos voltajes (> 1000 V) se limitan por un cortacorriente.
- Son insensibles a los efectos de tormentas, radiofrecuencia y electricidad estática.
- La tensión de operación es pequeña (< 50 V), una gran ventaja considerando el riesgo de corrientes errantes.

Los sistemas de iniciación electrónica poseen una alta precisión y flexibilidad en la asignación de tiempos de detonación y a su vez ofrece las siguientes ventajas y resultados.

- Reduce la vibración, el eliminar la superposición de ondas por efecto de la dispersión. Así, las intensidades de vibración son más predecibles que en otros sistemas.
- Mejora la fragmentación, al conseguir una actuación más homogénea del explosivo dentro del macizo a volar.
- Mayor versatilidad de los diseños de las voladuras, al ser ajustables los tiempos en intervalos de 1 ms.
- Reduce inventarios y sus complejidades, al disponer de todos los tiempos posibles con un juego de detonadores.
- Mejora los resultados en las voladuras especiales, como en las voladuras de contorno.

**Figura 21**

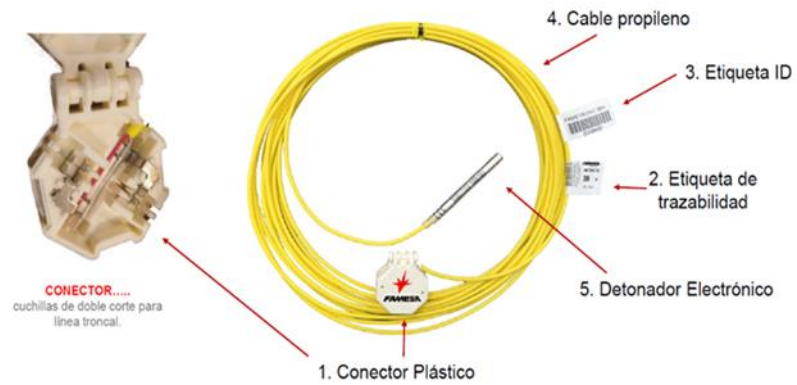
*Componentes de un detonador electrónico.*



*Nota:* Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

## Figura 22

Componentes de un conector electrónico.



Nota: Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

## Figura 23

Unidad de registro.



Nota: Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

**Figura 24**

*Unidad de disparo.*



*Nota:* Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

**Figura 25**

*Control remoto inalámbrico CRI.*



*Nota:* Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

### **2.2.5 Tipos de explosivos**

Las sustancias explosivas son sustancias o compuestos en estado sólido, líquido o gaseoso que se convierten en grandes cantidades de productos mediante reacciones

químicas redox en un tiempo muy corto, del orden de una fracción de milisegundo, en grandes volúmenes de productos gaseosos y con la correspondiente liberación de energía.

Los explosivos disponibles comercialmente son, por tanto, mezclas de sustancias, combustibles y oxidantes que, cuando se inician mediante un estímulo apropiado, producen una reacción exotérmica muy rápida que luego produce una serie de productos gaseosos a altas presiones y temperaturas.

Es químicamente estable y ocupa un gran volumen, aproximadamente entre 1000 y 10000 veces el volumen original de la habitación en la que estaba contenido el explosivo.

Estos fenómenos se utilizan en la tecnología de voladura de rocas para realizar trabajos mecánicos de fragmentar la roca.

Los explosivos son herramientas básicas en las operaciones de minería e ingeniería civil, de acuerdo con su sensibilidad al detonador, los explosivos se clasifican en altos explosivos y en agentes de voladura.

### **Altos explosivos**

Son aquellos explosivos que son capaces de poder iniciarse por medio de un fulminante n°8. Entre ellos tenemos a los siguientes

- **Dinamitas**

La dinamita desde sus inicios siempre ha cambiado, sus composiciones son cada vez más perfeccionadas, un número amplio de variaciones sutiles en torno a cinco componentes básicos: Nitroglicerina, nitroglicol, nitrocelulosa, sales oxidantes y sustancias combustibles. La porción líquida de todas las dinamitas está formada por la mezcla de dos esteres orgánicos comúnmente llamados "NG", que son la nitroglicerina y el nitroglicol. Actualmente el porcentaje de nitroglicerina en la mezcla es menor, debido al hecho de que el nitroglicol tiene menor punto de congelación, mejor estabilidad al calor y menor costo.

Las dinamitas con mayor contenido de "NG", suministran mayor poder rompedor y buena resistencia al agua, siendo comúnmente "fragmentadoras" o "tritadoras".

En el otro extremo quedan las de menor contenido de "NG" y mayor proporción de

nitratos, por lo que tienen menor efecto brisante, pero mayor volumen y expansión de gases mostrando mayor cantidad “empujadora o volteadora”. Normalmente su capacidad de resistencia al agua disminuye proporcionalmente al menor contenido de “NG”.

Las principales ventajas de las dinamitas son:

- Sensible al fulminate nº6, 8 y así como al cordón detonante.
- Potencias de gran magnitud, gran efecto triturador.
- Elevadas densidades, desde 1.05 hasta 1.5g/cm<sup>3</sup>.
- Altas velocidades de detonación que varían desde 3500 a 6000 m/s.
- Debido a su alta simpatía, posee alta capacidad para transmitir la detonación.

Como desventajas de las dinamitas se tiene las siguientes:

- Debido a su contenido de nitroglicerina, su categoría de humos no es buena, lo cual, emana gases nocivos.
- Altamente sensible a golpes con herramientas metálicas.

## Figura 26

*Dinamita sensible al fulminante común N°6.*



*Nota:* Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

### ▪ **Booster**

Con el desarrollo del ANFO, y después, de los agentes de voladura en hidrogel, apareció la necesidad de boosters de alta energía y velocidad de detonación. El desarrollo de las mezclas de emulsión no sensibilizadas para voladuras ha

impulsado la demanda de estos explosivos altamente energéticos. El booster conocido también como cebo o primer, básicamente está compuesto de pentolita y que a su vez consta de dos orificios pasantes de los cuales uno de estos tiene una reducción para una correcta ubicación del fulminante; es un explosivo de alta potencia, densidad, velocidad de detonación y presión de detonación, de modo que toda la columna explosiva alcanzará su mejor performance, por ende, será activado en su totalidad.

Son empleados para la iniciación de explosivos insensibles o agentes de voladura de tipo slurries, ANFO y nitracarbonitratos, donde un fulminante común o el poder explosivo de un cordón detonante no los logra iniciar. Estos se usan en la voladura de taladros de diferentes diámetros en las minas de tajo abierto, canteras y ocasionalmente en minería subterránea.

Los boosters se presentan en los siguientes tipos:

- BOOSTER HDP - 1/5 (90g)
- BOOSTER HDP - 1/3 (150g)
- BOOSTER HDP - 1/2 (225g)
- BOOSTER HDP - 3/4 (340g)
- BOOSTER HDP - 1 E (450g)
- BOOSTER HDP - 2 E (900g)
- BOOSTER HDP - 3 E (1 350g)

**Figura 27**

*Boosters en sus distintos pesos.*



Nota: Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

▪ **Emulsiones encartuchadas**

Las emulsiones explosivas en una envoltura plástica son del tipo designado agua en aceite. En ellas, la fase acuosa está constituida por sales inorgánicas oxidantes diluidas en agua, mientras que la fase aceitosa está integrada por un combustible líquido inmiscible con el agua del tipo hidrocarbonado y que finalmente es sensibilizado con microesferas de vidrio (sensibilización mecánica).

Su utilización está dirigido a cualquier tipo de trabajo: Minería, en obras de ingeniería civil, en canteras, en taladros secos, húmedos e inundados, con una modalidad de aplicación similar a las dinamitas convencionales, pudiendo trabajar como carga explosiva o como “cebos” de iniciación de columnas de nitrocarbonitratos.

Debido a la buena calidad de los gases post voladura y al no contener nitroglicerina en su composición, permite que el personal reingrese a la labor en menos tiempo; optimizando el tiempo en los ciclos de trabajo, sin previo descuido de la seguridad.

Las emulsiones encartuchadas están clasificadas según los siguientes tipos:

- Emulnor 500; que son empleados para voladuras en rocas muy suaves.
- Emulnor 1000; que son empleados para voladuras en rocas suaves a intermedias.
- Emulnor 3000; que son empleados para voladuras en rocas intermedias a duras



- Emulnor 5000; que son empleados para voladuras en rocas muy duras.

**Figura 28**

*Emulsiones encartuchadas en sus distintas presentaciones.*



*Nota:* Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

### **Agentes de voladura**

Son aquellos explosivos que no pueden iniciarse por medio de un fulminante n°8, sino que van a requerir de mayor energía para su iniciación que en este caso va ser un cebo o prima. Entre los agentes de voladura más resaltantes tenemos a los siguientes:

- **Anfo**

Este agente de voladura surge como causa de una explosión en 1947 en la ciudad de Texas, Estados Unidos; con la intención de proteger el nitrato de amonio con parafina, sin tener idea alguna que un 1% de esta sustancia representaba ya un combustible sensibilizante del nitrato de amonio. En efecto cualquier combustible combinado con nitrato de amonio resultará un agente explosivo, el producto que más se emplea es el gasoil ya que en comparación con el petróleo posee la ventaja de no poseer un punto de volatilidad tan bajo, por tanto, se expone a menores riesgos de explosiones de vapor. Está compuesto con nitrato de amonio en prills grado ANFO que retienen al combustible, un combustible líquido y un colorante. La mezcla se efectúa en equipos modernos de alta precisión. Este agente de voladura posee

un alto nivel de energía con componentes sensibilizantes que le permiten obtener una alta presión de detonación y velocidad de detonación, que asegura como efecto una mejora en los avances y en los volúmenes de rotura. Además, se usa en la voladura de taladros de diferentes diámetros en las minas de tajo abierto, canteras y en minería subterránea para el carguío de taladros horizontales y verticales (positivos y negativos).

## Figura 29

*Agente de voladura Anfo.*



*Nota:* Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

- **Anfo pesado**

Para la obtención del anfo pesado se realiza la mezcla emulsión matriz y anfo en distintas proporciones lo cual nos permite:

- Proporcionar al anfo mayor energía y resistencia al agua.
- Reducir la potencia y costo de una emulsión pura para voladuras en rocas competentes ya sean terrenos secos o húmedos.

El anfo pesado ha sido diseñado para trabajar en diámetros mayores a 4" como columna explosiva en taladros llenos o con alta presencia de agua que no es posible evacuar o donde no se puede cargar en forma mecanizada, así mismo, resiste altas presiones hidrostáticas y generan un elevado volumen y presión de gases, para su

iniciación se recomienda usar un primer de tamaño y peso adecuado según diámetro y profundidad.

**Figura 30**

*Agente de voladura Anfo pesado.*



*Nota:* Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

- **Emulsión gasificada**

Es una emulsión gasificable formada por una solución microscópica oxidante dispersa en una fase combustible continua y estabilizada por un emulsificante. Se caracteriza por ser altamente resistente al agua, además, es seguro durante su manipulación.

Se sensibiliza mediante la adición de un agente sensibilizador, llamado N-30 antes de su carguío en el taladro por medio de una unidad de bombeo, especialmente diseñada sobre una unidad móvil (camiones fábrica).

Como ventajas de usar emulsión gasificada se tiene las siguientes:

- Puede usarse en terrenos secos, húmedos o inundados y con rocas de distinta dureza.

- Se tiene un acople al 100% en los taladros, esto implica que haya un aprovechamiento de toda la energía que se deposita en ellas.
- Su utilización representa un trabajo seguro, toda vez que la emulsión matriz se sensibiliza al final de la unidad mecanizada; es decir que se trata de un producto no explosivo antes de ingresar en los taladros.
- Puede ser cargado a distintas densidades y energías, para obtener una buena fragmentación y mejorar la productividad desde la mina hasta su molienda en la planta.
- Por su alto poder rompedor es posible ampliar las mallas de perforación y, por ende, reducir los costos de perforación.
- Debido a su fácil carguío nos permite optimizar los tiempos durante el carguío.

**Figura 31**

*Emulsión matriz.*



*Nota:* Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

**Figura 32**

*Solución sensibilizante N-30*



*Nota:* Fuente Manual de Perforación y Voladura FAMESA.

## Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

### 3.1 Pruebas realizadas con detonador electrónico

Durante el periodo de pruebas que comprendió los meses de enero, febrero y marzo del 2021 se realizaron 66 pruebas con detonadores electrónicos en diferentes tajos de producción y zanja. En las pruebas realizadas se tenían los siguientes parámetros de perforación:

**Tabla 2**

*Parámetros de perforación y voladura.*

Parámetros de Perforación y Voladura	
Tipo de Roca	Regular
RMR	55
Q	3.39
Densidad	2.8 Tn/ m3.
Altura de banco	20 m.
Equipo de perforación	Epiroc Simba S7
Diametro de taladro de producción	64 mm.
Longitud máxima de taladro radial	28 m.
Malla de perforación en zanja	1.0 x 1.2 m.
Malla de perforación en producción	2.0 x 2.2 m.
Explosivo utilizado	ANFO
Densidad del explosivo	0.85 gr/cc.
Velocidad de detonación	3300 m/s.
Energía teórica	932 cal/gr.
Presión de detonación	51 kbar.
Iniciador utilizado	Booster 150 gr.

*Nota:* Fuente elaboración propia.

Los datos obtenidos de las pruebas realizadas se resumen en las siguientes tablas:

**Tabla 3***Pruebas realizadas 1.*

Fecha	Tajo	Nivel	Tipo de Voladura	Burden (m)	E (m)	Long. Tal. (m)	Toneladas (t)	N° Taladros cargados	Total Explosivos (kg)	Factor de Potencia (kg/t)	P 80 (in)
01-01-21	Tj. 6039-2	-300	Zanja	1.0	1.2	10.0	1800.0	39	1380.85	0.77	8.96
03-01-21	Tj.5901	-670	Zanja + Prod.	1.0	1.2	18.0	1250.0	15	855.25	0.68	7.18
03-01-21	Tj.5901	-670	Producción (+)	1.0	1.2	15.0	3300.0	14	602.10	0.18	6.89
04-01-21	Tj.5901	-670	Producción (+)	2.0	2.2	19.0	3800.0	41	1306.15	0.34	7.79
05-01-21	Tj.5978	-55	Producción (+)	2.0	2.2	12.0	4000.0	80	1362.00	0.34	8.43
07-01-21	Tj.6001	-610	Producción (+)	2.0	2.2	28.0	4607.0	32	1379.80	0.30	5.06
07-01-21	Tj.5901	-670	Producción (+)	2.0	2.2	20.0	11500.0	135	4520.25	0.39	7.57
08-01-21	Tj.5978	-55	Producción (+)	2.0	2.2	12.0	7851.0	131	2144.65	0.27	8.39
08-01-21	Tj.6039-2	-300	Producción (+)	2.0	2.2	12.0	7500.0	113	2266.95	0.30	9.52
11-01-21	Tj.5901	-670	Producción (+)	2.0	2.2	15.0	4200.0	97	1389.55	0.33	8.38
12-01-21	Tj.5955-1	-580	Zanja	1.0	1.2	14.0	1300.0	21	755.10	0.58	6.41
13-01-21	Tj.5778	-55	Producción (+)	2.0	2.2	12.0	5500.0	98	1764.70	0.32	9.83
13-01-21	Tj.6001	-610	Producción (+)	2.0	2.2	28.0	23500.0	115	5917.25	0.25	9.67
14-01-21	Tj.5955-1	-580	Producción (+)	2.0	2.2	14.5	3550.0	49	1332.35	0.38	5.51
14-01-21	Tj.5901	-670	Producción (+)	2.0	2.2	22.0	10000.0	82	3262.30	0.33	6.18
19-01-21	Tj.5901	-670	Producción (+)	2.0	2.2	22.5	8855.0	93	2513.95	0.28	7.70
22-01-21	Tj.5936-1	-55	Producción (+)	2.0	2.0	11.2	4100.0	67	1210.05	0.30	8.31
24-01-21	Tj.5901	-670	Zanja + Prod.	2.0	2.2	11.8	3800.0	104	1390.60	0.37	6.47
25-01-21	Tj.6001	-610	Producción (+)	2.0	2.2	28.0	10050.0	72	3135.80	0.31	5.49
26-01-21	Tj.5901	-670	Producción (+)	2.0	2.2	22.0	5900.0	64	2034.60	0.34	7.34
26-01-21	Tj.6144	-300	Producción (+)	2.0	2.2	22.0	3300.0	29	1004.35	0.30	6.15

*Nota:* Fuente elaboración propia.

**Tabla 4***Pruebas realizadas 2.*

Fecha	Tajo	Nivel	Tipo de Voladura	Burden (m)	E (m)	Long. Tal. (m)	Toneladas (t)	N° Taladros cargados	Total Explosivos (kg)	Factor de Potencia (kg/t)	P 80 (in)
27-01-21	Tj.6001	-610	Producción (+)	2.0	2.2	28.0	9500.0	64	2259.60	0.24	5.17
29-01-21	Tj.6144	-300	Producción (+)	2.0	2.2	22.0	1800.0	32	754.80	0.42	5.48
31-01-21	Tj.6144	-300	Producción (+)	2.0	2.2	22.0	1862.0	21	804.50	0.43	8.40
01-02-21	Tj.5971	-175	Zanja + Prod.	2.0	2.2	18.0	4283.0	52	1757.80	0.41	9.36
03-02-21	Tj.5999	-460	Producción (-)	2.0	2.2	15.0	3500.0	39	1405.85	0.40	8.66
04-02-21	Tj.6001	-610	Producción (+)	2.0	2.2	28.0	23900.0	133	5819.95	0.24	6.21
06-02-21	Tj.5901	-670	Producción (+)	2.0	2.2	20.0	4900.0	67	2010.20	0.41	9.45
10-02-21	Tj.5901	-670	Producción (+)	2.0	2.2	18.0	7000.0	100	2340.30	0.33	7.83
11-02-21	Tj.6039-2	-255	Producción (-)	2.0	2.2	15.0	8000.0	57	1758.55	0.22	8.77
12-02-21	Tj.5936-1	-55	Producción (-)	2.0	2.2	15.0	3327.0	41	1043.65	0.31	8.54
14-02-21	Tj.6001	-610	Producción (+)	2.0	2.2	28.0	10500.0	60	3759.15	0.36	5.69
16-02-21	Tj.5901	-670	Producción (+)	2.0	2.2	20.0	7596.0	63	2709.45	0.36	7.97
19-02-21	Tj.6001	-610	Producción (+)	2.0	2.2	28.0	7000.0	33	1754.95	0.25	8.77
20-02-21	Tj.6090	-550	Producción (-)	2.0	2.2	23.0	2000.0	26	628.90	0.31	9.39
22-02-21	Tj.6001	-610	Producción (+)	2.0	2.2	28.0	9132.0	64	2509.60	0.27	8.57
24-02-21	Tj.6090	-550	Producción (-)	2.0	2.2	23.0	2400.0	28	754.20	0.31	7.90
26-02-21	Tj.6083	-55	Producción (+)	2.0	2.2	22.0	2800.0	90	763.50	0.27	8.49
26-02-21	Tj.1805	295	Zanja	1.5	1.5	23.0	2100.0	18	1782.80	0.85	6.09
28-02-21	Tj.1805	295	Producción (+)	2.0	2.2	23.0	4350.0	36	880.40	0.20	6.77
02-03-21	Tj.6090-3	-490	Zanja	1.5	1.5	16.0	1850.0	31	579.65	0.31	7.07
03-03-21	Tj.6090-3	-490	Producción (-)	2.0	2.2	16.0	1300.0	17	177.55	0.14	7.52
04-03-21	Tj.6090-3	-490	Producción (-)	2.0	2.2	23.0	1600.0	19	602.85	0.38	5.32
04-03-21	Tj.6090-3	-490	Producción (-)	2.0	2.2	23.0	2300.0	16	627.40	0.27	7.81

Nota: Fuente elaboración propia



**Tabla 5***Pruebas realizadas 3*

Fecha	Tajo	Nivel	Tipo de Voladura	Burden (m)	E (m)	Long. Tal. (m)	Toneladas (t)	N° Taladros cargados	Total Explosivos (kg)	Factor de Potencia (kg/t)	P 80 (in)
07-03-21	Tj.1805	295	Producción (+)	1.5	1.2	23.0	2766.0	15	777.25	0.28	9.75
08-03-21	Tj.5901	-670	Producción (+)	2.0	2.2	20.0	6000.0	53	1632.95	0.27	6.98
09-03-21	Tj.1805	295	Producción (+)	2.0	2.2	23.0	4564.0	33	1104.95	0.24	9.60
10-03-21	Tj.5901	-670	Producción (+)	2.0	2.2	20.0	5400.0	74	1511.25	0.28	9.13
11-03-21	Tj.1805	295	Producción (+)	2.0	2.2	23.0	7415.0	48	1582.20	0.21	5.22
12-03-21	Tj.5996	-255	Zanja	1.0	1.5	14.0	1100.0	17	477.70	0.43	7.82
13-03-21	Tj.6128	-255	Producción (+)	2.0	2.2	12.0	2800.0	58	933.70	0.33	7.21
13-03-21	Tj.5996	-255	Producción (+)	2.0	2.2	14.0	2000.0	32	704.80	0.35	5.10
14-03-21	Tj.6128	-255	Producción (+)	2.0	2.2	12.0	3500.0	56	1133.40	0.32	8.73
15-03-21	Tj.5996	-255	Producción (+)	2.0	2.2	14.0	4900.0	73	1710.95	0.35	9.07
15-03-21	Tj.1805	295	Producción (+)	2.0	2.2	23.0	7500.0	56	2108.40	0.28	5.06
18-03-21	Tj.5996	-255	Producción (+)	2.0	2.2	17.0	3500.0	38	1255.70	0.36	5.86
21-03-21	Tj.5955	-550	Zanja + Prod.	2.0	2.2	10.0	2000.0	38	905.70	0.45	5.34
21-03-21	Tj.5996	-255	Producción (+)	2.0	2.2	14.0	4666.0	49	882.35	0.19	6.79
22-03-21	Tj.5955	-550	Producción (-)	2.0	2.2	10.0	1500.0	18	627.70	0.42	8.45
23-03-21	Tj.5971	-215	Producción (+)	1.8	2.0	27.0	2034.0	13	952.40	0.47	10.01
23-03-21	Tj.5955	-550	Producción (+)	1.8	2.0	15.0	2030.0	33	904.95	0.45	6.30
24-03-21	Tj.1805	295	Producción (+)	2.0	2.2	23.0	3220.0	29	1179.35	0.37	8.07
25-03-21	Tj.5955	-550	Producción (+)	1.8	2.0	12.0	3123.0	44	1106.60	0.35	7.14
26-03-21	Tj.5971	-215	Producción (+)	1.8	2.2	27.0	3758.0	25	1079.35	0.29	7.27
28-03-21	Tj.6090-1	-550	Producción (+)	2.0	2.0	20.0	1500.0	22	579.05	0.39	8.81
28-03-21	Tj.6001-3B	-610	Producción (+)	1.5	2.0	25.0	11550.0	164	4401.25	0.38	7.28

Nota: Fuente elaboración propia

Mina Condestable tiene una producción anual de 2500000 Tn de mineral de Cu con una ley equivalente de 0.8 %, la cual es minada en un 85 % por el método de Sub level stoping, lo cual indica que 2100000 Tn son extraídas por este método.

Cuando se disparan taladros de producción se detonan 50 taladros en promedio, lo cual equivale a aproximadamente 5140 Tn,

En mina Condestable es necesario realizar 410 disparos de taladros de producción al año para poder cubrir el plan de minado anual. Calculando el tamaño de muestra necesario que garantice que los resultados obtenidos tengan un nivel de confianza del 90 % y un error de estimación aceptado del 10%, se calcula lo siguiente:

$$n = \frac{N \times Z_{\alpha}^2 \times p \times q}{e^2 \times (N - 1) + Z_{\alpha}^2 \times p \times q}$$

Donde:

n: Tamaño de muestra

N: Tamaño de población = 410

NC: Nivel de confianza 90%

Z $\alpha$ : Parametro estadístico que depende de NC=1.64,

p: Probabilidad que ocurra el evento = 0.5

q: Probabilidad que no ocurra el evento = 0.5

e: Error de estimación aceptado = 10%

Reemplazando

$$n = \frac{410 \times 1.64^2 \times 0.5 \times 0.5}{0.10^2 \times (410 - 1) + 1.64^2 \times 0.5 \times 0.5} = 28.7 = 29$$

Esto nos indica que son necesarios 29 pruebas con detonadores electrónicos como mínimo para garantizar que los indicadores obtenidos a partir de las pruebas son representativos. En el estudio realizado se llevaron a cabo 66 pruebas, lo cual es mayor a las 29 solicitadas.

## Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

### 4.1 Análisis del tamaño de granulometría

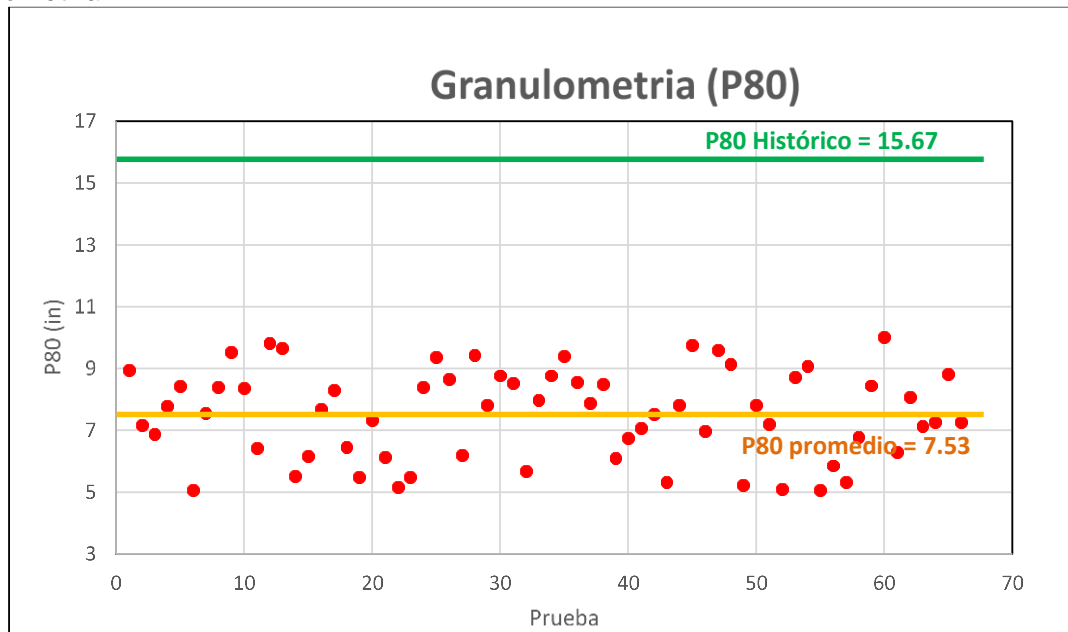
Se realizó la evaluación de la interacción que tiene el detonador electrónico y el ANFO utilizado en los taladros de producción en Sub level stopping con el tipo de roca en cuanto a resultado post voladura en fragmentación, para ello se realizó análisis con software WipFrag y Split.

Para determinar el P80 se tomó muestras en las labores asignadas a las pruebas en tipo de roca en mineral con resistencia a compresión en mineral 110.08MPa, intrusivo 169.65MPa y Caliza 79.37MPa.

Como dato histórico se tiene que el promedio de la fragmentación (P 80) utilizando detonadores no eléctricos es de 15.67”.

**Figura 33**

*Granulometría*



*Nota:* Fuente elaboración propia.

Del cuadro anterior se concluye que el tamaño de la fragmentación (P80) promedio utilizando detonadores electrónicos es de 7.53”, lo cual comparado con el tamaño histórico de la fragmentación (P80) es un 52 % menor, esto nos permite obtener ahorros potenciales en el tratamiento del mineral, específicamente en energía en la actividad de chancado primario.

#### 4.2 Comparación de costos

Si bien el uso de detonadores electrónicos permite obtener ahorrar energía en la actividad de chancado, el costo de un detonador electrónico es de 21 \$ la unidad, lo cual es mayor comparado con los detonadores no eléctricos los cuales tienen un valor de 3.5 \$ la unidad. Para saber si es factible el uso de estos detonadores electrónicos fue necesario realizar el siguiente análisis económico.

**Tabla 6**

*Análisis de costo*

		VOLADURA CON DETONADOR NO ELECTRICO	VOLADURA CON DETONADOR ELECTRONICO
ACTIVIDAD	Und.	P.U.	P.U.
Perforación	\$/ Tn	2.91	2.91
Voladura	\$/ Tn	2.72	2.91
Ventilación	\$/ Tn	0.27	0.27
Limpieza	\$/ Tn	2.97	2.97
Sostenimiento	\$/ Tn	7.85	7.85
Transporte	\$/ Tn	4.23	4.23
Servicios	\$/ Tn	1.32	1.32
Bombeo	\$/ Tn	1.75	1.75
Chancado	\$/ Tn	1.48	1.18
Molienda	\$/ Tn	2.54	2.54
Flotación	\$/ Tn	0.86	0.86
Espesador	\$/ Tn	0.37	0.37
Filtrado	\$/ Tn	0.23	0.23
Relavera	\$/ Tn	0.45	0.45
Costo total	\$/ Tn	29.95	29.86
DIFERENCIA	\$/ Tn		0.07
AHORRO ANUAL (2100000 Tn)	\$		147000

*Nota:* Fuente elaboración propia

Según el análisis realizado y considerando las actividades que incluyen a mina y planta concentradora, se pueden llegar a obtener ahorros anuales de \$ 147000, producto de la reducción del tamaño de la fragmentación.

### 4.3 Análisis de vibraciones

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de las detonaciones de las voladuras con detonadores electrónicos, se realiza el monitoreo de vibraciones de las pruebas realizadas de las cuales se validan 8 monitoreos, los cuales se usarán para realizar un modelo de vibraciones a campo lejano en un medio. En la siguiente tabla se presenta los registros de vibración tomados por fecha.

**Tabla 7**

*Pruebas de vibraciones*

PRUEBAS DE VIBRACIONES					
Fecha	Distancia (m)	Carga operante (Kg)	Distancia escalar (DS)	VPP (mm/s)	VPP simulado
11-03-21	4000	3.12	22.65	5.13	8.32
12-03-21	2030.00	7.81	7.26	20.40	36.10
13-03-21	2500	3.12	14.15	8.9	15.26
13-03-21	5000	3.12	28.31	4.62	6.23
14-03-21	3970	20.31	8.81	18.9	28.14
15-03-21	8060	20.31	17.88	6.47	11.28
15-03-21	6650	18.72	15.37	8.64	13.72
18-03-21	3970	15.6	10.05	12.3	23.73

*Nota:* Fuente elaboración propia

Para el análisis de vibraciones se utilizó el modelo campo lejano de Devine, este modelo para predecir VPP podemos aplicarlo a partir de las mediciones previas que realizamos en la labor, donde determinamos: el nivel de vibración que genera una carga explosiva, la carga explosiva para generar dicha vibración, y la distancia desde la carga explosiva hasta el punto donde se midió la vibración.

$$VPP = K x \left(\frac{d}{\sqrt{W}}\right)^{-\alpha}$$

Donde:

VPP: Velocidad pico – partícula (mm/s)

d: Distancia entre el punto de partícula y la carga explosiva (m.)

W: Peso de la carga explosiva detonada en un instante (kg.)

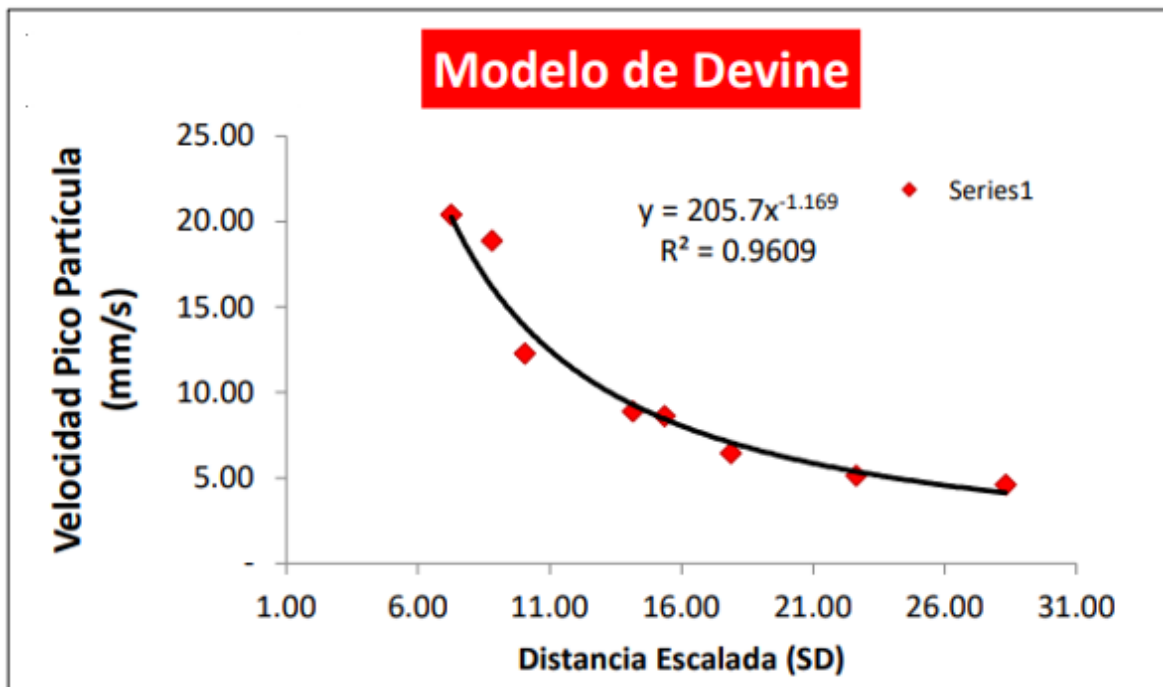
K: Factor controlado principalmente por el explosivo

$\alpha$ : Factor de atenuación de la roca

Considerando que el modelo de Devine es el más ajustado a campo lejano, se elige este para determinar las constantes que ajustan al comportamiento de la roca con la vibración por voladura, las cuales son:  $K= 205.7$  y  $\alpha = -1.169$ .

**Figura 34**

*Modelo de Devine*



Nota: Fuente elaboración propia

Con esos valores conseguimos la siguiente ley de atenuación en campo lejano según Devine:

$$VPP = 205.07 \times \left(\frac{d}{\sqrt{W}}\right)^{-1.169}$$

Calculando la Velocidad Pico Partícula crítico (VPP Crítico) y el nivel de daño:

$$VPP_{critico} = \sigma_t \times Vp / Ei$$

Donde:

PPV crítico: Velocidad pico – partícula crítico (mm/s)

$\sigma_t$ : Resistencia a la tracción (Mpa) = 3

Vp: Velocidad de la onda p (m/s) = 3500 + 1000 log(Q) = 4031

Ei: Modulo de Young (Gpa) = 14.8

$$VPP_{critico} = \frac{3 \times 4031}{14.8} = 763 \text{ mm/s}$$

Conociendo el VPP critico se concluye:

**Tabla 8**

*Modelo de daño*

CRITERIO DE DAÑO	TIPO DE DAÑO	Vpp crítico
Mayor 4 * PPV crítico	Intenso fracturamiento	3050
Mayor 1 * PPV crítico	Creación de nuevas fracturas	763
Mayor ¼ * PPV crítico	Leve propagación fracturas preexistentes	191

*Nota:* Fuente elaboración propia

Para calcular la carga operante máxima a detonar por retardo, debemos definir la longitud que queremos dañar sobre las cajas adyacentes. Trabajaremos con 1.22m y el valor de la velocidad pico particular crítico, con estas acotaciones el cálculo es el siguiente:

$$VPP_{critico} = 205.07 \times \left(\frac{d}{\sqrt{W}}\right)^{-1.169}$$

$$763 = 205.07 \times \left(\frac{1.22}{\sqrt{W}}\right)^{-1.169}$$

$$W = 13.1 \text{ kg/ retardo}$$

Por tanto, se concluye que la carga operante máxima a detonar para un tipo de roca con características similares a los tajos donde se realizó la prueba, debería ser de 13.00 kg/retardo y/o taladro para taladros ubicados en la caja techo y en taladros de producción usar 15.60kg/retardo y/o taladro, para no provocar daño excesivo el macizo rocoso.

#### 4.4 Validación de hipótesis

Para validar la hipótesis se realizará un análisis de varianza o ANOVA a los resultados de granulometría (P80) obtenidos en las 66 pruebas realizadas descritas en las tablas 4, tabla 5 y tabla 6 y se evaluará la hipótesis nula ( $H_0$ ) y hipótesis alternativa ( $H_a$ ).

- Hipótesis Nula: El uso de detonadores electrónicos no permite obtener una menor fragmentación y menor daño al macizo rocoso.
- Hipótesis Alternativa: El uso de detonadores electrónicos permite obtener una menor fragmentación y menor daño al macizo rocoso.

**Tabla 9**

*Datos de granulometría*

Dato	P 80 (ln)	Dato	P 80 (ln)	Dato	P 80 (ln)
1	8.96	23	5.17	45	9.75
2	7.18	24	5.48	46	6.98
3	6.89	25	8.4	47	9.6
4	7.79	26	9.36	48	9.13
5	8.43	27	8.66	49	5.22
6	5.06	28	6.21	50	7.82
7	7.57	29	9.45	51	7.21
8	8.39	30	7.83	52	5.1
9	9.52	31	8.77	53	8.73
10	8.38	32	8.54	54	9.07
11	6.41	33	5.69	55	5.06
12	9.83	34	7.97	56	5.86
13	9.67	35	8.77	57	5.34
14	5.51	36	9.39	58	6.79
15	6.18	37	8.57	59	8.45
16	7.7	38	7.9	60	10.01
17	8.31	39	8.49	61	6.3
18	6.47	40	6.09	62	8.07
19	5.49	41	6.77	63	7.14
20	7.34	42	7.07	64	7.27
21	6.15	43	7.52	65	8.81
22	7.34	44	5.32	66	7.28

*Nota:* Fuente elaboración propia

Para la realización del análisis de varianza o ANOVA se tomará los siguientes parámetros:



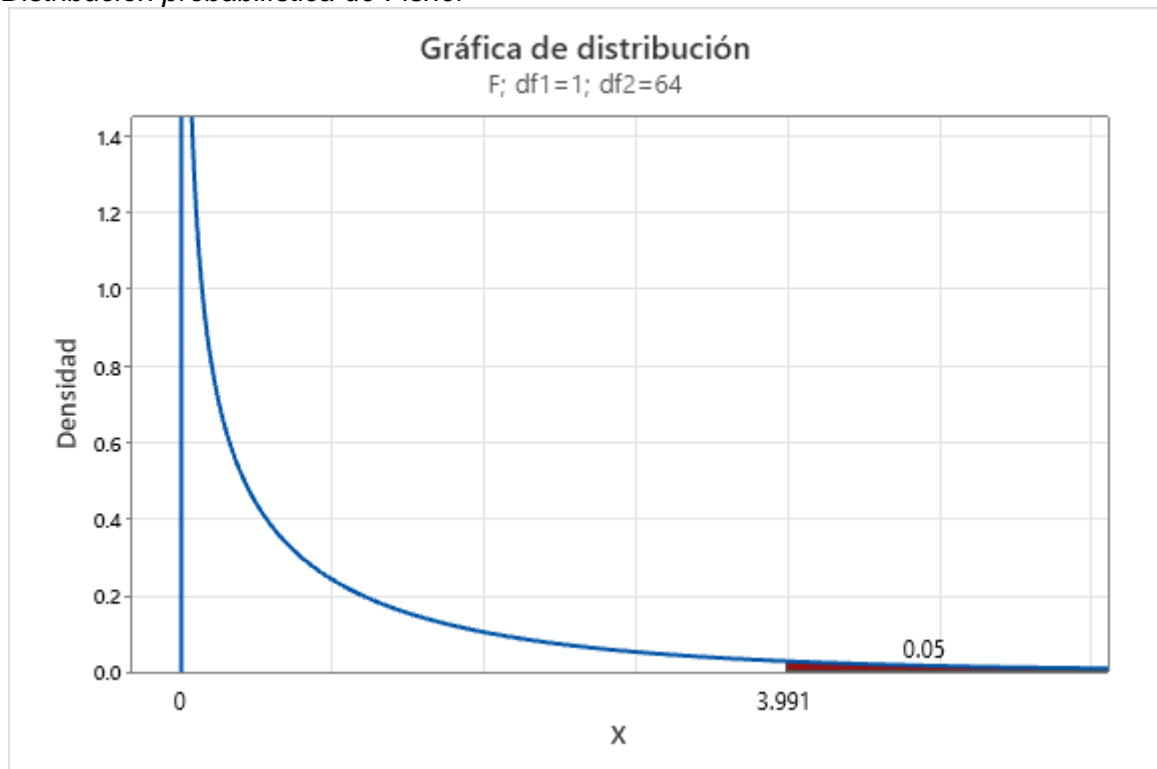
- Grados de libertad del numerador:  $k - 1 = 2 - 1 = 1$ , donde “k” es la cantidad de grupos de estudio, en este caso son 2, el grupo donde se realizaron las pruebas con los detonadores electrónicos y el grupo donde no se realizan las pruebas con detonadores electrónicos cuyo P80 promedio es 15.67”.
- Grados de libertad del denominador:  $n - k = 66 - 2 = 64$ , donde “n” es la cantidad de datos analizados, en este caso es 66.

Para realizar el ANOVA se grafica la función de distribución probabilística de Fisher

F, en este caso será:

**Figura 35**

*Distribución probabilística de Fisher*



Nota: Fuente elaboración propia

De la gráfica se ha obtenido el valor crítico  $F = 3.991$  y se establece lo siguiente:

Si: Estadístico  $F >$  Valor crítico  $F$ , entonces se rechaza la  $H_0$

Estadístico  $F <$  Valor crítico  $F$ , entonces se acepta la  $H_0$

Posterior a ello, se analizan los datos de la Tabla y se calcula el estadístico  $F$  obteniéndose lo siguiente:

**Tabla 10***Análisis de varianza*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	2097.5	2097.50	514.73	0.000
Error	130	529.7	4.07		
Total	131	2627.2			

*Nota:* Fuente elaboración propia

Del cuadro anterior se obtiene que el Estadístico  $F = 514.73$  y se concluye que:

Estadístico  $F = 514.73 >$  Valor crítico  $F = 3.991$ , entonces se rechaza la  $H_0$  y se acepta la  $H_a$  que señala lo siguiente: El uso de detonadores electrónicos permite obtener una menor fragmentación y menor daño al macizo rocoso.

## Conclusiones

El uso de detonador electrónico permite controlar el daño hacia las cajas por lo tanto un mayor tiempo de autoaporte del macizo rocoso.

El uso de detonador electrónico permite incrementar el número de taladros a disparar (voladura masiva) debido a que se daña menos el macizo rocoso.

De acuerdo al análisis granulométrico realizado, se obtiene un P80 promedio de 7.53" ó 19 cm, haciendo una disminución del 52.05% con respecto al histórico 15.67" ó 39.8 cm, con el detonador no eléctrico, lo cual genera un ahorro anual de \$ 147000 debido al menor uso de energía.

De acuerdo al monitoreo de vibraciones, se obtienen registros de voladuras realizadas con detonador no eléctrico con VPP= 46.30mm/s y con detonador electrónico con VPP = 5.33mm/s.

De las tablas mencionadas de criterios de daño, podemos resaltar para que se genere algún tipo de daño a una excavación en roca competente de los tajos. Los niveles de vibración deben estar sobre los 250 mm/s, por tanto, según los registros vibracionales no supera lo estipulado.

Se realizó el cálculo de carga operante, concluyendo que la carga operante máxima a detonar para un tipo de roca con características similares a los tajos donde se realizaron las pruebas, debería ser de 13.00 kg/taladro para no provocar daño excesivo el macizo rocoso, este cálculo aplica a taladros ubicados en la caja techo, y para los taladros de producción usar 15.6 kg/taladro.

## Recomendaciones

Ante los buenos resultados que se vienen obteniendo en lo que se refiere a la granulometría, se recomienda continuar con el uso de los detonadores electrónicos, ya que se puede realizar voladuras masivas tanto en zanja como en producción.

Con el uso de detonadores electrónicos se reduce la carga operante a un solo taladro, por lo que su uso reduce el resultado del monitoreo de vibraciones, disminuyendo la Velocidad Pico Partícula.

Para la voladura de zanja se podría incrementar la malla a 1.40m x 1.40m y comparar los resultados con la malla actual (1.20m x 1.20m) y para la voladura de producción se podría incrementar a 1.90m x 1.90m y comparar los resultados con la granulometría.

Es importante continuar con la capacitación y entrenamiento de todo el proceso de operación de los equipos electrónicos a fin de evitar accidentes.

## Referencias bibliográficas

- Agreda Turriarte, Carlos. (2016). Clases de Perforación y voladura, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Alejo, Gonzalo. (2021, Octubre). Métodos de Perforación en Minería Subterránea. iSE Academy. <https://ise-academy.net/metodos-de-perforacion-en-mineria-subterranea/>
- Bernaola Alonso, José. (2012). Perforación y voladura de rocas en minería. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas de la Universidad Politécnica de Madrid. [https://oa.upm.es/21848/8/20131007\\_PERFORACION\\_Y\\_VOLADURA.pdf](https://oa.upm.es/21848/8/20131007_PERFORACION_Y_VOLADURA.pdf)
- Cámara Minera del Perú. (2022, Diciembre). Métodos de Perforación en minería subterránea. CAMIPER. <https://camiper.com/tiempominero-noticias-en-mineria-para-el-peru-y-el-mundo/tipos-de-perforacion-en-mineria-subterranea>
- Departamento Técnico Exsa S.A. (2019). Manual Práctico de Voladura 5ta Edición. Exsa S.A. <https://es.scribd.com/document/475226605/MANUAL-DE-VOLADURA-exsa-Cap-2-Pag-45>
- López Jimeno, Carlos, Cebrián Romo, Benjamín y Rocha Gil, María. (2019). Manual de Perforación y Voladura. Famesa Explosivos SAC. <https://es.scribd.com/document/448983290/MANUAL-FAMESA-2019-1-Cap-7-Pag-186>
- López Jimeno, Carlos. (2017). Manual de perforación, explosivos y voladuras en minería y obras públicas. Grupo de Proyectos de Ingeniería. [https://oa.upm.es/21848/8/20131007\\_PERFORACION\\_Y\\_VOLADURA.pdf](https://oa.upm.es/21848/8/20131007_PERFORACION_Y_VOLADURA.pdf)
- Mota, Enrique. (2017, 10 de octubre). Avances tecnológicos en la perforación y voladura de rocas. [Presentación de avances]. PERVOL 17, Madrid, España. <https://www.interempresas.net/Mineria/Articulos/203363-Avances-tecnologicos-en-la-perforacion-y-voladura-de-rocas.html>

Pernía Llera, José María. (2012). Manual de perforación y voladura de rocas. Instituto geológico y minero de España.

<https://es.scribd.com/document/514360850/Manual-de-Perforacion-y-Voladura-de-Rocas-Cap-32-Pag-363>

## Anexos

Anexo N° 1: Análisis de fragmentación

Fecha: 24 – 03 – 23

Tajo: 1805 Nivel: 295

Se dispararon taladros de producción 29 taladros de producción con una malla de perforación de 1.8 x 2.0 metros.

En las siguientes figuras se ven los amarres realizados con los detonadores electrónicos

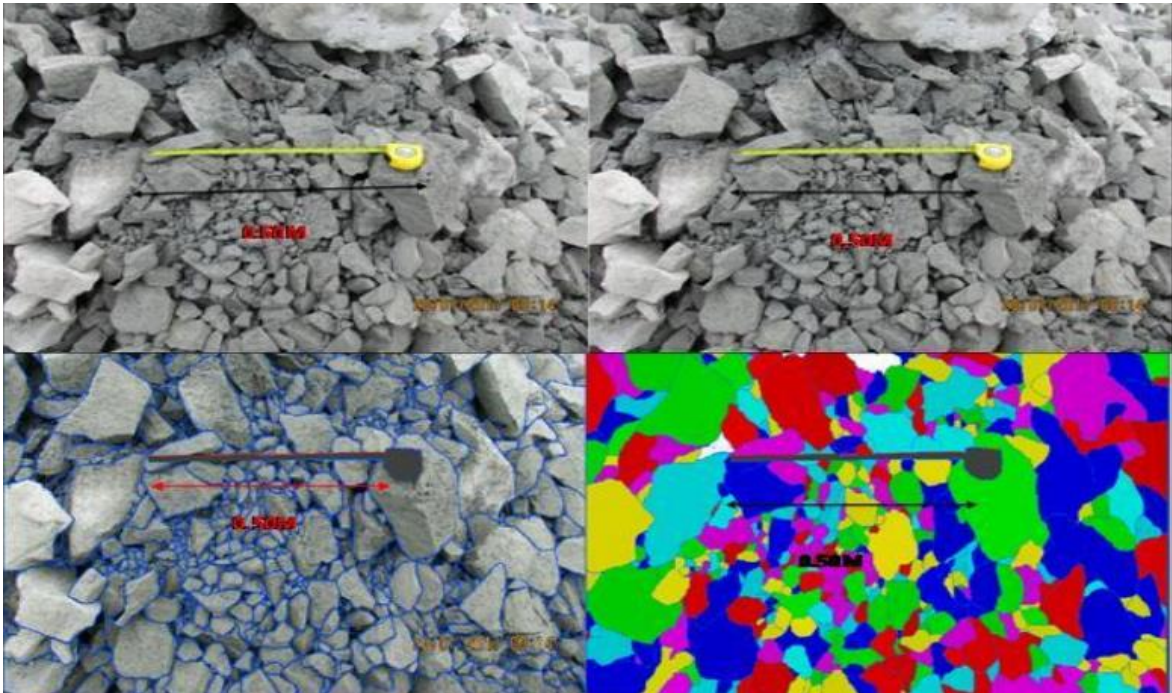


Detonadores electrónicos instalados

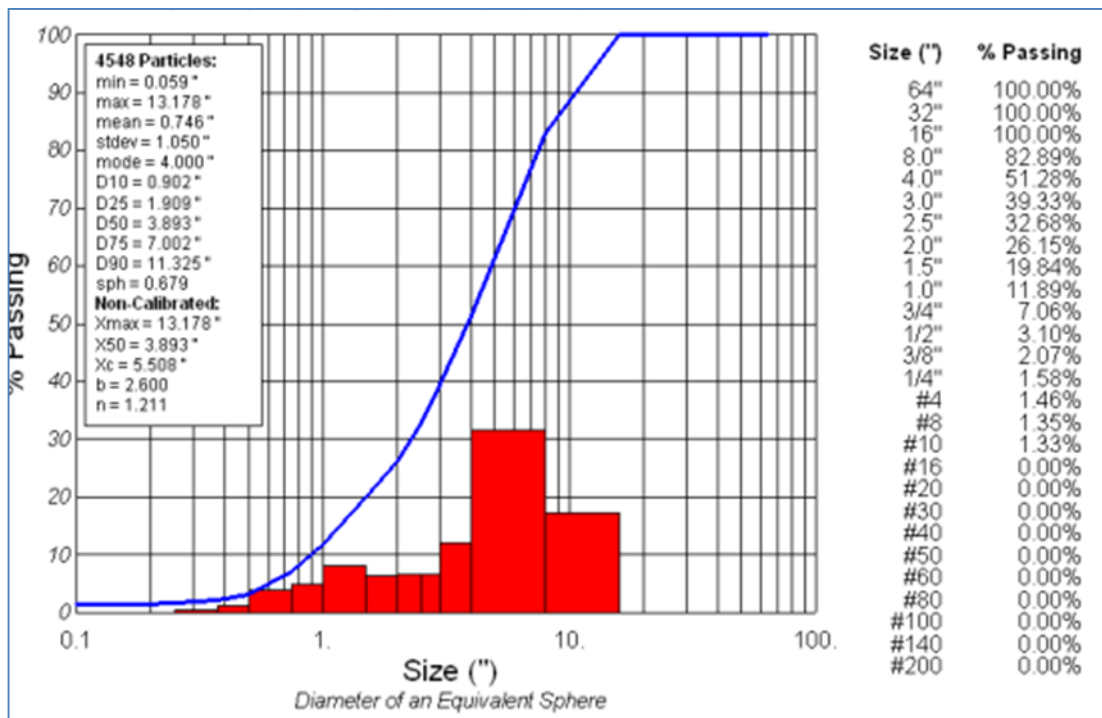


Amarre de detonadores electrónicos

El resultado del tamaño de la granulometría según el análisis fue de máximo 13.1” y mínimo 0.59”, teniendo un P80 de 7.46”



Evaluación de fragmentación



Aplicación de software Wipfrag