



# **UNIVERSIDAD NACIONAL “SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”**

---

## **ESCUELA DE POSTGRADO**

### **DETONADORES ELECTRÓNICOS PARA MEJORAR LA FRAGMENTACIÓN DE LA ROCA EN MINERÍA A CIELO ABIERTO, AÑO 2019.**

**Tesis para optar el grado de Maestro  
en Ingeniería de Minas**

**Mención en Sistema de Gestión Integral Minera**

**LUIS ALBERTO JESUS ARANDA**

**Asesor: Mag. ARNALDO ALEJANDRO RUIZ CASTRO**

**Huaraz - Ancash - Perú**

**2022**

**N° Registro: T0851**



## AGRADECIMIENTO

A la empresa ENAEX PERÚ S.A.C por darme la oportunidad de trabajar y conocer a profundidad el uso y la aplicación de los detonadores electrónicos.

A la Compañía Minera Antamina S.A. por permitirme tomar los datos para realizar la presente tesis.

A la plana docente de la escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo por los conocimientos impartidos que me serán de gran utilidad para mi desarrollo profesional.

Al Mag. Arnaldo Alejandro Ruiz Castro por brindarme su amistad y confianza para recurrir a su capacidad y experiencia para guiarme en la elaboración de mi tesis.



A mi esposa Miriam y mis hijos Fabrizio y Luanna, que se han convertido en la principal motivación y fuerza para superarme día a día.

A mis padres Celestino y Juana por su apoyo incondicional que siempre me han dado. Son inseparables a lo largo de mi vida.

A mis hermanos Diego, Dennis y Flor por su respaldo y aliento.

A Dios por darme salud, fuerza y perseverancia para poder alcanzar mis objetivos.

## ÍNDICE

Resumen	xii
Abstract	xiii
INTRODUCCIÓN	14
Capitulo I	
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	16
1.1 Planteamiento y formulación del problema	16
1.2 Objetivos	18
1.3 Justificación	19
1.4 Delimitación	20
Capitulo II	
MARCO TEÓRICO	21
2.1 Antecedentes de Investigación	21
2.2 Bases teóricas	26
2.3 Definición de términos	54
2.4 Hipótesis	56
2.5 Variables	57
Capitulo III	
METODOLOGÍA	58
3.1 Tipo de Investigación	58
3.2 Diseño de investigación	58
3.3 Población y muestra	59
3.4 Técnicas e Instrumento(s) de recolección de datos	60



3.5	Plan de procesamiento y análisis de datos	60
Capítulo IV		
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		61
4.1	Presentación de resultados	61
4.2	Prueba de hipótesis	70
4.3	Discusión	78
Conclusiones		89
Recomendaciones		91
Referencias bibliográficas		92
Anexos		94



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	
Diseño de perforación y voladura	62
Tabla 2.	
Contrastación de hipótesis general	71
Tabla 3.	
Precios unitarios de los insumos de voladura.	81
Tabla 4.	
Precios unitarios de los insumos de voladura.	81
Tabla 5.	
Resumen de los resultados con detonadores pirotécnicos	82
Tabla 6.	
Resumen de los resultados con detonadores electrónicos.	82
Tabla 7.	
Resumen de consumos de insumos con detonadores pirotécnicos.	83
Tabla 8.	
Resumen de consumos de insumos con detonadores electrónicos.	83
Tabla 9.	
Resumen de costos por proyecto de voladura con detonadores pirotécnicos.	84
Tabla 10.	
Resumen de costos por proyecto de voladura con detonadores electrónicos.	84
Tabla 11.	
Resumen de costos y tonelajes.	85
Tabla 12.	

Resumen de costos y tonelajes.	86
Tabla 13.	
Rendimientos y costos de palas p&h 4100ac.	86
Tabla 14.	
Resumen de costos y tonelajes.	87
Tabla 15.	
Resumen de costos y tonelajes.	87
Tabla 16.	
Ahorro total en 10 voladuras	88
Tabla 17.	
Ahorro proyectado anual	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Condiciones del estado de la detonación.	26
Figura 2:	Primera etapa de la mecánica de fragmentación	29
Figura 3:	Segunda etapa de la mecánica de fragmentación.	30
Figura 4:	Tercera etapa de la mecánica de fragmentación.	31
Figura 5:	Desarrollo de una detonación.	32
Figura 6:	Fases de la mecánica de rotura de un taladro con cara libre.	34
Figura 7:	Desplazamiento de material, presencia de cara libre.	35
Figura 8:	Fases de la mecánica de rotura de un taladro sin cara libre.	35
Figura 9:	Parámetros de la voladura en banco.	49
Figura 10:	Partes de detonador pirotécnico.	51
Figura 11:	Partes de detonador electrónico daveytronic.	53
Figura 12:	Diseño de carguío de taladros.	62
Figura 13:	Resultados de fragmentación.	63
Figura 14:	Resultados de bolonería.	64
Figura 15:	Ciclo de minado.	64
Figura 16:	Velocidad de minado.	65
Figura 17:	Factor de potencia.	65
Figura 18:	Niveles de vibraciones.	66
Figura 19:	Resultados de fragmentación.	67
Figura 20:	Resultados de bolonería.	67
Figura 21:	Ciclo de minado.	68
Figura 22:	Velocidad de minado.	68

Figura 23:	Factor de potencia.	69
Figura 24:	Niveles de vibraciones.	69
Figura 25:	Proyecto de voladura 6-np-3833-10.	70
Figura 26:	Fragmentación (pirotécnico vs electrónico).	75
Figura 27:	Bolonería (pirotécnico vs electrónico).	75
Figura 28:	Ciclo de minado (pirotécnico vs electrónico).	76
Figura 29:	Velocidad de minado (pirotécnico vs electrónico).	76
Figura 30:	Factor de potencia (pirotécnico vs electrónico).	77
Figura 31:	Vibraciones (pirotécnico vs electrónico).	77

## RESUMEN

El presente trabajo titulado “Detonadores electrónicos para mejorar la fragmentación de la roca en minería a cielo abierto” tuvo como objetivo principal conocer las bondades del detonador electrónico y su influencia para mejorar la fragmentación de la roca, el tipo y diseño de investigación empleada es aplicativo y no experimental – longitudinal respectivamente.

El lugar motivo de estudio es la Compañía Minera Antamina S.A y los detonadores electrónicos utilizados son los Daveytronic SP de la empresa Enaex S.A., como población se tiene 20 voladuras y como muestra se tendrá 10 voladuras realizadas empleando detonadores electrónicos.

La técnica empleada es análisis documental, recurriendo a fuentes y libros especializados y el instrumento es el registro de datos una hoja de cálculo Excel.

Los resultados obtenidos son reflejados en valores como la fragmentación que mejoró en un 27.68 %, viéndose reflejado en la bolonería generada que disminuyó en un 50.63 %; el ciclo de minado de la pala P&H4100AC mejoró en un 6.59 %, lo cual se plasmó en la velocidad de minado, pues ésta mejoró en un 21.68 %, se logró reducir el nivel de vibración en 12.95% y el factor de potencia en 7.62%, la mejora de los indicadores descritos líneas arriba de las 10 voladuras analizadas, permitió obtener un ahorro en voladura de 118,759.43 USD y en carguío de 37,337.01 USD haciendo un total de 156,096.44 USD.

**Palabras claves** Detonadores electrónicos, Detonadores pirotécnicos, Malla de perforación, fragmentación.

## ABSTRACT

The present work entitled "Electronic detonators to improve rock fragmentation in open pit mining" had as main objective to know the benefits of the electronic detonator and its influence to improve rock fragmentation, the type and design of research used is applicative. and non-experimental – longitudinal respectively.

The place of study is the Compañía Minera Antamina S.A and the electronic detonators used are the Daveytronic SP of the company Enaex S.A., as a population there are 20 blasts and as a sample there will be 10 blasts carried out using electronic detonators.

The technique used is documentary analysis, using specialized sources and books and the instrument is the data record in an Excel spreadsheet.

The results obtained are reflected in values such as fragmentation, which improved by 27.68%, being reflected in the generated bouquets, which decreased by 50.63%; the mining cycle of the P & H4100A shovel improved by 6.59%, which was reflected in the mining speed, as it improved by 21.68%, it was possible to reduce the vibration level by 12.95% and the power factor by 7.62%, the improvement of the indicators described above of the 10 blasts analyzed, allowed to obtain savings in blasting of 118,759.43 USD and in loading of 37,337.01 USD making a total of 156,096.44 USD.

### Keywords

Electronic detonators, Pyrotechnic detonators, Blasting, Drill Mesh, Fragmentation

## INTRODUCCIÓN

Dentro de las operaciones de minado la voladura de rocas representa lo más relevante dentro del proceso extractivo de minerales ya que representa la primera y más económica operación de conminución del mineral y desmonte, su objetivo principal es lograr un adecuado tamaño de roca con las consideraciones granulométricas planificadas que requiere la mina con un mínimo de daño en su entorno ya sea por el tema de rocas voladoras (fly rock) tiros cortados y daños al macizo rocoso. Resultados adversos obligan a efectuar minados selectivos incrementando los costos de operación y costos globales de minado.

El avance tecnológico en los sistemas de iniciación en voladura permite trasladarse desde el sistema convencional (mecha de seguridad y fulminantes) hasta el moderno y preciso sistema de iniciación electrónica mediante el cual se puede controlar la energía liberada en un disparo optimizando la fragmentación y disminuyendo el daño a las paredes. El sistema de iniciación con detonadores electrónicos fija con claridad los conceptos de precisión, flexibilidad y principalmente de seguridad.

El presente trabajo de investigación se centra en la Compañía Minera Antamina S.A. que es un yacimiento de pórfidos de cobre, la mina tiene una antigüedad de más de 21 años y cuyo potencial de reservas probadas manifiestan otros 20 años más de operación.

Luego de un análisis de la problemática presente en el área de Perforación y Voladura se identificó el problema principal del trabajo de investigación ¿El uso de detonadores electrónicos podrá mejorar la fragmentación de la roca en la Compañía Minera Antamina S.A.? la hipótesis general es “uso de detonadores electrónicos

mejora la fragmentación de la roca en la Compañía Minera Antamina S.A.” que demostraremos en el capítulo IV.

La presente tesis está compuesta de cuatro capítulos, en el capítulo I se especifica el problema de la investigación; en el capítulo II se detalla el marco teórico en el que se apoya este trabajo de investigación, en el capítulo III, se plantea la metodología que se utilizó en el trabajo, en el capítulo IV se realiza el análisis de los resultados obtenidos y la discusión de estos.

La investigación es de tipo aplicativo - cuantitativo y el diseño es no experimental – longitudinal ya que se comparó los resultados de los detonadores pirotécnicos y los detonadores electrónicos. No se tuvo limitación alguna para la realización de trabajo de investigación.

## CAPITULO I

### PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

#### 1.1 Planteamiento y formulación del problema

La voladura de rocas es la operación unitaria más relevante dentro del proceso de extracción de. Su objetivo principal es fragmentar la roca a una adecuada granulometría y forma de la pila del material para el proceso de minado, las voladuras deben de generar un mínimo daño en su entorno. Los resultados de la voladura y la productividad de las operaciones unitarias necesarias para extraer el mineral hacen que sean importante tener el control de sus efectos y los consiguientes costos, los que se verán impactados dependiendo de los ritmos de producción y leyes que requiere la planta para una óptima recuperación (Mamani, 2018).

El proceso de fragmentar la roca con explosivo está influenciado por un gran número de variables, algunas de las cuales son controlables y otras intrínsecas. La compleja interrelación existente entre estas variables hace más compleja la situación, haciendo los resultados de la voladura virtualmente imposibles mediante el uso de algoritmos analíticos simple.

Cueva (2016) afirma “las voladuras controladas de rocas no son solo un conjunto de técnicas para mantener estables las paredes del Pit sino tener un equilibrio en las actividades sociales del entorno controlando los niveles

permisibles de ruido, vibraciones y control de los gases residuales de la voladura” (p.5).

El requerimiento de la planta concentradora de la Compañía Minera Antamina S.A., con respecto a la fragmentación es un P80 de 6 pulgadas de tamaño de roca para mineral. Esta fragmentación no fue posible obtener en las voladuras con detonadores no eléctricos. Mejorar la fragmentación producto de la voladura traerá grandes beneficios a la operación con en el minado, chancado y molienda, obteniendo mejores resultados en el costo global mina.

Otro problema significativo es respecto a la seguridad porque los taladros son cargados con grandes cantidades de explosivos, entre 500 a 1000 kilogramos por taladro, por lo que es importante tener en cuenta la identificación de los tiros quedados (TQs). Estos TQs ocurren, generalmente, debido al corte de la línea descendente a los detonadores (tubo de choque en caso de los detonadores no eléctricos o cable de conexión de los detonadores electrónicos).

Sobre la diferencia de precio de los detonadores, el detonador no eléctrico cuesta 5.00 \$ (dólares) en promedio mientras que el detonador electrónico 25.00 \$ (dólares) , varía según el proveedor. El alto costo del detonador electrónico se ve compensado en la seguridad y en la mejora de la fragmentación de las rocas lo que a su vez logra mejorar el carguío, acarreo, chancado y molienda (Romero, 2016).

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo de investigación es el estudio de la voladura con detonadores electrónicos para mejorar la fragmentación de la roca en la Compañía Minera Antamina S.A.

### **1.1.1 Problema Principal**

¿El uso de detonadores electrónicos podrá mejorar la fragmentación de la roca en la Compañía Minera Antamina S.A.?

### **1.1.2 Problemas específicos**

1. ¿En qué medida el uso de detonadores electrónicos mejora el ciclo de minado en la Compañía Minera Antamina SA?
2. ¿En qué medida el uso de detonadores electrónicos reduce el nivel de vibraciones en la Compañía Minera Antamina SA?
3. ¿En qué medida el uso de detonadores electrónicos reduce el factor de potencia en la Compañía Minera Antamina SA?
4. ¿Cómo se puede reducir los costos de voladura y minado mediante el uso de detonadores electrónicos en la Compañía Minera Antamina SA?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Determinar como el uso de detonadores electrónicos podrá mejorar la fragmentación de la roca en la Compañía Minera Antamina S.A.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

1. Determinar en qué medida el uso de detonadores electrónicos mejora el ciclo de minado en la Compañía Minera Antamina SA.

2. Determinar en qué medida el uso de detonadores electrónicos reduce el nivel de vibraciones en la Compañía Minera Antamina SA.
3. Determinar en qué medida el uso de detonadores electrónicos reduce el factor de potencia en la Compañía Minera Antamina SA.
4. Reducir los costos de voladura y minado mediante el uso de detonadores electrónicos en la Compañía Minera Antamina SA

### **1.3 Justificación**

En el presente trabajo de investigación se busca describir el proceso de fragmentación y las variables identificadas para mejorar los resultados de la voladura. Mediante esta metodología ha sido posible entender, evaluar y finalmente lograr optimizar el proceso, asimismo, ha sido necesario incorporar tecnología y software para su evaluación que permitan predecir el complejo comportamiento de las variables que inciden en el desarrollo de una voladura y luego proponer las soluciones técnicas y económicas que el proceso y la operación en general requieren (Mamani, 2018).

La voladura involucra la perforación de una serie de hoyos en una distribución dada dentro del macizo rocoso a fragmentar, posteriormente colocar explosivo y la subsecuente detonación en una secuencia específica, el ingeniero a cargo de la voladura, para poder diseñar y realizar los cálculos ingenieriles debe de considerar para ello un gran número de variables que pueden ser agrupadas dentro de tres grandes categorías:

- Tipo de roca, en lo que se incluye la condición in situ, su grado de alteración, así como la extensión y orientación de las fracturas.
- Propiedades de los explosivos en las cuales deben de considerarse no solo la energía total liberada por el explosivo, sino también su reacción cinética.
- Distribución del explosivo, que incluye variables tales como burden, espaciamiento y diámetro de los hoyos, la ubicación del explosivo en los hoyos, número y posición de los iniciadores, retardos y secuencia de iniciación.

## **1.4 Delimitación**

### ***1.4.1 Delimitación espacial***

El presente trabajo de investigación se realizará en la Compañía Minera Antamina S.A

### ***1.4.2 Delimitación de tiempo***

Se tomarán registros de las voladuras realizadas con los detonadores electrónicos Daveytronic SP de la empresa Enaex S.A. en el año 2019.

### ***1.4.3 Delimitación conceptual***

Se utilizarán información relacionado a los detonadores electrónicos y técnicas para realizar voladura controlada de rocas en minería a cielo abierto.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes de Investigación

##### Antecedentes Nacionales

Chavez (2014) afirma:

Los tiempos cortos entre taladros favorecen la fragmentación debido a la interacción de las ondas, sin embargo, tal reducción puede generar el incremento de vibraciones las cuales pueden ocasionar Velocidad pico partículas (VPP) superiores a la VPP crítica del macizo y ocasionar daños estructurales a los taludes, por lo que un estudio de vibraciones debe ser realizado. (p.88)

La retención de los gases producto de la reacción química del explosivo para su aprovechamiento en la fragmentación de la roca puede ser favorecida con el uso de accesorios como retenedores de gas existentes en el mercado.

Hinostroza (2014) afirma:

En los resultados presentados de las diferentes pruebas que se han realizado de la doble iniciación se ha demostrado que la fragmentación de las rocas ha mejorado, el P80 ha reducido, la velocidad de carguío de las palas ha aumentado y de manera visual se ha observado que el factor de llenado de las tolvas de volquetes es mejor produciendo menos

espacios perdidos en las tolvas, la producción diaria del mineral ha incrementado.

Se ha conseguido tener una mayor producción en mineral y reducir los Kw-hr/ TM en planta, al optimizar la fragmentación de la roca con la aplicación de la doble iniciación electrónica. (p.162)

Poma (2012) afirma:

El uso de detonadores electrónicos nos permitió trabajar con tiempos cortos (4ms y 6ms) sin que la desviación estándar de los tiempos de detonación (+/- 0.001%, teórico según proveedor) afecte los resultados propios de las pruebas. En caso se hubiesen realizado las pruebas con detonadores no eléctricos, la desviación estándar de los tiempos de detonación hubiese sido mayor (+/- 2% en fondo y +/- 2% en superficie, teórico según proveedor), con lo cual, no se hubiese podido aprovechar los tiempos óptimos de detonación y se hubiesen traslapado los tiempos, no pudiéndose analizar las mejoras por efectos de los tiempos de detonación. (p.82)

El uso de doble deck de carga, ayuda cuando se trabaja en el límite de los parámetros de perforación (burden y espaciamento), sin embargo, cuando se quiere mejorar significativamente la fragmentación, se debe trabajar sobre la reducción de los parámetros de perforación (burden y espaciamento) ya que se podrá aportar mayor energía explosiva. Otro uso que se pudo haber dado al usar doble deck de carga sería el de usar tiempos distintos entre decks (en el mismo taladro), con el fin de minimizar la carga

explosiva por tiempo, lo cual también pudo ayudar a controlar la frecuencia (>10Hz).

No se comentó acerca de la dispersión en la ubicación de los taladros, que afecta directamente sobre los parámetros de perforación (burden y espaciamiento), sin embargo, esta es importante cuando se trata de mejorar la fragmentación. Esta variación en la ubicación de un taladro afecta directamente sobre la interacción de ondas (tracción y compresión) durante el proceso de detonación. Una variación máxima aceptable entre taladros debe mantenerse por debajo del 2%.

Huaman (2010) afirma:

La mayor exactitud de los detonadores electrónicos se traduce en menores dispersiones al momento de detonar las cargas explosivas y de esta manera producir los efectos programados, evitando acoplamientos los cuales aumentan las vibraciones con todas las implicancias que esto significa.

Flexibilidad y seguridad a la hora de disparar ya que se cuenta con una gama de posibilidades de ubicación gracias a su modo disparo remoto.  
(p.85)

Se reducen los problemas de fragmentación que se producen especialmente en zonas periféricas a las voladuras, tanto para minería de superficie como obras civiles.

La granulometría de las pilas de material volado es más homogénea y con la geometría necesaria para mejorar el rendimiento del equipo de carguío.

A raíz de la mejor excavabilidad de la pila de material volado, los tiempos de espera de los equipos de transporte son menores, aumentando de cierta manera el rendimiento de este proceso. A su vez, al alimentar al chancador primario con material más homogéneo, se reducen también los tiempos de espera en estos puntos, al no interrumpir la operación por bolones que puedan quedar atascados en estos equipos.

Miranda (2009) afirma:

El rendimiento fue en 8 % en promedio de los detonadores electrónicos frente a detonadores no eléctricos tratándose de costos y de 1 770 TM por taladro a favor de detonadores electrónicos y de 1 692 TM por taladro para no eléctricos; a su vez se desempeñan mucho mejor en voladura de producción que en precorte, permitió ahorrar US \$ 180 791 al año y US \$ 0,004 por tonelada métrica. (p.95)

Paredes (2014) afirma:

Siendo los tiempos de detonación precisos, nos permite diseñar voladuras con periodos cortos, donde la colisión de las ondas da por resultado una mejor fragmentación, empleando la energía explosiva eficientemente, lo que conlleva a resultados idóneos de fragmentación, asimismo permite efectuar un análisis técnico destinado a modificar los parámetros de perforación y voladura, sin alterar los resultados. (p.188)

La aplicación de los detonadores electrónicos en la mina Toquepala, ha permitido efectuar voladuras masivas, es decir se ha incrementado el número de taladros por proyecto de voladura, gracias al excelente control de daños que se puede aplicar y predecir en el diseño, dada la precisión,

exactitud y versatilidad que permite bajar los kilos por retardo y tener un control adecuado en los tiempos, con lo cual, se reducen los niveles de vibración de la voladura.

La fragmentación mejoró en un 13,0% viéndose reflejado en la cantidad de bolonería generada, que disminuyó en un 43,0%; de igual forma, el ciclo de minado de la Pala P&H4100A mejoró en un 9,0%, lo cual se plasmó en la velocidad de minado, pues ésta mejoró en un 7,0%. (p.189)

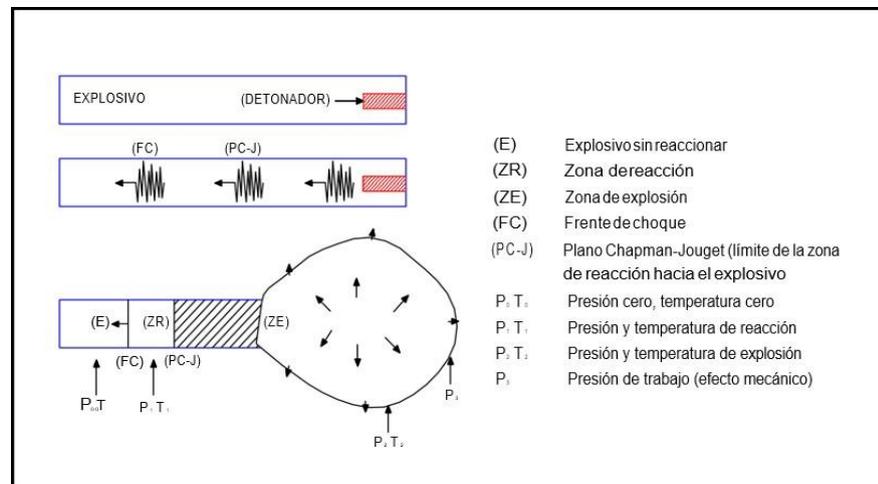
De acuerdo a los resultados obtenidos en cuanto a granulometría y fragmentación, en las primeras voladuras con detonadores electrónicos, se ha tenido un ahorro tanto en voladura como en minado de 29 162,56 US\$, los resultados de estos estudios cuantificados, nos han permitido proyectar un ahorro anual del costo global de minado para el año 2014 de 1 425 034,35 US\$, el mismo que será incrementado agudizando los estudios en los parámetros de voladura como un incremento en las dimensiones de la malla de perforación y reducción del factor de carga explosiva. (p.189)

## 2.2 Bases teóricas

### 2.2.1 Mecánica de fragmentación de la roca

#### 2.2.1.1 Onda de choque.

En los explosivos, las velocidades de las primeras moléculas gasificadas son tan grandes que no ceden su calor por conductividad a la zona inalterada de la carga, sino que lo transmiten por choque, deformándola y produciendo calentamiento y explosión adiabática con generación de nuevos gases. El proceso se repite con un movimiento ondulatorio que afecta a toda la masa explosiva y que se denomina “Onda de Choque”, la que se desplaza a velocidades entre 1 500 y 7 000 m/s según la composición del explosivo y sus condiciones de iniciación. (EXSA S.A., 2008)



**Figura 1:** Condiciones del estado de la detonación. Tomado del Manual práctico de voladura – EXSA

Un carácter determinante de la onda de choque en la detonación es que una vez que alcanza su nivel de equilibrio (temperatura, velocidad y presión) este se mantiene durante todo el proceso, por lo que se dice que es

auto sostenida, mientras que la onda deflagrante tiende a amortiguarse hasta prácticamente extinguirse, de acuerdo con el factor tiempo / distancia a recorrer. En este nivel de equilibrio, se forma una zona de reacción, que en su último tramo queda limitada por un plano ideal, que se denomina Plano de Chapman – Jouguet, lo que se conoce también como condiciones del estado de detonación. En el Plano “CJ” los gases se encuentran en estado de hipercompresión. (EXSA S.A., 2008)

Otra diferencia es que, en el caso de combustión o deflagración, los productos de la reacción de óxido-reducción se mueven en el sentido contrario al sentido de avance de la combustión, mientras que, en el caso de una detonación, los productos se desplazan en el mismo sentido de avance de la detonación. Esto se evidencia por medio de la ecuación fundamental conocido como la “Condición de Chapman – Jouguet”:

$$VOD = S + W$$

*VOD*: Velocidad de detonación.

*S*: Velocidad de sonido.

*W*: Velocidad de partículas (productos).

De donde se deduce que cuando *W* tiene un valor negativo, se tendrá que  $VOD < S$ , lo que significa que la velocidad de avance de la reacción es menor que la velocidad del sonido (subsónico) lo que viene a ser la combustión o deflagración y cuando es supersónico es detonación. Tanto la

detonación como la deflagración dan lugar a la formación de la onda de choque. (EXSA S.A., 2008)

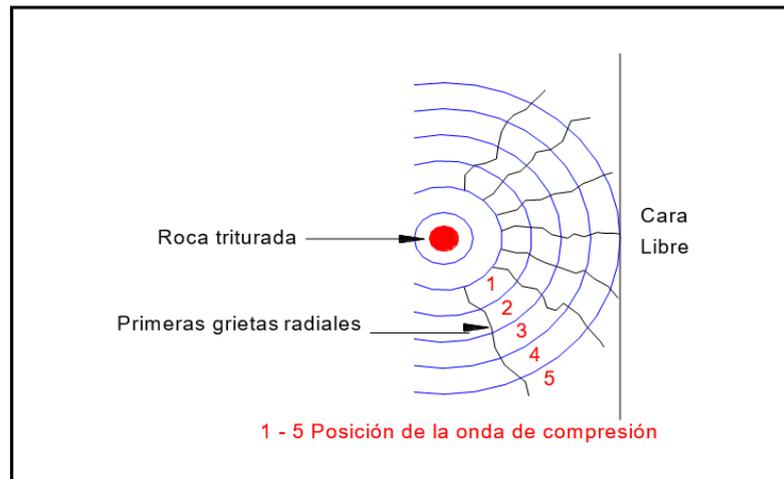
En general, respecto a la velocidad, los explosivos son considerados como:

- Deflagrantes, cuando la velocidad está por debajo de los 1000m/s.
- Detonantes de bajo régimen de 1 000 a 1 800m/s (transición entre deflagración y detonación).
- Detonantes de régimen normal entre 1 800 a 5 000m/s (categoría a la que pertenecen todos los explosivos de uso industrial).
- Detonantes de alto régimen, por encima de los 5 000m/s (explosivos de uso militar).

#### **2.2.1.2 Proceso de mecánica de fragmentación en el macizo rocoso.**

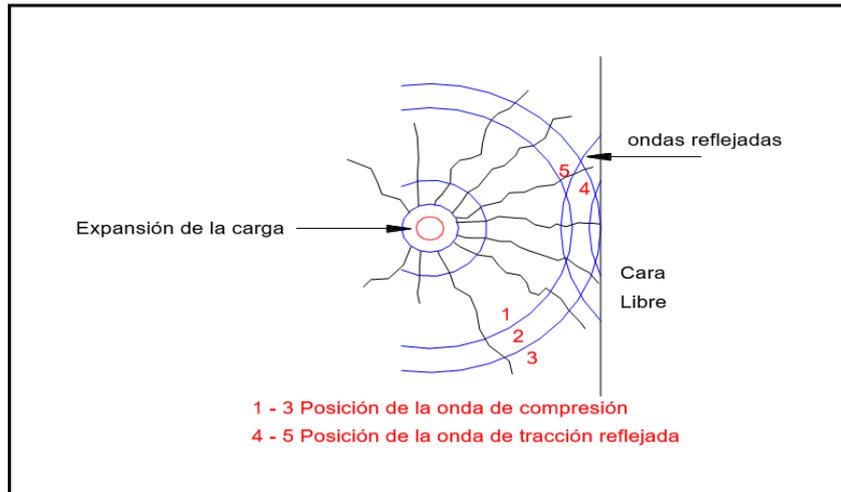
El mecanismo de fragmentación del macizo rocoso puede dividirse en tres etapas:

**Primera etapa;** Después de la detonación de un explosivo, la alta presión producida supera la resistencia a la compresión de la roca, produciéndose un fenómeno de trituración y pulverización en el área adyacente del taladro. Esta onda de choque viaja a una velocidad de que varía entre los 3 000 a 5 000 m/s, estableciendo esfuerzos tangenciales que crean grietas radiales, las cuales se mueven dentro de la influencia del taladro. Las primeras grietas, se forman en un periodo de 1 a 2 milisegundos. Veamos la siguiente figura.



**Figura 2:** Primera etapa de la mecánica de fragmentación. Tomado del Manual práctico de voladura – EXSA

**Segunda etapa:** La presión asociada con la onda de choque de la primera etapa es positiva, si esta onda alcanza una cara libre, ella es reflejada, lo cual hace que la presión decaiga rápidamente a valores negativos, dando paso a una onda de tracción. Esta onda de tracción viaja hacia la roca y como el material es menos resistente a la tracción que a la compresión, las primeras fisuras pueden desarrollarse debido al esfuerzo de tracción de la onda reflejada. Si estos esfuerzos, son suficientemente intensos, ellos pueden causar fisuras en la cara libre. En la quebradura de la roca, este efecto de fisuramiento parece ser de importancia secundaria, se ha calculado que la carga explosiva debe ser del orden de 8 veces la carga normal para causar fracturamiento de la roca solamente por reflexión de la onda de choque.

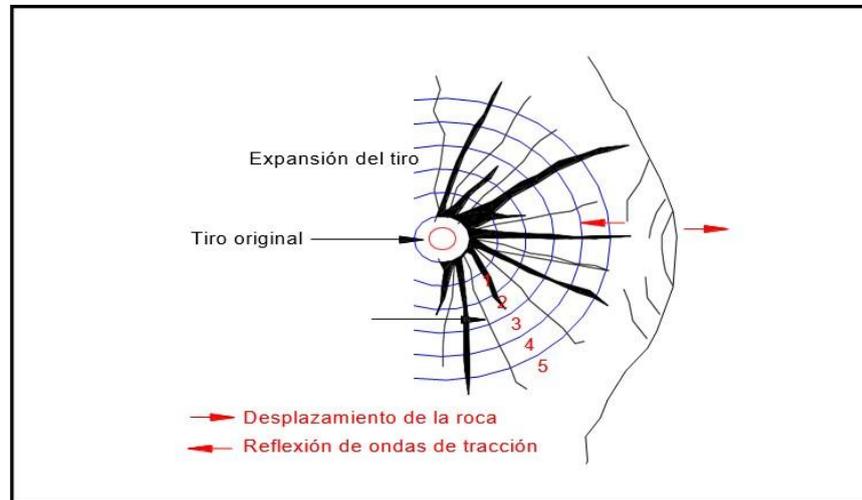


**Figura 3:** Segunda etapa de la mecánica de fragmentación. Tomado del Manual práctico de voladura – EXSA

Luego, en la primera y segunda etapa la función de la energía de choque es la de condicionar la roca por la inducción de numerosas pequeñas fracturas, la cantidad de la energía de la onda de choque es del orden del 5 a 15% del total de la energía del explosivo, esto sugiere que dicha onda de choque no es por si sola responsable de la fragmentación o quebradura de la roca, pero si provee las condiciones básicas para la última etapa de este proceso.

**Tercera etapa:** En esta última etapa, bajo la influencia de la presión excesivamente alta de los gases, las primeras grietas se ven aumentadas de tamaño por el efecto combinado del esfuerzo de tracción inducido por la compresión radial y una expansión de los gases. De esta forma, cuando la masa en frente de los taladros cede y se mueve hacia el burden, los grandes esfuerzos compresivos son descargados dentro de la roca de la misma forma que libera su energía un resorte comprimido que es liberado súbitamente. El efecto de liberación o descarga induce altos esfuerzos de tracción dentro de

la masa rocosa, completándose el proceso de quebradura comenzando en la segunda etapa. Las condiciones iniciales de la segunda etapa sirven como zonas de debilidad para iniciar la fragmentación principal.

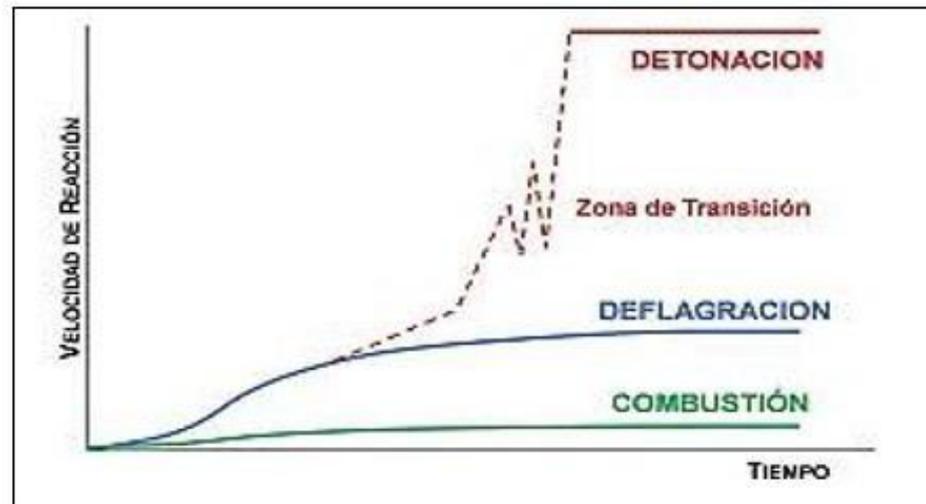


**Figura 4:** Tercera etapa de la mecánica de fragmentación. Tomado del Manual práctico de voladura – EXSA

### 2.2.2 Velocidad de detonación (VOD).

Se define como la velocidad con la que la onda de detonación u onda de choque viaja a través del explosivo. Su valor es indicativo del performance del explosivo. Entre los factores más importantes que afectan la velocidad de detonación, se pueden señalar a los siguientes:

- Influencia del diámetro del explosivo.
- Influencia del grado de confinamiento y el tamaño de las partículas del explosivo.
- Influencia de la densidad del explosivo.
- Energía de iniciación (Cebo).
- Efecto del agua en la performance de los explosivos comerciales.
- Influencia de la temperatura del explosivo.



**Figura 5:** Desarrollo de una detonación. Tomado de Bernaola et al (2013)

### 2.2.3 Presión de detonación y volumen específico de gases.

Durante el proceso de detonación de un explosivo, se genera una onda de choque, la cual es portadora de una presión característica que se transmite al medio que lo rodea y que se denomina presión de detonación, al igual que la velocidad de detonación, la presión de detonación es una indicadora de la habilidad de un explosivo para fragmentar la roca y puede determinarse mediante los denominados ensayos acuáticos y en ciertas ocasiones mediante sensores de presión, ambos son de difícil implementación.

Según Konya (1998), “la presión de choque es una presión transitoria, que viaja a la velocidad de detonación del explosivo. Se estima que esta presión sólo representa del 10% al 15 % de toda la energía de trabajo disponible en un explosivo. La presión de gas equivale del 85% al 90% de la energía útil del explosivo”.

La presión de detonación está relacionada con la velocidad de detonación y con la densidad del explosivo

$$Pd = \frac{Kx\rho xVOD^2}{1 + 0.8x\rho}$$

*Pd*: Presión de detonación. (Kg/ cm<sup>3</sup>)

*K*: Constante del explosivo

$\delta$ : Densidad inicial del explosivo (g/cm<sup>3</sup>)

*VOD*: Velocidad de detonación (m/s)

Es muy importante diferenciar, la presión de detonación con la presión de explosión, esta última se define como la presión ejercida contra las paredes del taladro como consecuencia de la acción expansiva de los gases producto de la detonación del explosivo. Al igual que la presión de detonación, su valor depende de la densidad y la VOD del explosivo. Generalmente su valor es la mitad del valor de la presión de detonación

$$Pg = \frac{Pd}{2} = \frac{\rho \times VOD^2}{8} \times 10^{-5}$$

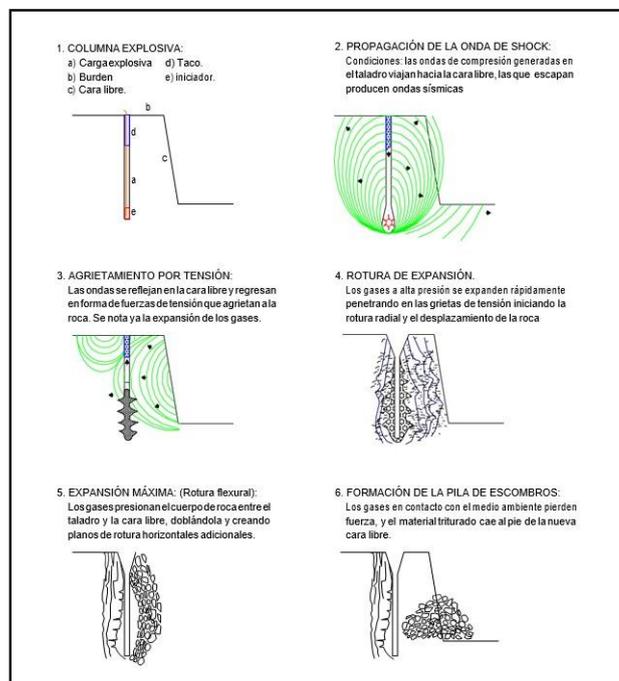
*Pg*: Presión de gases (Kbars)

Por otro lado, la presión de explosión está relacionada con la composición química del explosivo, influye en su valor el grado de confinamiento del explosivo dentro del taladro, así como el nivel de iniciación (Cebado).

## 2.2.4 Condiciones adecuadas para una voladura.

### 2.2.4.1 Cara libre.

La cara libre es una superficie de contacto con el medio ambiente, tomando como referencia un cubo y es indispensable para la formación y retorno de las ondas de tensión reflejadas que provocan la fragmentación. Si la cara libre es inadecuada la voladura será deficiente y si no hay cara libre las ondas de compresión viajarán libremente sin reflejarse, difundiéndose a la distancia sólo como ondas sísmicas.



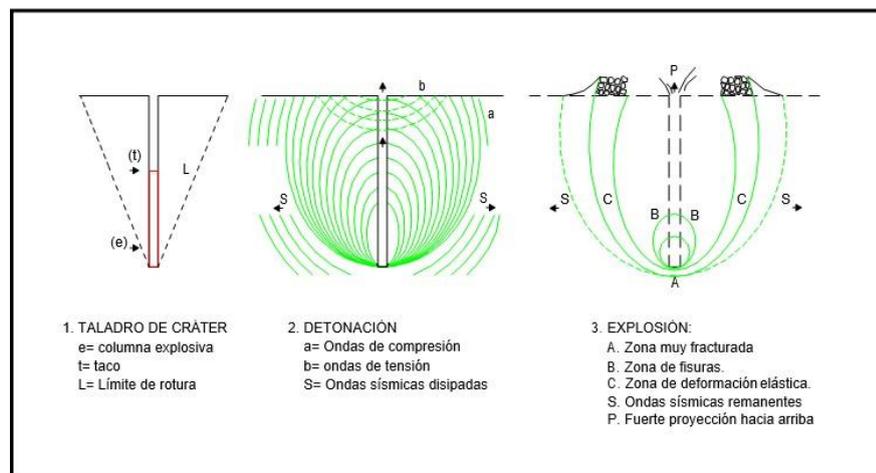
**Figura 6:** Fases de la mecánica de rotura de un taladro con cara libre.  
Tomado del Manual práctico de voladura – EXSA

Asimismo, la presencia de cara libre en los proyectos de voladura, permiten un apilamiento y desplazamiento adecuado, muy aparte de ser un gestor de la disminución de los niveles de vibración.



**Figura 7:** Desplazamiento de material, presencia de cara libre. Tomado del Manual práctico de voladura – EXSA

En la siguiente figura, podemos observar la mecánica de fragmentación y desplazamiento de material en un disparo sin cara libre.



**Figura 8:** Fases de la mecánica de rotura de un taladro sin cara libre. Tomado del Manual práctico de voladura – EXSA

### 2.2.5 Definición de burden.

El burden, es la distancia del eje del taladro a la cara libre más cercana, orientando perpendicularmente a las líneas de los taladros. El burden, también denominado por muchos autores como piedra, es la

variable de la voladura más difícil de determinar, es muy importante diferenciar los diferentes tipos de burden, tales como:

**Burden de diseño:** Esta definido por el patrón o retícula de diseño de perforación, basado en un triángulo equilátero, donde su valor es igual al espaciamiento entre 1,15, también existen mallas cuadradas donde el espaciamiento es igual al burden.

**Burden efectivo:** Esta definido por la secuencia de detonación, en la cual, el burden de diseño es reducido a través de los tiempos de retardo, para ello existen artificios que están en función a los tiempos nominales de detonación, el burden efectivo, es expresado en base, a la cantidad de milisegundos por metro. El enunciado radica en aminorar el burden de diseño e incrementar el espaciamiento, con ello se logra un mejor aprovechamiento de la energía explosiva, lo cual se refleja en un mejoramiento de la fragmentación.

#### **2.2.6 Rigidez del burden.**

También denominado Factor de rigidez del burden, está en función a la altura de banco, dureza de roca, estructura de la roca y explosivo usado. Está definido por la altura del banco dividido entre el burden de diseño. Si el factor de rigidez es menor de 2, la masa rocosa será muy rígida, más difícil de desplazar; factores de rigidez bajos requieren factores de energía poco más altos para producir fragmentación uniforme. El factor de rigidez puede ser mejorado usando diámetros de carga más pequeños, o bancos más altos.

### **2.2.7 *Energía explosiva requerida para la fragmentación de rocas.***

La energía química de un explosivo con un determinado grado de confinamiento y adecuadamente diseñado, se transforma a través de la detonación en productos gaseosos a altas presiones y temperaturas.

Físicamente, el proceso corresponde a un choque

dinámico, relacionado con la reacción termodinámica de descomposición del explosivo y cuya acción en el entorno, es la transmisión de una onda de choque al macizo rocoso y la presión y empuje posterior de los gases.

Se ha demostrado que, para quebrar una roca, es necesario emplear grandes cantidades de energía, de la cual, solo una parte se transforma en trabajo útil. Se estima que un porcentaje superior del 50 a 60% de la energía liberada por un explosivo, se pierde en forma de calor, vibraciones y energía acústica.

La teoría termodinámica de la detonación de un explosivo establece que los fenómenos activos (onda de choque generada durante la detonación y la posterior presión de los gases), están en relación directa con la energía química contenida en el explosivo y con la forma de liberación de dicha energía.

### **2.2.8 *Factores relevantes en el mecanismo de la voladura.***

En la voladura a tajo abierto y en general en todas las voladuras, el mecanismo de transferencia de la energía liberada por el explosivo a la roca y el grado de eficacia en la fragmentación requerida está influenciado de una

forma práctica por una serie de factores que pueden agruparse en tres categorías:

### **2.2.9 Factores relacionados con el macizo rocoso.**

Las propiedades del macizo rocoso tienen gran importancia, tanto en el diseño de una voladura, como en los resultados de esta, los principales parámetros a tener presente son los siguientes:

**Densidad de la roca;** Es un indicador del grado de dificultad que ofrece la roca para ser fragmentada, así materiales con mayor densidad, requieren una mayor cantidad de energía para ser quebrados y desplazados en forma satisfactoria.

**Propiedades de resistencia;** Estas propiedades intrínsecas de la roca deben determinarse a partir de ensayos de laboratorio, de este modo, deben evaluarse la resistencia a la compresión, tracción y corte. La resistencia al corte no representa por sí sola una fuerza, sino que es el resultado de la acción combinada de las resistencias a la tracción y compresión, estas dos resistencias dinámicas, además de servir de índices para clasificar a las rocas según el grado de facilidad que ofrecen para la fragmentación, intervienen directamente en el diseño de la voladura.

**Velocidad de propagación de las ondas sísmicas;** Es la velocidad con la que se propaga la onda de tensión o de choque a través del macizo rocoso, es muy importante porque afecta a la distribución de tensiones en el interior del sólido rocoso y también porque es una medida de la elasticidad de la roca.

**Impedancia característica:** Es igual al producto de la densidad de la roca por la velocidad de propagación de las ondas de choque. La impedancia característica o impedancia de la roca, constituye un parámetro muy útil para analizar la transferencia de la energía de la onda de choque al macizo rocoso. Se ha determinado experimentalmente, que la mayor transferencia de la energía se logra cuando la impedancia de la roca es igual a la impedancia de detonación del explosivo, este último se obtiene como el producto de la densidad del explosivo por su velocidad de detonación.

**Absorción de la energía o capacidad de deformación plástica;** Esta propiedad da cuenta de la elasticidad de la roca y se utiliza para expresar la capacidad de ésta para resistir un impulso y recuperar su fricción original y forma, sin ser colapsada.

**Estructura: Las características estructurales del macizo rocoso,** tales como: fallas, grietas, diaclasas y otros, juegan un rol muy importante sobre la fragmentación obtenida por la voladura, por ello, previamente al diseño, se debe tratar de establecer la orientación preferencial de estos accidentes estructurales, al objeto de disponer en forma adecuada la malla de perforación, así como la secuencia de salida del disparo.

#### ***2.2.10 Explosivos y su clasificación.***

Una explosión, es un fenómeno que ocurre como consecuencia de una liberación repentina de energía, mediante una fuente generadora que la produzca. Es condición necesaria para que se realice una explosión, que la liberación de dicha energía sea a través de un proceso extremadamente

rápido. Para nosotros es de importancia las explosiones producidas por explosivos químicos.

La iniciación y consecuente propagación de la reacción química durante una explosión puede ser originada por dos mecanismos diferentes, los cuales a su vez definirán si la reacción del explosivo produce una detonación y una deflagración de este: el primero es de naturaleza mecánica, en la cual la reacción es originada y transferida por fuerzas de presión; cuyas velocidades son supersónicas en el mismo explosivo, generando la onda de choque que inicia la reacción química. Ejemplo TNT, ANFO, slurries, etc. El segundo mecanismo es de origen térmico, donde la

temperatura del explosivo se eleva por encima de su temperatura de descomposición, lo cual origina una reacción relativamente lenta o deflagración, lo cual se propaga por debajo de la velocidad del sonido en el explosivo y no es suficientemente fuerte para producir una onda de choque. Ejemplo: la pólvora, la composición pirotécnica en las mechas de seguridad.

Se han registrado casos en donde los explosivos detonantes han reaccionado en la forma de una rápida descomposición: El ANFO puede llegar a deflagrar si es utilizado incorrectamente, esto sucede en taladros cuyos diámetros son muy cercanos al diámetro crítico del ANFO, también en agua y en cuyos cebos de iniciación cuyo peso sea similar al peso de cebado mínimo requerido para iniciar el ANFO.

#### **2.2.10.1 Explosivos químicos.**

Son aquellas mezclas explosivas cuya liberación de energía va acompañada de una reacción química donde se cumple la ley de la

conservación de la materia y energía. Los explosivos químicos son clasificados en:

**Altos explosivos;** Son aquellos detonantes sensibles al fulminante número 8, los mismos que reaccionan a una velocidad mayor que la velocidad del sonido; su velocidad de detonación es del orden de 2 000 a 7 000m/s y su presión de detonación alrededor de  $4 \times 10^6$ PSI. Ejemplo: dinamitas, permisibles, explosivos acuosos (hidrogel, emulsiones) y explosivos especiales.

**Bajos explosivos;** Se caracterizan por su bajo rango de deflagración, unos cuantos cm/s o m/s menores que la velocidad del sonido y presiones menores, hasta 3 000PSI, ejemplo: la pólvora negra.

#### **2.2.10.2 Agentes de voladura.**

Son mezclas explosivas que tienen como ingredientes un oxidante y un combustible y requieren de un Booster para su iniciación. Estos agentes de voladura no son sensibles al fulminante número 8. Ejemplo: ANFO, ALANFO, SANFO, Slurries, Emulsiones, etc.

No obstante, que ninguno de sus ingredientes son explosivos cuando ellos no han sido mezclados, pueden ser sensibilizados lo suficiente como para poder convertirse en altos explosivos.

#### **2.2.11 Parámetros de voladura de banco.**

##### **2.2.11.1 Diámetro.**

Está definido por el diámetro de la broca de perforación, están función a la disponibilidad y aplicabilidad del equipo de perforación, la altura de banco y la amplitud de las voladuras a realizar. A medida que se

incrementa el diámetro de los taladros, los costos de perforación, carga y explosivos generalmente bajan; también hace que la VOD aumente y se mantenga estable, pero a medida que se baja el diámetro de perforación existe una distribución más uniforme de la energía en los taladros, permitiendo también efectuar voladuras selectivas.

Según McKenzie (1994), los factores principales a evaluar para elegir el diámetro de taladro son:

- Costo específico de la voladura ( $\$/m^3$  de roca voladura).
- Fragmentación y la relación entre el espaciamiento de los taladros y de las fracturas.
- Control de la exactitud de la perforación y su efecto en la fragmentación, seguridad e impacto ambiental.
- Tamaño de la perforadora y la accesibilidad al sitio.
- Altura del banco y la proporción del taladro requerido para el taco.

El diámetro de taladro es frecuentemente relacionado con la altura de banco o longitud de taladro, esto debido a la desviación es menor en taladros cortos y la desviación se incrementa con taladros largos. Entonces cuanto más grande es el diámetro de taladro la perforación es más exacta.

El costo de perforación tomará mayor importancia cuando el espaciamiento las fracturas del macizo rocoso no son un factor crítico.

No obstante, se debe señalar que, si bien un diámetro grande reduce el costo en perforación y voladura, se pierde algo de control sobre el daño e impacto ambiental porque requieren un factor de carga más alto que mallas perforadas con taladros más pequeños.

McKenzie (1994) sostiene que, “el diámetro de taladro deberá estar entre 0.5% y 1% del largo requerido de taladro (por ej. una longitud máxima de taladro = 100 a 200 veces el diámetro). Taladros de diámetro más pequeño que esto (y su correspondiente burden y espaciamiento más pequeño) entregará mejor fragmentación, menores vibraciones y permitirán el uso de perforadoras más livianas y móviles, pero probablemente aumentarán el costo de perforación”.

$$H_b = 150 d$$

Despejando “d” de la ecuación 1, tenemos:

$$d = \frac{H_b}{150}$$

Donde:

H<sub>b</sub>: altura de banco (m).

d: diámetro del taladro (m)

#### **2.2.11.2 Espaciamiento.**

Se define como la distancia entre taladros de una misma fila perpendiculares al burden. Se calcula en relación con la longitud del burden. La distribución de la energía explosiva es óptima cuando el espaciamiento es igual a 1,15 veces el burden y el patrón está en forma triangular.

Se recomienda usar una malla triangular equilátera y no una malla cuadrada, porque aporta más efectividad en la fragmentación de la roca. Por tal razón, el espaciamiento se relaciona, generalmente, con el burden.

McKenzie (1994), sostiene que “evidencias teóricas y prácticas sugieren que la relación óptima S/B para operaciones normales en bancos con mallas trabadas (triangulares equiláteros) está en el rango de 1.1 a 1.4”.

#### **Altura de banco.**

La altura de banco está relacionada con el diseño del equipo de minado, el diámetro de perforación y las características geomecánicas que conforman los materiales de la mina, asimismo, mucho depende los ritmos de producción, hoy en día, la gran minería, tiende a alturas de banco de 20 a 30m, ello con el fin de incrementar los ritmos de minado, incrementar reservas y reducir la relación desbroce mineral.

#### **2.2.11.3 Longitud de taladro.**

Es la suma de la altura del banco con la sobre perforación, esta última comienza por debajo del nivel del piso, la profundidad del taladro debe de reflejar la exactitud de la operación de perforación, debe estar de acuerdo con lo diseñado en términos de altura, excesos no controlados en el proceso de perforación, incrementan absurdamente los costos de esta operación.

#### **2.2.11.4 Sobre perforación.**

Es la profundidad por debajo del nivel de piso, la sobre perforación garantiza la rotura de la roca a nivel del piso diseñado, su dimensión

se basa en el concepto de cráteres invertidos, para ello es importante conocer las características del macizo rocoso y el grado de potencia del explosivo. Otro factor importante es cuando se tiene un factor de rigidez menor de 2, se requiere más sobre perforación.

Para obtener una fragmentación adecuada al nivel del piso es necesario realizar una sobre perforación. Esto quiere decir que la sobre perforación es perforar una longitud adicional a la de la altura de banco, o perforar por debajo del nivel del piso de banco.

Se entiende que la sobre perforación permite, en el momento de la detonación de la columna explosiva, que la onda de choque se encuentre en su máximo nivel justo en la cota del pie de banco.

Calvin J. Konya formula lo siguiente:

$$L = 0.3 B$$

Donde:

L: Largo de la sobre perforación (m),

B: Burden (m)

Si se tiene exceso de sobre perforación sucederá lo siguiente:

- Incremento de costos de perforación y consumo de explosivos.
- Alto grado de fracturamiento en el piso inferior lo que ocasionará problemas de perforación en ese nivel y problemas en el carguío de explosivos.
- Altos niveles de vibración.
- Con una sobre perforación corta el piso resulta irregular en el nivel del piso diseñado, además de no obtener el volumen y tonelaje de material fragmentado que se había previsto, lo que se perderá productividad de las maquinarias.

#### 2.2.11.5 Taco.

Es el material inerte que va encima de la carga explosiva con la finalidad de confinar y retener la energía explosiva; cuando el taco es menor al rango de confinamiento tendremos roca proyectada (fly rock) y escape prematuro de gases, que viene a ser la energía que tiene un costo y que no es aprovechada.

El taco es el relleno de la parte superior del taladro con material estéril. Su misión es la de retener los gases producto de la detonación del explosivo, durante fracciones de segundos, suficientes para evitar que los gases fuguen por la boca del taladro, de esta manera trabaje por completo en el proceso de la fragmentación de la roca.

- Si no hay taco los gases escaparán a la atmosfera arrastrando gran cantidad de energía que debería actuar en la fragmentación de la roca.
- Si el taco es insuficiente habrá problemas de fuerte ruido por onda aérea, de craterización y proyección de rocas (fly rock).
- Si el taco es excesivo, se obtendrá gran cantidad de bloques procedentes de la parte superior del banco, por tanto, fragmentación irregular, poco esponjamiento de la pila del material y un nivel de vibración muy alto.

Normalmente, para el taco, se emplea detritus producto de la perforación, debido a su disponibilidad. También es común utilizar arcilla, piedra chancada fina y angulosa. En ocasiones, en taladros inundados, se deja el agua para que cumpla la función del taco.

Para la determinación del taco se debe tener en cuenta lo siguiente:

- El tipo y tamaño del material a utilizar.
- La longitud de taco.

McKenzie (1994), sostiene que “El material óptimo para el taco es un árido granulado (gravilla angulosa) con un tamaño medio aproximadamente igual a un décimo o un quinceavo del diámetro del hoyo. Luego, un hoyo de 100 mm de diámetro debería utilizar un árido de 10 a 12 mm. Bajo estas condiciones, el largo del taco frecuentemente se puede reducir a casi 20 a 25 veces el diámetro del hoyo”.

La experiencia práctica considera que el taco debería ser como máximo el 50% de la altura de banco.

Para calcular la Longitud de Taco (T) tenemos diversos modelos:

- Según la Teoría y Modelo Matemático de Richard L. Ash:

$$T = (0.5 \text{ a } 1.0) B$$

Donde:

B = Burden.

- Según la Teoría de Calvin. J. Konya:

$T = B$  ; roca estratificada.

$T = 0.72 B$  ; roca masiva.

#### 2.2.11.6 Burden.

Este parámetro ha sido definido a profundidad en los ítems anteriores, como sabemos, es la distancia del eje del taladro a la cara libre más cercana, orientando perpendicularmente a las líneas de los taladros.

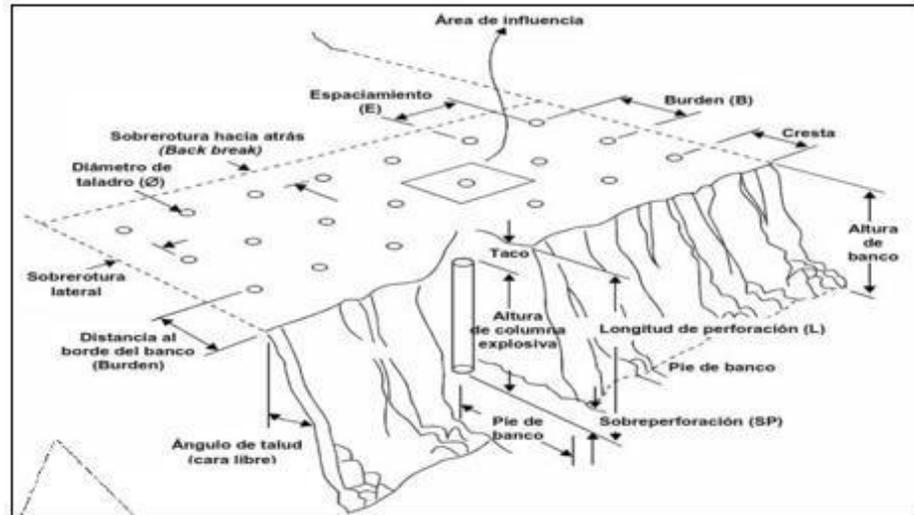
Es la distancia más corta del taladro a la cara libre o al punto de alivio en el momento que el taladro detona. Se considera que el cálculo del burden es un parámetro muy crítico en el diseño de voladura de rocas. Un apropiado burden garantiza el control de la fragmentación de la roca, control en la proyección de rocas, principalmente.

Si el burden es demasiado pequeño:

- Demasiado desplazamiento de la roca volada.
- Presión dinámica sobre el explosivo de los taladros cercanos.
- La fragmentación es demasiado fina.

Si el burden es demasiado grande:

- Sobre rotura de la cara final.
- Lanzamiento de material hacia atrás.
- Proyección de rocas (fly rock).
- Niveles de golpe de aire altos.
- Formación de cráteres.
- Niveles de vibración altos.
- Fragmentación demasiado gruesa.



**Figura 9:** Parámetros de la voladura en banco. Tomado de EXSA S. A. Manual Práctico de Voladura. Lima

### 2.2.12 Sistema de iniciación

El sistema de iniciación transfiere la señal de detonación de taladro a taladro en un tiempo preciso. La selección del sistema de iniciación resulta crítica para el éxito de una voladura. El sistema de iniciación no sólo controla la secuencia de disparo de los taladros, sino que también afecta la cantidad de vibración generada por una voladura, el tamaño de la fragmentación producida y el rompimiento trasero. Aunque el costo de los sistemas de iniciación es una consideración importante dentro del proceso de selección, debe ser una consideración secundaria

especialmente si el sistema de iniciación más económico causa problemas como: vibración, rompimiento trasero o poca fragmentación. Será un error el seleccionar un sistema de Iniciación basándose estrictamente en el costo.

### 2.2.12.1 Detonadores no eléctricos o pirotécnicos

Los detonadores no eléctricos, o pirotécnicos, se componen de una cápsula de aluminio, que contiene en su interior una carga base de pentrita, una carga primaria de azida de plomo, un elemento cilíndrico metálico portador de la pasta de retardo llamado porta retardo, un sistema amortiguador de onda de detonación y un tapón de goma semiconductor que sirve como elemento de engarce al tubo de transmisión.

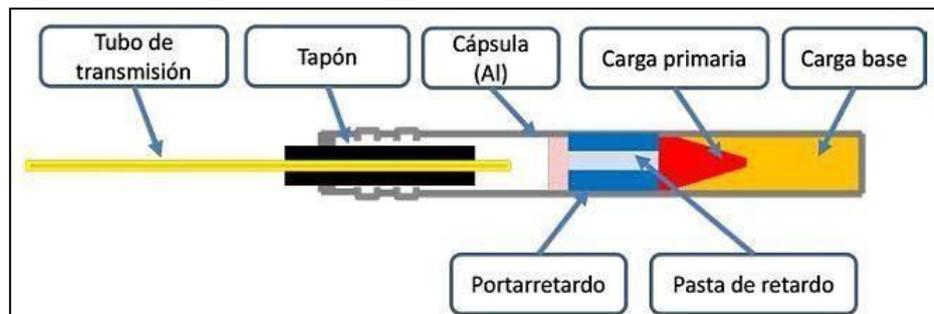
El tubo de transmisión (tubo de choque) consiste en un tubo de plástico laminado multicapa que contiene en su cara interna una finísima capa de material reactivo (18 mg/m +/- 5 mg/m de HMX y Al). Dicho tubo, una vez iniciado, conduce la onda de detonación de baja energía a una velocidad de aproximadamente 2 000 m/s. Este fenómeno de onda de choque se propaga con toda fiabilidad a través de este, aunque en él existan dobleces, nudos. Esta onda de detonación no tiene influencia sobre la columna de explosivo contenida en el taladro, permitiendo la iniciación en el fondo de este ya que la cantidad de materia reactiva contenida en él es tan pequeña que la superficie exterior del tubo queda intacta durante el paso de la mencionada onda de detonación.

El tubo de choque no es de naturaleza eléctrica, no puede ser iniciado por ondas de radiofrecuencia, electricidad estática, corrientes erráticas o llama, o las fricciones o impactos comunes en la actividad normal de carga de voladuras.

El elemento porta retardo es de aluminio y contiene una mezcla pirotécnica, que es la que da el tiempo de retardo al detonador. La

composición de la parte pirotécnica por su calidad y por el control a la que es sometida, da tiempos de combustión muy precisos y uniformes. La porta retardo recibe la energía de iniciación desde el tubo de transmisión a través de una composición iniciadora situada en la parte superior del mismo que asegura la iniciación adecuada de la mezcla pirotécnica.

La carga primaria recibe la energía de iniciación de la columna pirotécnica de la porta retardo y lo transfiere a la carga base. La carga base tiene la función de iniciar con suficiente energía al alto explosivo (booster).



**Figura 10:** Partes de detonador pirotécnico. Tomado de Bernaola et al (2013)

### 2.2.12.2 Detonadores electrónicos

Este tipo de detonadores, de similar estructura que el detonador pirotécnico, están constituidos por una cápsula metálica de aluminio cerrada por un extremo, encontrándose en su interior un condensador, un chip, un inflamador, un explosivo primario y un explosivo base.

Estos detonadores tienen como principales características su seguridad y su precisión de detonación.

Con objeto de entender el sistema electrónico de iniciación, discutiremos algunos puntos suponiendo sistema no eléctrico y electrónico.

Hay varios tipos de sistemas electrónicos siendo probados y usados en la industria minera, los cuales utilizan algún tipo de dispositivo almacenado de energía eléctrica para proveer energía suficiente para iniciarlo a un tiempo de retardo programado en un chip electrónico.

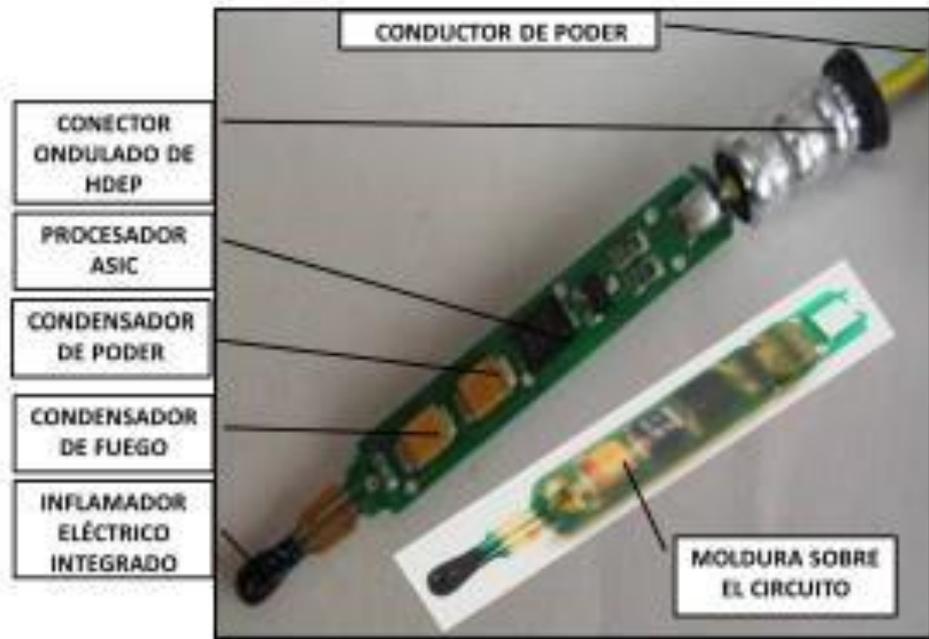
Todas las demás tecnologías convencionales existentes del detonador incluyendo tubo de choque, eléctrico o de la mecha de seguridad, etc. utilizan energía pirotécnica como una manera de iniciación y retraso. Aunque la construcción de detonador electrónico no puede parecer ser significativamente diferente, hay una diferencia del diseño muy básica entre un detonador electrónico, detonador con tubo de choque y detonadores eléctricos.

Una de las diferencias básicas en el retraso electrónico con sistema pirotécnico de retardo es en la posición del iniciador. En el detonador electrónico el iniciador queda bajo el módulo de retraso, considerando que tanto el tubo de choque y el detonador eléctrico utilizan el iniciador antes de elemento de retardo.

Otra diferencia básica en diseño del detonador electrónico es el uso de algún tipo de dispositivo eléctrico almacenado de energía, típicamente condensador, es usada en el módulo de retardo. La construcción y diseño de detonador electrónico cambian de fabricante a fabricante.

Sobre el precio aproximado en el mercado, el detonador pirotécnico cuesta 5 dólares mientras que el detonador electrónico 25 dólares; esto varía según el proveedor. El alto costo del detonador electrónico se ve retribuido

en la seguridad y en la fragmentación de las rocas lo que a su vez optimiza el carguío, acarreo de mineral, chancado y molienda.



**Figura 11:** Partes de detonador electrónico Daveytronic. Tomado de Davey Bickford. (2014)

El sistema electrónico viene junto a un paquete de software. Usando el software de diseño de voladura un ingeniero puede realizar el diseño de voladura en la oficina, se puede simular la voladura, luego puede optimizarse el diseño.

En el reto de reducir costos en la minería es de introducir tecnología en el proceso. Si bien es más costosa en comparación a los sistemas tradicionales, ésta se diferencia en que mejora y eleva la productividad de la mina y los problemas medioambientales.

El uso de detonadores electrónicos se verá reflejado en los siguientes:

- Seguridad.
- Mejor fragmentación.
- Mejor apilamiento del material volado.
- Mejora la productividad de los equipos de minado.
- Mejor control de proyección de rocas (fly rock).
- Mejor control de la estabilidad de taludes.
- Mejor control de las vibraciones.
- Mejor control de la carga operante.

### 2.3 Definición de términos

- **Acoplamiento.** Se refiere al grado de contacto entre el explosivo en un pozo y la roca que lo rodea. Cuando el diámetro del explosivo es menor que el del pozo, se dice que la carga está desacoplada y la razón de desacople definido como la relación entre el volumen de la carga al volumen del pozo. Los explosivos cargados a granel tienen un factor de acoplamiento igual a 1. Algunos autores definen la razón de acoplamiento como la razón de diámetro de carga a la del pozo. (Enaex, 2010, p. 1).
- **Burden y burden efectivo.** El burden de un pozo se refiere a la dimensión lineal entre el pozo y la cara libre y se mide perpendicular a la dirección de la línea de pozos que constituyen una fila. El término burden generalmente se refiere al burden perforado y la dimensión lineal se hace a la cara libre existente del banco. El término burden efectivo se refiere a la dimensión lineal entre el pozo y la posición de la cara libre más cercana al tiempo de la detonación del pozo y toma en consideración la dirección de la iniciación. (Enaex, 2010, p. 3).

- **Decibeles.** El decibel es una unidad usada para medir los niveles de presión del sonido de una tronadura. El decibelio es una unidad relativa, que mide los niveles de presión del sonido.(Enaex, 2010, p. 4).
- **Explosivos primarios.** Son explosivos que detonan por ignición simple de medios tales como chispas, llamas, impacto y otras fuentes primarias de calor. Se denominan así aquellos que contienen los detonadores, cordón detonante e iniciadores. (Enaex, 2010, p. 6).
- **Explosivos secundarios:** Son aquellos en que la detonación es iniciada por impacto de la detonación de un explosivo inicial (primario). Esta reacción se presenta en todos los explosivo usados en tronadura de rocas.(Enaex, 2010, p. 6).
- **Factor de carga.** Mediante este término se describe la cantidad de explosivo usado para romper un volumen o peso unitario de roca. El factor de carga se indica mediante unidades de kg/m<sup>3</sup> o kg/ton.(Enaex, 2010, p. 7).
- **Factor de energía.** Este término es similar al Factor de carga, pero la energía del explosivo se expresa con relación al peso o volumen de roca quebrada (o sea. MJ/m<sup>3</sup> o MJ/ton o Kcal/ton). El factor de Energía es por eso el producto de Factor de Carga y la energía por peso del explosivo.(Enaex, 2010, p. 8).
- **Secuencia de la iniciación.** Se describe frecuentemente en términos de VO, V1, V2, et11. El uso del descriptor "V" se adopta como una anotación para describir la orientación aproximada de la cara libre expuesta por los pozos de tronadura al detonar.(Enaex, 2010, p. 9).

- **Velocidad de detonación (VOD)** es una medida de la razón a que la reacción de la detonación procede, por la columna del explosivo. Típicamente, el VOD variará entre 3000 m/ s para ANFO en pozos de tronadura de diámetros pequeños y 6000 m/ s para emulsión y acuagel en pozos de tronadura de diámetros más grandes. Se considera un indicador del potencial de fragmentación de un explosivo, con el potencial creciente para un VOD creciente.(Enaex, 2010, p. 11).
- **Velocidad peak de partícula y velocidad de la onda P.** La Velocidad peak de partícula (PPV) se refiere a la velocidad de movimiento de partículas individuales dentro de la masa rocosa como una vibración u onda de choque que se propaga por la roca. Estas partículas se pueden mover sólo en cantidades pequeñas en 3 dimensiones, de manera que se pueden medir velocidades peak de partícula en 3 direcciones ortogonales. El PPV medido en cualquiera ubicación es una función de la energía en la fuente de vibración, la distancia desde la fuente y las características de la atenuación de la roca. La velocidad de la onda P,  $V_p$ , es una medida de la velocidad de propagación de la onda en la roca y es independiente de la fuente de vibración. La velocidad de la onda P es controlada por la roca y propiedades estructurales del medio. PPV y  $V_p$ , se relacionan en un medio elástico, homogéneo.(Enaex, 2010, p. 11).

## 2.4 Hipótesis

### 2.4.1 Hipótesis general

El uso de detonadores electrónicos mejora la fragmentación de la roca en la Compañía Minera Antamina S.A.

### 2.4.2 *Hipótesis específicas*

1. El uso de detonadores electrónicos mejora el ciclo de minado en la Compañía Minera Antamina SA.
2. El uso de detonadores electrónicos reduce el nivel de vibraciones en la Compañía Minera Antamina SA.
3. El uso de detonadores electrónicos reduce el factor de potencia en la Compañía Minera Antamina SA.
4. El uso de detonadores electrónicos reduce los costos de voladura y minado en la Compañía Minera Antamina SA

## 2.5 Variables

### 2.5.1 *Identificación de variables*

- **Variable Independiente:** Detonadores electrónicos.
- **Variable Dependiente:** Mejorar la fragmentación de la roca.

## CAPITULO III

### METODOLOGÍA

#### 3.1. Tipo de Investigación

La investigación desarrollada fue **aplicativa** que permitió plantear alternativas de solución frente a un problema práctico. Vamos a utilizar los conocimientos existentes sobre el tema de estudio.

A su vez la investigación fue **cuantitativo** ya que utilizamos herramientas de análisis matemático y estadístico para describir, explicar y analizar las variables de estudio que son medibles.

**Explicativo – correlacional** ya que existen dos variables que vamos a relacionar. Se va a realizar voladuras bajo diseños específicos y se va a evaluar los resultados obtenidos.

#### 3.2. Diseño de investigación

**No experimental:** Para el recojo de la información de interés no se manipularán variables. Se realizará voladuras con diseños específicos.

**Longitudinal:** Se realizará varias voladuras con detonadores electrónicos y de ello se registrarán los resultados. La recopilación de data será durante el año 2019, de manera prospectiva.

### 3.3. Población y muestra

#### 3.3.1 Población

Se tendrá como población 20 voladuras en total, 10 voladuras con detonadores no eléctricos y 10 voladuras con detonadores electrónicos Daveytronic en la Compañía Minera Antamina S.A.

#### 3.3.1. Muestra

Para tener una muestra representativa con un alto nivel de confianza se aplica la siguiente formula

$$n = \frac{Z^2 * p * q * N}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q}$$

#### Donde:

n: tamaño de muestra buscado

N: Tamaño de la población o universo (10 voladuras)

Z: Parámetros estadísticos que dependen del nivel de confianza (97%)

e: Error de estimación máximo aceptable (3%)

p: Probabilidad de que ocurra el evento estudiado (50%)

q: (1-p) Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado (50%)

Reemplazando se tiene:

$$n = \frac{2.17^2 * 0.5 * 0.5 * 10}{0.03^2 * (10 - 1) + 2.17^2 * 0.5 * 0.5}$$

$$n = 10$$

Con un nivel de confianza al 97% y una desviación estándar de 2.17, se tomará como muestra representativa los datos históricos proporcionados por el área de diseño P&V de 10 voladuras efectuadas con detonadores no eléctricos en la fase 3 y se registraran la información de 10

voladuras realizadas con detonadores electrónicos Daveytronic en la fase 6 durante el 2019 en la compañía Minera Antamina S.A.

### **3.4. Técnicas e Instrumento(s) de recolección de datos**

#### **3.4.1. Técnicas**

La técnica que se utilizará será la de análisis documental, recurriendo como fuentes a libros especializados, que se usará para recolectar datos sobre las variables de interés.

#### **3.4.2. Instrumentos**

El instrumento que se utilizará es la ficha de registro de datos en una hoja de cálculos en Excel.

### **3.5. Plan de procesamiento y análisis estadístico de datos**

Los datos serán sometidos a los criterios de análisis que nos permitan obtener resultados de la voladura.

Para los análisis de la fragmentación nos apoyaremos de software especializados como son el wipfrag y el equipo porta metric.

Para el registro de vibraciones instalaremos sismógrafos configurados en campo lejano.

Además, nos ayudaremos del programa computarizado EXCEL, para facilitarnos en los cálculos.

## CAPITULO IV

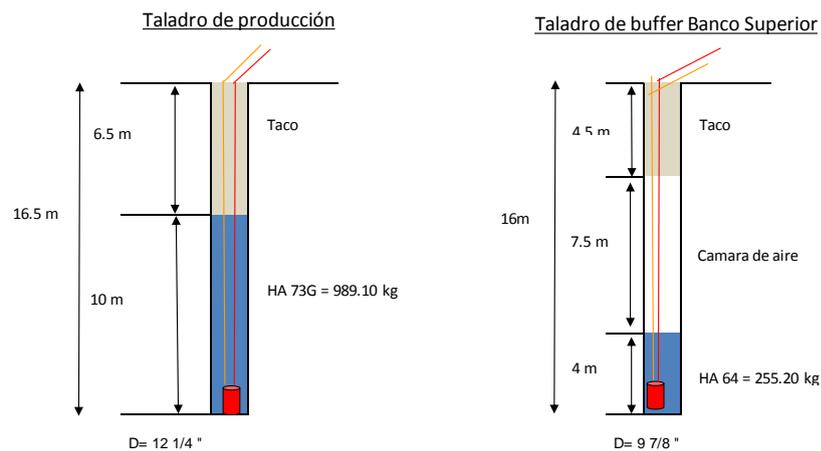
### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

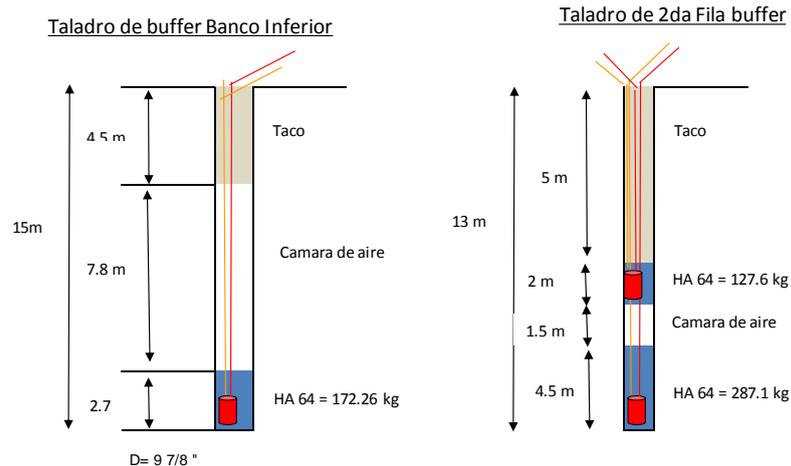
#### 4.1. Presentación de resultados

Realizaremos los análisis comparativos de resultados en base a voladuras con detonadores pirotécnicos y detonadores electrónicos Daveytronic SP de la empresa Enaex S.A. realizados en la Compañía Minera Antamina S.A.

##### 4.1.1. *Diseño de perforación y voladura utilizado*

Para las pruebas con detonadores electrónicos Daveytronic SP en las 10 voladuras, se utilizaron la siguiente configuración de diseño de perforación y voladura.





**Figura 12:** Diseño de carguío de taladros. Tomado del área de Asistencia técnica Enaex, 2019

**Tabla 1.**

*Diseño de perforación y voladura*

PARAMETROS	Unidades	Pirotécnico	Electrónico
<b>Parametros de P&amp;V</b>			
Burden	m	6.00	6.00
Espaciamiento	m	7.00	7.00
Altura taladro	m	16.50	16.50
Sobre perforacion	m	1.50	1.50
densidad roca	gr/cc	2.90	2.90
Diametro de taladro	pulgadas	12.25	12.25
Tipo Carga explosiva		HA73G	HA73G
Densidad de explosivo	gr/cc	1.30	1.30
Altura de carga	m	10.00	10.00
Altura de taco	m	6.50	6.50
Carga lineal	kg/m	98.91	98.91
Cantidad de explosivo	kg	989.06	989.06
Tonelaje por taladro	TM	1,827.00	1827.00
Factor de carga	kg /m3	1.57	1.57
Factor de potencia	kg /TM	0.54	0.54
<b>Tiempos de secuencia</b>			
Secuencia		en V	en V
Tiempo entre taladro	ms	17.00	142.00
Tiempo entre fila	ms	11.00	153.00

Fuente: Asistencia técnica Enaex, 2019

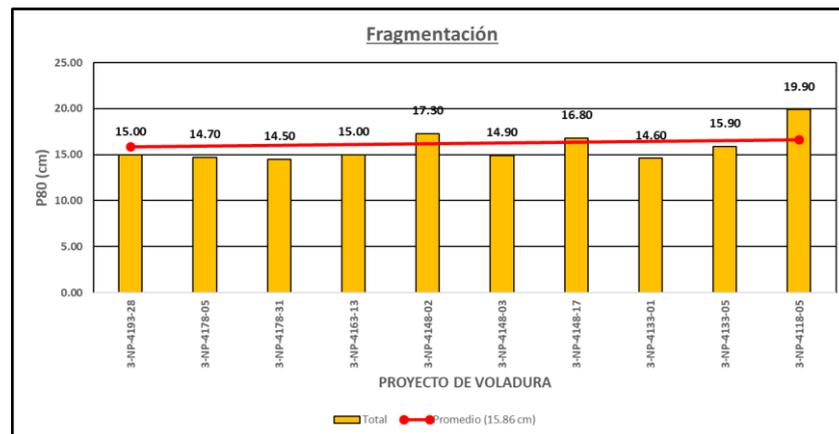
#### 4.1.2. Resultados de voladura con detonadores pirotécnicos

Se ha recopilado la información histórica de los resultados obtenidos de las voladuras con detonadores pirotécnicos realizadas en la Fase 3 de los niveles 4193, 4178, 4163, 4148, 4133 y 4118, cuyos resultados en cuanto a fragmentación, velocidad de excavación de carguío de palas y costos de voladuras han sido tomados como línea base para la comparación de los resultados obtenidos con la voladura de detonadores electrónicos en el Fase 6 de los niveles 3863, 3848, 3833, 3968 y 3953, asimismo, en la comparación de resultados, se ha recopilado la información en cuanto a:

- Estadísticas del sistema Dispatch,
- Información geotécnica y geológica,
- Datos de ingeniería y registros de perforación y disparos

##### 4.1.2.1. Estadística de fragmentación

En los análisis de fragmentación se tomó como referencia el parámetro P80.



**Figura 13:** Resultados de fragmentación. Tomado del Área de Asistencia Técnica Enaex, 2019

#### 4.1.2.2. Porcentaje de fragmentación gruesa

Los resultados de bolonería están basados en los análisis granulométricos.

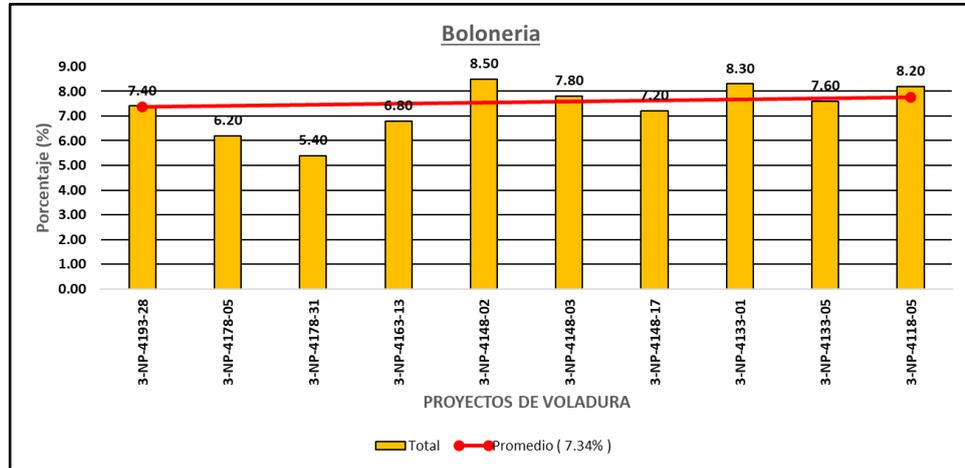


Figura 14: Resultados de bolonería. Tomado del Área de Asistencia Técnica Enaex, 2019.

#### 4.1.2.3. Ciclo de minado

Se realizó un resumen detallado de los ciclos de minado, empleando las estadísticas del sistema Dispatch.

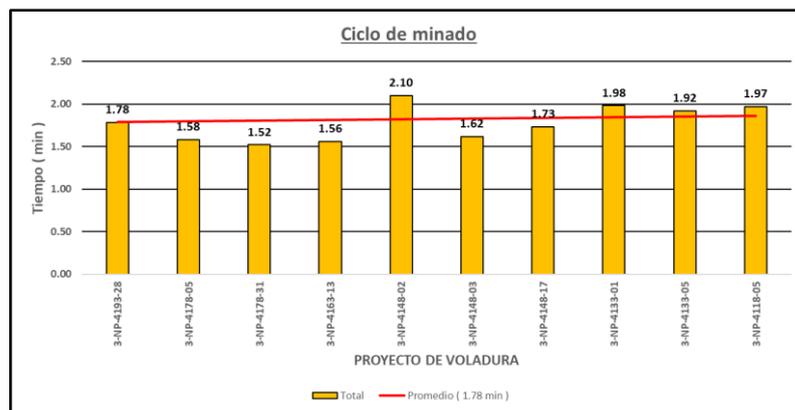
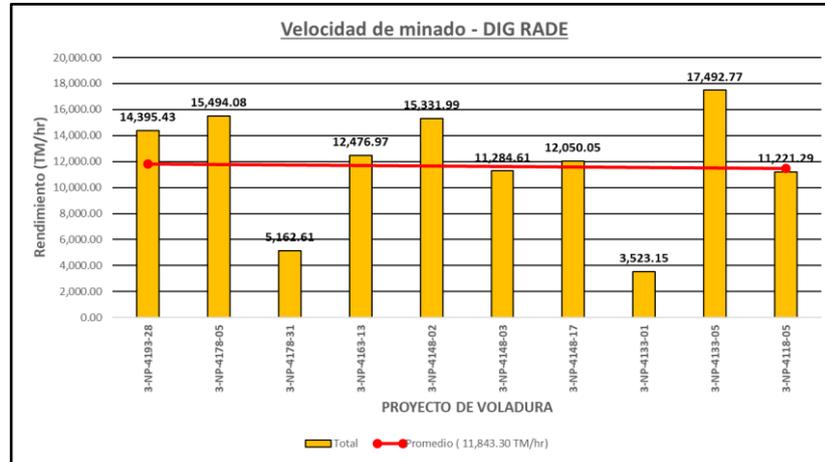


Figura 15: Ciclo de minado. Tomado del Área de Asistencia Técnica Enaex, 2019.

#### 4.1.2.4. Velocidad de minado

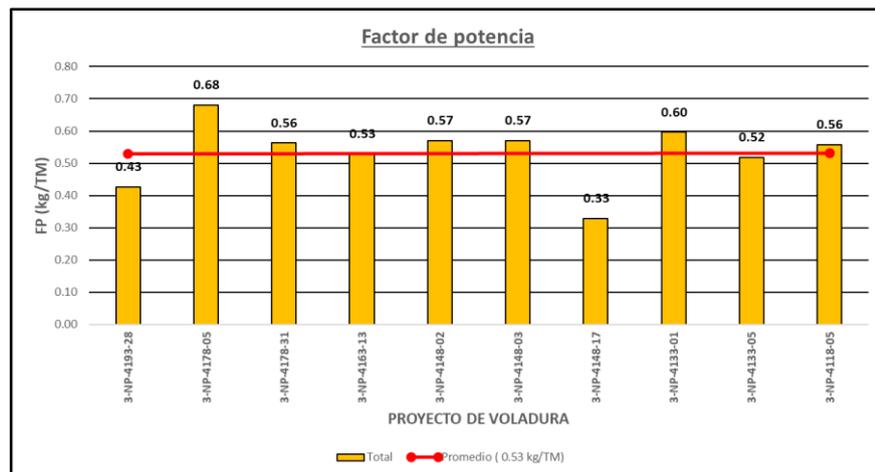
Se realizó un resumen detallado de las velocidades de excavación empleando las estadísticas del Sistema Dispatch.



**Figura 16:** Velocidad de minado. Tomado del Área de Asistencia Técnica Enaex, 2019.

#### 4.1.2.5. Factor de potencia

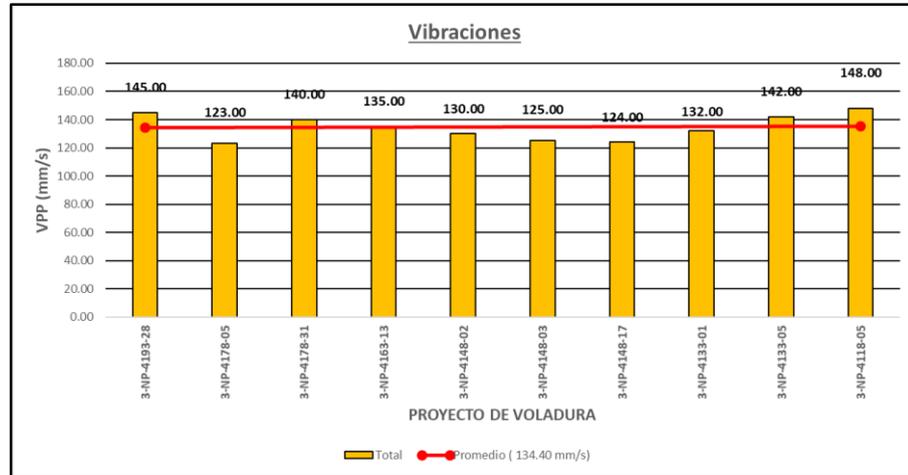
Se realizó un resumen detallado del factor de potencia por voladura.



**Figura 17:** Factor de potencia. Tomado del Área de Asistencia Técnica Enaex, 2019.

#### 4.1.2.6. Nivel de vibraciones de la voladura

Se realizó un resumen detallado de las velocidades pico partículas empleando las estadísticas obtenidas.



**Figura 18:** Niveles de vibraciones. Tomado del Área de Asistencia Técnica Enaex, 2019.

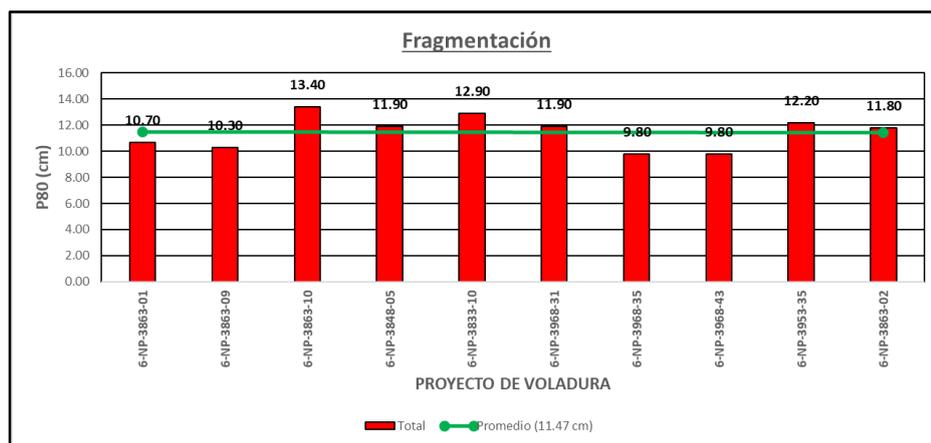
#### 4.1.3. Resultados de voladuras con detonadores electrónicos

La evaluación y análisis de los resultados de las voladuras con detonadores electrónicos se efectuó bajo los mismos conceptos de evaluación que se realizó con los detonadores pirotécnicos. El espacio muestral de prueba y evaluación de resultados se centra en la Fase 6 de los niveles 3863, 3848, 3833, 3968 y 3953; el análisis de resultados se basa en los siguientes aspectos:

- Estadísticas del Sistema Dispatch,
- Información geotécnica y geológica,
- Datos de ingeniería y registros de perforación y disparos.

##### 4.1.3.1. Estadística de fragmentación

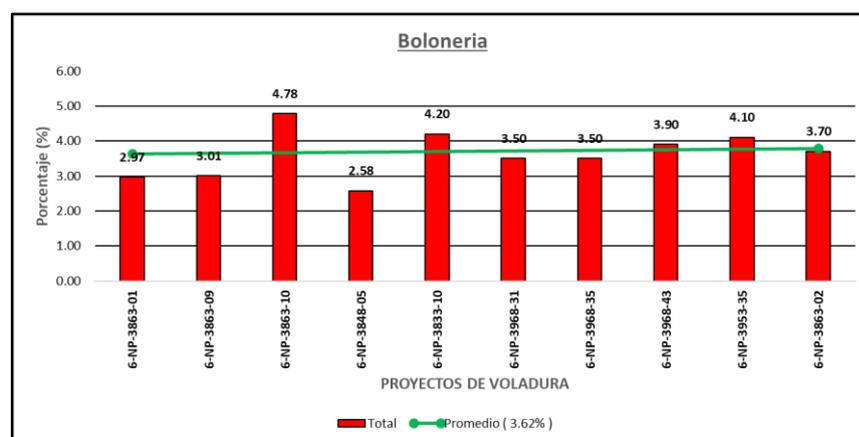
Al igual que el anterior, se tomó como referencia el parámetro P80.



**Figura 19:** Resultados de fragmentación. Tomado del área de Asistencia técnica Enaex, 2019.

#### 4.1.3.2. Porcentaje de fragmentación gruesa

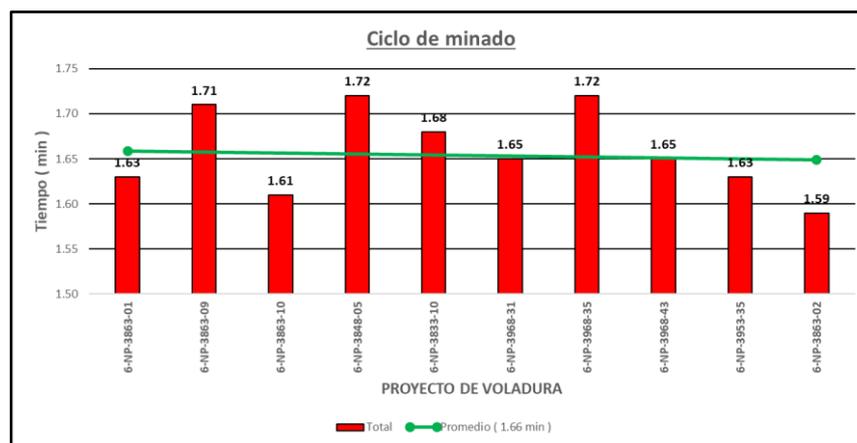
Se ha efectuado una gráfica resumen de las voladuras electrónicas por proyecto de voladura:



**Figura 20:** Resultados de bolonería. Tomado del área de Asistencia técnica Enaex, 2019.

#### 4.1.3.3. Ciclo de minado

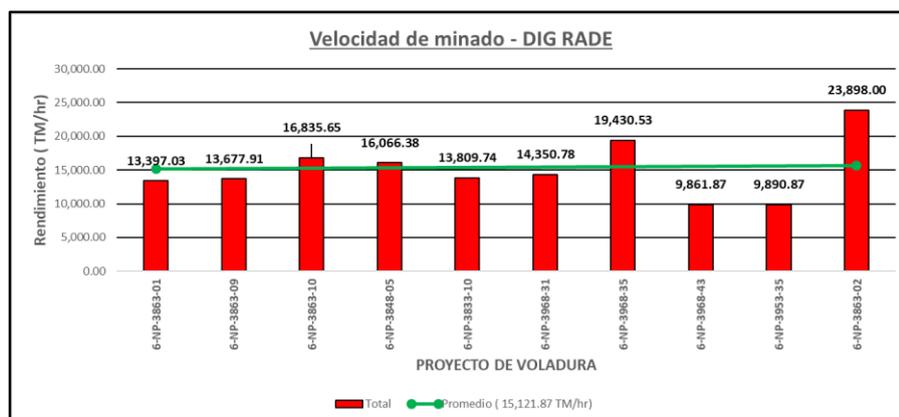
Se ha realizado un resumen detallado empleando las estadísticas del sistema Dispatch, estos resultados están dados por proyecto de voladura.



**Figura 21:** Ciclo de minado. Tomado del área de Asistencia técnica Enaex, 2019.

#### 4.1.3.4. Velocidad de minado

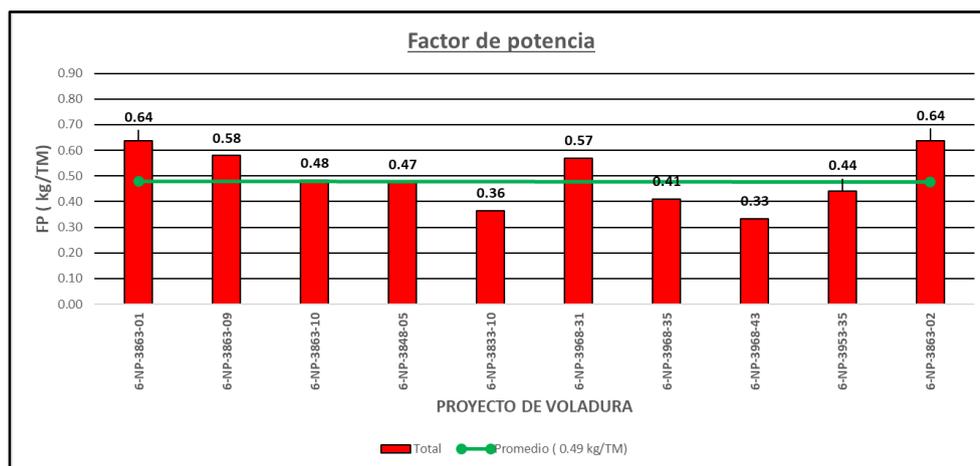
Se ha realizado un resumen detallado de las velocidades de excavación empleando las estadísticas del sistema Dispatch.



**Figura 22:** Velocidad de minado. Tomado del Asistencia técnica Enaex, 2019.

#### 4.1.3.5. Factor de potencia

Los resultados de factor de potencia de los detonadores electrónicos fueron los siguientes:



**Figura 23:** Factor de potencia. Tomado del área de Asistencia técnica Enaex, 2019.

#### 4.1.3.6. Niveles de vibraciones de la voladura



**Figura 24:** Niveles de vibraciones. Tomado del área de Asistencia técnica Enaex, 2019.

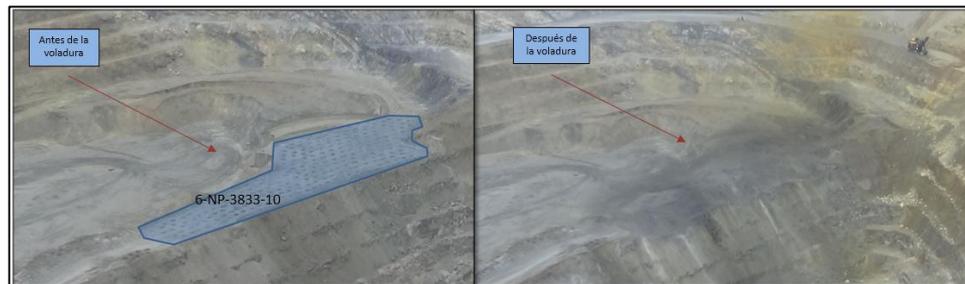
#### 4.1.4. Evaluación visual de las voladuras

Las fotos que se presentan en la figura 25, obtenidas de los resultados de las voladuras con detonadores electrónicos, nos brindan una evaluación visual de los resultados.

El análisis cualitativo visual es el sistema más utilizado y en la mayoría de los casos el único que se aplica. La pila del material es el

reflejo de los resultados de la voladura y es observada inmediatamente después de efectuarse el disparo, este método de evaluación tiene un seguimiento continuo de acuerdo con el avance del minado y también es respaldado mediante los análisis de fragmentación.

Véase la figura 25 donde se muestra los resultados de las voladuras, allí se aprecia los resultados saltantes de fragmentación.



**Figura 25:** Proyecto de voladura 6-NP-3833-10. Tomado del área de Asistencia técnica Enaex, 2019.

## 4.2. Prueba de hipótesis

### 4.2.1. Contratación de Hipótesis General

Planteamiento general: Hipótesis nula y alternativa. Estadístico de contraste y región crítica. Tipos de error I y II. Riesgos alfa y beta. Prueba para la proporción de una población. Prueba para la media de una población. Potencia de un contraste. Grado de significación (P-valor).

**Tabla 2**

*Contrastación de hipótesis general*

<b>Contrastación de Hipótesis General</b>		
	H <sub>0</sub> VERDADERO	H <sub>0</sub> FALSO
ACEPTAR H <sub>0</sub>	No error	Error Tipo II ( $\beta$ )
RECHAZAR H <sub>0</sub>	Error Tipo I ( $\alpha$ )	No error ( $1-\beta$ ), Potencia P

**Pasos que seguir para realizar un contraste de Hipótesis**

- 1 Identificar el parámetro que vamos a estudiar. ( $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $\sigma^2$ ,  $p_1$ )
- 2 Especificar la hipótesis nula y alternativa. ( $H_0$ ,  $H_1$ )
- 3 Fijar un valor para el nivel de significación ( $\alpha$ )
- 4 Obtener el valor del estadístico para la muestra elegida.
- 5 Determinar la región de aceptación y la región de rechazo.
- 6 Decidir si rechazamos o no rechazamos la hipótesis nula.
- 7 Interpretar los resultados obtenidos.

**Hipótesis General**

El uso de detonadores electrónicos mejora la fragmentación de la roca en la Compañía Minera Antamina S.A.

**Datos**

- 1 Distribución Normal. ( $\mu$ ,  $\sigma$ )
- 2 **Hipótesis Nula (H<sub>0</sub>):** El uso de detonadores electrónicos **NO** mejora la fragmentación de la roca en la Compañía Minera Antamina S.A.

**Hipótesis Alternativa (H1):** El uso de detonadores electrónicos SI mejora la fragmentación de la roca en la Compañía Minera Antamina S.A.

- 3 Nivel de significación ( $\alpha$ ): 5%
- 4 Obtenemos el valor estadístico para la muestra.

Aplicamos contrastación de hipótesis Bilateral, porque utilizaremos como media una igualdad. Utilizaremos el método estadístico y método de intervalo de confianza para poder determinar la región de aceptación o rechazo.

Donde:

<b>N ( <math>\mu, \sigma</math> )</b>	Distribucion normal
<b>n =</b>	Tamaño de la muestra
<b><math>\sigma =</math></b>	Desviación típica
<b><math>\sigma^2 =</math></b>	Varianza
<b><math>H_0 (\mu_0) =</math></b>	Hipótesis nula
<b><math>H_1 \neq</math></b>	Hipótesis alternativa
<b><math>\bar{X} =</math></b>	Media muestral
<b><math>\alpha =</math></b>	Nivel de significación
<b><math>1 - \alpha =</math></b>	Región de aceptación
<b><math>\alpha/2</math></b>	Región de rechazo
<b>Z <math>\alpha/2</math></b>	Región de aceptación + $\alpha/2$
<b>Tabla Z <math>\alpha/2</math></b>	Ver tabla de distribución

Asignando Datos:

<b>N ( <math>\mu, \sigma</math> )</b>	
<b>n =</b>	10
<b><math>\sigma =</math></b>	1.63
<b><math>\sigma^2 =</math></b>	2.66
<b><math>H_0 (\mu_0) =</math></b>	15.86
<b><math>H_1 \neq</math></b>	15.86
<b><math>\bar{X} =</math></b>	11.47
<b><math>\alpha =</math></b>	0.05
<b><math>1-\alpha =</math></b>	0.95
<b><math>\alpha/2</math></b>	0.025
<b>Z <math>\alpha/2</math></b>	0.9750
<b>Tabla Z <math>\alpha/2</math></b>	1.96

### Método estadístico

Tipificamos con la media muestral

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$$

Remplazando:

$$Z = \frac{11.47 - 15.86}{\frac{1.63}{\sqrt{10}}}$$

$$Z = -8.52$$

### Método intervalo de confianza normal

Se tiene como media muestral de X = 11.47

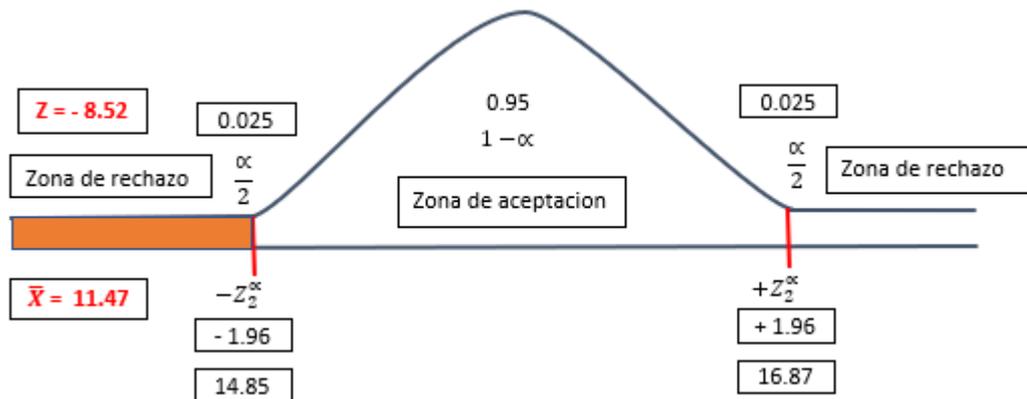
$$\mu_0 - Z^{\alpha/2} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$15.86 - 1.96 * \frac{1.63}{\sqrt{10}} = 14.85$$

$$\mu_0 + Z^{\alpha/2} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$15.86 + 1.96 * \frac{1.63}{\sqrt{10}} = 16.87$$

5 Determinamos la región de aceptación o región de rechazo



Para el valor de  $Z = -8.52$  y  $X = 11.47$ , se encuentra en la zona de rechazo, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, donde el uso de detonadores electrónicos **SI** mejora la fragmentación de la roca en la Compañía Minera Antamina S.A.

#### 4.2.2. Comparación de resultados de las voladuras con detonadores pirotécnicos y electrónicos

##### 4.2.2.1. Caso base de comparación (Minado en la Fase 3 y Fase 6)

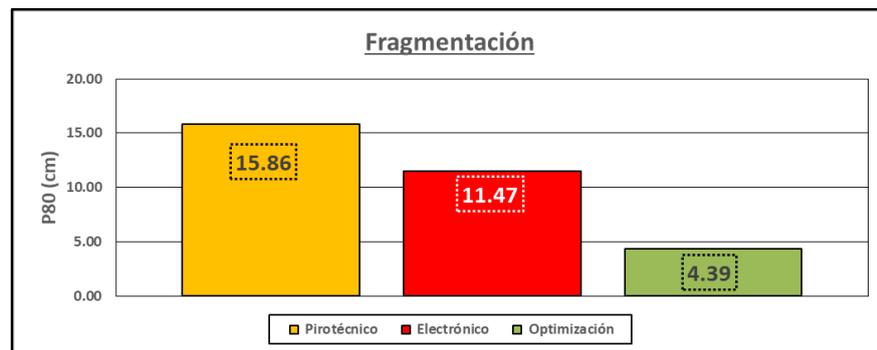
Dadas las necesidades de la mina Antamina de lograr mayor eficiencia en sus operaciones unitarias para generar un menor costo global en sus procesos y de esta manera ser más competitivos en el mercado minero, se vio la necesidad de evaluar y utilizar los detonadores electrónicos en sus operaciones de minado, orientado a voladuras de control y fragmentación en producción.

Como ya se mencionó y apreció de forma detallada, se efectuó un levantamiento minucioso de las datas de los resultados obtenidos con los detonadores pirotécnicos y electrónicos con la finalidad de determinar los

estándares en cada parte del proceso, lo cual nos ha servido para efectos de comparación en los diferentes parámetros trazados y definidos como: fragmentación, porcentaje de bolonería, vibraciones, rendimientos pala y otros.

#### 4.2.2.2. Estadísticas de fragmentación

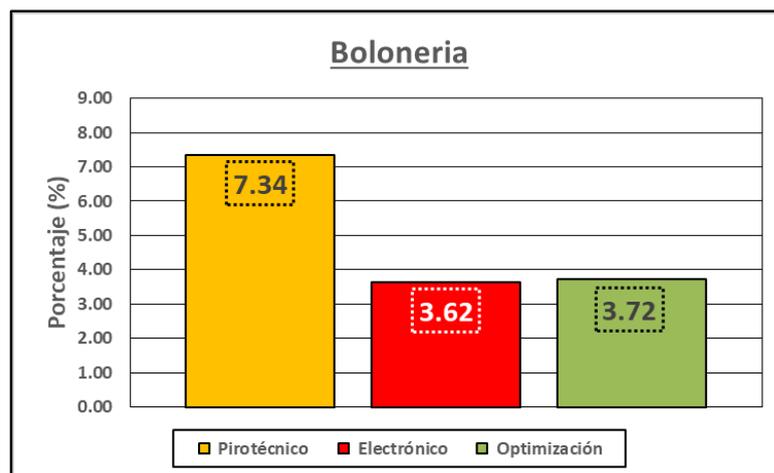
Se basan en los resultados obtenidos anteriormente.



**Figura 26:** Fragmentación (Pirotécnico vs Electrónico). Tomado del área de Asistencia técnica Enaex, 2019.

#### 4.2.2.3. Porcentaje de fragmentación gruesa

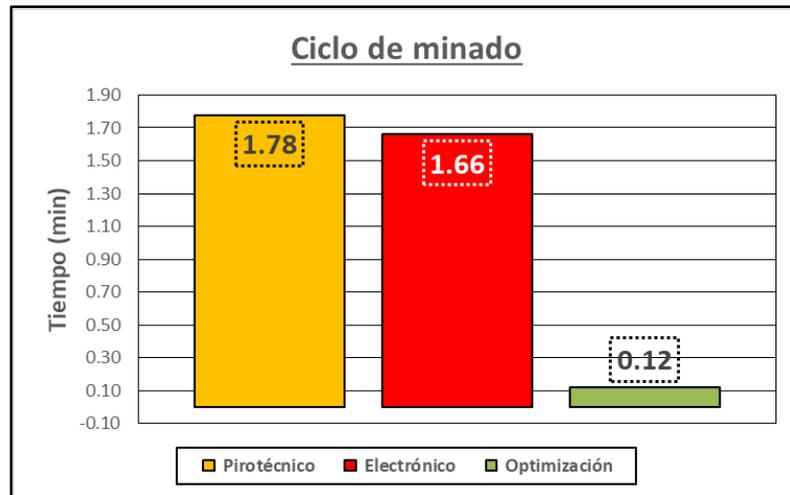
Se fundamentan en los siguientes resultados.



**Figura 27:** Bolonería (pirotécnico vs electrónico). Tomado del área de Asistencia técnica Enaex, 2019.

#### 4.2.2.4. Ciclo de minado

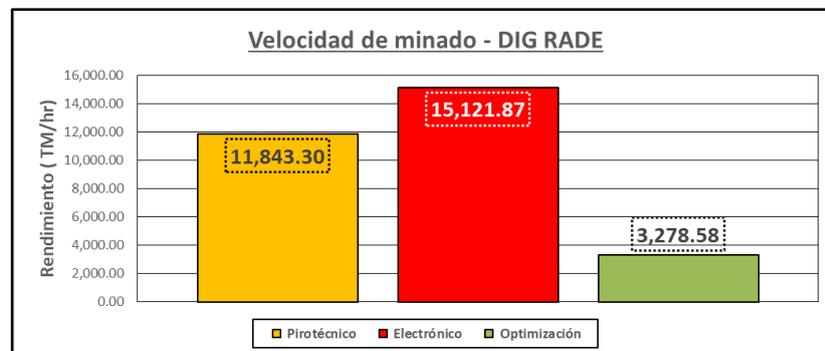
Los resultados en cuanto a ciclo de minado fueron:



**Figura 28:** Ciclo de minado (pirotécnico vs electrónico). Tomado del área de Asistencia técnica Enaex, 2019.

#### 4.2.2.5. Velocidad de minado

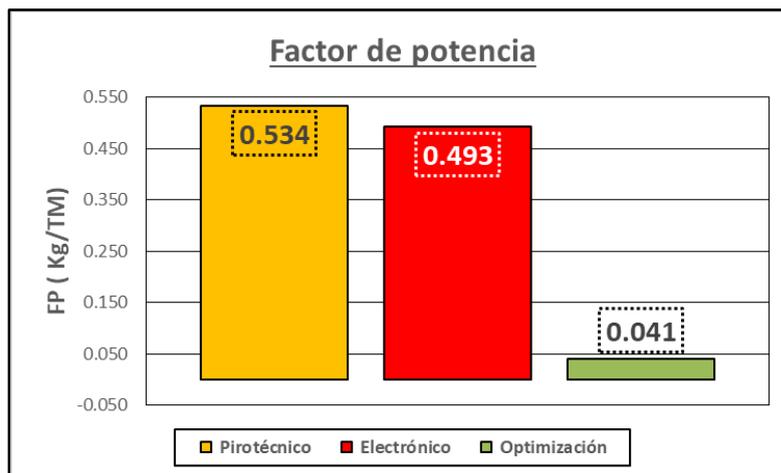
Los resultados en cuanto a velocidad de minado fueron:



**Figura 29:** Velocidad de minado (pirotécnico vs electrónico). Tomado del área de Asistencia técnica Enaex, 2019.

#### 4.2.2.6. Factor de potencia

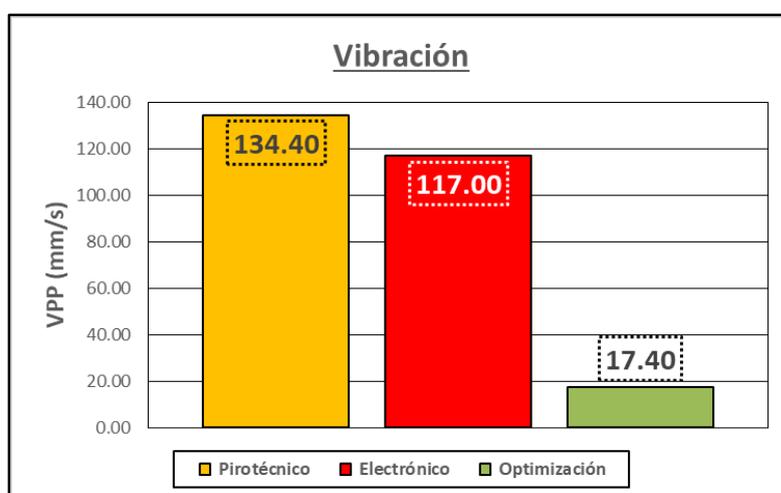
La comparación de los resultados de factor de potencia, con ambos detonadores, fue el siguiente:



**Figura 30:** Factor de potencia (pirotécnico vs electrónico). Tomado del área de Asistencia técnica Enaex, 2019.

#### 4.2.2.7. Nivel de vibraciones de la voladura

Los resultados promedios de vibración con ambos detonadores se muestran en la siguiente gráfica:



**Figura 31:** Vibraciones (pirotécnico vs electrónico). Tomado del área de Asistencia técnica Enaex, 2019.

## **4.3. Discusión**

### **4.3.1. Interpretación y análisis de resultados**

De acuerdo con las gráficas mostradas, se efectúa el siguiente análisis de todos los parámetros evaluados:

#### **4.3.1.1. Porcentaje de fragmentación gruesa**

En las voladuras con detonadores pirotécnicos se obtuvo 7.34 %, frente a 3.62 % que se obtuvo en las voladuras con detonadores electrónicos, es decir, decreció el porcentaje de material grueso en un 3.72%

#### **4.3.1.2. Ciclo de minado**

Las operaciones de carguío pala-camión en las voladuras con detonadores pirotécnicos fueron de 1.78 minutos, en las voladuras con detonadores electrónicos fueron de 1.66 minutos, también decrece el tiempo de carguío, es decir, la operación fue más productiva.

#### **4.3.1.3. Velocidad de minado**

La velocidad efectiva de movimiento de material en las voladuras con detonadores pirotécnicos fue de 11,843.30 TM/hr, mientras que la velocidad de minado con los detonadores electrónicos fue de 15,121.87 TM/hr, es decir, se puede minar 3,278.58 TM/hr de más, asimismo, en un día se puede incrementar la producción en más de 65,500 TM y al año la producción se incrementa en más de 23 millones de Toneladas Métricas en una sola Pala.

#### **4.3.1.4. Factor de potencia**

Con los detonadores pirotécnicos, se tuvo un factor de potencia de 0.534 kg/TM, mientras que, en las voladuras con detonadores electrónicos, se ha obtenido un factor de potencia de 0.493 Kg/TM, la tendencia fue llegar a un factor de carga de 0,47 kg/TM sin alterar los resultados de la fragmentación, por el contrario, estos mejorarlos; como análisis en este ítem, se consumió menos explosivo por tonelada rota.

#### **4.3.1.5. Vibraciones**

El promedio de las vibraciones obtenidas con los detonadores pirotécnicos fue de 134.40 mm/s, en las voladuras con detonadores electrónicos, este índice se bajó a 117 mm/s, lo cual implica menos daño al entorno del macizo rocoso.

#### **4.3.2. *Ventajas de los detonadores electrónicos.***

La correcta aplicación del sistema de voladura electrónica nos permite optimizar el negocio minero, llegando a disminuir el costo global mina. Las ventajas que se obtienen son variadas y alcanzables en un período de corto plazo. Algunos beneficios adicionales muy apartes de los enunciados anteriormente en la sustentación y justificación del presente trabajo de Tesis son los siguientes:

Seguridad en un 100%, es decir, reduce a cero la presencia de tiros cortados desconocidos en la voladura, debido a que estos son detectados antes de la iniciación del disparo.

Ampliación de malla, mínimo 10%, con esto se obtiene una disminución de la perforación específica, reduciendo el Factor de potencia explosiva.

Optimización del ciclo pala-camión lo que implica un aumento de la productividad, por ende, mayor eficiencia, como también disminución de consumo de energía y aumento de productividad de procesos de conminución (chancado y molienda).

Voladuras masivas en yacimientos estructuralmente complicados gracias al excelente control de daños que se puede aplicar; etc. dada la precisión y exactitud que permite bajar los kilos por retardo

#### **4.3.3. *Evaluación económica de las voladuras con detonadores electrónicos.***

##### **4.3.3.1. Costos unitarios de los insumos de voladura.**

La evaluación económica de los resultados comparativos de ambos detonadores es mediante la comparación de los costos unitarios obtenidos, relacionados con la productividad de las operaciones que conforman el ciclo de minado, para ello empezamos mostrando la siguiente tabla donde podemos apreciar los precios unitarios de los insumos de voladura.

**Tabla 3.***Precios unitarios de los insumos de voladura.*

<b>PARAMETROS</b>	<b>Undidades</b>	<b>Pirotécnico</b>	<b>Electrónico</b>
Burden	m	6.00	6.00
Espaciamiento	m	7.00	7.00
Altura taladro	m	16.50	16.50
Sobre perforacion	m	1.50	1.50
densidad roca	gr/cc	2.90	2.90
Diametro de taladro	pulgadas	12.25	12.25
Tipo Carga explosiva		HA73G	HA73G
Densidad de explosivo	gr/cc	1.12	1.12
Altura de carga	m	10.00	10.00
Altura de taco	m	6.50	6.50
Carga lineal	kg/m	85.21	85.21
Cantidad de explosivo	kg	852.11	852.11
Tonelaje por taladro	TM	1,827.00	1827.00
Factor de carga	kg /m3	1.35	1.35
Factor de potencia	kg /TM	0.47	0.47
<b>COSTOS</b>			
Anfo	\$/tal	122.70	122.70
Emulsion	\$/tal	369.82	369.82
Detonadores electrónicos	\$/tal	0.00	26.62
Detonador pirotécnico	\$/tal	2.90	2.90
Booster 2 libras	\$/tal	4.15	4.15
Cable de conexión M35	\$/tal	0.00	1.26
Cordon 5P - 1400 m	\$/tal	0.76	0.00
Retardos superficiales	\$/tal	2.40	0.00
Costo por taladro (\$)	\$/tal	502.73	527.45
Costo por tonelada (\$)	\$/TM	0.28	0.29
<b>DIFERENCIA</b>	<b>USD</b>		<b>24.72</b>

Fuente: Asistencia técnica Enaex, 2019

**Tabla 4.***Precios unitarios de los insumos de voladura.*

<b>Costos unitarios de agentes de voladura</b>		
<b>Agente</b>	<b>Unidades</b>	<b>Costo</b>
Anfo	\$/kg	0.48
Emulsión	\$/kg	0.62
Nitrito de sodio	\$/kg	0.10
<b>Costos unitarios de accesorios de voladura</b>		
<b>Accesorios</b>	<b>Unidades</b>	<b>Costo</b>
Detonadores electrónicos (\$/und)	\$/und	26.62
Detonador pirotécnico (\$/und)	\$/und	2.90
Booster 2 libras (\$/und)	\$/und	4.15
Cable de conexión M35	\$/m	0.18
línea silenciosa	\$/m	0.16
Cordon 5P - 1400 m	\$/caja	152.00
Retardos superficiales	\$/und	2.40

Fuente: Asistencia técnica Enaex y elaboración propia

#### 4.3.3.2. Resumen de los resultados de voladura.

Con la finalidad de cuantificar los resultados de las voladuras, tanto con detonadores pirotécnicos como electrónicos, se ha estructurado las dos siguientes tablas, donde se puede apreciar los resultados y comparaciones de ambos detonadores, en términos de factor de potencia, vibración, fragmentación, bolonería, ciclo de minado y rendimiento de la pala.

**Tabla 5.**

*Resumen de los resultados con detonadores pirotécnicos*

<b>Resumen de resultados con detonadores pirotécnicos</b>							
Proyecto de voladura	Factor carga (kg/TM)	Numero taladros (Unid)	Vibraciones VPP (mm/s)	Fragmentacion P80 (cm)	Porcentaje boloneria %	Ciclo de minado (min)	Velocidad de minado (TM/hr)
3-NP-4193-28	0.43	406.00	145.00	15.00	7.40	1.78	14,395.43
3-NP-4178-05	0.68	580.00	123.00	14.70	6.20	1.58	15,494.08
3-NP-4178-31	0.56	356.00	140.00	14.50	5.40	1.52	5,162.61
3-NP-4163-13	0.53	443.00	135.00	15.00	6.80	1.56	12,476.97
3-NP-4148-02	0.57	291.00	130.00	17.30	8.50	2.10	15,331.99
3-NP-4148-03	0.57	291.00	125.00	14.90	7.80	1.62	11,284.61
3-NP-4148-17	0.33	169.00	124.00	16.80	7.20	1.73	12,050.05
3-NP-4133-01	0.60	295.00	132.00	14.60	8.30	1.98	3,523.15
3-NP-4133-05	0.52	247.00	142.00	15.90	7.60	1.92	17,492.77
3-NP-4118-05	0.56	451.00	148.00	19.90	8.20	1.97	11,221.29
<b>Promedios ponderados</b>	<b>0.53</b>	<b>352.90</b>	<b>134.40</b>	<b>15.86</b>	<b>7.34</b>	<b>1.78</b>	<b>11,843.30</b>

Fuente: Asistencia técnica Enaex y elaboración propia

**Tabla 6.**

*Resumen de los resultados con detonadores electrónicos.*

<b>Resumen de resultados con detonadores electrónicos</b>							
Proyecto de voladura	Factor carga (kg/TM)	Numero taladros (Unid)	Vibraciones VPP (mm/s)	Fragmentacion P80 (cm)	Porcentaje boloneria %	Ciclo de minado (min)	Velocidad de minado (TM/hr)
6-NP-3863-01	0.64	650.00	115.00	10.70	2.97	1.63	13,397.03
6-NP-3863-09	0.58	275.00	118.00	10.30	3.01	1.71	13,677.91
6-NP-3863-10	0.48	228.00	123.00	13.40	4.78	1.61	16,835.65
6-NP-3863-02	0.64	650.00	121.00	11.80	3.70	1.59	23,898.00
6-NP-3848-05	0.47	223.00	112.00	11.90	2.58	1.72	16,066.38
6-NP-3833-10	0.36	317.00	114.00	12.90	4.20	1.68	13,809.74
6-NP-3968-31	0.57	171.00	117.00	11.90	3.50	1.65	14,350.78
6-NP-3968-35	0.41	278.00	110.00	9.80	3.50	1.72	19,430.53
6-NP-3968-43	0.33	157.00	121.00	9.80	3.90	1.65	9,861.87
6-NP-3953-35	0.44	250.00	119.00	12.20	4.10	1.63	9,890.87
<b>Promedios ponderados</b>	<b>0.49</b>	<b>319.90</b>	<b>117.00</b>	<b>11.47</b>	<b>3.62</b>	<b>1.66</b>	<b>15,121.87</b>

Fuente: Asistencia técnica Enaex y elaboración propia

### 4.3.3.3. Consumos de los insumos de voladura.

Partiendo de la base de las tablas anteriores, la siguiente etapa viene a ser el detalle de los consumos diseñados y registrados en los resultados de los proyectos de voladura, tanto en las efectuadas con detonadores pirotécnicos y electrónicos, estos datos nos servirán para más adelante determinar los costos generales por proyecto de voladura. Veamos las siguientes dos tablas.

**Tabla 7.**

*Resumen de consumos de insumos con detonadores pirotécnicos.*

Consumo de insumos con detonadores pirotécnicos								
Proyecto voladura	Petroleo (kg)	Emulsión matriz (kg)	Nitrato de amonio (kg)	Detonador pirotécnico (Unid)	Retardo superficie (Unid)	Booster 2 lb (Unid)	Cordon detonante (m)	Linea silenciosa (m)
3-NP-4193-28	6,227.26	242,171.05	97,560.34	406.00	203.00	406.00	2,842.00	500.00
3-NP-4178-05	8,896.08	345,958.65	139,371.91	580.00	290.00	580.00	4,060.00	500.00
3-NP-4178-31	5,460.35	212,347.03	85,545.52	356.00	178.00	356.00	2,492.00	500.00
3-NP-4163-13	6,794.76	264,240.83	106,451.31	443.00	221.50	443.00	3,101.00	500.00
3-NP-4148-02	4,463.38	173,575.81	69,926.25	291.00	145.50	291.00	2,037.00	500.00
3-NP-4148-03	4,463.38	173,575.81	69,926.25	291.00	145.50	291.00	2,037.00	500.00
3-NP-4148-17	2,592.13	100,805.19	40,610.09	169.00	84.50	169.00	1,183.00	500.00
3-NP-4133-01	4,524.73	175,961.73	70,887.44	295.00	147.50	295.00	2,065.00	500.00
3-NP-4133-05	3,788.50	147,330.67	59,353.21	247.00	123.50	247.00	1,729.00	500.00
3-NP-4118-05	6,917.47	269,012.67	108,373.68	451.00	225.50	451.00	3,157.00	500.00
<b>Totales</b>	<b>54,128.04</b>	<b>2,104,979.44</b>	<b>848,006.00</b>	<b>3,529.00</b>	<b>1,764.50</b>	<b>3,529.00</b>	<b>24,703.00</b>	<b>5,000.00</b>

Fuente: Asistencia técnica Enaex y elaboración propia

**Tabla 8.**

*Resumen de consumos de insumos con detonadores electrónicos.*

Consumo de insumos con detonadores electrónicos							
Proyecto voladura	Petroleo (kg)	Emulsión matriz (kg)	Nitrato de amonio (kg)	Detonador electrónico (unid)	Detonador pirotécnico (unid)	Booster 2 lb (unid)	Cable de conexión (m)
6-NP-3863-01	9,969.74	387,712.28	156,192.66	650.00	650.00	650.00	4,550.00
6-NP-3863-09	4,217.97	164,032.12	66,081.51	275.00	275.00	275.00	1,925.00
6-NP-3863-10	3,497.08	135,997.54	54,787.58	228.00	228.00	228.00	1,596.00
6-NP-3863-02	9,969.74	387,712.28	156,192.66	650.00	650.00	650.00	4,550.00
6-NP-3848-05	3,420.39	133,015.14	53,586.10	223.00	223.00	223.00	1,561.00
6-NP-3833-10	4,862.17	189,084.30	76,173.96	317.00	317.00	317.00	2,219.00
6-NP-3968-31	2,622.81	101,998.15	41,090.68	171.00	171.00	171.00	1,197.00
6-NP-3968-35	4,263.98	165,821.56	66,802.40	278.00	278.00	278.00	1,946.00
6-NP-3968-43	2,408.08	93,647.43	37,726.54	157.00	157.00	157.00	1,099.00
6-NP-3953-35	3,834.52	149,120.11	60,074.10	250.00	250.00	250.00	1,750.00
<b>Totales</b>	<b>49,066.48</b>	<b>1,908,140.90</b>	<b>768,708.19</b>	<b>3,199.00</b>	<b>3,199.00</b>	<b>3,199.00</b>	<b>22,393.00</b>

Fuente: Asistencia técnica Enaex y elaboración propia

#### 4.3.3.4. Análisis de costos de las voladuras.

Teniendo presente las tablas anteriores, donde se mencionan los precios unitarios de los insumos de voladura, los resultados de rendimientos de minado y los consumos registrados por proyecto de voladura en ambos sistemas de iniciación, determinamos los costos totales, para luego relacionarlos con el tonelaje disparado y así obtener el costo unitario por tonelada, expresado en US\$/TM por proyecto de voladura ya sea este el caso del pirotécnico y electrónico.

**Tabla 9.**

*Resumen de costos por proyecto de voladura con detonadores pirotécnicos.*

Costo por voladura con detonadores pirotécnicos									
Proyecto voladura	Total explosivos (USD)	Detonador pirotécnico (USD)	Retardo superficie (USD)	Booster 2lb (USD)	Cordon detonante (USD)	Línea silenciosa (USD)	Costo total voladura (USD)	Tonelaje disparado (TM)	Costo unitario (USD/TM)
3-NP-4193-28	199,964.10	1,177.40	487.20	1,684.90	308.56	80.00	203,702.16	896,157.00	0.23
3-NP-4178-05	285,663.00	1,682.00	696.00	2,407.00	440.80	80.00	290,968.80	760,128.00	0.38
3-NP-4178-31	175,337.98	1,032.40	427.20	1,477.40	270.56	80.00	178,625.54	581,953.00	0.31
3-NP-4163-13	218,187.43	1,284.70	531.60	1,838.45	336.68	80.00	222,258.86	818,462.00	0.27
3-NP-4148-02	143,324.02	843.90	349.20	1,207.65	221.16	80.00	146,025.93	477,379.00	0.31
3-NP-4148-03	143,324.02	843.90	349.20	1,207.65	221.16	80.00	146,025.93	477,379.00	0.31
3-NP-4148-17	83,236.29	490.10	202.80	701.35	128.44	80.00	84,838.98	458,780.00	0.18
3-NP-4133-01	145,294.11	855.50	354.00	1,224.25	224.20	80.00	148,032.06	472,852.00	0.31
3-NP-4133-05	121,653.04	716.30	296.40	1,025.05	187.72	80.00	123,958.51	424,283.00	0.29
3-NP-4118-05	222,127.61	1,307.90	541.20	1,871.65	342.76	80.00	226,271.12	806,264.00	0.28
<b>Totales</b>	<b>1,738,111.59</b>	<b>10,234.10</b>	<b>4,234.80</b>	<b>14,645.35</b>	<b>2,682.04</b>	<b>800.00</b>	<b>1,770,707.88</b>	<b>6,173,637.00</b>	<b>0.29</b>

Fuente: Asistencia técnica Enaex y elaboración propia.

**Tabla 10.**

*Resumen de costos por proyecto de voladura con detonadores electrónicos.*

Costo por voladura con detonadores electrónicos								
Proyecto voladura	Total explosivos (USD)	Detonador electrónico (USD)	Detonador pirotécnico (USD)	Booster 2lb (USD)	Cable de conexión (USD)	Costo total voladura (USD)	Tonelaje disparado (TM)	Costo unitario (USD/TM)
6-NP-3863-01	320,139.57	17,303.00	1,885.00	2,697.50	819.00	342,844.07	1,310,400.00	0.26
6-NP-3863-09	135,443.66	7,320.50	797.50	1,141.25	346.50	145,049.41	449,089.00	0.32
6-NP-3863-10	112,295.11	6,069.36	661.20	946.20	287.28	120,259.15	459,648.00	0.26
6-NP-3863-02	320,139.57	17,303.00	1,885.00	2,697.50	819.00	342,844.07	1,310,400.00	0.26
6-NP-3848-05	109,832.50	5,936.26	646.70	925.45	280.98	117,621.89	449,568.00	0.26
6-NP-3833-10	156,129.60	8,438.54	919.30	1,315.55	399.42	167,202.41	639,072.00	0.26
6-NP-3968-31	84,221.33	4,552.02	495.90	709.65	215.46	90,194.36	344,736.00	0.26
6-NP-3968-35	136,921.23	7,400.36	806.20	1,153.70	350.28	146,631.77	560,448.00	0.26
6-NP-3968-43	77,326.02	4,179.34	455.30	651.55	197.82	82,810.03	225,976.00	0.37
6-NP-3953-35	123,130.60	6,655.00	725.00	1,037.50	315.00	131,863.10	541,076.00	0.24
<b>Totales</b>	<b>1,575,579.20</b>	<b>85,157.38</b>	<b>9,277.10</b>	<b>13,275.85</b>	<b>4,030.74</b>	<b>1,687,320.27</b>	<b>6,290,413.00</b>	<b>0.28</b>

Fuente: Asistencia técnica Enaex y elaboración propia.

Como conclusión, en cuanto a costos unitarios en ambos sistemas de iniciación de voladuras, podemos manifestar que, en las voladuras con detonadores pirotécnicos, tenemos un costo de 0,29 USD/TM, mientras que, en las voladuras con detonadores electrónicos, el costo unitario es de 0,28 USD/TM, aparentemente la diferencia es mínima, pero tendrá enorme relevancia cuando estos costos, los relacionemos con los tonelajes a minar.

#### 4.3.3.5. Costo ahorrado en voladura con los detonadores electrónicos.

En las diez voladuras efectuadas con detonadores electrónicos, se ha tenido un ahorro de más de 118,750 dólares un promedio de 11,875.94 dólares por disparo, en la siguiente tabla se muestra el análisis cuantificable:

**Tabla 11.**

*Resumen de costos y tonelajes.*

Descripcion de item	Unidad	Valor
Costo unitario voladura con detonadores pirotécnicos	USD/TM	0.29
Tonelaje disparado con detonadores electrónicos	TM	6,290,413.00
Proyeccion Costo total voladura con detonadores pirotécnicos	USD	1,806,079.70
Costo total voladura con detonadores electrónicos	USD	1,687,320.27
Ahorro promedio por voladura (10 voladuras)	USD/voladura	11,875.94
<b>Ahorro total obtenido</b>	<b>USD</b>	<b>118,759.43</b>

Fuente: Asistencia técnica Enaex y elaboración propia.

#### 4.3.3.6. Proyección de ahorro en voladura durante el año 2020.

Manteniéndose los precios unitarios de los insumos de voladura, existe un ahorro sustancial expresado en dólares, para tal efecto, es importante conocer el tonelaje de mineral que se minará en el año 2020.

Para determinar esta proyección, nos basamos en la siguiente data:

**Tabla 12.**

*Resumen de costos y tonelajes.*

Descripción de ítem	Unidad	Valor
Costo unitario voladura con detonadores pirotécnicos	USD/TM	0.29
Costo unitario voladura con detonadores electrónicos	USD/TM	0.28
Tonelaje de mineral a disparar en el año 2020	TM/año	64,500,000.00
Costo total voladura con detonadores pirotécnicos	USD/año	18,518,997.14
Costo total voladura con detonadores electrónicos	USD/año	17,831,529.27
<b>Ahorro total por año</b>	<b>USD/año</b>	<b>687,467.87</b>

Fuente: Asistencia técnica Enaex y elaboración propia.

La proyección de ahorro para el año 2020 es de más de 687,460.00 dólares, es el resultado de la diferencia de ambos detonadores.

#### **4.3.3.7. Rendimientos y costos del equipo de carguío.**

El costo horario de una Pala P&H4100AC es de 324.23US\$/hr, en base a este parámetro de costo unitario, es que efectuamos y estructuramos la siguiente tabla y análisis cuantificable:

**Tabla 13.**

*Rendimientos y costos de palas P&H 4100AC.*

Sistema de iniciación de voladura	Tonelaje disparado (TM)	Velocidad de minado - DIG RATE (TM/hr)	Costo horario (USD/hr)	Costo tonelada (USD/TM)	Costo total (USD)
Pirotécnico	6,173,637.00	11,843.30	324.23	0.027	169,013.61
Electrónico	6,290,413.00	15,121.87	324.23	0.021	134,873.53

Fuente: Asistencia técnica Enaex y elaboración propia.

#### **4.3.3.8. Costo ahorrado en carguío con los detonadores electrónicos.**

En las diez voladuras efectuadas con detonadores electrónicos, se ha tenido un ahorro de más de 37,300 dólares debido al siguiente análisis:

**Tabla 14.**

*Resumen de costos y tonelajes.*

<b>Descripcion de item</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Costo unitario de carguio con detonadores pirotécnicos	USD/TM	0.027
Tonelaje disparado con detonadores electrónicos	TM	6,290,413.00
Proyeccion Costo total carguio con detonadores pirotécnicos	USD	172,210.54
Costo total carguio con detonadores electrónicos	USD	134,873.53
<b>Ahorro total obtenido</b>	<b>USD</b>	<b>37,337.01</b>

Fuente: Asistencia técnica Enaex y elaboración propia.

#### **4.3.3.9. Proyección de ahorro en carguío durante el año 2020.**

Conociendo ya el tonelaje de mineral que se minará durante el año 2020y relacionando este con los costos de minado de ambos detonadores (electrónico y pirotécnico), efectuamos la siguiente tabla, con sus respectivas relaciones de cálculo:

**Tabla 15.**

*Resumen de costos y tonelajes.*

<b>Descripcion de item</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Costo unitario de carguio con detonadores pirotécnicos	USD/TM	0.027
Costo unitario de carguio con detonadores electrónicos	USD/TM	0.021
Tonelaje de mineral a minar en el año 2020	TM/año	64,500,000.00
Costo total carguio con detonadores pirotécnicos	USD/año	1,765,795.04
Costo total carguio con detonadores electrónicos	USD/año	1,382,952.54
<b>Ahorro total por año</b>	<b>USD/año</b>	<b>382,842.50</b>

Fuente: Asistencia técnica Enaex y elaboración propia.

La proyección de ahorro para el año 2020 es de más de 382,840.00 dólares, es el resultado de la diferencia de ambos detonadores

#### **4.3.3.10. Proyección total de ahorro.**

Durante las primeras voladuras, se tuvieron los siguientes ahorros:

**Tabla 16.**

*Ahorro total en 10 voladuras*

<b>Proyeccion total de ahorro en 10 voladuras</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Voladura	USD	118,759.43
Carguio	USD	37,337.01
<b>Ahorro total por año</b>	<b>USD</b>	<b>156,096.44</b>

Fuente: Asistencia técnica Enaex y elaboración propia

**Ahorro (Prueba) = 156,096.44 US\$**

Con los resultados obtenidos, tanto en fragmentación como rendimiento de los equipos de carguío, más la proyección de minado para el año 2020, estimamos el siguiente ahorro:

**Tabla 17.**

*Ahorro proyectado anual*

<b>Proyeccion total de ahorro anual</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Voladura	USD	687,467.87
Carguio	USD	382,842.50
<b>Ahorro total por año</b>	<b>USD</b>	<b>1,070,310.37</b>

Fuente: Asistencia técnica Enaex y elaboración propia

**Ahorro (2020) = 1,070,310.37 US\$**

## CONCLUSIONES

1. El porcentaje de fragmentación gruesa se redujo de un  $P80 = 15.86$  cm a  $P80 = 11.47$  cm, lo cual mejoró en un 27.68% viéndose reflejado en la cantidad de bolonería generada, que disminuyó en un 50.63%.
2. El ciclo de minado de la Pala P&H4100AC mejoró en un 6.59%, lo cual se plasmó en la velocidad de minado, pues ésta mejoró en un 21.68%, lo cual incrementó el dig rate de la pala en 3,278.58 Tm/hr adicionales.
3. Las vibraciones se redujeron de 134.40 mm/s a 117 mm/s medido en campo lejano, lo que da una reducción del 12.95 %, al reducir vibraciones cuidamos la estabilidad de los taludes, evitamos activar fallas presentes y hacemos más segura la operación de minado.
4. En las voladuras con detonadores electrónicos, se cambiaron los tiempos entre taladros, fila y el factor de potencia, este último, se bajó en un 7.62%, el factor de potencia con los detonadores electrónicos es de 0,493 Kg/TM, mientras que el factor de potencia con los detonadores pirotécnicos es de 0,534 Kg/TM. lo cual permitió una reducción de costo por tonelada métrica volada.
5. Los resultados obtenidos al reducir fragmentación y el factor de potencia con detonadores electrónicos, nos ha permitido lograr un ahorro en voladura de 118,759.43 USD y en carguío de 37,337.01 USD haciendo un ahorro total de 156,096.44 US\$, los resultados de estos estudios cuantificados, nos han permitido proyectar un ahorro anual del costo global de minado para el año 2020 de 1,070,310.37 US\$, el mismo que será incrementado si ajustamos más los

parámetros de voladura como un incremento en las dimensiones de la malla de perforación y reducción del factor de carga explosiva.

6. Un beneficio adicional que nos brindan las voladuras con detonadores electrónicos es seguridad en un 100% ya que puedes ser testeados en todo momento desde la programación hasta la iniciación de la voladura, evitando que ocurra presencia de tiros quedados desconocidos, muy aparte de garantizar una detonación ordenada acorde al diseño planificado, en cuanto a secuencia de detonación y control de tiempos en los taladros.
7. Siendo los tiempos de detonación precisos con dispersión 0.005%, nos permite diseñar voladuras con periodos cortos, donde la colisión de las ondas da por resultado una mejor fragmentación, empleando la energía explosiva eficientemente, lo que conlleva a resultados idóneos de fragmentación, asimismo permite efectuar un análisis técnico destinado a modificar los parámetros de perforación y voladura, sin alterar los resultados.

## RECOMENDACIONES

1. Durante el primado, dejar descender el booster con el detonador electrónico ensamblado hasta el fondo del taladro por el centro de este; luego, asegurar el cable en la superficie con una estaca para evitar su caída al fondo del taladro.
2. El tapado del taladro se debe realizar usando tubo PVC para proteger el cable del detonador; y, asegúrese que el material de tapado esté libre de rocas excesivamente grandes y filudas que puedan ocasionar daños y corte al cable del detonador.
3. Se recomienda utilizar un detonador no eléctrico como back up en caso se corte el cable del detonador electrónico y poder así iniciar la columna explosiva.
4. Masificar el uso de detonadores electrónicos en toda la mina, asimismo, continuar con el seguimiento de los resultados, con el fin de obtener parámetros de voladura que se ajusten aún más al macizo rocoso.
5. Realizar voladuras masivas, controlando el nivel de vibraciones, juntar varios proyectos de voladura para disparo en un solo horario y así evitar tiempos muertos de evacuación de equipos por voladura.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernaola Alonzo, J., Castilla Gomez, J., & Herrera Herbert, J. (2013). *Perforacion y Voladura de Rocas en Minería* (Vol. 1). Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. [http://oa.upm.es/21848/1/20131007\\_PERFORACION\\_Y\\_VOLADURA.p df](http://oa.upm.es/21848/1/20131007_PERFORACION_Y_VOLADURA.pdf)
- Chavez Leon, L. A. (2014). *Optimización de la fragmentación en los proyectos de voladura primaria en la zona norte del tajo San Pedro Sur, Minera La Zanja*. (Tesis de pregrado), Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Peru, Lima. <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/4244>
- Cueva. (2016). *Técnicas Modernas en Voladuras Controladas en Minería a Cielo Abierto. Instituto de Ingenieros de minas del Peru.*  
<https://www.convencionminera.com/perumin32/doc/conferencias/tecnologia/ocueva-tt.pdf>
- EXSA S.A. (2008). *Manual Practico de Voladura*. Lima, Perú.  
<https://exsa.net/cursos> 94
- Hinostroza Sierra, J. R. (2014). *Optimización de la fragmentación en las rocas con la aplicación de la doble iniciación electrónica en la explotación de cobre porfirítico a cielo abierto*. Tesis de pregrado, Universidad Mayor de San Marcos, Lima, Lima.  
<http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/4039>
- Huaman Ubillus, B. A. (2010). *Implementacion de un nuevo sistema de iniciacion electrónica en el Peru - seguridad y versatilidad*. Tesis de pregrado,

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Lima.

<http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/679>

Mamani. (2018). *Optimización de la fragmentacion con el uso de detonadores electrónicos en la mina Toquepala*. Tesis de pregrado, Universidad

Nacional Jorge Basadre Grohman - Tacna, Perú, Tacna.

<http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/3211>

Miranda Salas, Y. (2009). *Estudio del Rendimiento entre Detonadores*

*Electrónicos y no Electrónicos e Implicancia en Economía del Proceso y Seguridad en Tajo Abierto*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Arequipa.

Paredes Ponce, R. M. (2014). *Empleo de detonadores electrónicos para optimizar la fragmentación en sector yeso anhidrita en mina modelo a tajo abierto -*

*Toquepala*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Agustín ,

Arequipa. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3906>

Poma Fernandez, J. L. (2012). *Importancia de la fragmentacion de la roca en el proceso Gold Mill ( Caso Minera Yanacocha)*. Tesis de pregrado,

Pontifica Universidad Catolica Del Peru, Lima, Lima.

<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/1696>

Romero. (2016). *voladura con detonadores electrónicos para optimizar la*

*fragmentación y seguridad en el tajo toromocho – minera chinalco Perú*

s.a. Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Peru,

Huancayo. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/3897>

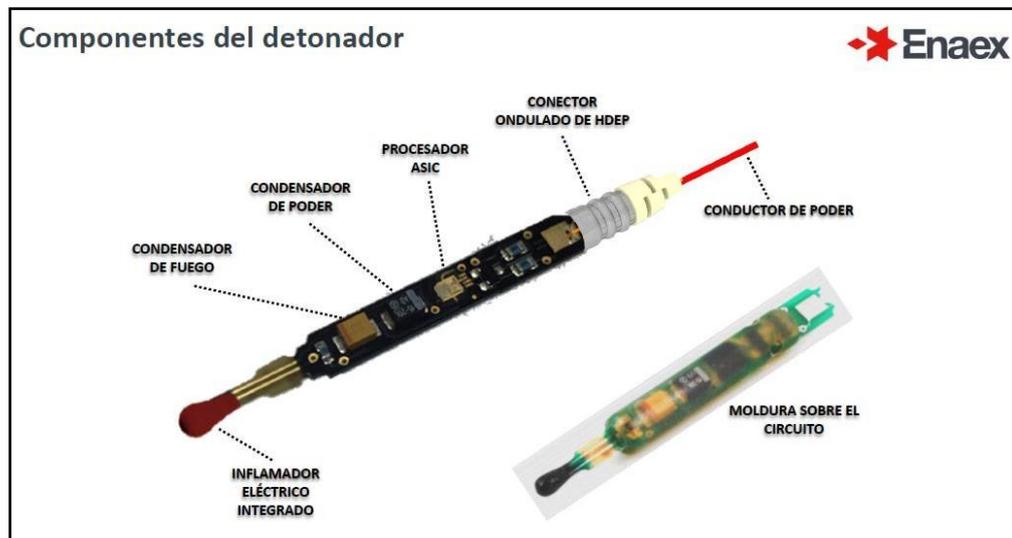
## ANEXOS

### Anexo 1. Matriz de consistencia

PROBLEMA GENERAL	VARIABLES	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS	TÉCNICAS
¿El uso de detonadores electrónicos podrá mejorar la fragmentación de la roca en la Compañía Minera Antamina S.A.?		Determinar como el uso de detonadores electrónicos podrá mejorar la fragmentación de la roca en la Compañía Minera Antamina S.A.	El uso de detonadores electrónicos mejora la fragmentación de la roca en la Compañía Minera Antamina S.A.	Análisis Documental
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	Variable	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECIFICAS	INSTRUMENTOS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿En qué medida el uso de detonadores electrónicos mejora el ciclo de minado en la Compañía Minera Antamina SA?</li> <li>• ¿En qué medida el uso de detonadores electrónicos reduce el nivel de vibraciones en la Compañía Minera Antamina SA?</li> <li>• ¿En qué medida el uso de detonadores electrónicos reduce el factor de potencia en la Compañía Minera Antamina SA?</li> <li>• ¿Cómo se puede reducir los costos de voladura y minado mediante el uso de detonadores electrónicos en la Compañía Minera Antamina SA?</li> </ul>	<p><b>Independiente:</b> Detonadores electrónicos</p> <p><b>Variable Dependiente:</b> Mejorar la fragmentación de la roca</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar en qué medida el uso de detonadores electrónicos mejora el ciclo de minado en la Compañía Minera Antamina SA.</li> <li>• Determinar en qué medida el uso de detonadores electrónicos reduce el nivel de vibraciones en la Compañía Minera Antamina SA.</li> <li>• Determinar en qué medida el uso de detonadores electrónicos reduce el factor de potencia en la Compañía Minera Antamina SA.</li> <li>• Reducir los costos de voladura y minado mediante el uso de detonadores electrónicos en la Compañía Minera Antamina SA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El uso de detonadores electrónicos mejora el ciclo de minado en la Compañía Minera Antamina SA.</li> <li>• El uso de detonadores electrónicos reduce el nivel de vibraciones en la Compañía Minera Antamina SA.</li> <li>• El uso de detonadores electrónicos reduce el factor de potencia en la Compañía Minera Antamina SA.</li> <li>• El uso de detonadores electrónicos reduce los costos de voladura y minado en la Compañía Minera Antamina SA</li> </ul>	Ficha de registro de datos en Excel

Fuente: Elaboración propia

## Anexo 2. Componentes del detonador electrónico Daveytronic SP.



Fuente: Manual de entrenamiento Daveytronic – Enaex

## Anexo 3. Sistema de iniciación electrónica Daveytronic SP.



Fuente: Manual de entrenamiento Daveytronic – Enaex

#### Anexo 4. Primado de taladro con detonador electrónico Daveytronic SP.



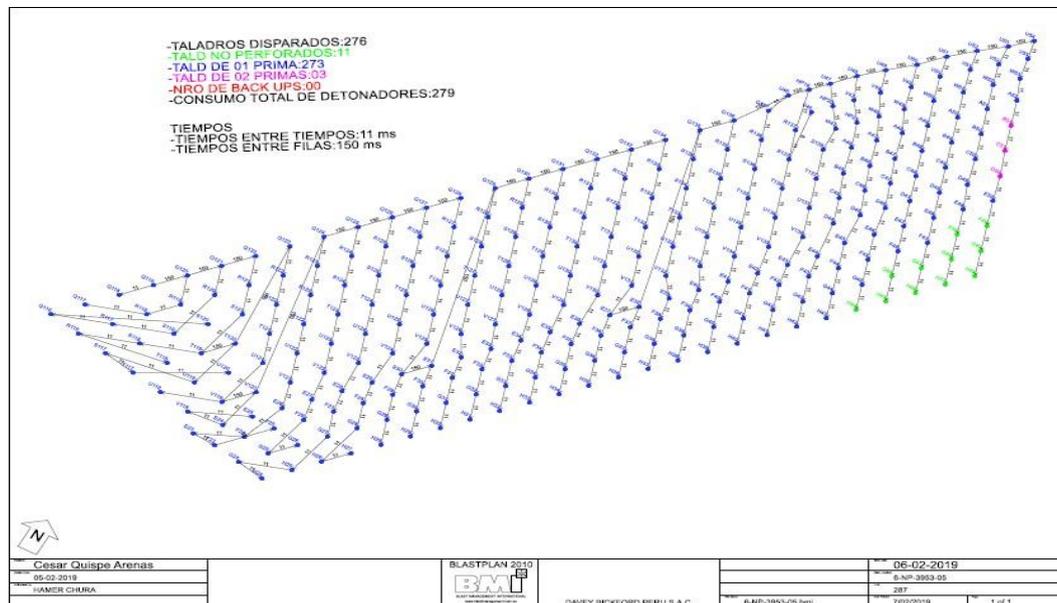
Fuente: Propia

#### Anexo 5. Inicio de voladura con detonadores electrónicos



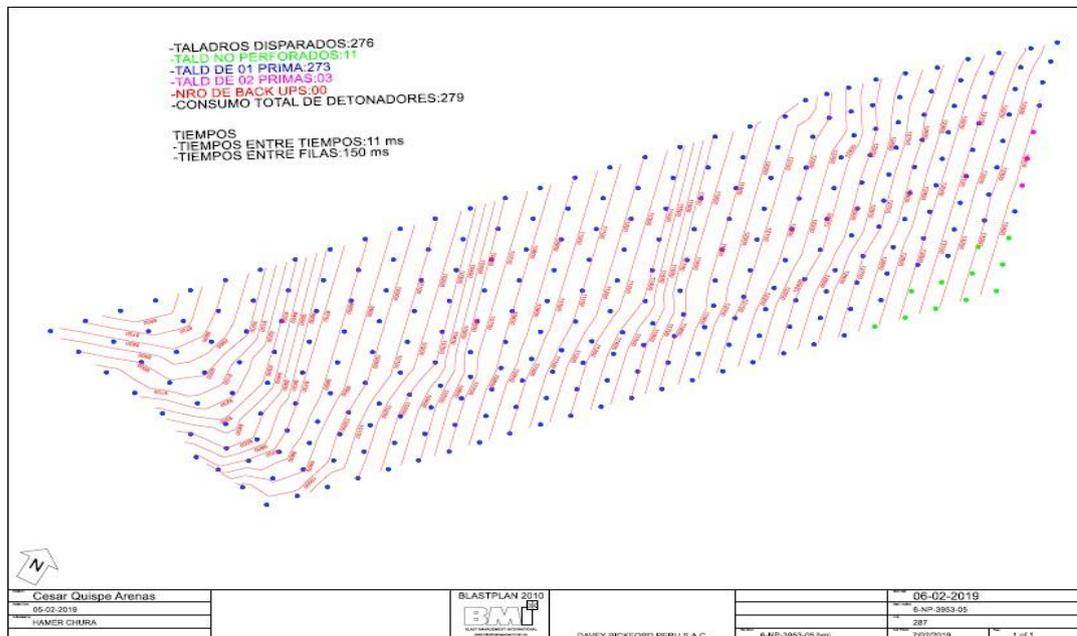
Fuente: Propia

**Anexo 6. Diseño de secuencia de salida de voladura - Proyecto 6-NP-3863-09**



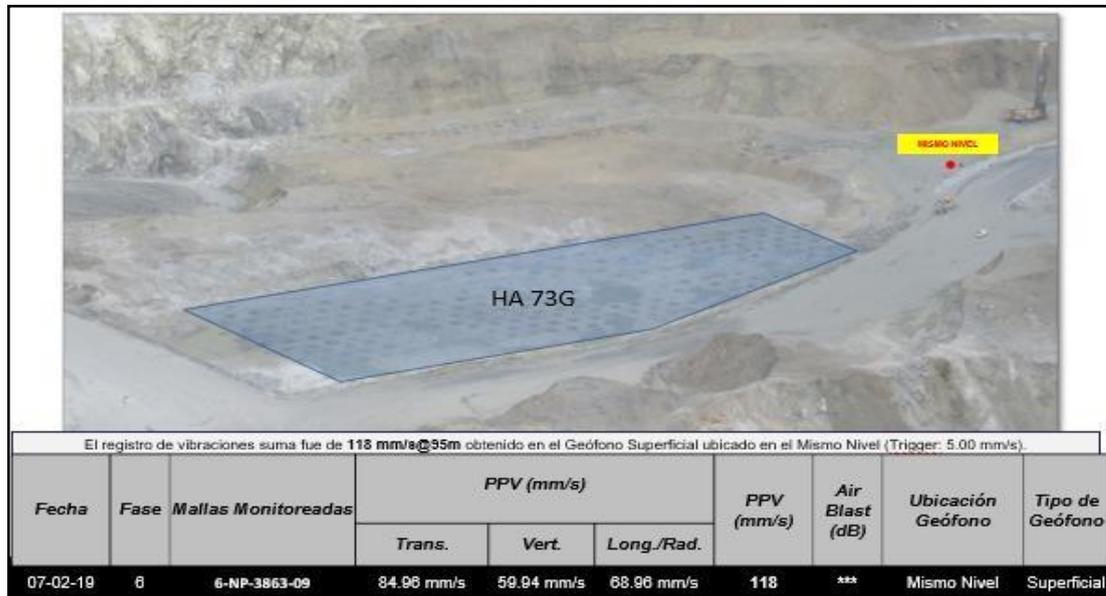
Fuente: Asistencia técnica Enaex

**Anexo 7. Isolíneas de voladura Proyecto 6-NP-3863-09**



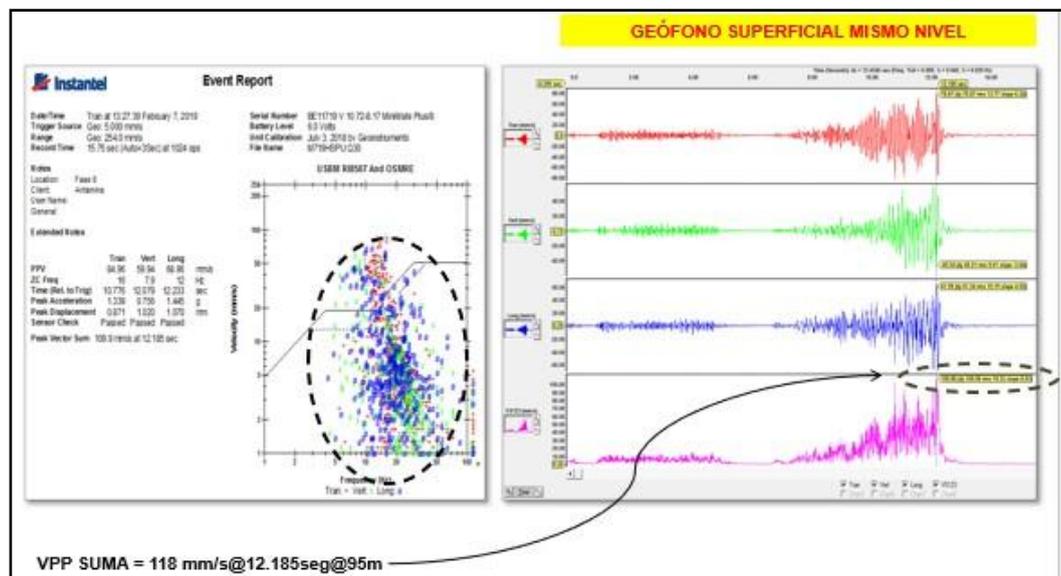
Fuente: Asistencia técnica Enaex

**Anexo 8. Punto de monitoreo e instalación de sismógrafo - Proyecto 6-NP-3863-09**



Fuente: Asistencia técnica Enaex.

**Anexo 9. Reporte del registro del sismógrafo Instantel - Proyecto 6-NP-3863-09**



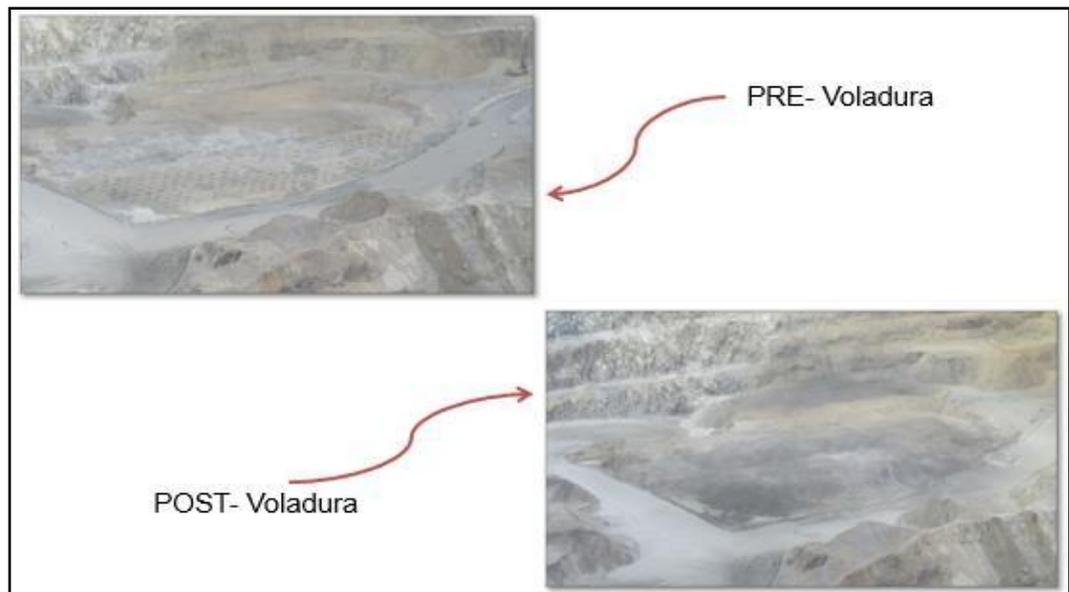
. Fuente: Asistencia técnica Enaex

**Anexo 10. Grabación de salida de voladura con cámara de alta - Proyecto 6-NP-3863-09**



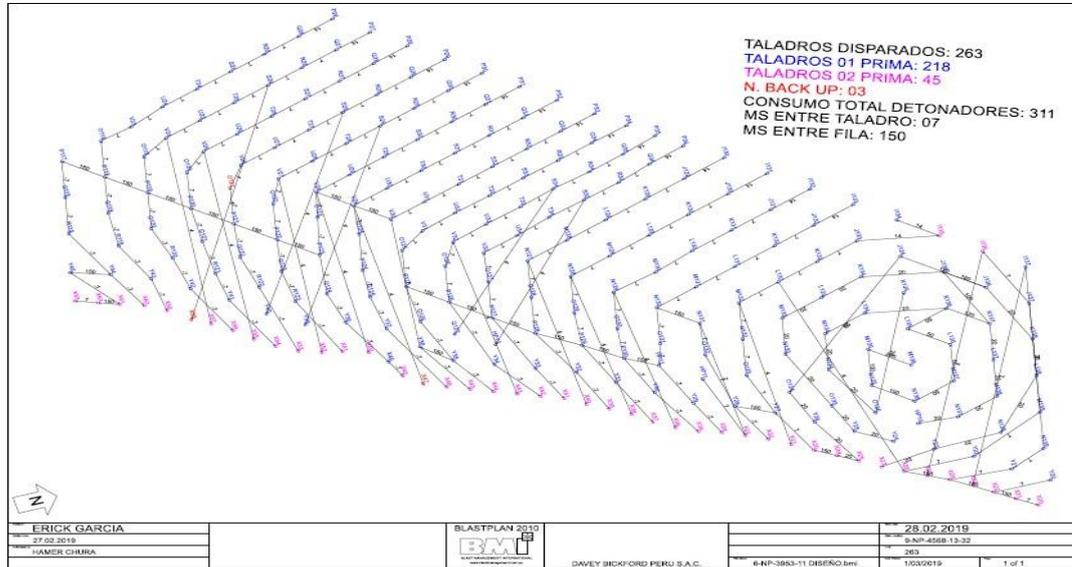
Fuente: Asistencia técnica Enaex

**Anexo 11. Fotografía de antes y después de la voladura - Proyecto 6-NP-3863-09**



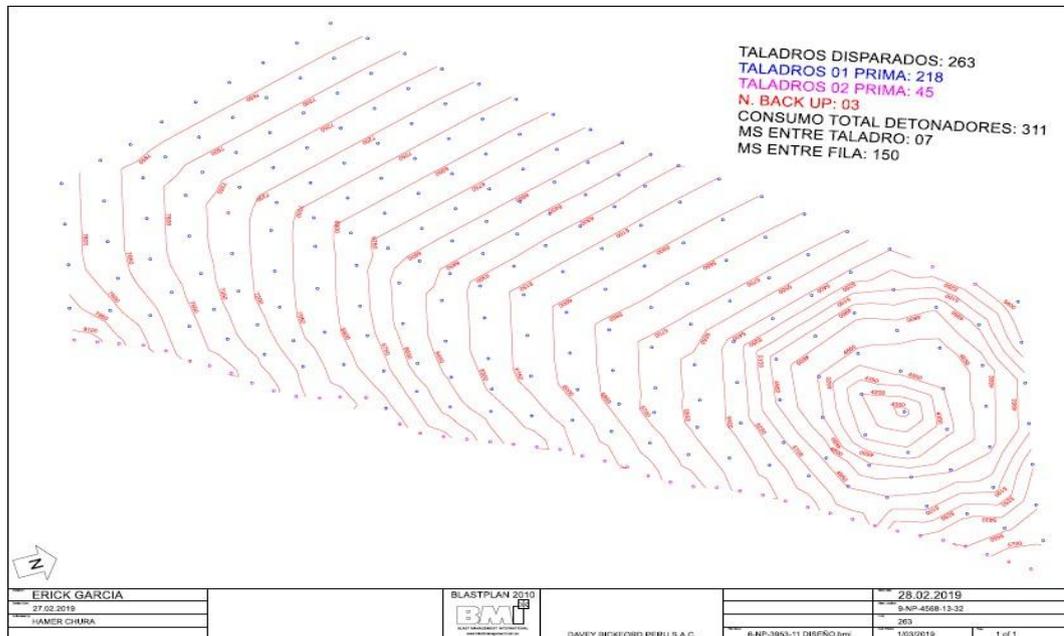
Fuente: Asistencia técnica Enaex

**Anexo 12. Diseño de secuencia de salida de voladura - Proyecto 6-NP-3953-35**



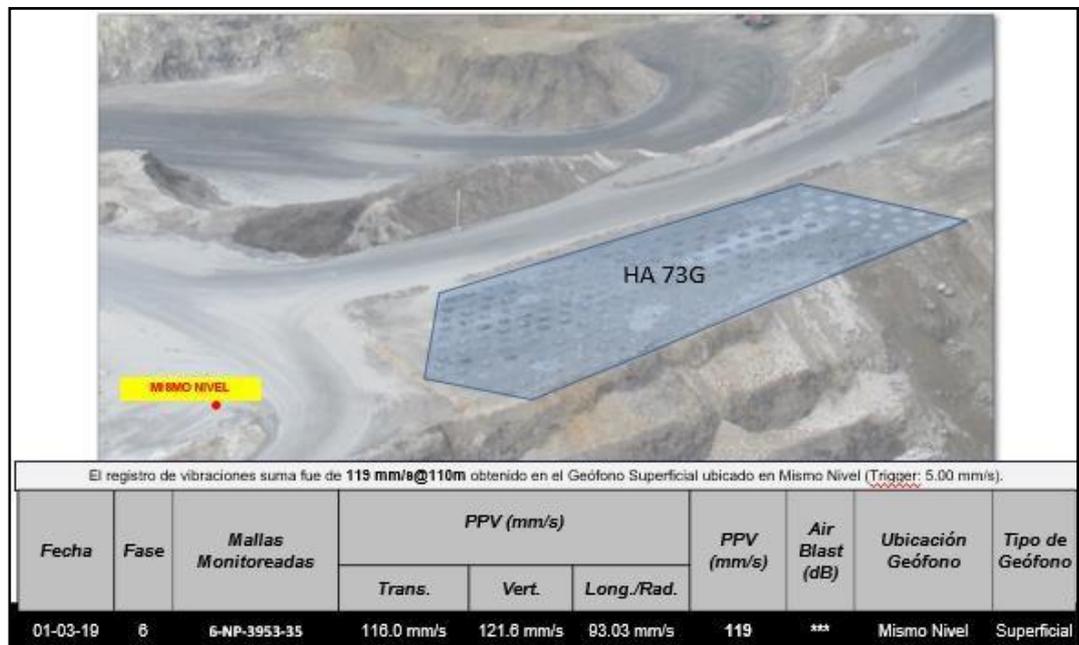
Fuente: Asistencia técnica Enaex

**Anexo 13. Isolíneas de voladura Proyecto 6-NP-3953-35**



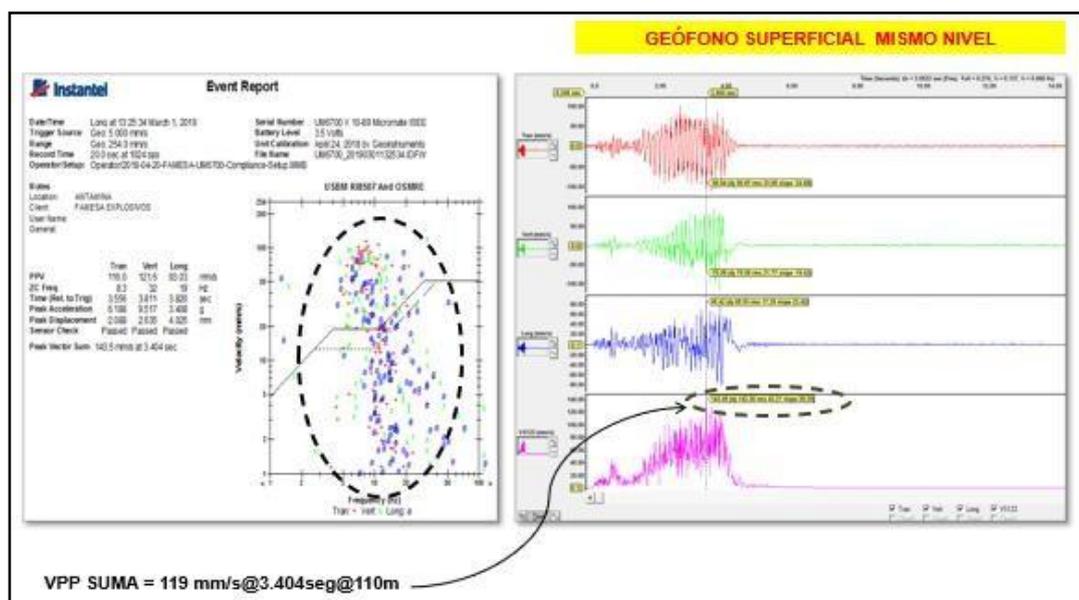
Fuente: Asistencia técnica Enaex

**Anexo 14. Punto de monitoreo e instalación de sismógrafo - Proyecto 6-NP-3953-35**



Fuente: Asistencia técnica Enaex

**Anexo 15. Reporte del registro del sismógrafo Instantel - Proyecto 6-NP-3953-35**



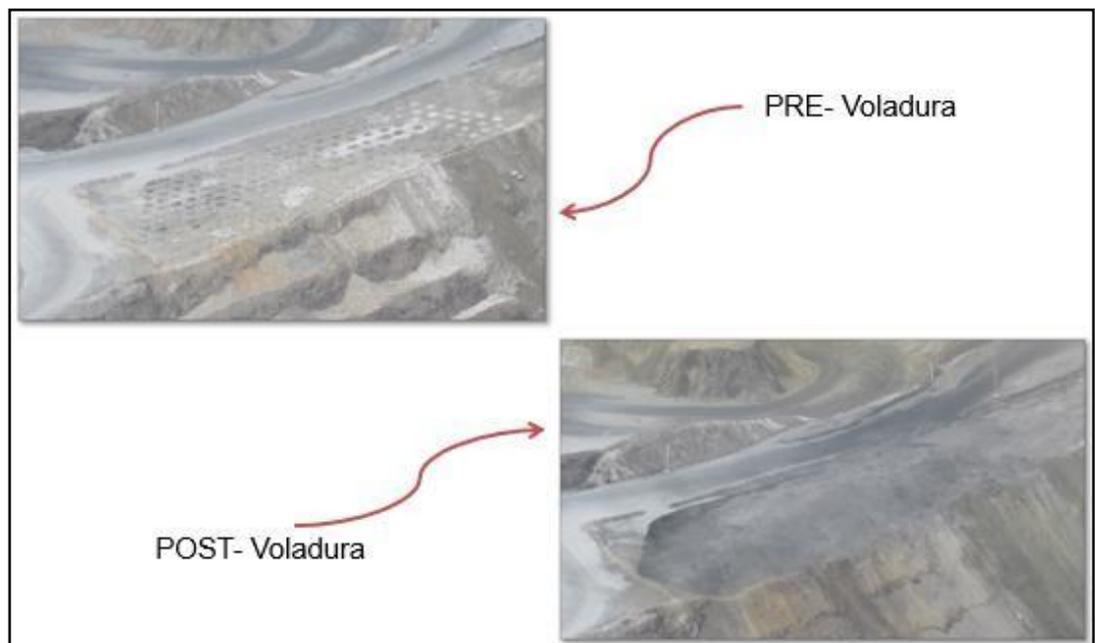
Fuente: Asistencia técnica Enaex

**Anexo 16. Grabación de salida de voladura con cámara de alta - Proyecto 6-NP-3953-35**



Fuente: Asistencia técnica Enaex

**Anexo 17. Fotografía de antes y después de la voladura - Proyecto 6-NP-3953-35**



Fuente: Asistencia técnica Enaex