UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

CAMBIO DE DETONADOR ELECTRÓNICO PARA LA DISMINUCIÓN DE CORTES EN LA LÍNEA DESCENDENTE EN TALADROS DE GRAN DIÁMETRO EN EXPLOTACIÓN MINERA DE COBRE A CIELO ABIERTO

TESIS

PRESENTADA POR:

BACH. JEAN PIERRE JUNIOR ZENTENO COLLADO

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

MOQUEGUA – PERÚ

2 018

006

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

FOLIO N° .....

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Según Resolución...de Comision Organizadora N°. 0588-2018-UNAM.....

El Jurado Dictaminador ha calificado la defensa de la tesis:

TITULADA:

Cambio de Detonador Electronico para la disminución de cortes en la línea descendente en Taladros de gran Diametro en explotación minera de cobre a cielo abierto

Asesor:.....Mg. Ing. Arquimedes León Vargas Luque

Asesor Externo:.....Ing. Jesús Ismith Cruces Herrera

Tesista: ...Bach. Jean Pierre Junior Zenteno Collado

Dictamina como...Aprobado.....por.....unanimidad.....

La defensa del tema de investigación con la nota: .....Quince..... (15)

Por lo que.....Sí.....opta el Grado de Ingeniero de Minas.

Siendo las....17:00.....horas, del.....03.....de.....Julio.....del año.....2018.....

se procede a firmar la presente.

Presidente del Jurado
ING. AGAPITO FLORES JUSTO

Primer Miembro
ING. JAVIER PEMULOTA ARANA

Segundo Miembro
MSc. [illegible] Cahuana Q.

Tesista
Jean Pierre Junior Zenteno Collado

#6

DEDICATORIA

A Dios por haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi madre Yacira, a mis abuelos y a las personas que hicieron posible mi formación y desarrollo como Profesional, que me han acompañado a lo largo de este camino, que ha sido tan difícil y tan gratificante a la vez.

Agradecimiento

A la Universidad Nacional de Moquegua y a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas por brindarme todos los conocimientos para realizar mis estudios.

Al MSc. Arquimides León Vargas Luque, por el apoyo brindado en la dirección de la presente investigación, por su amistad y compañerismo.

Al MSc. Jesus Smith Cruces Herrera, por el apoyo y asesoría para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A mis compañeros del área de perforación, disparos y servicios auxiliares de la unidad Cuajone, por su excelente ética profesional, valiosas aportaciones críticas en el desarrollo del presente documento, y sobre todo por su apreciable y valiosa amistad.

A los catedráticos de la Escuela de la Escuela de Ingeniería de Minas, por sus orientaciones, sugerencias atinadas y contribuir en mi formación académica.

.

Resumen

Se el presente trabajo denominado "*Cambio de detonador electrónico para la disminución de cortes en la línea descendente en taladros de gran diámetro en explotación minera de cobre a cielo abierto"*, se evaluó desde marzo del año 2016 hasta el mes de agosto del año 2017, las variables evaluadas fueron; número de cortes en línea descendente, cantidad de detonadores demandados por mes y la probabilidad de accidentes, todas ellas en un periodo de un mes.

Al finalizar la evaluación se concluye que con el cambio de detonador electrónico estándar (A) a detonador electrónico reforzado (B) se obtiene una disminución significativa de cortes de 20,67 unidades por mes a sólo 2,67 unidades de corte por mes en la línea descendente respectivamente en taladros de gran diámetro en la explotación minera de cobre a cielo abierto.

También se determinó que el cambio de detonador electrónico no influyó estadísticamente en una variación de la demanda de detonadores requeridos por mes, sin embargo, disminuye significativamente la probabilidad de que ocurran accidentes en el área de voladura de 0,41%, a sólo de 0,06% al mes, por lo que el impacto fue muy positivo. Finalmente se recomienda el uso de los detonadores electrónicos reforzados (B), ya que se obtuvo resultados favorables en el periodo de prueba.

Abstract

The present work called "Change of electronic detonator for the reduction of cuts in the descending line in large diameter drills in open pit copper mining", was evaluated from March 2016 until August 2017, the variables evaluated were: Number of cuts in descending line, number of triggers demanded per month and the probability of accidents, all in a period of one month.

At the end of the evaluation it is concluded that the change from standard electronic detonator (A) to reinforced electronic detonator (B) represents a significant reduction of cuts of 20.67 units per month to only 2.67 cutting units per month in the descending line respectively in large diameter drills in open-pit copper mining.

It was also determined that the change of electronic detonator did not statistically influence a variation in the demand of detonators required per month, however, it significantly decreases the probability of accidents occurring in the area of blasting of 0.41%, to only 0 , 06% per month, so the impact was very positive. Finally, the use of reinforced electronic detonators (B) is recommended, since favorable results were obtained in the test period.

CONTENIDO

Agradecimiento ..... **iii**

Resumen ..... **iv**

Abstract ..... **v**

INTRODUCCIÓN **12**

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA **14**

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA. **14**
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA. **19**
1.2.1. Interrogante General. 19
1.2.2. Interrogantes Específica. 20
1.3. JUSTIFICACIÓN. **20**
1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS. **21**
1.4.1. Objetivo General. 21
1.4.2. Objetivo Específico. 21
1.5. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS. **22**
1.5.1. Hipótesis General. 22
1.5.2. Hipótesis Específica. 22

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO **23**

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO **23**
2.1.1. A nivel Nacional: 23
2.1.2. A nivel Internacional: 25
2.2. BASES TEÓRICAS. **27**
2.2.1. Ubicación de proyecto. 28
2.2.2. Accesibilidad. 29
2.2.3. Clima. 30
2.2.4. Método de explotación. 31
2.3. GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO **32**
2.3.1. Génesis del yacimiento. 32
2.3.2. Geología Estructural Regional. 36
2.3.3. El Sistema de fallas Incapuquio. 36
2.3.4. Falla Micalaco 37
2.3.5. Falla Viña Blanca. 37
2.3.6. Falla Botiflaca 38
2.4. DISEÑO DE CARGA **39**
2.5. SISTEMAS DE INICIACIÓN EN VOLADURA. **40**
2.5.1. Sistema a Fuego 42
2.5.2. Cordón Detonante 43
2.5.3. Sistemas Eléctricos 44
2.5.4. Sistemas no eléctricos 46
2.5.5. Sistema electrónico 48
2.6. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS **50**

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO 60
3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN 60
3.1.1. UBICACIÓN POLÍTICA. 60
3.1.2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA. 60
3.2. TIPO Y DISEÑO 61
3.3. NIVEL DE INVESTIGACIÓN 62
3.4. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES 62
3.4.1. Variable independiente 62
3.4.2. Variable dependiente 62
3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA 63
3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS 63
3.7. VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS 63
3.8. MÉTODOS Y TÉCNICAS PARA LA PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS 64
3.8.1. Características técnicas detonadores electrónicos. 64
3.8.2. Mallas de perforación en fases de prueba. 65
3.8.3. Costos por detonador electrónico. 65
3.8.4. Equipo registrador. 65
3.8.5. Análisis Descriptivo. 67
3.8.6. Procesamiento de datos: 68
CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS 69
4.1. RESULTADOS 69
4.1.1. Cortes en línea descendente 69
4.1.2. Cantidad de detonadores requeridos por mes (unidades) 71
4.1.3. Probabilidad de accidentes por mes (%) 74
4.2. DISCUSIONES 76
4.2.1. Cortes en línea descendente (unidades) 76
4.2.2. Cantidad de detonadores requeridos por mes (unidades) 77
4.2.3. Probabilidad de accidentes por mes (%) 78
CONCLUSIONES 80
RECOMENDACIONES 82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 83
ANEXOS 86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estadística de accidentes fatales en el sector minero..... 15

Figura 2. Esquema de corte de línea descendente..... 18

Figura 3. Esquema de elongación en la línea descendente..... 19

Figura 4. Ubicación de la Unidad minera Cuajone..... 29

Figura 5. Diagrama de Flujo de la Operación Cuajone 31

Figura 6. Mapa Geológico Regional..... 35

Figura 7. Esquema de diseño de carga por taladro. 39

Figura 8: Sistema de iniciación a fuego 42

Figura 9: Esquema de aplicación del cordón detonante. 43

Figura 10: Características del cordón detonante..... 44

Figura 11: Esquema de aplicación del detonador eléctrico..... 45

Figura 12: Características del detonador eléctrico..... 46

Figura 13: Esquema de aplicación del tubo de choque..... 47

Figura 14: Características del tubo de un sistema de detonador no eléctrico.
..... 47

Figura 15: Características de un detonador electrónico..... 49

Figura 16: Esquema de aplicación del detonador electrónico. 50

Figura 17: Esquema un taladro cargado. 57

Figura 18. Equipo registrador. 66

Figura 19. Condiciones de funcionamiento del equipo registrador. 67

Figura 20. Caja y bigotes para cortes descendentes presentados en detonador estándar y detonador reforzado 70

Figura 21. Caja y bigotes para demanda de detonador estándar y detonador reforzado 72

Figura 22. Caja y bigotes para probabilidad de accidentes en detonador estándar y detonador reforzado 75

Figura 23: Diagrama de barras de cortes de línea descendente en unidades por mes. 77

Figura 24: Diagrama de barras para cantidad de detonadores requeridos por mes. 78

Figura 25: Diagrama de barras de probabilidad de accidentes por mes. . 79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ruta de acceso a la Unidad Minera Cuajone..... 29

Tabla 2 Distancias y vías de acceso a la operación 30

Tabla 3 Clasificación de explosivos y materiales relacionados..... 41

Tabla 4 Características técnicas de los detonadores electrónicos. 64

Tabla 5 Malla de perforación por fase de minado. 65

Tabla 6 Costo por detonador electrónico. 65

Tabla 7 Comparación de dos muestras independientes con la prueba t de Student. 68

Tabla 8 Cortes en línea descendente por cada 5000 detonadores del mes de marzo a agosto del año del 2016 y 2017 69

Tabla 9 Cantidad de detonadores demandados por mes, desde marzo a agosto del año del 2016 y 2017 71

Tabla 10 Probabilidad de accidentes por mes en porcentaje por presencia de cortes en línea descendente del mes de marzo a agosto del año del 2016 y 2017. 74

LISTA DE ABREVIATURAS

Km:	Kilómetros.
N - S :	Norte - Sur.
E - W :	Este - Oeste.
MA :	Millones de Años.
PETN:	Pentrita.
gr/m :	Gramos por metro.
m/s :	Metros por segundo.
cm :	centímetro.
mg/m :	Miligramo por metro.
AWG :	American Wire Gauge (clasificación de diámetros de origen estadounidense.
UTM :	Universal Transverse Mercator (sistema de coordenadas).
HMX:	High Melting Explosive.
N:	Newton.
dBL:	Sobrepresión.
LP:	Longitud de perforación.
LC:	Longitud de carga.
LT:	Longitud de taco.

INTRODUCCIÓN

El trabajo de investigación “Cambio de detonador electrónico para la disminución de cortes en la línea descendente en taladros de gran diámetro en explotación minera de cobre a cielo abierto” se inicia con la proyección a minimizar los cortes de la línea descendente generados en el proceso de carguío y tapado de taladros de producción en la unidad minera Cuajone, buscando en el mercado un producto con las características requeridas para las condiciones de la operación minera.

La base de datos que se genera mensualmente con el consumo de los detonadores electrónicos es el punto de partida para desarrollar la investigación y determinar que detonador electrónico es el idóneo para las condiciones de trabajo como el material usado en el taco y presencia de rocas colgadas en las paredes de los taladros.

En el primer capítulo se desarrolla la presentación del problema, justificación, objetivos e hipótesis de la investigación.

En el segundo capítulo se desarrolla la revisión de antecedentes, se describe las características geográficas donde se desarrolló el trabajo, la geología de la zona de estudio, los diferentes sistemas de iniciación y finalmente la definición de términos.

En el tercer capítulo se desarrolla la metodología que se aplicó para el trabajo de investigación, indicando las variables de estudio que en

este caso fueron como independiente dos tipos de detonadores uno estándar (A) y reforzado (B), también se detalla el desarrollo de la investigación cuantitativa de diseño experimental y presentación de resultados.

En el cuarto capítulo se describe los resultados por cada variable dependiente, para la investigación se consideró cortes en la línea descendente (unidades) buscando un resultado menor a 0.1%, cantidad de detonadores demandados por mes (unidades) y probabilidad de accidentes por mes (%) y se discute los resultados con otros trabajos de investigación. Finalmente, en los dos últimos capítulos se tiene las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I:

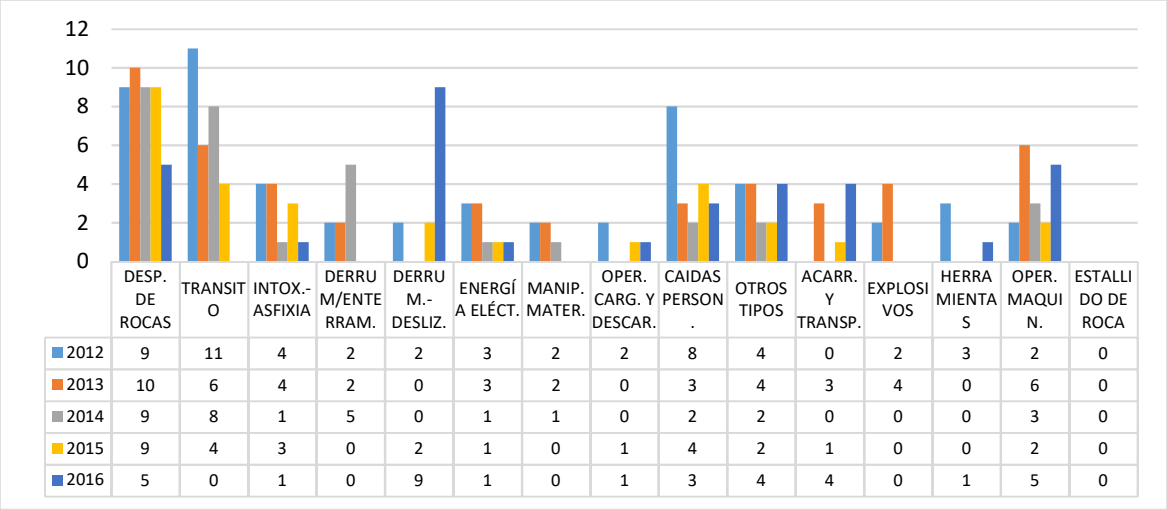
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.

La voladura de rocas es considerada un trabajo de alto riesgo, si bien su índice de frecuencia en relación con otros accidentes es menor, su índice de gravedad es por mucho mayor en comparación, casi siempre con consecuencias muy graves que afectan al trabajador; personas; equipos e instalaciones que se ubican en el lugar (ISEM, 2012).

Es entonces que las empresas mineras y sus áreas de perforación y voladura buscan realizar los ajustes necesarios que permitan en el corto plazo reducir los riesgos (detonaciones no planificadas con daños a la persona y propiedad) generados por el uso de explosivos en su ciclo de producción. El ministerio de Energía y Minas del Perú emite una estadística del periodo 2012 – 2016 en el cual se muestran las principales causas de accidentes fatales en el sector minero como lo muestra en la figura 1.

La alternativa de bajar el consumo de detonadores electrónicos o explosivos es la primera medida que se piensa en realizar, esto se traduce a reducir en forma significativa los volúmenes de material a volar, pero no es la opción más recomendada por el efecto que esta reducción podría tener en los planes de producción que se trazan las empresas mineras a nivel mundial. En una operación minera, un accidente puede generar en algunos casos hasta la paralización de las operaciones, afectando negativamente la imagen de la empresa, causando una debilidad en el valor de las acciones que ella mantiene en el mercado financiero.



	DESP. DE ROCAS	TRANSITO	INTOX.-ASFIXIA	DERRUM/ENTERRAM.	DERRUM.-DESLIZ.	ENERGÍA ELÉCT.	MANIP. MATER.	OPER. CARG. Y DESCAR.	CAIDAS PERSON.	OTROS TIPOS	ACARR. Y TRANSP.	EXPLOSIVOS	HERRAMIENTAS	OPER. MAQUIN.	ESTALLIDO DE ROCA
2012	9	11	4	2	2	3	2	2	8	4	0	2	3	2	0
2013	10	6	4	2	0	3	2	0	3	4	3	4	0	6	0
2014	9	8	1	5	0	1	1	0	2	2	0	0	0	3	0
2015	9	4	3	0	2	1	0	1	4	2	1	0	0	2	0
2016	5	0	1	0	9	1	0	1	3	4	4	0	1	5	0

*Figura 1. E*stadística de accidentes fatales en el sector minero.

Fuente: MINEM, 2016.

Actualmente existen alternativas de mejora tecnológica que permiten reducir los índices de riesgo y frecuencia en las áreas de perforación y voladura sin tener que considerar medidas que afecten

a los planes de producción, tal es el caso de tener un cambio de detonador electrónico para la disminución de cortes en la línea descendente en taladros de gran diámetro, el cual está preparado para soportar las condiciones agrestes del ámbito minero.

En minería metálica el uso de detonadores electrónicos es importante porque permite aprovechar al máximo los tiempos de detonación al tener una dispersión de tiempos menor a la de detonadores convencionales y flexibilidad de programación, es así que se busca usar la cantidad de cortes en la línea descendente por mes como herramienta para medir la eficacia de los nuevos detonadores electrónicos reforzados. (Huamán, 2010).

La unidad Cuajone ubicada en la región Moquegua busca disminuir la cantidad de cortes en la línea descendente en taladros de gran diámetro de producción en su operación como problemática a solucionar, en tal sentido y en base al análisis de antecedentes se evaluó la factibilidad técnica del cambio de detonador electrónico propuesto por una empresa especializada, en todas sus fases de minado actuales.

La unidad Cuajone viene utilizando en la actualidad un detonador electrónico estándar, con características de diseño que no soportan las condiciones de la operación, es por este motivo que se producen los cortes en la línea descendente en la etapa de carguío y tapado de taladros.

Dentro de las principales causas de los cortes en las líneas descendentes se encuentra la mala operación en el primado o cebado de taladros; caída de rocas colgadas en la pared del taladro; derrumbe del taladro por roca fracturada; material usado en el tapado con diámetro elevado. La principal incidencia de los cortes se presenta en la etapa de tapado de taladros, es decir el mayor número de cortes en la línea descendente se producen en la zona de taco del taladro. Para disminuir los cortes que se tiene, se propone el uso de un detonador electrónico reforzado (B), el cual cuenta con el diseño y características necesarias para poder soportar las condiciones de la operación.

- En la figura 2, se muestra una de las dos principales causas de cortes en líneas descendentes en taladros de gran diámetro de producción. Como se observa en el gráfico, el material usado para la conformación del taco (proceso de tapado), presenta un diámetro elevado, causante de golpes y cortes en la línea descendente que provocan daños a la estabilidad de la comunicación con el detonador electrónico, esto durante la caída del material de taco en un promedio de 5 m de altura dentro del taladro de producción.

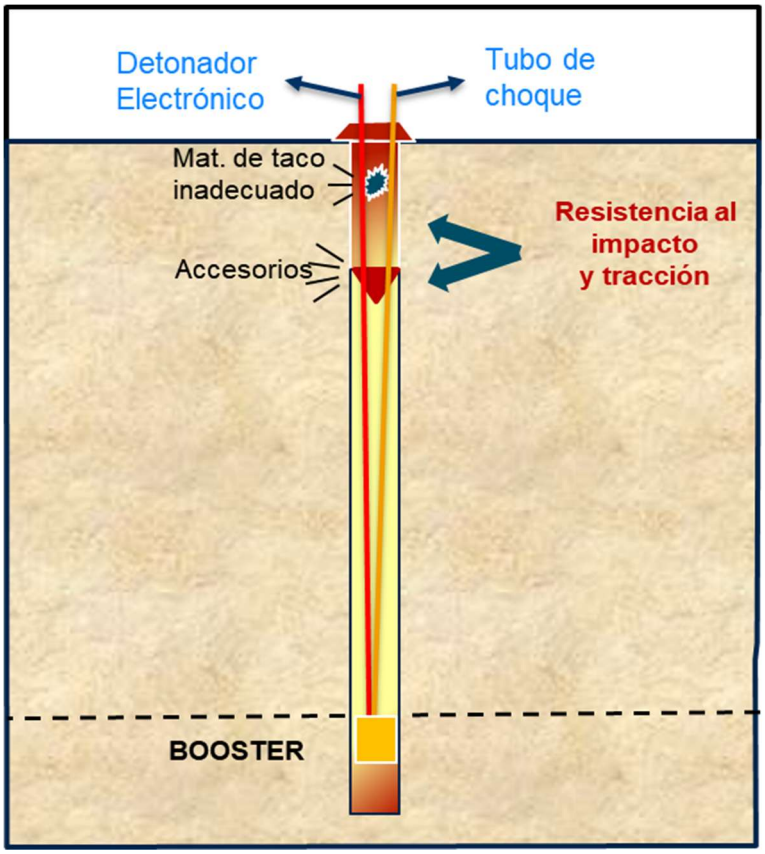


Figura 2. Esquema de corte de línea descendente.

Fuente: Mina Cuajone, 2016.

- En la figura 3, se muestra la segunda causa de cortes en líneas descendentes en taladros de gran diámetro de producción. Como se observa en el gráfico, la elongación de la línea descendente es una causante de la perdida de comunicación con el detonador electrónico, debido al vaciado de la mezcla explosiva que cae 16 m aproximadamente; la caída de rocas colgadas en las paredes del taladro; la formación de cavidades a lo largo del taladro, lo cual conlleva al desplazamiento del material en el interior del taladro y terminando en la elongación de la línea descendente.

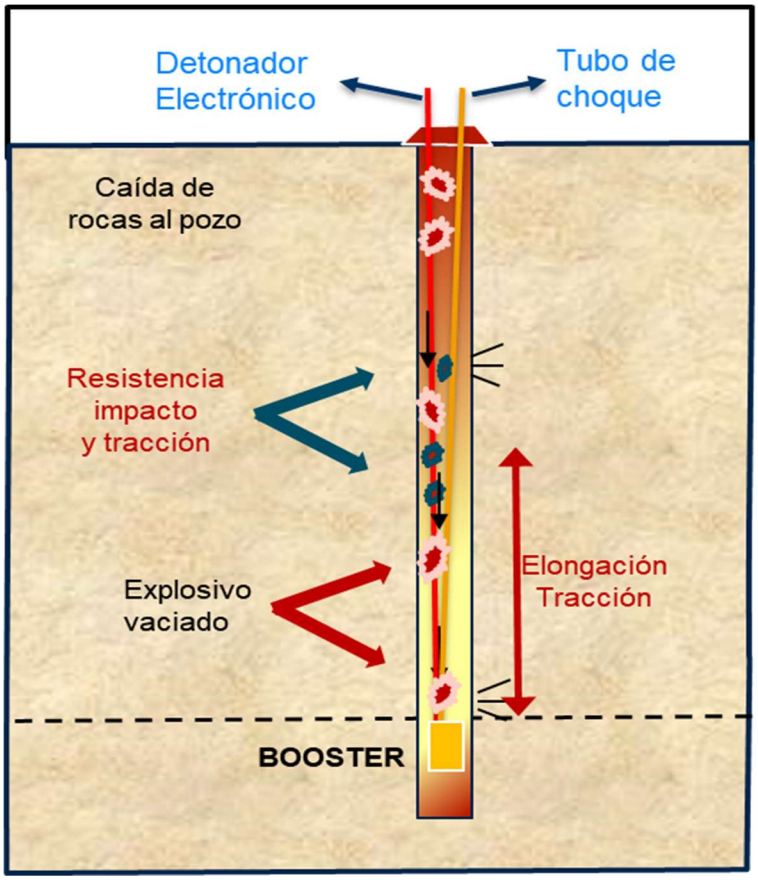


Figura 3. Esquema de elongación en la línea descendente.

Fuente: Mina Cuajone, 2016

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

1.2.1. Interrogante General.

¿Cómo influye el tipo de detonador electrónico, en la disminución de cortes en la línea descendente en taladros de gran diámetro en la explotación minera de cobre a cielo abierto?

1.2.2. Interrogantes Específica.

¿Qué hacer para disminuir los cortes en la línea descendente en taladros de gran diámetro en la explotación minera de cobre a cielo abierto?

1.3. JUSTIFICACIÓN.

El desarrollo de este trabajo expone la situación de la unidad minera Cuajone que utiliza detonadores electrónicos estándar (A), la cual busca disminuir los cortes en las líneas descendentes en taladros de gran diámetro de producción en el área perforación y voladura. Es más, la actividad que se desarrolla en el área perforación y voladura es el trabajo inicial en el ciclo de minado de la operación, de la cual dependen los trabajos que se derivan de ella.

Las bondades ofrecidas por los detonadores electrónicos dan pie a maximizar su efectividad, su tiempo de retardo programable; baja dispersión de tiempos; conexión independiente a la secuencia de detonación y comprobación antes del proceso de voladura e iniciación remota son algunos de las ventajas ofertadas por este tipo tecnología en la industria minera.

La implementación y aplicación de detonadores electrónicos reforzados (B), que proponen una serie de mejoras en resistencia a la

tensión; tracción; impacto; corte; abrasión; tiene como objetivo exponer la factibilidad en la disminución de cortes en la línea descendente, aplicando para ello el reemplazo del detonador electrónico estándar (A) por otro detonador electrónico reforzado (B), para lograr de esta manera que la unidad minera obtenga una disminución significativa en los cortes en la línea descendente en taladros de gran diámetro de producción, minimizando los riesgos asociados a la operación.

1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS.

1.4.1. Objetivo General.

Demostrar que con el cambio de detonador electrónico estándar (A) se tendrá una disminución favorable de los cortes en la línea descendente en taladros de gran diámetro en la explotación minera de cobre a cielo abierto.

1.4.2. Objetivo Específico.

Determinar la cantidad de cortes en la línea descendente en la explotación minera de cobre a cielo abierto, al realizar el cambio de detonador electrónico.

1.5. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS.

1.5.1. Hipótesis General.

La implementación del detonador electrónico reforzado (B), tiene una disminución favorable en la cantidad de cortes en la línea descendente en taladros de gran diámetro en la explotación minera de cobre a cielo abierto.

1.5.2. Hipótesis Específica.

El cambio de detonador electrónico, tiene una disminución favorable en los cortes de la línea descendente en taladros de gran diámetro en explotación minera de cobre a cielo abierto, Mejorando la eficiencia en el uso de detonadores.

CAPÍTULO II:

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

2.1.1. A nivel Nacional:

Huamán, B. (2010), Implementación de un nuevo sistema de iniciación electrónica en Perú - seguridad y versatilidad. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. p 102. La mayor ventaja de los detonadores electrónicos Hotshot, es su calidad de exactitud, precisión y flexibilidad de programación, a partir de esta base se deben construir las directrices para mejorar el proceso de extracción global de la minería, es decir, enmarcado en el concepto de voladura óptima, cuyo norte principal es conseguir excelentes resultados en esta operación, sin que ello signifique afectar el resto de las operaciones (carguío, transporte y chancado primario); constituyéndose en el objetivo principal al introducir la tecnología de los detonadores electrónicos Hotshot.

Huamán, B. (2010), Implementación de un nuevo sistema de iniciación electrónica en Perú - seguridad y versatilidad. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. p 105-106. La principal desventaja que rodea el empleo de los detonadores electrónicos en general, es el económico, pues hasta que no se llegue a una fabricación masiva los costos unitarios serán altos. Pero si se logra demostrar todos sus potenciales apuntando a los mejoramientos que se puedan realizar sobre los procesos que, si realmente aumentan los costos de extracción de los recursos mineros, su utilización se incrementará con la consiguiente estabilización y mejora de sus costos.

La implementación del detonador electrónico Hotshot y el sistema Smartshot en Perú está caminando a paso lento pero seguro, es así que en Antamina estamos a un 50% de utilización de este sistema siendo la intención de esta operación llegar al 100%.

Aguilar, M y Chilón, F (2017), Estimación de presiones dinámicas inducidas por voladura para definir distancias críticas para detonadores electrónicos Daveytronic en tajo la Quinua Yanacocha. (Tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte. p 79. A través del presente trabajo de investigación, se logró definir las distancias críticas para los detonadores Daveytronic, utilizando la información de las pruebas realizadas en el tajo La Quinua nivel 3228, para los taladros

de producción de 10 5/8'' usados en este tajo se halló que las distancias entre taladros para el diseño de malla deben estar en un rango de 1.6 a 4 metros de longitud dependiendo de la altura de carga, lo que representa las distancias críticas de operación segura para no afectar los detonadores por efecto de la presión dinámica.

2.1.2. A nivel Internacional:

Lepileo, P. (2012), Análisis de modos de falla en proceso de detonación electrónica. (Tesis de pregrado). Universidad de Chile. p 60 - 61. Finalmente, con los datos de las encuestas, se pudo relacionar a cada modo de falla con su frecuencia de aparición y su criticidad, luego se agrupó cada modo de falla por causa, y en función de la criticidad, la frecuencia y el nivel de la causa que la provoca, se pudo notar, mediante el uso de gráficos, que las causadas por una desconexión de cables son frecuentes, pero bastante poco críticas y fácilmente corregibles. Para evitar estas fallas, se sugiere instruir de mejor manera a los operarios para que realicen esta tarea con menos probabilidad de error.

Las fallas causadas por interferencia, son altamente probables de aparecer en el sistema, y su criticidad va de media a extrema. Para evitar estas fallas causadas por interferencia se requiere de un estudio más exhaustivo, como se mencionó, se deben medir las variables y encontrar la correlación entre ellas y la frecuencia de la falla y su

criticidad, para poder encontrar buenas medidas de mitigación de estas. En el intertanto se sugiere contar con un medidor de campo eléctrico y cuando este muestre un valor dentro de los márgenes de la guía de seguridad de Orica se debe intentar despejar la fuente o hacer que los que provocan esta interferencia, estén lo más perpendicularmente posible de los cables de la malla de tronadura.

Miller y Martin (2007), Una visión de los beneficios entregados utilizando detonadores electrónicos de retardo en la industria de la cantera. Servicios de Orica para Cantera. p 14. Los detonadores electrónicos se comercializaron en la industria australiana de canteras desde finales de la década de 1990. Hasta ahora, la utilización de detonadores electrónicos dentro de esta industria ha sido relativamente modesta, y tradicionalmente solo se usa cuando el operador de cantera enfrenta opciones de voladura limitadas a menudo debido a limitaciones ambientales o de producción. Esto a pesar de una importante realización de los beneficios y la aceptación de los detonadores dentro de la industria minera.

Banda y Rhodes (2005), Los detonadores electrónicos de retardo son una solución única para los problemas de minería pertinentes. La revista del Instituto Sudafricano de Minería y Metalurgia. p 4. La mina Mufulira se convirtió en la primera mina en Zambia en convertir el 100% de sus operaciones al uso de Smartdets,

eliminando el tubo de descarga no eléctrico tradicional. Esto se debió a que la administración de la mina estaba preparada para ver más allá del costo unitario de un producto y estaba lista para ver escenarios con más amplia de la rentabilidad y el aumento de la productividad.

2.2. BASES TEÓRICAS.

En la actualidad la tecnología en explosivos ha logrado alcanzar niveles que años atrás no se pensaba. Como principal testigo de ello es el desarrollo de los detonadores electrónicos de retardo programables y sus sistemas de control e iniciación. El adecuado trabajo de estos sistemas dependerá de la identificación de mejoras por parte de las empresas mineras, llevando a las empresas de servicio poder brindar calidad y confianza ya que se entrega una herramienta segura y moderna. (Huamán, 2010).

La mayor precisión que ofrecen las voladuras electrónicas, ha llevado a las empresas mineras de gran escala a consumir esta tecnología, abarcando casi el total del mercado. (Aguilar & Chilón Ayay, 2017).

Empleando el cambio de detonador electrónico, disminuirá la cantidad de cortes en la línea descendente en taladros de gran diámetro en el área de Perforación, Disparos y Servicios Auxiliares de la unidad minera Cuajone

2.2.1. Ubicación de proyecto.

La Unidad Minera Cuajone se encuentra ubicada en el flanco Occidental de los Andes del Sur del Perú entre los 2,950 y 3,880 m.s.n.m., aproximadamente a 45 Km al NE de la cuidad de Moquegua, Distrito de Torata, Provincia de Mariscal Nieto, Departamento de Moquegua.

El tajo en explotación se encuentra emplazado en la ladera Sur de la Quebrada Torata y cortada en la parte central por la quebrada Chuntacala con una dirección E-O.

El área de la unidad minera Cuajone está representada por las coordenadas UTM

317, 685 E – **8 117, 350** N

319, 515 E – **8 115, 815** N

Zona 19, Banda K (Datum WGS-84) las cuales pertenecen a la carta topográfica Nacional 35-u correspondientes al Cuadrángulo de Moquegua (INGEMET, 1979).



Figura 4. Ubicación de la Unidad minera Cuajone

Fuente: Mina Cuajone, 2016.

2.2.2. Accesibilidad.

La ciudad de Moquegua cuenta con un pequeño aeropuerto al que no llegan aviones comerciales por lo que se puede acceder desde la ciudad de Lima vía aérea a las ciudades de Arequipa y Tacna y desde allí por carretera a la ciudad de Moquegua. La accesibilidad a Moquegua por vía terrestre se da como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1
Ruta de acceso a la Unidad Minera Cuajone

Recorrido	Distancia	Transporte
Lima – Moquegua	1, 146 km.	Vía aérea – Terrestre
Arequipa – Moquegua	227 km.	Vía Terrestre
Tacna – Moquegua	160 km.	Vía Terrestre

Fuente: Mina Cuajone, 2016.

Para acceder a la operación minera desde Moquegua se sigue siguiente ruta:

Tabla 2
Distancias y vías de acceso a la operación

Recorrido	Distancia	Transporte
Moquegua – Desv. Torata	20 km.	Vía Terrestre
Desv. Torata – Villa Botiflaca	25 km.	Vía Terrestre

Fuente: Mina Cuajone, 2016.

2.2.3. Clima.

La zona de la unidad minera y alrededores presenta un clima desértico con temperaturas bastante marcadas durante el día y la noche, con presencia de corrientes de vientos helados por estar cerca de la Cordillera Occidental. La temporada de lluvias se da entre los meses de Diciembre – Marzo, acompañadas de una neblina densa, la cual repercute a la visibilidad de la operación. Las temporadas más secas del año se presentan entre Abril –Noviembre, meses en los que durante la noche se presenta un clima frio y vientos helados, durante este período las temperaturas suelen bordear los 10°C. Generalmente todos los meses del año son muy soleados, haciéndose notar las estaciones frías durante la noche. (MINCETUR, 2006).

2.2.4. Método de explotación.

Las operaciones en la mina Cuajone realizan con el método de explotación a Cielo Abierto (Open Pit). En dos turnos de 12 horas por día, con un área de explotación aproximadamente de 2.7 Km de longitud (N - S) y 2.5 Km de ancho (E - W), con una profundidad de 900 metros.

El tajo cuenta con bancos operacionales de 15 m. de altura cada uno, siendo el nivel superior de 3850 y el nivel inferior de 2950 m.s.n.m. El ángulo inter-rampas es de 38°- 49° y una gradiente de 10%.

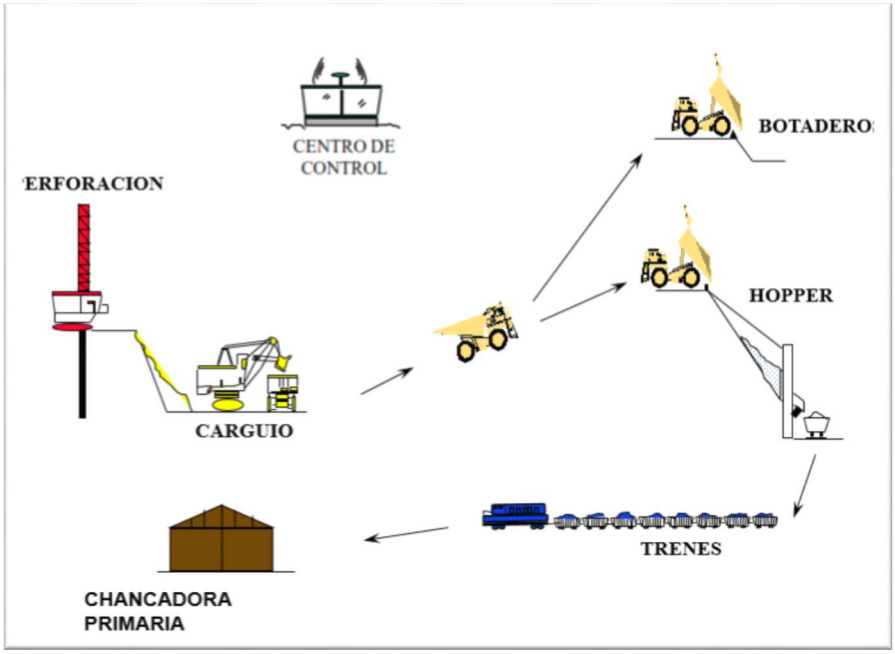


Figura 5. Diagrama de Flujo de la Operación Cuajone

Fuente: Mina Cuajone, 2016.

2.3. GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.3.1. Génesis del yacimiento.

Los yacimientos minerales ubicados al Norte de Chile y al sur del Perú, son principalmente el resultado del avance de la Placa Continental Sudamericana sobre la Placa Subductora del Pacífico Oriental, con características de Pórfidos de Cobre en su gran mayoría.

La Placa del Pacífico subductora a la Placa Continental generó una gran energía por rozamiento que permitió el derretimiento de rocas con altos contenidos de cobre. La presencia de energía, causo la apertura de zonas débiles en la corteza (Fisuras, fallas, etc.) por los cuales se desplazaron los magmas, fluidos y gases a grandes presiones y temperaturas, causando que se depositen soluciones hidrotermales en zonas propicias para las alteraciones.

El yacimiento de Cuajone se encuentra emplazado dentro de la “Subprovincia Cuprífera del Pacífico” en el Flanco Occidental de los Andes; Cerro Verde, Quellaveco y Toquepala son depósitos de gran envergadura alineados en una dirección Noroeste.

En la zona de Cuajone afloran rocas antiguas que pertenecen al Grupo Toquepala, cuyas edades se estiman entre 100 y 34 MA. El basamento más antiguo que se constituye en Cuajone está representada por una andesita que localmente se le llama Andesita

Basáltica que alcanza una potencia que excede los 800.00 m. Se la relaciona como varios flujos andesíticos pertenecientes posiblemente a la Formación Paralaque, últimamente cobra mayor firmeza la teoría que relaciona esta roca como un intrusivo somero perteneciente al Batolito Andino del Sur que se relaciona con la Diorita que se tiene en el yacimiento Toquepala. Sobreyaciendo a la Andesita Basáltica, posteriormente se depositó la secuencia volcánica perteneciente al Volcánico Quellaveco.

Tanto la Andesita Basáltica como el Volcánico Quellaveco que pertenecen al Grupo Toquepala, los cuales se habrían depositado entre 100 y 70 MA (Fines del Cretáceo – comienzos del Terciario).

Entre 70 y 65 MA. Se tiene la intrusión de un cuerpo Dioríticо-Granodiorítico elongado con una dirección predominante hacia el Norte que aflora al Oeste de la mina.

Posteriormente, entre 60 y 50 MA. La intrusión de la Latita Porfirítica se da en 3 eventos o pulsos magmáticos, destacando el Primer Pulso Intrusivo que causo un gran fracturamiento y alteración en la roca intrusiva como en la roca encajonante que genero las condiciones apropiadas para la mineralización de Cuajone. El Segundo Pulso Intrusivo presenta una baja importancia porque mineralizó las rocas presentes en una menor cantidad. El Tercer Pulso Intrusivo pierde relevancia puesto que casi no aporto mineral.

Con el cuerpo Mineralizado ya formado, se inició un largo proceso de erosión con un tiempo estimado de 50 MA y 24 MA aproximadamente.

Una vez formado el Cuerpo Mineralizado de Cuajone, se presentó un largo Proceso Erosivo que duró entre 50 y 24 MA aproximadamente. El proceso de erosión afecto a gran parte del Grupo Toquepala e inclusive rocas pertenecientes al Volcánico Quellaveco. Generado todo este proceso, el nivel freático descendió de tal forma que permitió lixiviar parcialmente el cuerpo, oxidar y enriquecer en el lapso de tiempo.

Se reanuda la actividad magmática aproximadamente entre 23 y 27 MA, depositándose una secuencia de rocas de la formación Huaylillas, iniciándose un nuevo proceso de erosión que trajo la formación de paleo valles que posterior en su fase final fue rellenado con aglomerados y conglomerados.

Se presenta un tercer proceso erosivo entre 17 y 14 MA, en lo que actualmente se conoce como las quebedas Chuntacala y torata. En esta se llega a exponer una superficie de rocas perteneciente al Grupo Toquepala. Por el descenso del nivel freático también se da un proceso de lixiviación, oxidación y enriquecimiento del sector, pero en menor magnitud.

Posteriormente entre 14 y 9 MA. Se reanudó nuevamente la actividad magmática con periodos erosivos intraformacionales que permitieron la deposición de los volcánicos de la Formación Chuntacala.

Se presenta un cuarto periodo erosivo entre los últimos 9MA, este proceso da como resultado la topografía del yacimiento Cuajone antes de iniciar su proceso de minado. Las principales manifestaciones son los valles formados por las quebradas Torata, Cocotea y Chuntacala (Concha, 1999) .

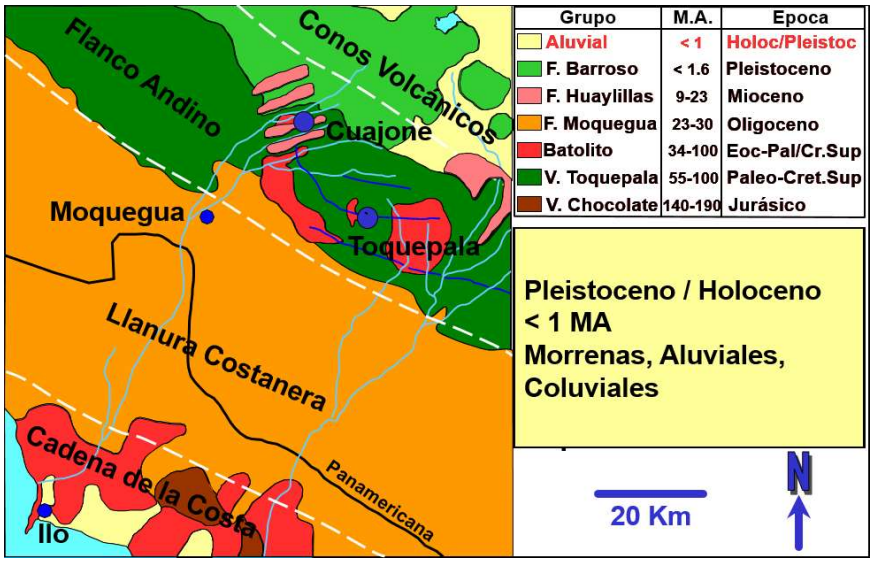


Figura 6. Mapa Geológico Regional.

Fuente: Mina Cuajone, 2015

2.3.2. Geología Estructural Regional.

En la fosa Oceánica del Pacifico se puede apreciar la tendencia estructural del Sur del Perú, que en su mayoría tiene una orientación Noroeste Sureste.

Así mismo, se puede apreciar el Batolito de la Costa, la Depresión Tectónica formada entre los cerros de la Cadena Costanera y el Pié del Frente Andino, el Flanco Occidental de los Andes y las grandes Fallas Regionales como es el caso de Incapuquio, Micalaco, Viña Blanca y Botiflaca (Concha, 1999).

2.3.3. El Sistema de fallas Incapuquio.

Identificadas cerca al límite de la frontera de Chile, Pasan por el departamento de Tacna y gran parte del departamento de Moquegua. Mantienen un rumbo preferencial entre 290° y 310° con una distancia aproximada de 140 Km de largo. Tienen hasta un Km de ancho compuesta de rocas alteradas y trituradas y un buzamiento subvertical.

De acuerdo a Wilson y García, las fallas son de tipo transcurrente y han tenido lugar durante el Terciario Inferior (Concha, 1999).

2.3.4. Falla Micalaco

Identificada en las inmediaciones de la mina Toquepala con un afloramiento de 21 Km de longitud y llega a tener potencias de hasta 500 m. en zonas de cizalla entre el pueblo de Micalaco y la quebrada Cortadera.

Rellenada principalmente por cuarzo, turmalina, sulfuros, diques, brechas, rocas trituradas, ligera alteración hidrotermal, material fracturado y material cizallado. Presenta un buzamiento subvertical.

En la zona Sur de la mina, esta estructura limita la mineralización con un rumbo de 290° (Concha, 1999).

2.3.5. Falla Viña Blanca.

Aflora aproximadamente 5.5 Km en la Riolita Porfirítica a 3 Km al Este Sureste de la mina Cuajone. Por las características presentes como no atravesar las rocas volcánicas postminerales de la Formación Huaylillas, indica que no ha tenido reactivaciones posteriores su ocurrencia que se dio probablemente en el Terciario Inferior.

Presenta una dirección predominante de 290º y un buzamiento preferencialmente subvertical. Tiene una variación de potencia de hasta 2 m y en conjunto pueden llegar hasta 20 m.

Se presenta como un conjunto de estructuras paralelas y sinuosas. Rocas fracturadas, rocas cizalladas, brechas y fragmentos de rocas de diferente y variada composición son parte del relleno acumulado en esta zona (Concha, 1999).

2.3.6. Falla Botiflaca.

Aflora aproximadamente a 2.5 Km al Suroeste de la mina Cuajone en forma sinuosa con una longitud de proximadamente 20 Km cruzando las quebradas de Cocotea y Torata.

Tiene un rumbo generalizado de 280º a 300º y presenta un buzamiento subvertical. La potencia llega hasta 40 m. (Manrique y Plazoles 1974) y está compuesta por roca fuertemente fracturada, brechas heterolíticas compuestos por clastos y fragmentos subangulares a subredondeados.

Atraviesa rocas pertenecientes al Grupo Toquepala y por posibles reactivaciones posteriores también atraviesan rocas postminerales volcánicas pertenecientes a la Formación Huaylillas (Concha, 1999).

2.4. DISEÑO DE CARGA

Los diseños de carga están compuestos por diferentes secciones de material acorde con la necesidad y características del macizo rocoso a volar. Entre sus partes se encuentra el taco; cámara de aire; zona de esponjamiento y mezcla explosiva. En la unidad minera Cuajone se usa una mezcla explosiva gasificada.

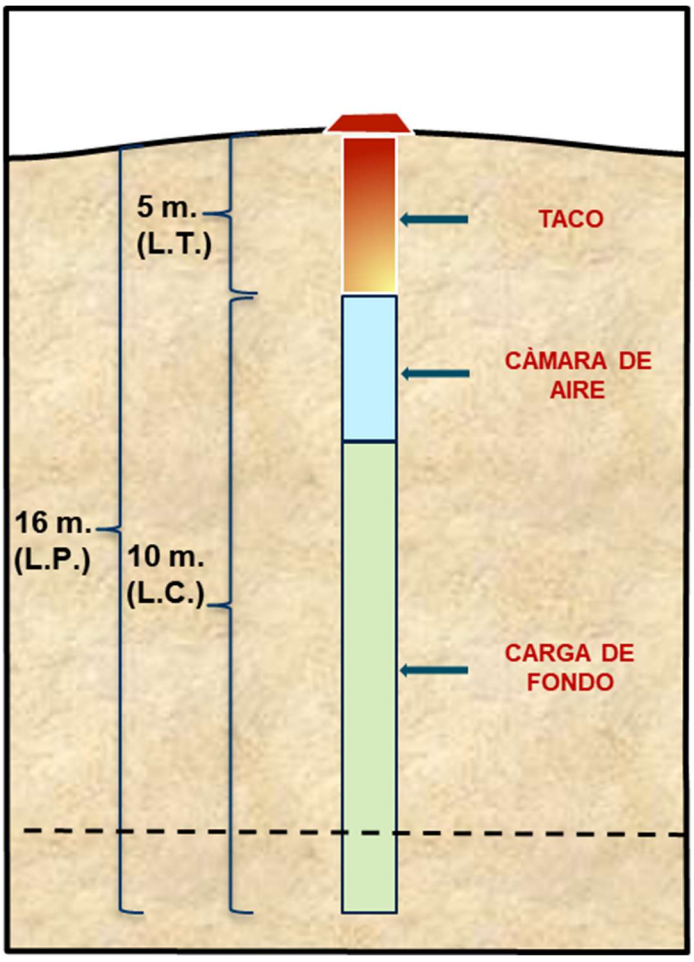


Figura 7. Esquema de diseño de carga por taladro.

Fuente: Mina Cuajone, 2016.

2.5. SISTEMAS DE INICIACIÓN EN VOLADURA.

Los sistemas de iniciación son dispositivos que transmiten una señal a cada taladro con un tiempo específico para iniciar una detonación.

El éxito de una voladura radica en una apropiada selección del sistema de iniciación, siendo este un trabajo critico ya que no solo controla la secuencia de iniciación de cada taladro, sino también la cantidad de vibración; fragmentación; sobrerotura y la violencia con la que ocurre la voladura. Adicional al criterio de selección se añade el costo que generará obtener buenos resultados.(López, 2006).

Según el DS N° 010-2017-IN que aprueba el Reglamento de la Ley N ° 30299 , Ley de armas de fuego , municiones , explosivos , productos pirotécnicos y materiales relacionados de uso civil, donde clasifica los detonadores electrónicos como materiales relacionados como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3
Clasificación de explosivos y materiales relacionados

	CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
EXPLOSIVOS	Explosivos primarios o iniciadores	Aquellos que por su naturaleza altamente sensible al calor, al choque, a la fricción o a otras fuentes primarias energéticas se utilizan para transmitir la detonación a los explosivos secundarios. *Ejemplo: Azida de plomo, estifnato de plomo, fulminato de mercurio, entre otros.*
	Explosivos secundarios o rompedores	Aquellos explosivos relativamente insensibles en comparación con los explosivos primarios, que por lo general se activan mediante estos últimos, reforzados o no por cargas multiplicadoras o suplementarias. *Ejemplo: Dinamita, PETN, TNT, RDX, HMX, etc.; agentes de voladura como anfo, anfo pesado, entre otros.*
MATERIALES RELACIONADOS	Conexos o accesorios de voladura	Artículos u objetos que contienen cargas explosivas o no explosivas y que son utilizados para iniciar o ayudar a iniciar la detonación de un explosivo. *Ejemplos: Detonadores o fulminantes, mechas de seguridad,* *conectores, detonadores no eléctricos, cordón detonante, entre otros.*

	Insumos	Sustancias químicas con características técnicas destinadas a la fabricación de explosivos primarios o secundarios o aquellos que por tratamiento físico o químico pueden convertirse en explosivos pero que no tienen naturaleza explosiva. *Ejemplo: Nitrato de amonio que cuente hasta con 0,2% de sustancias combustibles, entre otros.*

***Fuente**:* MININTER, 2017

2.5.1. Sistema a Fuego

Sistema usado aún en pequeñas operaciones que recién inician, voladura secundaria, pruebas de laboratorio, donde se busca aplicar métodos económicos. El presente ha sido reemplazado por sistemas más avanzados con una mayor posibilidad de precisión y seguridad en la operación.

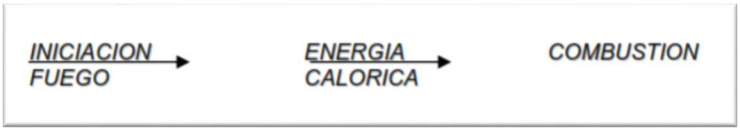


Figura 8: Sistema de iniciación a fuego

Fuente: López, (2006)

2.5.2. Cordón Detonante

Para iniciar el cordón detonante se requiere un detonador N° 6, siendo relativamente sensible. El cordón tiene una reacción muy violenta con una velocidad de detonación cerca de 7400 m/s.

Los cordones están constituidos en el núcleo central por explosivo (PETN) recubierto de fibras sintéticas y cubierta exterior de plástico de diverso color. En el mercado se puede encontrar diversos tipos de cordón en gr/m.

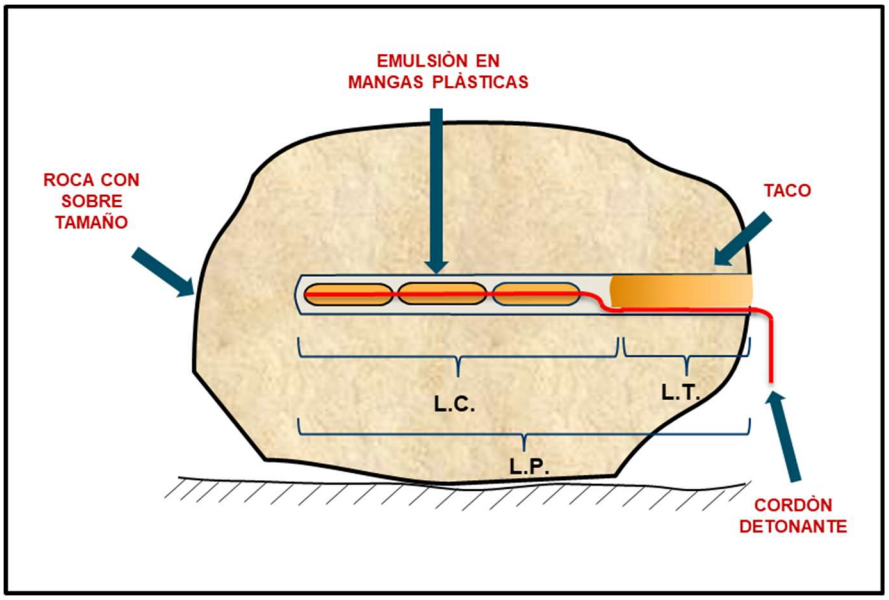


Figura 9: Esquema de aplicación del cordón detonante.

***Fuente**: Elaboración Propia.*

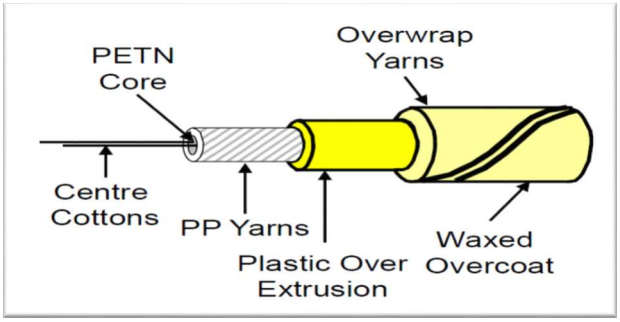


Figura 10: Características del cordón detonante.

***Fuente**:* ESSEEM, s. f.

Para asegurar la detonación efectiva del cordón en superficie debemos tomar en cuenta mantener ángulos rectos en las conexiones; una distancia mayor a 20 cm cuando se tenga cordones paralelos; de haber conectores de retardo y cordón paralelo se debe tener una distancia mínima de 1 m; el inicio debe estar en la misma dirección del cordón detonante.(López, 2006).

2.5.3. Sistemas Eléctricos

En este sistema se cuentan con detonadores eléctricos instantáneos; de retardo y Sísmico. Las variadas gamas de detonadores eléctricos superan ampliamente las desventajas de los detonadores no eléctricos, es decir se pueden iniciar de manera simultánea y verificar el amarre correcto al medir la resistencia antes de la iniciación. Estos detonadores presentan como principal desventaja la posible iniciación por efecto de rayos o corrientes inducidas (relámpagos, transmisiones de radio).

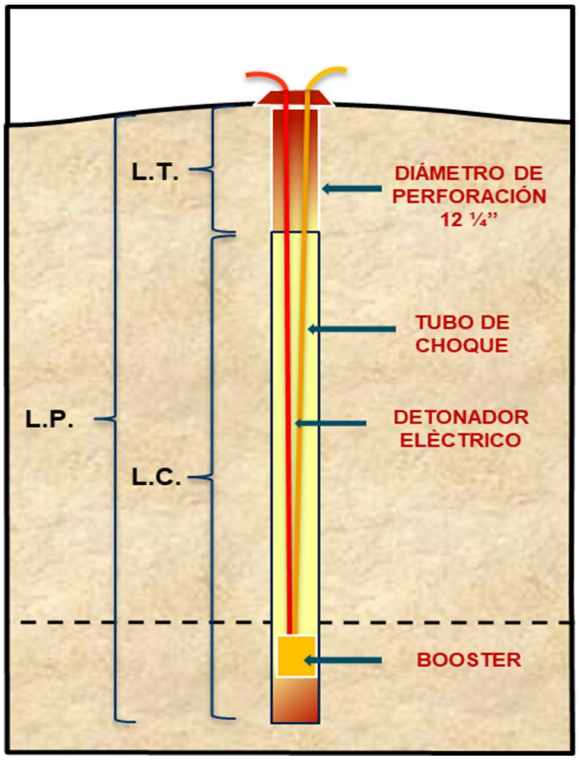


Figura 11: Esquema de aplicación del detonador eléctrico.

***Fuente**: Elaboración Propia.*

La necesidad de mayor exactitud y menor dispersión de las capsulas con que funcionan, llevan a elegir este sistema sobre los no eléctricos.

La intolerancia a tiros fallidos y la iniciación confiable son la principal razón para elegir un sistema de iniciación eléctrica. El sistema está constituido por una capsula de aluminio o cobre; carga explosiva primaria y una secundaria; elemento de retardo con un tiempo de combustión especifico y un elemento inflamador eléctrico o pirotécnico.

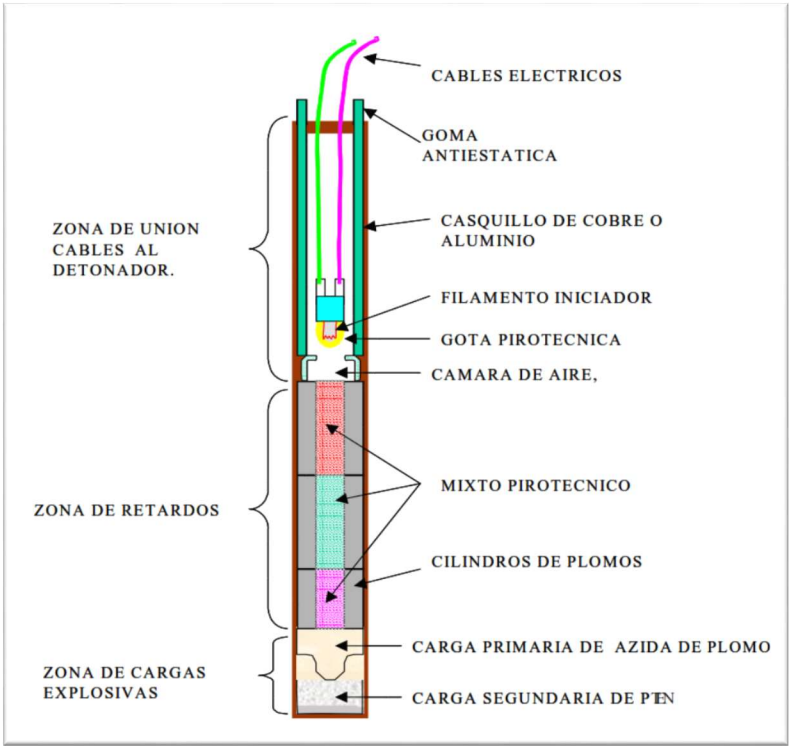


Figura 12: Características del detonador eléctrico

Fuente: López, (2006)

2.5.4. Sistemas no eléctricos

Sistema compuesto por un tubo de plástico en cuyo interior tiene una película de explosivo delgada de aproximadamente 20 mg/m, este sistema tiene la característica de emitir una onda de choque que viaja por el tubo y se transmite al detonador. Tiene una reacción poco violenta, relativamente silenciosa y no interrumpe al explosivo ni al taco.

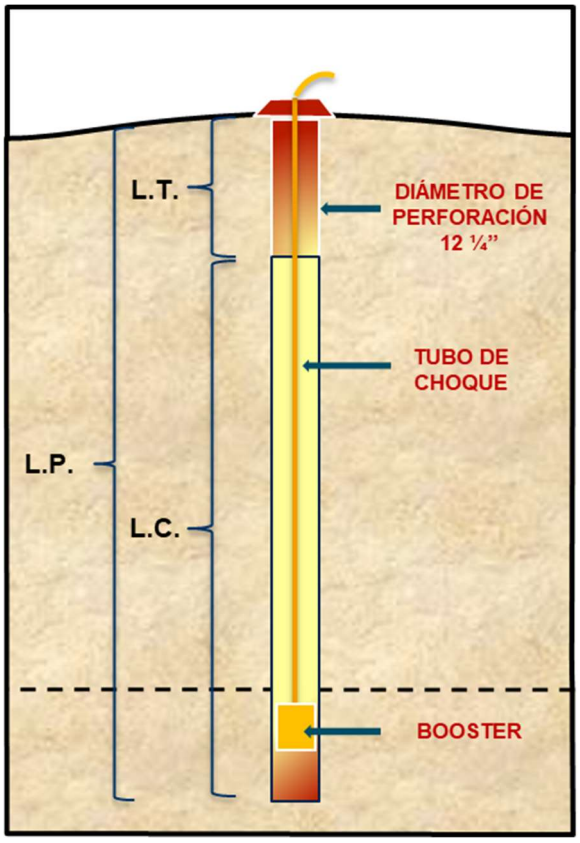


Figura 13: Esquema de aplicación del tubo de choque.

***Fuente**: Elaboración Propia.*

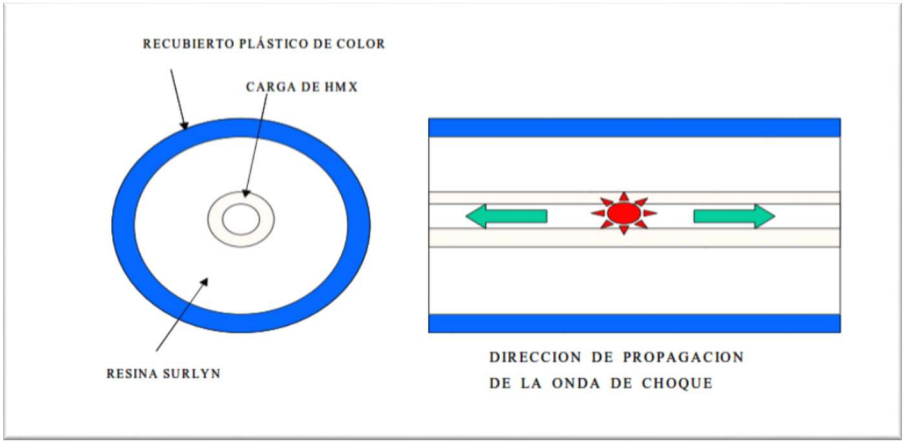


Figura 14: Características del tubo de un sistema de detonador no eléctrico.

Fuente: López, (2006).

El desarrollo de la tecnología de retardo en un detonador no eléctrico se basa en un retardo de plomo, estos elementos de retardo se obtienen de un tubo de plomo cuyo relleno con un tipo mixto de pirotécnico. La varilla trefilada es sometida a estiramientos hasta alcanzar un diámetro compatible con el diámetro del detonador, los retardos van a ser respectivos a las necesidades y cortados en cuestión a requerimiento.

Algunos detalles importantes que llevan al uso de esta tecnología es:

- No se inicia la carga explosiva al quemar el tubo.
- El sistema no inicia por golpes.
- El tubo puede soportar una elongación de hasta 5 veces su longitud.
- Señal que se propaga por el tubo es silenciosa.
- Conexión rápida y sencilla.
- A pesar de nudos y quiebres, no pierde propiedades de iniciación.
- Se obtienen diagramas flexibles.

2.5.5. Sistema electrónico

En las últimas décadas insistir en la precisión de los detonadores existentes es una necesidad para mejor los procesos de voladura y mejorar el control de vibraciones.

Los detonadores electrónicos contienen un circuito integrado en un chip que es el que proporciona el tiempo específico de retado, reemplazando al retardo pirotécnico tradicional. Un reloj digital (oscilador de cuarzo) integrado al circuito brinda la precisión en un rango de milisegundos a diferencia de los detonadores convencionales que su retardo se relacionaba estrictamente con los rangos en milisegundos. A mediados de los años 80 fabricantes iniciaron el proceso de desarrollo de esta tecnología que brinda un mayor control en el proceso de fragmentación, vibración y proyección.

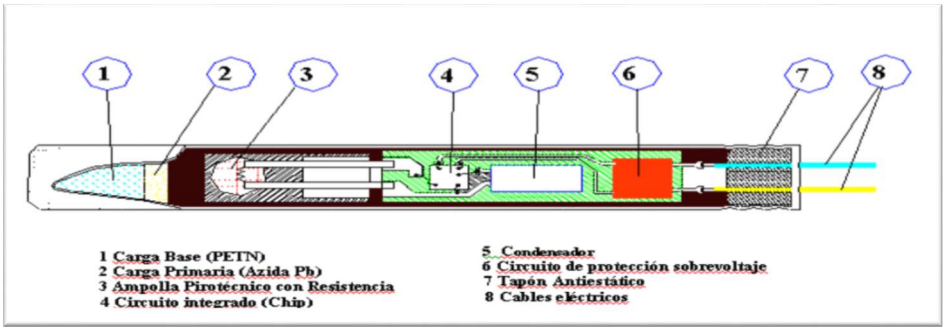


Figura 15: Características de un detonador electrónico

Fuente: López, (2006).

La flexibilidad en los tiempos de programación en los detonadores son una gran ventaja sobre los detonadores convencionales, estos ofrecen rangos de 1 milisegundo hasta 15 segundos que se admiten como pre-programación con una exactitud del orden de 0.1% del intervalo programado.

El sistema electrónico añade ventajas que superan a sus contendientes, tal es el caso de no poder explotar sin códigos de

activación únicos; recibir energía de iniciación y código de quema desde el punto de control; no son afectados por tormentas, frecuencias de radio y energías estáticas; cuentan con protecciones frente a sobre tensiones.

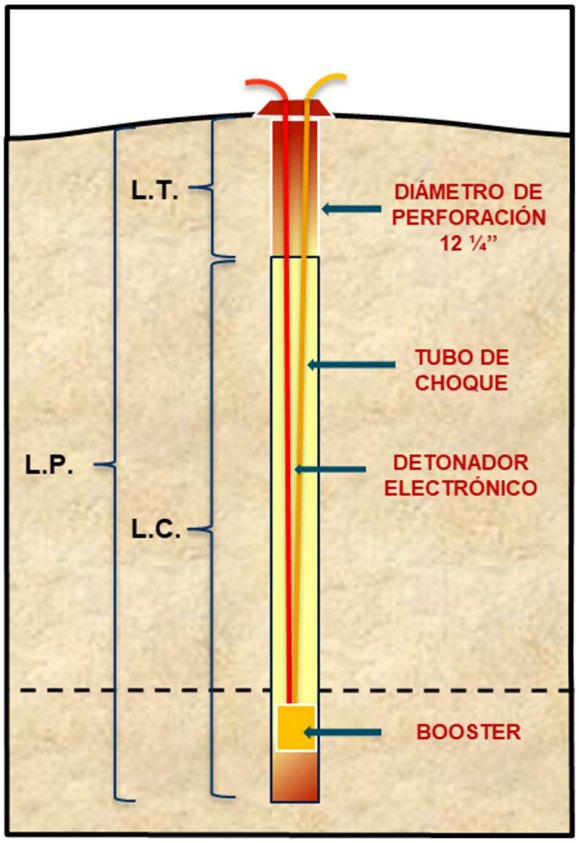


Figura 16: Esquema de aplicación del detonador electrónico.

***Fuente**: Elaboración Propia.*

2.6. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.

Para mejor comprensión de la presente investigación se consideró los términos más importantes.

a. **Detonación:** Es un proceso físico-químico caracterizado por su gran velocidad de reacción y por la formación de gran cantidad de productos gaseosos a elevada temperatura, que adquieren una gran fuerza expansiva (que se traduce en presión sobre el área circundante).

En los explosivos detonantes la velocidad de las primeras moléculas gasificadas es tan grande que no ceden su calor por conductividad a la zona inalterada de la carga, sino que los 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 a 7 000 m/s según la composición del explosivo y sus condiciones de iniciación. (EXSA, 2008)..

b. **Detonador Electrónico:** En general consisten de una unidad electrónica y un detonador eléctrico instantáneo. Se distingue un circuito integrado o microchip, que constituye el corazón del detonador, un condensador para almacenar energías y un circuito de seguridad conectados a los hilos que sirven de protección frente a diversas formas de sobrecargas eléctricas.

El propio microchip posee circuitos de seguridad internos. La otra unidad es un detonador eléctrico instantáneo ya explicado en la sección “Sistema Eléctrico”, en la cual la gota inflamadora (3) para la

iniciación de la carga primaria (2) está especialmente diseñada para proporcionar un tiempo de iniciación pequeño con la mínima dispersión. (López, 2006).

En ellos el conjunto temporizador convencional (resistencia - retardo) Se sustituye por elementos electrónicos y micro chips muy rápidos y precisos que proporcionan mucho mayor control sobre los intervalos de tiempo entre tiro y tiro.

El momento de inflamación del puente se regula estrechamente mediante un pequeño circuito temporizador electrónico instalado dentro del propio detonador, el mismo que al recibir un impulso eléctrico codificado del explosor, lo procesa y deriva hasta un condensador, que después lo descarga hacia el puente. Son muy precisos y altamente resistentes a la influencia de perturbaciones eléctricas extrañas.

Maniobrados con explosores programables conforman los sistemas de iniciación eléctrica más versátiles y de mayor campo de aplicación, especialmente para voladuras complicadas, demoliciones en áreas restringidas y grandes explotaciones mineras. (EXSA, 2008)

c. **Línea Descendente:** Las líneas descendentes son los cables conectados a la capsula. Normalmente, estos cables están hechos de cobre, hierro o aluminio y siempre están cubiertos con un aislamiento de plástico. Los alambres de las capsulas vienen en diferentes

longitudes y están codificados por colores. Las capsulas que provienen del fabricante están cortocircuitadas por un trozo de papel de aluminio que conecta los extremos de ambos cables de las capsulas. Esta lámina se llama SHUNT y ofrece cierta protección contra el tapón accidentalmente disparado por una corriente parásita. La derivación no se debe quitar de los cables hasta que la capsula esté conectada al circuito de voladura. (National Park Service, 1999).

Los alambres del detonador (Leg wires), de longitud entre 1,20 a 6,50 m (48” a 255”) según la especificación, para trabajos especiales como los de prospección sismográfica estos alambres conductores pueden tener hasta más de 30 m de longitud. Normalmente son de cobre o hierro estañado recubierto por material plástico, delgado, entre 0,5 y 0,6 mm (22 a 24 AWG). Modelables son resistentes entre 0,5 a 0,08 Ω/m (cobre) y entre 0,32 a 0,50 Ω/m (hierro). (EXSA, 2008).

En pozos de gran diámetro y de largo superior a 15 metros, las líneas descendentes deben tener una mayor resistencia tensil como asimismo al corte o cizalle, (López, 2006).

d. **Corte en línea descendente:** Es la perdida de comunicación del detonador electrónico causada por una serie de factores que generan un daño físico a la línea descendente, tal es el caso de golpes; cortes; elongación; etc.

La marcación de lugares donde se perforarán pozos, debe

realizarse con estacas de madera, evitando el uso de piedras, porque durante la operación de tapado de pozos pueden ser arrastradas hacia el interior de ellos, provocando cortes en las líneas descendentes, (López, 2006).

Una limpieza adecuada en pisos de bancos, para eliminar piedras de mayor tamaño, que pueden caer dentro del pozo durante el carguío o tapado, cortando líneas descendentes, (López, 2006).

e. **Minería a Cielo Abierto:** La minería a cielo abierto consiste en extraer minerales/materiales económicamente valiosos (por ejemplo, oro, plata, cobre, plomo, cinc, uranio, carbón, etc.) mediante la excavación de pozos o tajos inmensos en la superficie de la tierra, en lugar de la construcción de galerías o túneles.

Las minas a cielo abierto modernas pueden medir de 1,5 km a 3 km de largo y de ancho y, ocasionalmente, pueden tener más de 600 metros de profundidad. La mayoría de los minerales metálicos se encuentran naturalmente, ya sea en vetas de elevada concentración, o en depósitos ampliamente diseminados, de menor concentración. Esto es lo que llamamos minerales en alta ley o en baja ley. (Moran, 2013).

f. **Sistema de Iniciación:** Los sistemas de iniciación son dispositivos que permiten transferir una señal a cada pozo en un tiempo determinado para iniciar la detonación. (López, 2006).

g. **Espaciamiento y Espaciamiento Efectivo:** El espaciamiento para un pozo de tronadura se refiere a la dimensión lineal entre pozos de tronadura adyacentes que forman una fila, y se mide usualmente paralelo a la cara libre. El término usualmente se refiere al espaciamiento de la perforación. El término espaciamiento efectivo se refiere a la dimensión lineal entre pozos que detonan sucesivamente, y toma en consideración la dirección de la cara libre. (López, 2006).

h. **Combustión:** Puede definirse como tal a toda reacción química capaz de desprender calor pudiendo o no, ser percibida por nuestros sentidos, y que presenta un tiempo de reacción bastante lento, (EXSA, 2008).

i. **Booster:** Alto explosivo utilizado para mejorar la detonación de la columna explosiva (aumentar la velocidad de detonación). Por lo general se utilizan explosivos de alta velocidad de detonación, como el Booster de pentolita, (Hinostroza, 2014).

j. **Taco:** Es el material inerte que va encima de la carga explosiva con la finalidad de confinar la energía; cuando el taco es menor al rango que se menciona 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; taladros con agua requieren más taco que los taladros secos, (Hinostroza, 2014).

k. **Taladro:** Cavidad cilíndrica como consecuencia de una perforación en la cual, se deposita el explosivo de acuerdo a un diseño previo, (Hinostroza, 2014).

l. **Explosivo:** Es toda sustancia sólida o líquida que, al recibir un estimulante adecuado, en un infinitésimo de tiempo, se convierte en otras sustancias más estables, generalmente gaseosas; acompañados de una liberación de calor y altas presiones, (Hinostroza, 2014).

m. **Macizo rocoso:** Es el conjunto de los bloques de matriz rocosa y de las discontinuidades, (Hinostroza, 2014).

n. **Malla:** Es la forma geométrica en la que se disponen los taladros de una voladura, considerando básicamente la relación burden y espaciamiento, (Hinostroza, 2014).

o. **Carguío:** Una de las etapas que forma parte del proceso de explotación a tajo abierto. Se refiere específicamente a la carga de material mineralizado del yacimiento. El carguío se realiza en las bermas de carguío, las que están especialmente diseñadas para esta actividad, (Hinostroza, 2014).

p. **Longitud de Perforación**: La longitud de taladro tiene marcada influencia en el diseño total de la voladura y es factor determinante en el diámetro, burden y espaciado. Es la suma de altura de banco más la sobreperforación necesaria por debajo del nivel o razante del piso para garantizar su buena rotura y evitar que queden lomos o resaltos (toes), que afectan al trabajo del equipo de limpieza y deben ser eliminados por rotura secundaria.

q. **Longitud de Carga:** Es la parte activa del taladro de voladura, también denominada “longitud de carga” donde se produce la reacción explosiva

y la presión inicial de los gases contra las paredes del taladro. Es importante la distribución de explosivo a lo largo del taladro, según las circunstancias o condiciones de la roca. Usualmente comprende de 1/2 a 2/3 de la longitud total y puede ser continua o segmentada. Así pueden emplearse cargas sólo al fondo, cargas hasta media columna, cargas a columna completa o cargas segmentadas (espaciadas, alternadas o Deck charges) según los requerimientos incluso de cada taladro de una voladura. (EXSA, 2008).

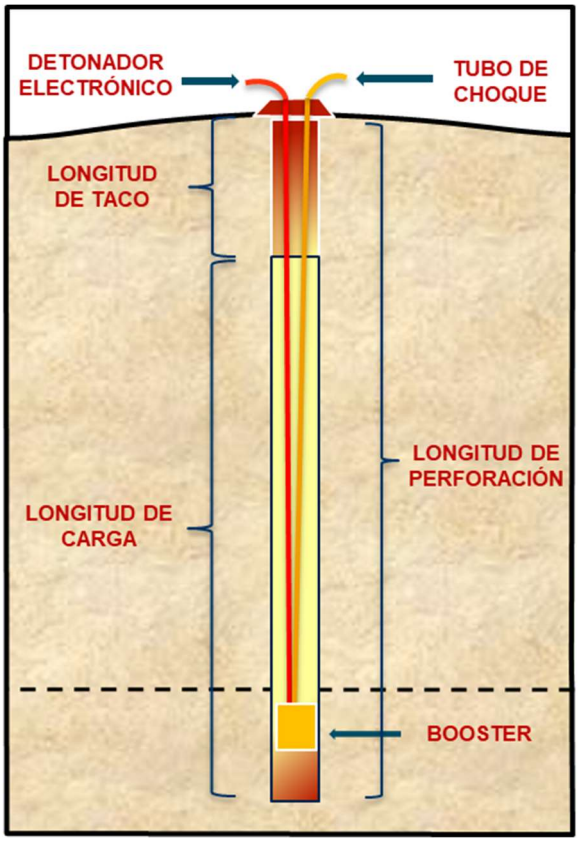


Figura 17: Esquema un taladro cargado.

***Fuente**: Elaboración Propia.*

r. **Longitud de Taco:** Normalmente el taladro no se llena en su parte superior o collar, la que se rellena con material inerte que tiene la función de retener a los gases generados durante la detonación, sólo durante fracciones de segundo, suficientes para evitar que estos gases fuguen como un soplo por la boca del taladro y más bien trabajen en la fragmentación y desplazamiento de la roca en toda la longitud de la columna de carga explosiva. En la práctica su longitud usual es de 1/3 del largo total del taladro.

   Si se tiene en cuenta al burden y resistencia de la roca, el taco variará entre T = 0,7 B para material muy competente, como granito homogéneo, o en un radio de taco o burden que puede aproximarse a 1, es decir: T = B para material incompetente con fisuras y fracturas abiertas. (EXSA, 2008).

s. **Deck:** Introduciendo un “air deck” en cada tiro que esté enfrente de una cara del banco, prorrateando la cantidad de explosivo de estos tiros en los demás. Usando la ecuación de Holmberg & Persson, se verá que lo anterior reducirá el nivel de vibración en la cara del banco de 1750 mm/s a 1100 mm/s, reduciendo 5 dBL en el nivel de “sobrepresión”. La introducción del “air deck” debe hacerse sin introducir cambios en el burden y espaciamiento de los tiros de primera fila.

   Disparos realizados en tronadura completas utilizando “air decks” igual a un 50% en todos los pozos de primera fila, mostraron que los niveles de “sobrepresión” fueron reducidos de 132 dBL a 127 dBL, lo cual

concordó con la reducción esperada para los niveles de vibración calculados. Dicha reducción se logró aumentando el tamaño de las tronaduras a través del incremento del número de filas. Sin embargo, es preciso hacer notar que para aminorar la “sobrepresión” se requirió la completa eliminación de la eyección de tacos. (López, 2006). Deck es la cámara de aire o espacio vació generado entre el taco y la carga explosiva, esto con diferentes objetivos de aplicación. Tiro es también conocido como taladro en el Perú.

t. **Emulsión:** Explosivo elaborado en base a una "emulsión agua en aceite". Se fabrica con una solución saturada de nitrato y una fase de aceite mineral. Está normalmente sensibilizada por burbujas de gas finamente dispersas (después de la adición de un agente gasificador en el collar del pozo de tronadura), o por adición de micro esferas de vidrio (usualmente durante la fabricación de la emulsión). Antes de la adición de los sensibilizantes, las emulsiones son normalmente clasificadas como agentes oxidantes, e incapaces de detonar. Las emulsiones pueden ser balanceadas en oxígeno o pueden tener un balance de oxígeno positivo. (López, 2006). La emulsión con sus agentes químicos ya mezclados, son vaciados desde la base del taladro, denominado a esta como carga de fondo; puesto que se ubica en el fondo del taladro.

CAPÍTULO III:

MARCO METODOLÓGICO

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

Empresa Southern Peru Copper Corporation – Unidad Minera Cuajone – Moquegua

3.1.1. UBICACIÓN POLÍTICA.

La Unidad Minera Cuajone se encuentra ubicada en el flanco Occidental de los Andes del Sur del Perú entre los 2,950 y 3,880 m.s.n.m., aproximadamente a 45 Km al NE de la cuidad de Moquegua, Distrito de Torata, Provincia de Mariscal Nieto, Departamento de Moquegua.

3.1.2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA.

El área de la Unidad Minera Cuajone está representada por las coordenadas UTM

317, 685 E – **8 117, 350** N

319, 515 E – **8 115, 815** N

3.2. TIPO Y DISEÑO

El tipo de investigación es cuantitativa, diseño tipo experimental, para el presente trabajo de investigación se usará dos tipos de detonadores electrónicos.

Para efectos de contrastación de la hipótesis, la investigación adoptó un diseño pre experimental, porque el grupo experimental estaba conformado previamente (Hernández, Fernández y Baptista, 2006). Entre los diseños pre experimentales, se adoptó el modelo con pre prueba – post prueba. Este diseño se identifica con el siguiente esquema:

GE O1 X O2

Dónde:

GE : Grupo Experimental

O1 : Pre test

X : Tipo de detonador electrónico

O2 : Post test

3.3. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Experimental-Aplicativo porque responde a las preguntas: ¿qué cambios y modificaciones se han producido?, ¿qué mejoras se han logrado?, ¿Cuál es la eficiencia del nuevo sistema?, etc.

En este nivel se aplica un nuevo sistema, modelo, tratamiento, programa, método o técnicas para mejorar y corregir la situación problemática, que ha dado origen al estudio de investigación. (Alfaro, 2012).

3.4. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.4.1. Variable independiente

Detonador electrónico Estándar A (Testigo).

Detonador electrónico reforzado B (Nuevo).

3.4.2. Variable dependiente

Cortes en línea descendente.

Cantidad de detonadores requeridos por mes (unidades).

Probabilidad de accidentes por mes (%).

3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población estudiada fueron dos tipos de detonadores electrónicos (Detonador electrónico Estándar A y Detonador electrónico reforzado B) usados en la unidad minera Cuajone.

Para la investigación se observó a la población total de detonadores usados en el periodo de la investigación, y luego ella se infirió 5000 unidades de detonadores electrónicos, es decir, se tomó el promedio mensual de consumo de detonadores electrónicos de cada 5000 unidades.

3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS

La técnica empleada fue el registro de la base de datos de los informes mensuales donde se especificó el N° de cortes en línea descendente en un mes, la cantidad de detonadores requeridos por mes en unidades. La probabilidad de accidentes por mes (%) se infirió a partir de los datos anteriores.

3.7. VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS

La validación de los datos se realizó con análisis de varianza a un 95% de confianza.

3.8. MÉTODOS Y TÉCNICAS PARA LA PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

3.8.1. Características técnicas detonadores electrónicos.

El presente cuadro muestra las características técnicas de los detonadores electrónicos sometidos a las pruebas en campo, reflejando una amplia superioridad el detonador electrónico reforzado.

Tabla 4
Características técnicas de los detonadores electrónicos.

PRODUCTO	Cable	Resistencia a la						
		Tensión	Tracción	Impacto	Corte	Abrasión	Agua	Elongación
	Color	(Kg)	(N)	(cm)	(cm)	(cycles)	(Bar)	(%)
DETONADOR STANDAR	Rojo	31.25	377.5	Bajo	Bajo	Bajo	10	57.25
DETONADOR REFORZADO	Verde	62.5	702.5	116.25	47.5	495	3.75	16.25

***Fuente**: Elaboración Propia.*

3.8.2. Mallas de perforación en fases de prueba.

Tabla 5
Malla de perforación por fase de minado.

FASE	*TIPO DE MALLA*	*ESPACIAMIENTO (m)*	*BURDEN (m)*	*Diámetro (plg)*
8Sur	*Triángulo Equilátero*	*10 - 11*	*8.69*	*12 ¼*
6B2	*Triángulo Equilátero*	*8 - 10*	*6.95*	*12 ¼*
6A	*Triángulo Equilátero*	*6 - 8*	*5.21*	*12 ¼*
5	*Triángulo Equilátero*	*6 - 8*	*5.21*	*12 ¼*

***Fuente**: Elaboración Propia*

3.8.3. Costos por detonador electrónico.

Tabla 6
Costo por detonador electrónico.

	DETONADOR	*CANTIDAD*	*UNIDAD DE MEDIDA*	*COSTO UNITARIO S/.*	*COSTO TOTAL S/.*
1	*Detonador electrónico Estándar (A)*	*5000*	*Und.*	*100.00*	*500,000.00*
2	*Detonador electrónico Reforzado (B)*	*5000*	*Und.*	*110.00*	*550,000.00*

***Fuente**: Elaboración Propia*

3.8.4. Equipo registrador.

El registrador es un dispositivo portátil que permite registrar el ID de los detonadores distribuidos en el proyecto de voladura. Este equipo consta de un menú que permite registrar los detonadores conectados a

él, permite identificar los problemas potenciales operativos que puede presentar un detonador electrónico, emitiendo un diagnóstico.

La verificación de los detonadores se hace a un voltaje menor al que se requiere para la detonación, y así evitar activaciones no deseadas durante el proceso.

El registrador actúa como un dispositivo de prueba para comprobar el estado de los detonadores en cada una de las etapas de la voladura, detectando una serie de problemas que se pueden dar en la conexión registrador - detonador.



Figura 18. Equipo registrador.

Fuente: Mina Cuajone, 2016.

Un registrador tiene la capacidad de almacenar o guardar información de 200 detonadores electrónicos. El equipo opera a un voltaje de 6 Volts. Para que haya una confiable comunicación entre los detonadores y el registrador cada detonador electrónico debe recibir 4 Volts.

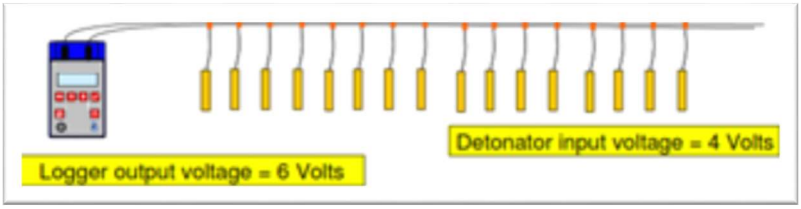


Figura 19. Condiciones de funcionamiento del equipo registrador.

Fuente: Mina Cuajone, 2016.

3.8.5. Análisis Descriptivo.

Para el contraste de la hipótesis, se realizó una prueba estadística de comparación de muestras independientes.

Prueba t de Student para la comparación de dos muestras independientes.

Para realizar la prueba de t-student primero se verificó que las muestras provengan de una distribución normal, para lo cual se usará el estadístico de W de Shapiro-Wilk a un con 95% de confianza. Se considera que los datos proceden de una distribución normal, y que el diseño es completamente aleatorizado.

Tabla 7
Comparación de dos muestras independientes con la prueba t de Student.

Detonador electrónico Estándar (A)	Detonador electrónico reforzado (B)
$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$
S_1^2	S_2^2
n_1	n_2

***Fuente**: Elaboración Propia.*

Donde:

$\bar{x}_1$= Media

S_1^2= Varianza

n_1= Muestra

3.8.6. Procesamiento de datos:

Los resultados se muestran en tablas y gráficos que sirven para la presentación de los datos procesados.

Para el tratamiento estadístico de la información obtenida, se aplicó las técnicas de la estadística descriptiva e inferencial.

Los datos fueron procesados aplicando el software Statgraphics y MS Excel.

CAPÍTULO IV:

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Cortes en línea descendente

Tabla 8
Cortes en línea descendente por cada 5000 detonadores del mes de marzo a agosto del año del 2016 y 2017

PERIODO	Detonador electrónico Estándar (A)	Detonador electrónico reforzado (B)
Mes 1	40	4
Mes 2	20	0
Mes 3	11	6
Mes 4	13	3
Mes 5	11	1
Mes 6	29	2

***Fuente**: Elaboración Propia*

Los datos obtenidos son de las bases de datos obtenidos entre el periodo de tiempo de marzo del 2016 a agosto del 2017, en dicho periodo se observa que el detonador electrónico A tiene un máximo de 40 y un mínimo de 11 cortes en línea descendente (por cada 5000 detonadores), sin embargo, el detonador electrónico reforzado B sólo

tiene un máximo de 6 cortes en línea descendente.

A. Comparación de cortes descendentes presentados en detonador estándar y detonador reforzado.

Este procedimiento compara dos muestras independientes calculando las estadísticas para cada muestra, y ejecuta varias pruebas para determinar si hay diferencias estadísticamente significativas entre las dos muestras.

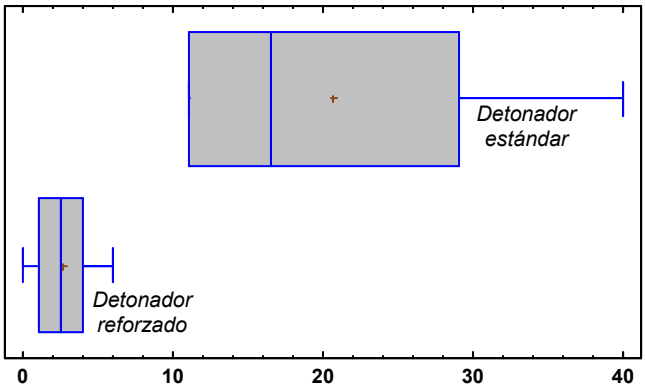


Figura 20. Caja y bigotes para cortes descendentes presentados en detonador estándar y detonador reforzado

Fuente: Elaboración propia

(a) Comparación de Medias

A un 95,0% de confianza para la media de cortes en línea descendente del detonador estándar es de 20,67 ± 12,32 (8,35; 32,99) y para detonador reforzado es de 2,67 ± 2,27 (0,40; 4,94) a un 95% de confianza y bajo la condición que las medias son iguales los valores son 18,0 ± 10,86 (7,14; 28,86).

(b) Prueba t para comparar medias

H_0: media1 = media2

H_1: media1 <> media2

Suponiendo que las varianzas son iguales el valor t es igual a 3,69 y el valor-P es igual a 0,0041556 por lo que se rechaza la H_0 para alfa de 0,05. La diferencia entre las medias, el cual se extiende desde 7,14 hasta 28,86. Y en dicho intervalo no contiene el valor 0, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de ambas muestras, con un nivel de confianza del 95,0%. Puesto que el valor-P calculado es menor que 0,05, se rechaza la H0.

4.1.2. Cantidad de detonadores requeridos por mes (unidades)

Tabla 9
Cantidad de detonadores demandados por mes, desde marzo a agosto del año del 2016 y 2017

PERIODO	Detonador electrónico Estándar (A)	Detonador electrónico reforzado (B)
Mes 1	4046	4719
Mes 2	5255	3040
Mes 3	5846	4382
Mes 4	2711	5071
Mes 5	3145	5042
Mes 6	4961	4864

***Fuente**: Elaboración Propia.*

Los datos obtenidos son de la base de datos obtenidos entre el periodo de tiempo de marzo del 2016 a agosto del 2017, en dicho periodo se observa la demanda del detonador electrónico A tiene un máximo de 5846 y un mínimo de 2711 unidades demandadas (por cada mes), sin embargo, el detonador electrónico reforzado B tiene un máximo de 5071 y un mínimo de 3040 unidades.

A. Comparación de demanda de detonador estándar demanda y detonador reforzado por mes

Desarrollamos las pruebas para comprar dos muestras y determinar si hay diferencias estadísticamente significativas entre las dos muestras.

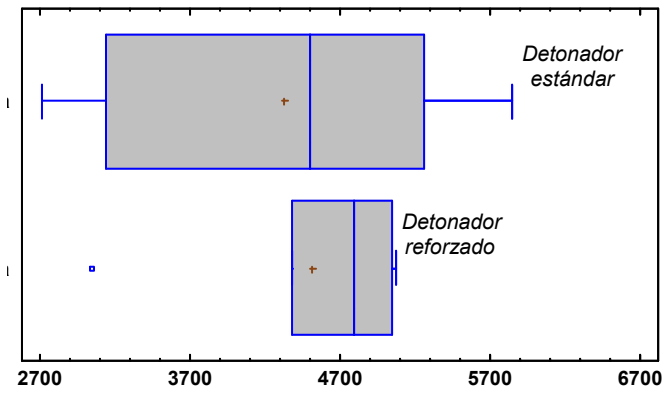


Figura 21. Caja y bigotes para demanda de detonador estándar y detonador reforzado

Fuente: Elaboración propia

(a) Comparación de Medias

A una confianza 95,0% para la demanda media de detonador Estándar es de 4327,33 ± 1298,77 (3028,57; 5626,10) y para detonador reforzado es de 4519,67 ± 805,19 (3714,47; 5324,86), los intervalos de confianza al 95,0% en intervalo de confianza para dicha diferencia de medias asumiendo varianzas iguales es de -192,33 ± 1324,54 (-1516,88; 1132,21)

(b) Prueba t para comparar medias

H_0: media1 = media2

H_1: media1 <> media2

Asumiendo varianzas iguales el valor t es igual a -0,323543 y el valor-P = 0,752949, por lo que no se rechaza la hipótesis nula para alfa de 0,05.

Es de particular interés el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias, los valores varían desde -1516,88 hasta 1132,21, este intervalo contiene el valor de 0, y no hay diferencia significativa entre las medias de ambas muestras de datos, a un nivel de confianza del 95,0%, no se puede rechazar la hipótesis nula.

4.1.3. Probabilidad de accidentes por mes (%)

Tabla 10
Probabilidad de accidentes por mes en porcentaje por presencia de cortes en línea descendente del mes de marzo a agosto del año del 2016 y 2017.

PERIODO	Detonador electrónico Estándar (A)	Detonador electrónico reforzado (B)
Mes 1	0.79%	0.08%
Mes 2	0.40%	0.00%
Mes 3	0.22%	0.11%
Mes 4	0.26%	0.06%
Mes 5	0.22%	0.02%
Mes 6	0.58%	0.04%

***Fuente**: Elaboración Propia*

Los datos obtenidos son de la base de datos obtenidos entre el periodo de tiempo de marzo del 2016 a agosto del 2017, en dicho periodo se observa la demanda del detonador electrónico A tiene una probabilidad de que se presente un corte de línea descendente (probabilidad de que pueda ocurrir accidentes) es de 0.79% máximo y un 0.22% mínimo, sin embargo, el detonador electrónico reforzado B tiene un 0.11% máximo y un 0.0% mínimo en un periodo de un mes.

A. Comparación de probabilidad de que ocurra un accidente en un detonador estándar demanda y detonador reforzado

Desarrollamos las pruebas para comprar dos muestras y determinar si hay diferencias estadísticamente significativas entre las dos muestras.

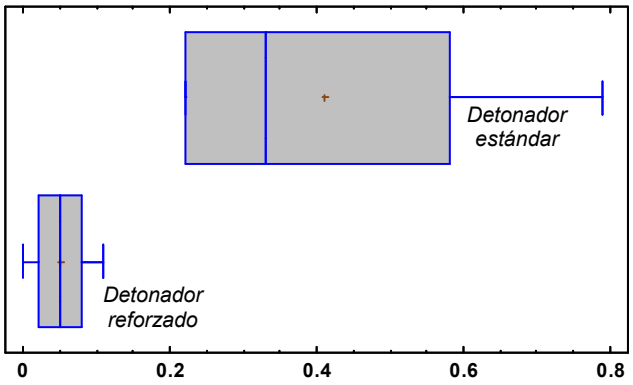


Figura 22. Caja y bigotes para probabilidad de accidentes en detonador estándar y detonador reforzado

Fuente: Elaboración propia

(a) Comparación de Medias

Intervalos de confianza del 95.0% para la probabilidad de accidentes por mes en porcentaje tiene una media para el detonador electrónico estándar de 0.41% ± 0.24% (0.17%; 0.65%) y para detonador electrónico reforzado es de 0.05% ± 0.042% (0.01%; 0.09%).

Intervalos de confianza del 95.0% intervalo de confianza para

la diferencia de medias suponiendo varianzas iguales: 0.36 ± 0.21 (0.15; 0.57).

(b) Prueba t para comparar medias

H_0: media1 = media2

H_1: media1 <> media2

Asumiendo que las varianzas son iguales el valor t es de 3.75213 y el valor-P de 0.00377061, por lo que se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0.05, el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias se extiende desde 0.146219 hasta 0.573781 considerando de que el intervalo no contiene el valor 0, se infiere que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de ambas muestras, a nivel de confianza del 95.0% y el valor-P calculado es menor que 0.05, por lo que se acepta la hipótesis alterna.

4.2. DISCUSIONES

4.2.1. Cortes en línea descendente (unidades)

Se apuesta por los detonadores electrónicos por la precisión que ofrecen en las voladuras, y como afirman Aguilar Ayala y Chilón Ayay (2017) esto ha llevado que las empresas mineras de gran escala consuman esta tecnología, por otro lado a pesar de la precisión se

presentan cortes de líneas y dichos cortes en este trabajo se demuestra que varía al tipo de detonador.

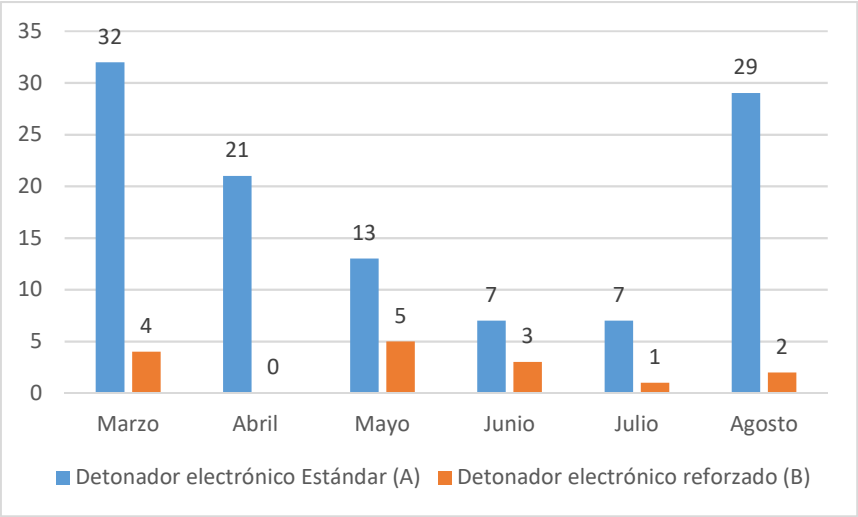


Figura 23: Diagrama de barras de cortes de línea descendente en unidades por mes.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 23 se observa que el detonador electrónico estándar presenta un mayor promedio en cortes de la línea descendente con respecto al nuevo detonador electrónico reforzado, por lo que se puede inferir con los datos evaluados que se tiene una disminución de 84.7% de cortes en línea descendente. La disminución de los cortes de línea al cambio de detonador electrónico se podría asociar a las características de detonador.

4.2.2. Cantidad de detonadores requeridos por mes (unidades)

La cantidad de detonadores electrónicos requeridos por mes supera las 4300 unidades, Huamán Ubillús, B. (2010), indica en su

trabajo que la principal desventaja al emplear detonadores electrónicos en general, es el económico, pues hasta que no se llegue a una fabricación masiva los costos unitarios serán altos.

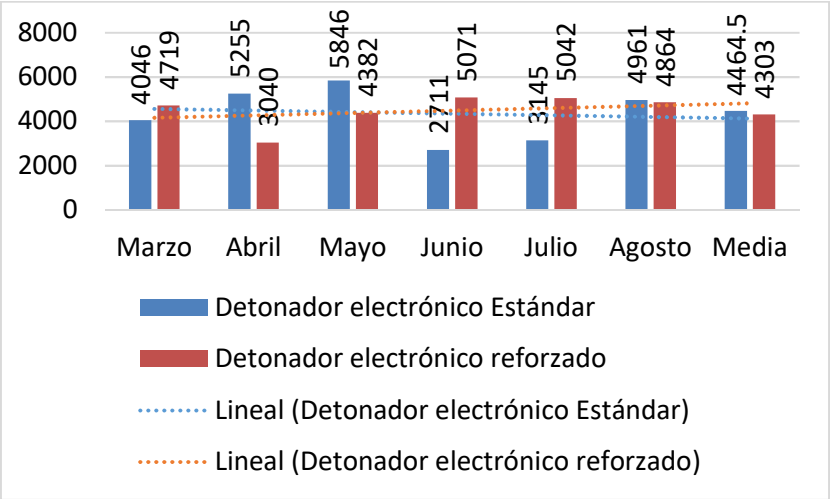


Figura 24: Diagrama de barras para cantidad de detonadores requeridos por mes.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 24, muestra que las cantidades requeridas de detonadores por mes son similares, y estadísticamente lo mismo, sin embargo al tener menos cortes en línea descendente se puede inferir que se ha usado adecuadamente los recursos.

4.2.3. Probabilidad de accidentes por mes (%)

Cada corte de línea descendente que se presenta genera una probabilidad de que se produzca accidente, por lo que se deben tomar

las medidas de seguridad necesaria lo que genera un costo adicional en la parte económica, adicional al tiempo destinado a dicha actividad.

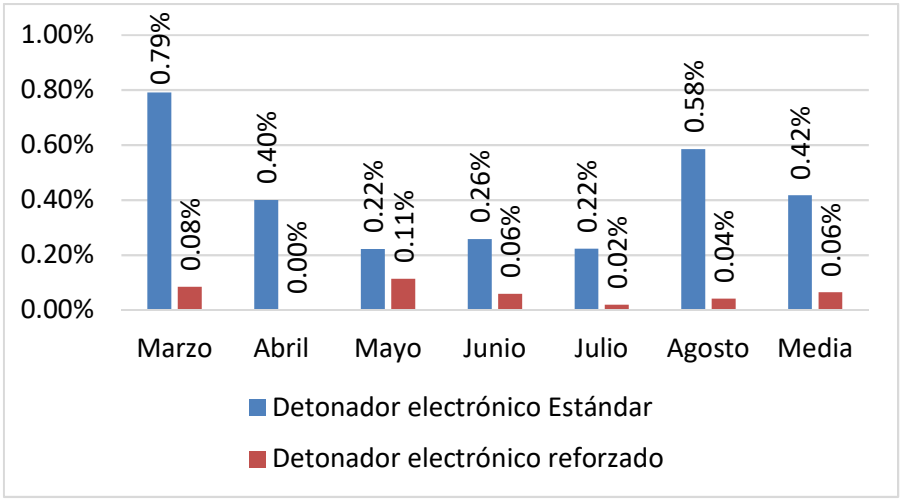


Figura 25: Diagrama de barras de probabilidad de accidentes por mes.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 25 se observa la probabilidad de ocurrencia de accidentes con el uso de los dos detonadores, y se observa una disminución significativamente al usar el nuevo detonador electrónico reforzado (B) con lo que se puede afirmar lo que indica Banda y Rhodes (2005), los detonadores electrónicos son la solución para los problemas de minería pertinentes y muestra el ejemplo de la mina Mufulira se convirtió en la primera mina en Zambia en convertir el 100% de sus operaciones al uso de detonador electrónico (Smartdets), y sólo se pudo lograr ello porque la administración de la mina estaba preparada para ver más allá del costo unitario de un producto y estaba lista para ver escenarios con más amplia de la rentabilidad y el aumento de la productividad.

CONCLUSIONES

Con el desarrollo de la investigación en la unidad minera Cuajone se logró demostrar que con el cambio de detonador electrónico Estándar (A) por el detonador electrónico Reforzado (B), se obtiene una disminución significativa de 20,67 cortes/mes en la línea descendente a sólo 2,67 cortes/mes con el nuevo detonador electrónico reforzado en la línea descendente en taladros de gran diámetro en la explotación minera de cobre a cielo abierto.

Se pudo determinar el impacto en los cortes de la línea descendente en la explotación minera de cobre a cielo abierto, al realizar el cambio de detonador electrónico estándar (A), esto no influyó estadísticamente una variación de la demanda de detonadores requeridos por mes, sin embargo ha disminuido significativamente la probabilidad de que ocurra accidentes, con el detonador electrónico estándar (A) la probabilidad era de 0,41%, al realizar el cambio al nuevo detonador electrónico reforzado (B) la probabilidad es sólo de 0,06% al mes, por lo que el impacto es muy positivo.

El detonador electrónico reforzado (B), comprueba claramente su superioridad en resistencia a la tensión con 62.5 kg; 702.5 N en la tracción; una resistencia al impacto de 116.25 cm y una resistencia al corte de 47.5 cm, cumpliendo con las necesidades operativas de unidad minera Cuajone.

Al desarrollar el cambio de detonador electrónico reforzado (B) en la unidad minera Cuajone, se consolidan las especificaciones técnicas de los detonadores electrónicos, en la precisión de sus tiempos (disminuyendo la dispersión), su gran versatilidad en programación para aprovechar al máximo las secuencias de voladura y los mejores resultados en el control de riesgos asociados a los trabajos propios de las áreas de voladura, brindando una mayor seguridad a los colaboradores de las empresas mineras.

RECOMENDACIONES

Para reducir el nivel de cortes en línea descendente se recomienda el uso de los detonadores electrónicos reforzado (B), ya que disminuye significativamente el número de cortes en la línea descendente en taladros de producción y en este trabajo de investigación se obtuvo resultados favorables.

Para mantener los resultados alcanzados en la investigación, se recomienda mantener las buenas practicas operacionales que se vienen aplicando y desarrollando.

Se recomienda ampliar las pruebas de detonadores electrónicos reforzados con otros proveedores para seguir disminuyendo la tasa de cortes en la unidad minera.

La selección adecuada del material y/o reducción de tamaño del material de taco es una parte fundamental en los controles a desarrollar, la supervisión en este proceso ayudará a mejorar los resultados esperados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar Ayala, M. J., & Chilón Ayay, F. (2017). *Estimación de presiones dinámicas inducidas por voladura para definir distancias críticas para detonadores electrónicos Daveytronic en tajo Quinua Yanacocha*. Universidad Privada del Norte.

Alfaro, C. (2012). *Metodología de investigación científica aplicado a la ingeniería*. Lima.

Banda, R., & Rhodes, N. (2005). Electronic Delay Detonators - a Unique Solution to Pertinent Mining Problems. *The South African Institute of Mining and Metallurgy*, *105*(October), 615-618.

Concha, O. (1999). Geologia y genesis de cuajone, 33-74.

ESSEEM. (s. f.). ESSEEM Work Package Initiation Systems worked out and giving a lecture by.

EXSA. (2008). Manual práctico de voladura, *4*, 358. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

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 », 174.

Huamán Ubillús, B. A. (2010). *Implementación de un nuevo sistema de iniciacín electrónica en Perú - seguridad y versatilidad*. Universidad

Nacional de Ingeniería.

INGEMET. (1979). *Geología del Cuadrángulo de Moquegua*. *Instituto geológico minero y metalúrgico* (Vol. 20).

ISEM. (2012). Uso seguro de explosivos en voladura de rocas. Recuperado a partir de http://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/uso-seguro-de-explosivos/

Lepileo Soriano, P. C. (2012). *Análisis de modos de falla en el proceso de detonación electrónica*. Universidad de Chile.

López Jimeno, C. (2006). *Manual de tronadura*. ENAEX S.A.

Miller, D., & Martin, D. (2007). A review of the benefits being delivered using electronic delay detonators in the quarry industry, 1-15.

Mina Cuajone. (2015). *Geología mina*.

Mina Cuajone. (2016). *Perforación, disparos y servicios auxiliares*.

MINCETUR. (2006). Plan estratégico regional de exportación Moquegua. *PERX-Moquegua*.

MINEM. (2016). ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ACCIDENTES MORTALES 2012-2016. Recuperado a partir de http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/ESTADISTICA/FATALES/ANALISIS/ANALISIS 2012 2016.xls

MININTER. (2017). DS N° 010-2017-IN: Reglamento de la Ley N ° 30299 , Ley de armas de fuego , municiones , explosivos , productos pirotécnicos y materiales relacionados de uso civil.

Moran, R. (2013). Preguntas y Respuestas sobre Minería. *Greenpeace*, 18. Recuperado a partir de http://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2013/cambio_climatico/Informe-Moran-mineria.pdf

ANEXOS

ANEXO 1.

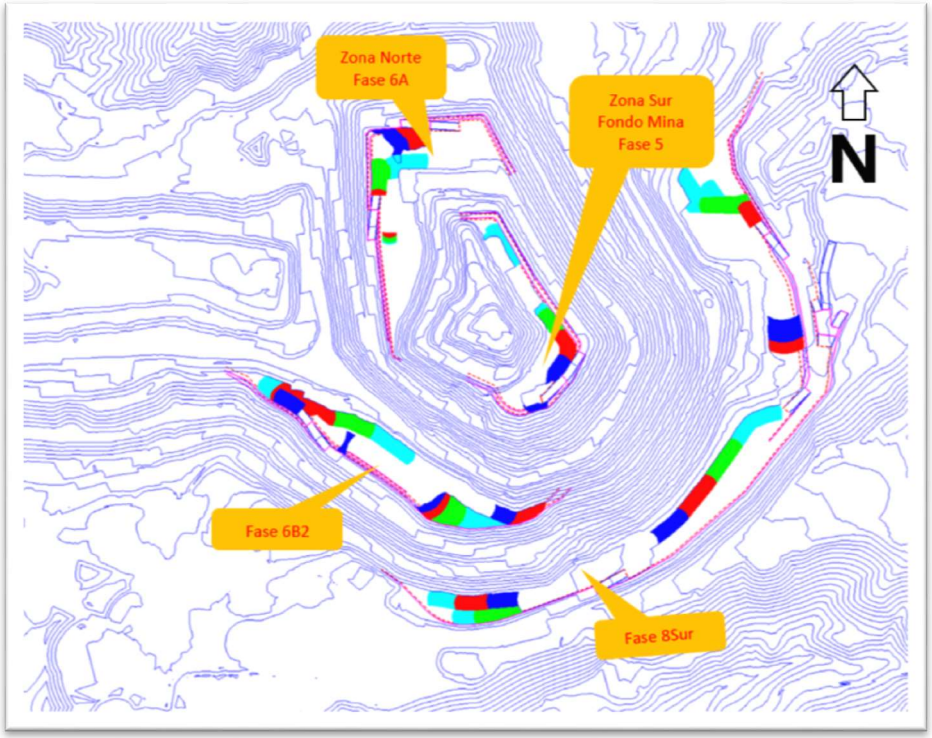


Figura 1.1: Características del detonador eléctrico

Fuente: Mina Cuajone, 2016.

ANEXO 2.

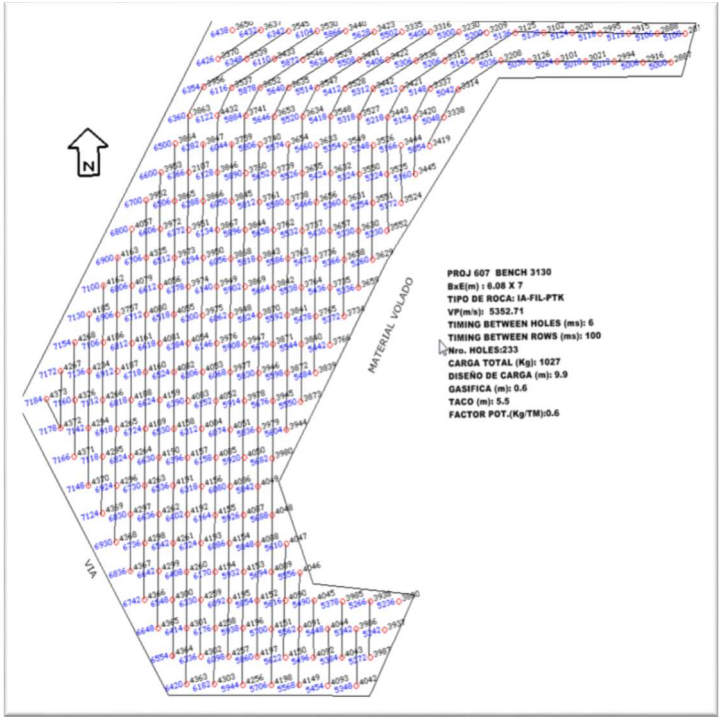


Figura 2.1. Diseño de secuencia de disparo.

Fuente: Mina Cuajone, 2016.

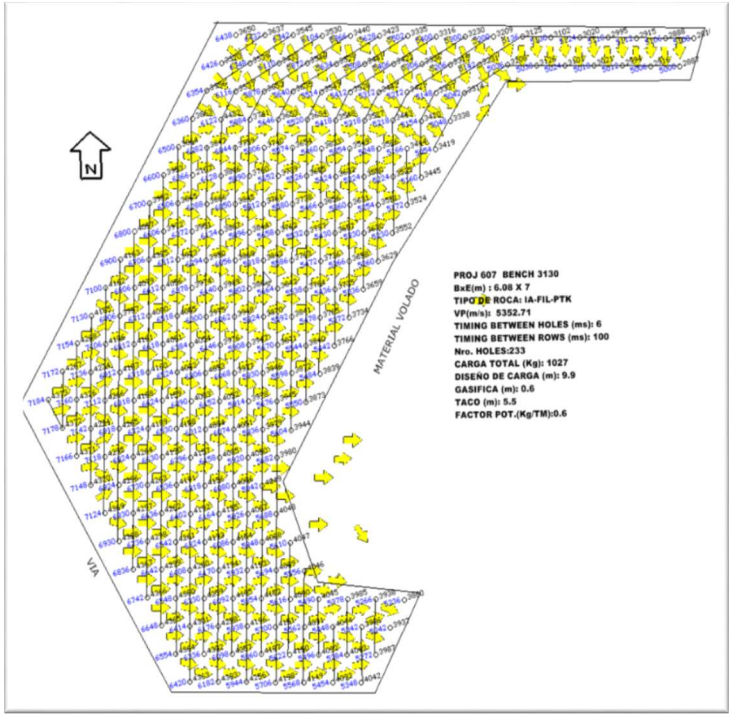


Figura 2.2. Simulación del desplazamiento de material.

Fuente: Mina Cuajone, 2016.

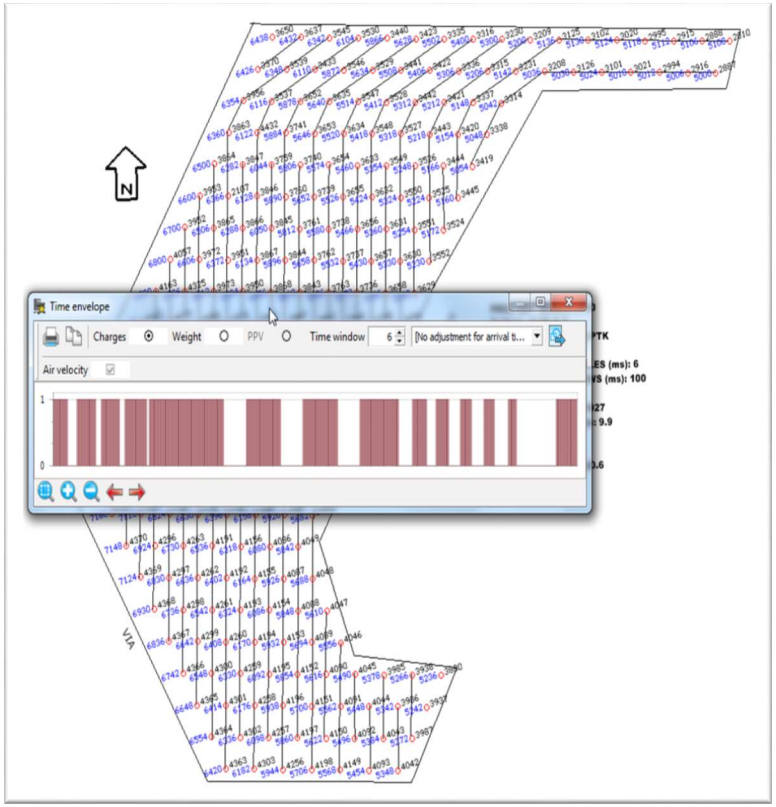


Figura 2.3. Simulación de tiempos de acople.

Fuente: Mina Cuajone, 2016.

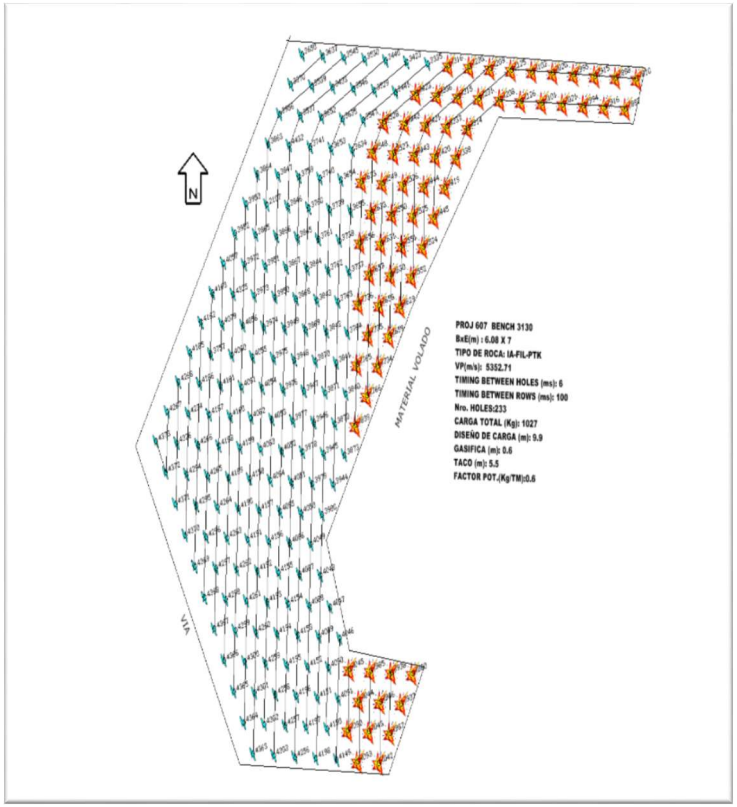


Figura 2.4. Simulación de la secuencia de voladura.

Fuente: Mina Cuajone, 2016.

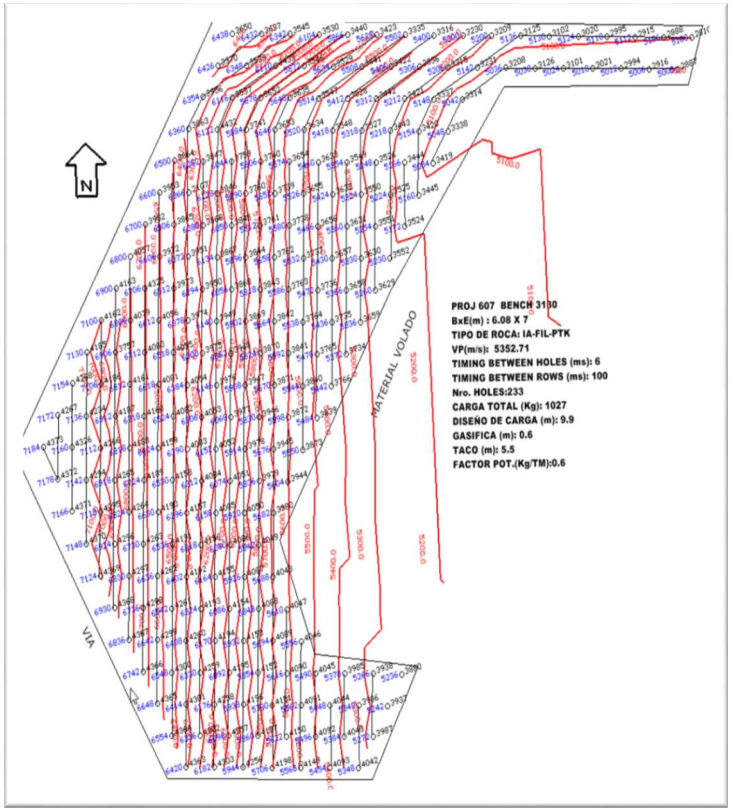


Figura 2.5. Simulación de líneas de Isotiempo.

Fuente: Mina Cuajone, 2016.

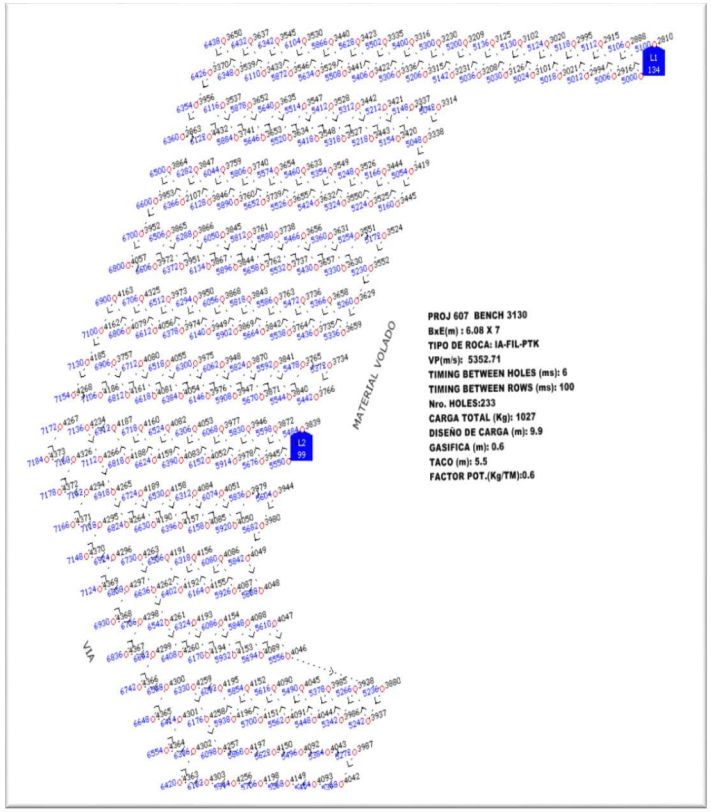


Figura 2.6. diseño de amarre.

Fuente: Mina Cuajone, 2016.

ANEXO 3



Figura 3.1. Fases de minado para desarrollo de pruebas.

Fuente: Mina Cuajone, 2016.



Figura 3.2. Material de taco.

Fuente: Mina Cuajone, 2016.



Figura 3.3. Proceso de tapado.

Fuente: Mina Cuajone, 2016.

ANEXO 4

Formato de registro de consumo de detonadores

CONSUMO DETONADORES ELECTRONICOS

ZONA	TALADROS (Und)	ADICIONAL (Und)	Corte en línea descendente								Cortes en línea descendente (Total)	CAIDOS AL TALADRO (Und)	i-kon (Und)	CC (Und)
			No Replica	Fuga	RE	Data Error	Detonador No Registrado							
							Tal.Produccion Cresta	Tal.Produccion	Tal. Bufer	Det. Fallado				

Fuente: Mina Cuajone, 2016.

ANEXO 5

Registro de consumo de detonadores debidamente llenado

CONSUMO DETONADORES ELECTRONICOS

ZONA	TALADROS (Und)	ADICIONAL (Und)	Corte en línea descendente								Cortes en línea descendente (Total)	CAIDOS AL TALADRO (Und)	i-kon (Und)
			No Replica	Fuga	RE	Data Error	Detonador No Registrado						
							Tal.Produccion Cresta	Tal.Produccion	Tal. Bufer	Det. Fallado			
3325	171	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	172	6
3625	96	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	96	5
3130	237	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	237	11
3325	381	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	381	15
2995	117	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	117	6
3625	152	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	152	6
3145	408	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	408	15
3325	113	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	115	6
3130	153	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	155	7
3625	124	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	124	5
3325	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66	3
3325	295	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	299	9
3130	190	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	194	8
3475	315	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	316	10
3130	114	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	116	4
3625	161	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	161	6
3115	254	4	0	0	0	0	1	0	0	0	1	259	10
3130	146	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	146	5
3475	231	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	233	9
3115	287	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	287	9
3310	283	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	285	12
3625	239	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	239	10
3130	55	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57	2
3115	261	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	261	10
3310	193	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	195	9
	5042	**26**	**1**	**0**	**0**	**0**	**1**	**1**	**0**	**0**	**3**	**5071**	**198**

Fuente: Mina Cuajone, 2016.