

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**“OPTIMIZACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN MEDIANTE EL USO DE
DOBLE INICIACIÓN ELECTRÓNICA EN ROCA TOBA CRISTAL
DE LA FASE 8 EN LA UNIDAD MINERA CUAJONE – 2019”**

TESIS

Presentada por:

Bach. Cristhian Alex Pérez Mamani

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

TACNA – PERÚ

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**“OPTIMIZACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN MEDIANTE EL USO DE
DOBLE INICIACIÓN ELECTRÓNICA EN ROCA TOBA CRISTAL DE LA
FASE 8 EN LA UNIDAD MINERA CUAJONE – 2019”**

Tesis sustentada y aprobada el 21 de octubre del 2021, estando integrado el Jurado
Calificador por:


PRESIDENTE


.....
Dr. Dante Ulises Morales Cabrera

SECRETARIO


.....
Dr. Carlos Huisa Ccori

VOCAL


.....
Dr. Jorge José Segura Dávila

ASESOR


.....
Dr. Julio Miguel Fernández Prado

DEDICATORIA

A Dios por iluminarme durante la realización del siguiente trabajo y permitirme realizarlo con la mayor satisfacción.

A mi familia, mis padres y hermanos por su inconmensurable cariño.

A la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, mi alma mater, por albergar mis anhelos académicos en el proceso de aprendizaje y formación profesional.

AGRADECIMIENTOS

A los supervisores del área de Perforación y Disparos de la Minera Cuajone, por su disposición y apoyo constante en la realización del presente estudio.

A los ingenieros de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, por haber contribuido en mi preparación académica profesional, compartiendo sus conocimientos y experiencias de vida.

CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1. Descripción del problema	2
1.1.1. Antecedentes del problema	2
1.1.2. Problemática de la investigación	3
1.2. Formulación del problema	3
1.3. Justificación e importancia	4
1.4. Alcances y limitaciones	5
1.5. Objetivos	6
1.5.1. Objetivo general	6

1.5.2. Objetivos específicos	6
1.6. Hipótesis	7
1.6.1. Hipótesis generales	7
1.6.2. Hipótesis específicas	7
CAPÍTULO II	8
MARCO TEÓRICO	8
2.1. Antecedentes del estudio	8
2.2. Bases Teóricas	11
2.2.1. Ubicación y acceso	11
2.2.2. Clima	13
2.3. Geología	14
2.3.1. Geología local	14
2.3.1.1. Rocas preminerales	14
2.3.1.2. Rocas intrusiva	16
2.3.1.3. Rocas postminerales	18
2.3.2. Geología regional	30
2.3.2.1. Grupo Toquepala	31
2.3.2.2. Formación Moquegua	31
2.2.2.3. Formación Capillune (Ts-ca)	33
2.2.2.4. Formación Barroso (TQ-vba)	33

2.2.2.5. Depósitos Fluviales (Q-fl)	34
2.2.2.6. Rocas Intrusivas	34
2.2.2.7. Chimeneas de Brecha (Ti-chb)	36
2.4. Geología Estructural	38
2.4.1. Estructuras	38
2.5. Detonadores Electrónicos	41
2.5.1. Sistema de Iniciación electrónica	42
2.6. Operaciones Mina	51
2.6.1. Perforación	51
2.6.2. Voladura	54
2.6.3. Carguío	60
2.6.4. Acarreo	61
2.7. Teoría de la voladura	62
2.7.1. Explosivo	62
2.7.2. Detonación	63
2.7.3. Mecanismo de fracturamiento de materiales rocosos	66
2.7.4. Colisión de ondas de choque	70
2.8. Definición de términos	75
CAPÍTULO III	80
MARCO METODOLÓGICO	80

3.1. Tipo y diseño de la investigación	80
3.2. Población y muestra	81
3.3. Operacionalización de variables	86
3.4. Técnicas e instrumentación para recolección de datos	87
3.5. Procesamiento y análisis de datos	88
3.5.1. Diseños de carga aplicado en toba cristal	90
3.5.2. Esquema de la energía según los diseños empleados	91
3.5.3. Representación de la onda de choque	92
3.5.4. Análisis de P (80)	93
3.5.5. Distribución de tamaño de partículas	95
3.5.6. Estudio de costos	97
CAPÍTULO IV	100
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	100
4.1. Resultados	100
4.1.1. Proyecto de voladura 3565-824	100
4.1.2. Proyecto de voladura 3550-808	106
4.1.3. Proyecto de voladura 3550-811	112
4.1.4. Proyecto de voladura 3550-809	118
4.1.5. Proyecto de voladura 3550-812	120
4.1.6. Proyecto de voladura 3550-814	126

4.2. Discusión	132
CONCLUSIONES	133
RECOMENDACIONES	135
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
ANEXOS	140

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
Tabla 1 Distancias y Vías de Acceso	13
Tabla 2 Perforadoras Primarias	52
Tabla 3 Parámetros de Perforación por tipo de Terreno	53
Tabla 4 Matriz de densidad según proporción	56
Tabla 5 Equipos de carguío	60
Tabla 6 Equipos de acarreo	62
Tabla 7 Datos poblacional y muestral	82
Tabla 8 Parámetros en diseños de carga	91
Tabla 9 Resultados según diseños sobre carga	94
Tabla 10 Análisis de costos	98
Tabla 11 Valores representativos USBM RI8507	142
Tabla 12 Límite VPP por tipo de roca	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
Figura 1 Ubicación Unidad Minera Cuajone	12
Figura 2 Contactos litológicos de la Formación Chuntacala	30
Figura 3 Plano regional mina Cuajone	37
Figura 4 Componentes del sistema electrónico	43
Figura 5 Detonador electrónico	44
Figura 6 Conexión del detonador electrónico	45
Figura 7 Estructura interna de un detonador electrónico	45
Figura 8 Cable de conexión	46
Figura 9 Logger	47
Figura 10 Blaster – Iniciador de voladura	49
Figura 11 Programación de tiempos en Software Shot plus i	50
Figura 12 Circuito de voladura con detonadores electrónicos	51
Figura 13 Pantalla de visualización MineOps en perforadoras	53
Figura 14 Booster 2 Lb.	57
Figura 15 Fanel	58
Figura 16 I-KON Xtreme	59
Figura 17 Esquema de detonación	64

Figura 18	Desarrollo de una detonación	65
Figura 19	Detonación por altas presiones	69
Figura 20	Proceso de desagregación	70
Figura 21	Dirección de colisión de choque	71
Figura 22	Solución para una P3 debido a la colisión de 2 ondas de choque	73
Figura 23	Distribución normal (Campana de Gauss)	86
Figura 24	Sistema Split Shovel de Pala	88
Figura 25	Vista de roca Toba Cristal de Fase	89
Figura 26	Esquemas de carga ejecutados en Toba Cristal	90
Figura 27	Distribución de halos energéticos de los 04 diseños	92
Figura 28	Líneas de la onda según esquemas empleados en T.C.	93
Figura 29	Gráfico P(80) vs. Dig Rate	95
Figura 30	Amplitud de los diseños de carga	96
Figura 31	Vista de frentes de minado sin doble iniciación electrónica	97
Figura 32	Costos de los 04 diseños	99
Figura 33	Logueo de detritus del Proyecto 3565-0824	100
Figura 34	Desarrollo del carguío	101
Figura 35	Diseño de amarre	102
Figura 36	Antes y post voladura de proyecto 3565-824	103

Figura 37	Reporte de vibraciones proyecto 3565-824	104
Figura 38	Logueo de detritos del Proyecto 3550-0808	106
Figura 39	Desarrollo del carguío	107
Figura 40	Diseño de amarre	108
Figura 41	Antes y post voladura de Proyecto 3550-808	109
Figura 42	Reporte de vibraciones de proyecto 3550-808	110
Figura 43	Logueo de detritos del Proyecto 3550-0811	112
Figura 44	Desarrollo de carguío	113
Figura 45	Diseño de amarre	114
Figura 46	Antes y post voladura de Proyecto 3550-0811	115
Figura 47	Reporte de vibraciones de proyecto 3550-811	116
Figura 48	Logueo de detritos del Proyecto 3550-0809	118
Figura 49	Desarrollo de carguío	119
Figura 50	Logueo de detritos del Proyecto 3550-0812	120
Figura 51	Detalle de carguío	121
Figura 52	Diseño de amarre del Proyecto 3550-0812	122
Figura 53	Antes y post voladura del Proyecto 3550-0812	123
Figura 54	Reporte de vibraciones del proyecto 3550-809.812	124
Figura 55	Logueo de detritos del Proyecto 3550-0814	126

Figura 56	Detalle de carguío	127
Figura 57	Diseño de amarre del Proyecto 3550-0814	128
Figura 58	Antes y post voladura del Proyecto 3550-0814	129
Figura 59	Reporte de vibraciones de proyecto 3550-814	130
Figura 60	Plano Geológico Cuajone	140
Figura 61	Registro Geomecánico en Toba Cristal	145

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Pág.
Anexo 1 Plano Geológico Cuajone	140
Anexo 2 Normativa de Control de Vibraciones	141
Anexo 3 Registro geomecánico en Toba Cristal	145

RESUMEN

La presente investigación denominada “Optimización de la fragmentación mediante el uso de doble iniciación electrónica en roca Toba Cristal de la Fase 8 en la Unidad Minera Cuajone - 2019”, tiene como objetivo demostrar la importancia del diseño de carga y el uso de colocar doble detonador electrónico en un taladro.

Con el propósito de optimizar la fragmentación en la fase de desmonte del Tajo Cuajone necesaria por la presencia de Toba Cristal (Esfuerzo de Compresión Uniaxial de 83,70 Mpa), la cual es la roca de mayor dureza para la voladura en mencionada fase (dado a su composición estructural y geológica) y con resultados, en más del 25% de los disparos en los proyectos de T.C. se obtuvo una fragmentación mayores al P(80) requerido, que han traído problemas de pisos, frentes duros y problemas en el minado, se hizo una modificación en los parámetros de voladura dando como resultado un nuevo diseño de carga que previamente analizados y con la evaluación de campo, se obtuvo de esta manera cambios positivos en la reducción de la fragmentación.

Palabras clave: iniciación electrónica, fragmentación de roca y velocidad de excavación.

ABSTRACT

The present investigation called "Optimization of fragmentation through the use of double electronic initiation in Toba Cristal rock of Phase 8 in the Cuajone Mining Unit - 2019", aims to demonstrate the importance of charge design and the use of placing double detonator electronic in a drill.

With the purpose of optimizing the fragmentation in the clearing phase of the Tajo Cuajone necessary for the presence of Crystal Toba (Uniaxial Compression Stress of 83.70 Mpa), which is the hardest rock for blasting in said phase (given to its structural and geological composition) and with results, in more than 25% of the shots in the T.C. projects a fragmentation greater than the required P(80) was obtained, which have brought problems with floors, hard faces and mining problems, a modification was made in the blasting parameters, resulting in a new load design that was previously analyzed and with the field evaluation, positive changes were obtained in this way in the reduction of fragmentation.

Keywords: electronic initiation, rock fragmentation and excavation speed.

INTRODUCCIÓN

La extracción de minerales en Mina Cuajone busca aminorar los costos operativos en perforación y voladura, optimizar las actividades dentro del proceso productivo. Por lo cual, se han realizado modificaciones al diseño de carga para maximizar la fragmentación utilizando doble detonador electrónico por taladro.

Dentro de las operaciones en mina, el proceso de voladura representa una etapa primordial dentro de las actividades de extracción en conjunto. Su principal objetivo es lograr el tamaño adecuado para el carguío de las palas en mineral y/o desmonte, y el diseño de granulación que requiere la mina, con el menor perjuicio al medio ambiente, ya sea posiblemente debido a los daños en el macizo rocoso, tiros cortados y fly rock, el resultado está obligando a una mejor planificación minera que integra varios factores y que son significativos al momento de cumplir con los planes programados por la empresa.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

1.1.1. Antecedentes del problema

Cuajone, Unidad Minera de Southern Copper Corporation Perú, prioriza sus actividades en la extracción de materia prima, gracias a los valores, la experiencia y la dedicación de la gente que labora. Asimismo, cabe mencionar que la importancia de la productividad se ve reflejada en sus distintos procesos desde el planeamiento ingenieril hasta el control operacional, abarcando además la perforación, voladura, carguío y acarreo, que en conjunto amerita una operación de calidad.

Es así que, que la voladura representa un aspecto técnico dentro de las operaciones unitarias de suma importancia en el proceso de extracción de material tanto mineral como desmonte, el principal objetivo es conseguir un tamaño adecuado de fragmentación en la roca, y consecuentemente generar un perjuicio mínimo a su entorno.

Y en los resultados en más del 25% de los disparos en proyectos con toba cristal se ha tenido fragmentación con sobre tamaños (bolonería) que han traído problemas de pisos, frentes duros, baja productividad y problemas de seguridad en el minado.

1.1.2. Problemática de la investigación

La tarea de fragmentación de rocas con explosivos y detonadores electrónicos se ve afectado por muchas variables, siendo en varios casos controlables mientras que en otros independientes. La conexión entre estos cambios dificulta las cosas, colocando a la voladura como un proceso que requiere un esfuerzo teórico - práctico en medida a los diferentes factores que influyen dentro un determinado terreno.

1.2. Formulación del problema

¿De qué manera se puede optimizar la fragmentación en roca Toba Cristal de la Fase 08 en la Unidad Minera Cuajone - SPCC?

1.3. Justificación e importancia

En este trabajo se determinó la significancia e importancia en el diseño de la carga explosiva y el uso de doble iniciación electrónica, lo que significa la mejora del proceso de fragmentación y factores conexos con el fin de optimizar continuamente los resultados obtenidos. Trabajando bajo esta premisa, se reconoce que es importante para una empresa minera aminorar los costos operativos; de modo que se está poniendo énfasis en realizar investigaciones en el campo de la actividad de perforación y voladura.

Es importante resaltar que la perforación y voladura dan inicio al proceso productivo en mina, donde el resultado es denominado la fragmentación.

Los resultados y efectos de la voladura tienen un impacto profundo en la rentabilidad minera, ya que está completamente ligado sobre el tamaño de la roca necesaria para afrontar los siguientes procesos. De dividirse y corregirse la fragmentación de las rocas, la operación recorrerá un largo camino en la mejora del desempeño,

logrando actualmente la corrección necesaria en la fase 8 del Tajo Cuajone.

1.4. Alcances y limitaciones

El alcance del presente trabajo está dirigido a los proyectos de voladura en la zona de desmonte de fase 08 de la Unidad Minera Cuajone.

Por otro lado, se presentaron las siguientes limitaciones:

- Cantidad insuficiente de proyectos de producción para más de 500 taladros.
- Escasa presencia de investigaciones con doble iniciación electrónica en voladura de rocas.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

- Optimizar la fragmentación mediante el uso de doble iniciación electrónica en roca toba cristal de la fase 8 de desmonte de mina Cuajone.

1.5.2. Objetivos específicos

- Identificar los diseños de carga aplicando la doble iniciación electrónica que se realizarán en roca toba cristal de la fase 8 de desmonte de mina Cuajone.
- Determinar qué factores influirán en los resultados de voladura en roca toba cristal de la fase 8 de mina Cuajone.
- Describir los costos y rendimientos en el proceso de voladura con el uso de doble iniciación electrónica.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis generales

- Es factible que el uso de doble iniciación electrónica en el diseño de voladura en roca toba cristal fase 8 mejore la fragmentación.

1.6.2. Hipótesis específicas

- Mediante el diseño de carga adecuado aplicando la doble iniciación electrónica para la fase de desmonte mejorarán los resultados obtenidos en fragmentación aumentando la eficiencia de conminución explosiva.
- Los factores de diseño de carga aplicando la doble iniciación electrónica son directamente proporcionales al resultado de fragmentación de esta manera se incrementará el Dig Rate en la fase 8 de desmonte de la mina Cuajone.
- Los rendimientos y costos por el diseño de carga con doble iniciación electrónica reducirán los costos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

Los antecedentes consultados hacen referencia a tesis y proyectos de investigación relacionados con el empleo en diseños de carga, detonación de tipo electrónico y cargas explosivas en diseños de voladura.

La tesis intitulada "**Optimización de la fragmentación de la roca con la aplicación de la doble iniciación electrónica en la explotación de cobre porfirítico**" de Jaime Roosevelt Hinostraza Sierra (2014), señala la relevancia de innovar y generar el uso del iniciador electrónico para la fragmentación de la roca. De acuerdo a las pruebas, en varias ocasiones se han modificado otros componentes preconfigurados, como la malla, diseño de carga explosiva y tiempos de salida de los proyectos de disparo. En experimentos con disparos de doble iniciación, se obtuvo una disminución de hasta un 36% en fragmentación de su P(80) de acuerdo a las evaluaciones resultadas en campo, además de obtener tiempos de reducción en el carguío de las palas del 31% en promedio.

La tesis intitulada **“Optimización de la fragmentación con el uso de detonadores electrónicos en la mina Toquepala ”** del autor Yony David Mamani Valdez (2018), menciona que el uso de detonadores electrónicos permiten a la configuración del taladro de producción de diversos disparos y dependiendo del tiempo de retardos está directamente relacionado con el material y velocidad de detonación, y eso significará una implicancia directa en la granulometría en las operaciones de mina.

La tesis intitulada **"Análisis comparativo la optimización de una triple iniciación electrónica, doble e iniciación simple en yacimiento cuprífero a cielo abierto"** escrita por Huerta Valer Gustavo Sammy (2019), establece que las múltiples iniciaciones mejoran la distribución y eficiencia de la voladura. En el trabajo realizado en la Minera Las Bambas hay un cambio significativo en la eficiencia, ya que se ha encontrado evidencias y diferencias sustanciales (40%), por lo que el % de finos menores a 1" son significativamente superior.

El informe de investigación “**Aplicación tecnológica con carga deck In Hua Neg Open Pit**” de Xiao Jun Zhang (2018), menciona en el desarrollo de la minería y la construcción moderna, mejorar la utilización eficaz de la energía explosiva mediante la optimización del taladro con carga, mejorando así la eficiencia energética, es un camino para dirimir un conflicto y el control de gastos adicionales. La carga dividida en varias secciones de la columna de perforación llamado también como el método de asignación racional de la energía, además del uso de una cámara de aire como contexto.

La tesis intitulada “**Optimización de la fragmentación de roca a través del diseño geomecánico y la doble iniciación no electrónica - Apumayo S.A.C.**” de José Choqueña Ccallata (2017), menciona que en el Proyecto Apumayo Sur, dentro de las operaciones mineras se observan presencia de sobre tamaño posterior al proceso de voladura, que dificulta la tarea de carguío, es necesario aminorar la fragmentación de un P (80) inicial de 7,93”. Para ello se hicieron pruebas en tres escenarios obteniendo 4,03”; 3,58”; 5,38” como tamaño ideal de fragmentación.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Ubicación y acceso

La Unidad Minera denominada Cuajone se ubica en el distrito de Torata, provincia de Mariscal Nieto, departamento de Moquegua, geográficamente se encuentra localizado en la zona central, flanco Oeste de la Cordillera Occidental de los Andes a una altura promedio de 3500 m.s.n.m.

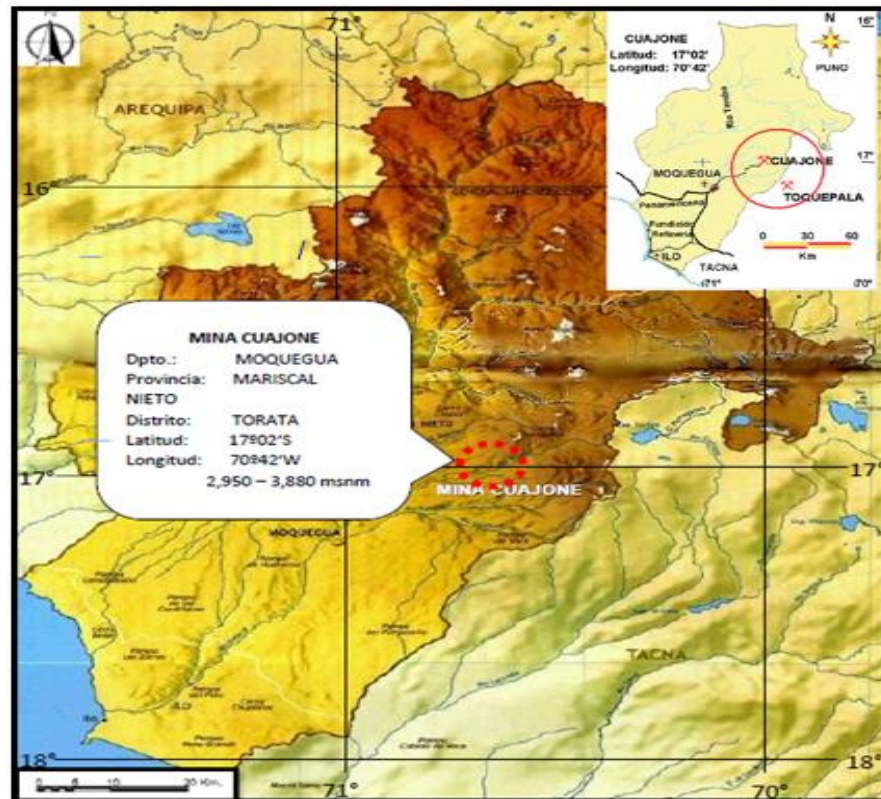
Esta área tiene las siguientes coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator):

317, 685 E – 8 117, 350 N

319, 515 E – 8 115, 815 N

Figura 1

Ubicación Unidad Minera Cuajone



Fuente: Geología SPCC, 2015.

Moquegua cuenta con un aeropuerto de reducidas dimensiones, no arriban vuelos comerciales, por ende se puede arribar desde Lima en avión a Arequipa o Tacna, posteriormente a Moquegua.

El nivel de acceso a la Mina Cuajone bajo modalidad terrestre se da de la siguiente manera:

Tabla 1

Distancias y Vías de Acceso

Ruta	Distancia	Tiempo	Vía
Región Moquegua a través del desvío Torata	25 km.	20 min.	Terrestre
Por medio del Desvío Torata, hacia la Villa Botiflaca	20 km.	20 min.	Terrestre

Fuente: Informe Interno Cuajone - SPCC, 2015.

2.2.2. Clima

El clima varía según la altitud, de moderado a un intenso frío. En Moquegua, el clima es cálido la mayor parte de los 365 días del año. En las zonas altas, las temperaturas a menudo caen por debajo de lo normal, con temperaturas de los 0° C en época de invierno.

2.3. Geología

2.3.1. Geología local

En la actualidad, Southern Peru Copper Corporation realiza sus estudios geológicos en un área cuya conformación rocosa encontrada en Cuajone, está formada por rocas de tipo volcánicas que se han conservado desde el período Cretácico hasta nuestros días. No se advierte la presencia de rocas grandes en la zona.

La litología de la zona está dividida en 3 grupos de rocas:

- Rocas Preminerales
- Rocas Intrusivas
- Rocas Postminerales

2.3.1.1. Rocas preminerales

Según Concha y Valle (1999), las rocas pertenecientes al grupo Toquepala, que proviene del Cretácico Superior-Terciario Inferior entre los años 80 y 60 M.A. de antigüedad. Estas rocas son las predominantes en la geografía de este lugar.

A) Andesita Basáltica

Roca de color verde oscuro a negro según su porcentaje de alteración. Tiene una estructura variada de fanerítica holocristalina a porfirítica. Sin potencia definida exactamente, ya que ningún taladro la ha podido cruzar. Potencia estimada de 800 m. Este es un tipo de roca de muy difícil hallazgo, pues se encuentra en menor medida a largo de la geografía del lugar (Concha & Valle, 1999).

B) Riolita Porfirítica

Es un tipo de roca que está compuesto de ácido porfirítico que fluye con granos de cuarzo de distintos colores, de hasta 2 mm de diámetro, por lo general subredondeadas. La matriz es afanítica y posee un alto grado de dureza. La roca tiene un color blanquecino a gris claro (Concha & Valle, 1999).

C) Dolerita Toquepala

Se superpone a la denominada riolita porfídica, existe en color negro, marrón y gris verdosa un flujo volcánico que se asemejan a la dolerita de Toquepala. Tiene forma porfirítica, altamente en calcita.

Se tiene una potencia de más de 130 m, pero hay evidencia confirmada por perforaciones diamantinas donde se asignan potencias hasta 230 m (Concha & Valle, 1999).

2.3.1.2. Rocas intrusiva

A) Diorita

Asimismo, Concha y Valle (1999) indican que, aproximadamente 1 a 2 km al oeste del cuerpo mineralizado, hay un stock de diorita largo cuyo conector se encuentra de norte a sur. El stock trasciende la andesita basáltica y todo el conjunto de rocas del Grupo Toquepala.

La datación radiométrica más reciente del río Chuntacala y Torata, arrojan un antigüedad de $66,7 \pm 1,7$ M.A. (G. Park 1998).

Las rocas vienen en una variedad de tonos de grises, de verde oscuro a un gris oscuro, de caracterización holocristalina, uniformes, de granos medios a gruesos (Concha & Valle, 1999).

B) Latita Porfirítica

Hacia el noroeste-sureste, se observa la presencia de una latita porfirítica de unos 2,45 km de largo y 0,70 km de ancho, conectada, que ha sido extensamente modificada y alterada en la zona sureste, reduciendo el cambio hacia el noroeste.

La estructura porfirítica de la latita está significativamente modificada por una estructura porfirítica formada por pequeños granos de cuarzo los cuales alcanzan en diámetro hasta 4 mm y feldespatos rectangulares que se transforman en matrices criptocristalinas (Concha & Valle, 1999).

Toda la estructura está conformado por una mineralización muy baja de cobre y molibdeno. En cuanto a los contactos litológicos con las rocas circundantes son mayormente ligados a la vertical, de manera principal con la andesita basáltica (Concha & Valle, 1999).

C) Brechas

De acuerdo a Concha y Valle (1999), las brechas se clasificaron como de alto contenido de mineral en brechas

mineralizadas con grados 0,40% Cu, brechas con grados que van desde el 0,10 % y 0,40% Cu y brechas estériles con menor rango de 0,10% Cu. El contenido que se encuentra en las brechas está determinado principalmente por los clastos, que por lo general provienen de las rocas mineralizadas.

D) Diques

Cuajone posee diques de 800 m de longitud y potencias variadas hasta los 3 m formados principalmente por latitas porfiríticas que propagan la mineralización y parece estar relacionada con la segunda intrusión de latitas porfiríticas (Concha & Valle, 1999).

2.3.1.3. Rocas postminerales

A) Formación Huaylillas

Los autores Concha y Valle (1999), indican que esta formación se extiende en la ladera del río Torata y al sureste de la quebrada Chuntacala. Edad estimada entre los 23 y los 17 M.A. y proporciona potencias hasta 230 m alrededor de la mina.

Conglomerado Riolítico - Dolorítico (CR - CD)

El sendero original de la Formación de Huaylillas, ligeramente visible al sur y este del Tajo, el cual está relleno con una paleo-superficie con dirección a la ruta este-oeste. Están formados por ángulos inclinados, seleccionados irregularmente y crecen hasta 0,40 m, siendo parte vital por riolitas que se parten en la base de las doleritas en las partes superiores cubriendo la riolita porfírica (RP) de manera inconsistente. Mediante la perforación diamantina, se perforó hasta 110 m de potencia en esta roca (Concha & Valle, 1999).

Toba Salmón (TSA)

La toba salmón es la segunda roca de esta formación, que se encuentra al norte de la quebrada Torata y en la vertiente sur de la quebrada Chuntacala. Se tiene una potencia por la parte sur de la mina Cuajone que alcanza los 15 m a 16 m la cual sobrepasa el revestimiento que no es propenso a la

degradación preexistente, rocas intersticiales y conglomerado riolítico.

Caracterizado por una coloración rosácea intensa, cuyo cambio ligeramente a blanco, es suave y de grano fino y es propenso a la fractura concoidal (Concha & Valle, 1999).

Vitrófiro (VT)

Roca volcánica que deriva de un fluido que se enfría rápidamente, sus colores varían de marrón claro, oscuro a negro. Hay variedades cuando se combinan con toba salmón hasta el marrón y el negro en la superficie junto con las traquitas que son frágiles y causan fracturas concoideas.

Lentamente entre toba salmón y la traquita hay presencia de vitrófiros con una potencia flexible de hasta 20 m. lo que indica que la lava es muy ligera y se enfría muy rápidamente (Concha & Valle, 1999).

Traquita (TR)

De acuerdo a Concha y Valle (1999), recubriendo lentamente la toba salmón con vitrófiros, hay una fuerte presencia de tractos que consisten en un flujo de traquita colorante marrón que contiene cristales de flogopita, fenos anhedrales, fenos subhedrales y biotitas ocasionalmente. Consiste en fracturas mínimamente invasivas que ocurren principalmente en arcillas con potencias variables de 0,30 m.

Se han podido advertir otras fracturas degenerativas, fracturas de concoides y fracturas de pirolusita. Uno de los atributos más resaltantes de esta roca es que deriva a una amplia gama de movimientos y eventos de vesículas de variadas dimensiones (Concha & Valle, 1999).

Toba Café (TBC) / Toba Blanca (TB) / Toba Micácea (TBM)

De acuerdo al Informe Interno de Southern Perú Copper Corporation (SPCC) (2015), sobreyaciendo a la toba traquítica y traquita, aflora la toba café, la cual está disponible como

forma de estrato hasta 2 m de potencia consistente en un marrón claro, que además está compuesto por una potencia de toba micácea muy fuerte, conocida y caracterizada por la alta abundancia de micas en una toba de color amarillo.

La toba micácea de cobertura es una toba blanca como indica el nombre, es de color blanco, tiene una potencia de hasta 45 m. Toda la gama de tufos amarillos y blancos está formada por flogopitas y fenocristales sanidina. Posterior de la deposición de toba blanca, hay algunos tramos claros que en paralelo forman paleovalles con la formación Chuntacala.

Aglomerado Tobáceo (AT)

El aglomerado tobáceo se presenta sobre la toba blanca y con la disonancia erosiva llenando un pequeño paleovalle, que consta de partes de tobas con ángulos amplios, subangulares y sub-redondeadas en el plan de la matriz predominante, estos elementos pueden tener varios tamaños con dimensiones que pueden llegar a los 0,40 m de diámetro (Southern Perú Copper Corporation, 2015).

Aglomerado Traquítico (AGTR)

Posteriormente, este paleorelieve debe incluirse dentro de lo que se rellena parcialmente con un aglomerado traquítico con disonancias erosivas, formado principalmente por racimos de traquita y tobas con ángulos angostos de tamaños variantes hasta 0,30 m (Southern Perú Copper Corporation, 2015).

Toba Retrabajada (TRE)

Muy localmente se presenta un pequeño paleovalle que erosionó al aglomerado traquítico y fue relleno por un flujo retrabajado de tobas (Southern Perú Copper Corporation, 2015).

Conglomerado Traquítico (CTR)

De manera parcial cubriendo ocasionalmente la ladera en la quebrada Chuntacala, hay la presencia del conglomerado traquítico que está principalmente compuesto por clastos de

tobas y traquitas subangulares de distintos tamaños hasta de 0,30 m de matriz tufácea-arenosa (Southern Perú Copper Corporation, 2015).

Conglomerado Amarillo / Verde (CA / CV)

Aflora en el antiguo paleovalle de la quebrada Chuntacala en el sector este como en el oeste del tajo actual. Compuesto principalmente por clastos subangulares, redondeados y angulares de traquitas, riolitas y tobas de diferentes dimensiones de hasta 0,80 m de diámetro en matrices arcillosa-tufácea que se encuentran de igual manera que el aglomerado traquítico en una cubierta coluvial discordante en las laderas de la quebrada de hasta 0,30 m de potencia (Southern Perú Copper Corporation, 2015).

Aglomerado Gris (AG)

Emplazado en el paleovalle de la quebrada Chuntacala. Tipo de flujo múltiple de clastos redondeados y angulares de

traquitas, andesitas y tobas de distintos colores y tamaños que van variando desde grises a negras y rojizas en matrices arenofúcea de color gris (Concha & Valle, 1999).

B) Formación Chuntacala

En la confluencia de los valles Chuntacala y Torata, a unos 400 m al norte, se depositó la Formación Chuntacala, que dio lugar entre las 14 y los 9 M.A. (Clark, Tosdal, Farrar, & Plazolles, 1990).

Consiste en tobas, conglomerados y varios aglomerados, algunos de los cuales a veces se dan lentamente y otros varían. La formación de Chuntacala tiene una potencia de hasta 200 m.

Conglomerado Basal (CB)

Según Concha y Valle (1999), ocurre de manera constante en las rocas originales y el aglomerado gris. Se tiene una capacidad de hasta 32 m y están formados por grietas en

las tobas, riolitas, traquitas y andesitas, principalmente redondas a subredondas y gradualmente hasta 1,20 m. Su vientre tiene forma discontinua. Ubicado en forma simultánea en un paleovalle similar a la quebrada Chuntacala, cuyo principal potencia está ubica dentro del tramo del paleovalle en dirección NE-SW.

Aglomerado Blanco (AB)

Emerge de manera irregular, cubriendo a la toba cristal (TC), sobreyaciendo al conglomerado basal de coloración blanca hasta 4,5 m de potencia. Esta roca se consideraba la parte inferior de toba cristal, pero posteriormente se ha mencionado para diferenciarse principalmente por sus diversas formas. Caracterizado como suaves y circulantes, formada por rocas de micas y sanidina sobre una matriz de granos medios a gruesos, rellenas en ciertas ocasiones por material vítreo (Southern Perú Copper Corporation, 2015).

Toba Cristal (TC)

En la roca toba cristal se tiene una potencia de hasta 120 m. La fracturación es subhorizontal, provocando además varias fracturas en dirección vertical, a veces con disyunción columnar compuesto por material arcilloso y pirolusita.

Tobas con texturas porfiríticas blancos con cristales de mica y sanidina en una matriz de granos medios a gruesos con ocasionales vesículas rellenas por material vítreo (Concha & Valle, 1999).

Toba Inferior (TI)

Emergiendo a la toba cristal para una conexión de movimiento lento, se muestra la toba inferior de coloración blanca a blanca amarillenta, naturalmente suave, con una forma de textura porfirítica débil dentro de la matriz afanítica. Se identifican cristales más grandes que son la sanidina, flogopita y biotita. Crece en las regiones oeste y este, tiene una potencia de hasta 90 m (Concha & Valle, 1999).

Aglomerado Inferior (AI)

Sobreyaciendo a la toba inferior y la toba cristal de forma discordante y formando relleno del paleovalle orientado al suroeste, emerge un tipo de flujo de coloración marrón oscuro formada principalmente por grupos de clastos en varios colores, en una matriz principalmente consolidada. Se tiene presencia de una potencia de hasta 90 m en medio de la quebrada (Concha & Valle, 1999).

Toba Superior (TS)

En las partes más sobresalientes de la Formación Chuntacala y en diferentes variaciones erosionales, se encuentra la toba superior (TS) con una potencia de unos 65 m de coloración gris claro, naturalmente suaves, con una denominancia de matrices afaníticas (Concha & Valle, 1999).

Aglomerado Superior (AS)

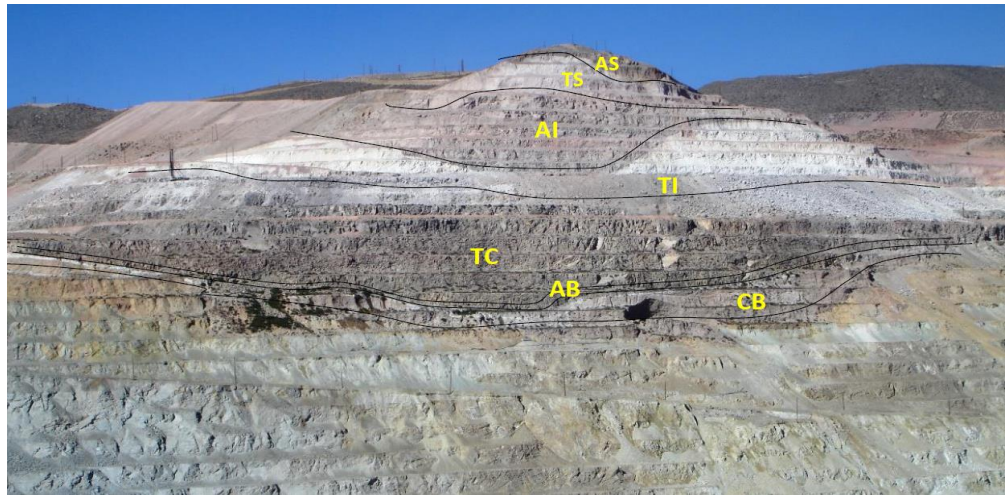
Compuesta por clastos sub-angulares de andesitas en una denominancia de matrices areno-tufácea, de color grisácea; de unos 50 m aproximados de potencia (Concha & Valle, 1999).

Andesita Porfirítica (AP)

Culmina el orden volcánico con la presencia de una andesita porfirítica que se encuentra y se presenta caótica dando la perspectiva de clastos grandes en una matriz de igual manera de andesita (Southern Perú Copper Corporation, 2015).

Figura 2

Contactos litológicos de la Formación Chuntacala



Fuente: Informe Interno Geología SPCC, 2015.

2.3.2. Geología regional

Según el Informe SPCC (2015), la superficie volcánica más antigua de la región costera es la del Grupo Toquepala (Cretácico Superior - Terciario Inferior), compuesto por piroclastos y aglomerados rojo-verde, compuestos de tintes verdes, cuya composición varía con andesítica, dacita, traquita y riolitas, y sedimentos clásticos locales en la extensión del Flanco Andino. El determinado grupo cuenta con una serie de variedades como: Paralaque, Quellaveco, Inogoya y

Toquepala, las cuales se almacenan en un área pequeña, debido a las diferencias entre ellas.

Cubierto con discordancias, la formación Moquegua (Mioceno-Oligoceno) tiene el tamaño de 500 a 600 m constituido por clastos de deposición, el conjunto describe una expansión del cuadrángulo de Moquegua, la cual consta de dos tipos: Inferior Moquegua y Superior Moquegua.

La formación del Huaylillas (Mioceno-Plioceno) contrasta fuertemente con el grupo de Toquepala y Moquegua, que está compuesto principalmente por series piroclásticas y flujos riolíticos. Está representado a lo largo del Flanco Andino por tipos de cuerpos que quedan en la fase de la erosión (Bellido, 1979).

2.3.2.1. Grupo Toquepala

Está debajo de las rocas de la zona y está formado por rocas volcánicas con intercalaciones de clastos. Tiene una edad de 35 a 100 M.A. (Cretácico Superior Plioceno).

2.3.2.2. Formación Moquegua

La Formación Moquegua se basó en la tensión tectónica creada entre el Frente Andino y la Cadena Costanera. Sobreyace discordante en el grupo de Toquepala y los Batolitos en el sur de Perú. La Formación de Moquegua se dividió en Inferior Moquegua y Superior Moquegua.

Se originó como resultado de la erosión a largo plazo en el Terciario (Oligoceno al Mioceno Inferior). Las rocas del continente fueron erosionadas y depositadas formando afloramientos rocosos, areniscas, tobas y conglomerados que componen principalmente lo que se conoce como la Llanura Costera.

2.3.2.3. Formación Huaylillas (Ts-vhu)

Colla y Valle (1999), menciona que es el resultado de una secuencia de flujos y tufos volcánicos que hacen erupción en las cumbres de los cerros similar en las rocas del grupo Toquepala y la estructura de Moquegua de diferentes formas. Se componen de tufos dacíticos, traquíticos y riolíticos, compuesto de feldespatos, micas, horblendas en mejor escala

y trozos de roca pómez. La apariencia es totalmente variada desde tobas con granos gruesos, porosos, blandos y friables hasta compactos, duros y silificados. Muestran la apertura de las bandas y son claramente visibles. Se les da una edad 17 a 23 M.A. (Mioceno Inferior a Medio).

2.2.2.3. Formación Capillune (Ts-ca)

Es la sucesión de pilares, areniscas, tufos y arcillas lo que incide discordantemente en la formación de Chuntacala y la formación de Huaylillas. Como resultado de la sedimentación, se ha confirmado su almacenamiento y depositación en la zona lacustre mediante fuertes corrientes (Concha & Valle, 1999).

2.2.2.4. Formación Barroso (TQ-vba)

Serie de derrames volcánicos formadas por traquitas, traquiandesitas y andesitas combinadas con piroclastos, intercambiables, aglomerados y brechas, que forman principalmente cadenas de erupciones volcánicas. La producción de Barroso se conecta de manera similar al diseño

de Capillune. Asignación de una edad Terciario Superior Cuaternario (Plioceno, Pleistoceno) (Concha & Valle, 1999).

2.2.2.5. Depósitos Fluviales (Q-fl)

Citado por Pachao (2017), estos depósitos fluviales se asocian con arenas, gravas y arcillas; consisten en todo tipo de materiales clásticos, desde rocas duras hasta suelos arenosos, como bancos de rocas.

El depósito fluvial de agua más importante se encuentra al pie del valle del río Moquegua, desde el pueblo de Tumilaca hacia abajo.

2.2.2.6. Rocas Intrusivas

Según Concha y Valle (1999), la región es rica en granodiorita, diorita, granito, cuarzo monzonita, latita, dacitas, brechas, chimeneas y diques de diferentes colores, formas pequeñas y grandes apófices que cruzan transversalmente el grupo de rocas de la Toquepala. Generaciones de intrusivos

desde el Cretácico Superior al Terciario Inferior al Medio (37 a 100 M.A.).

Origen derivado de tectónica de capas, la placa más pequeña del Pacífico Oriental conectada a la placa Continental en la región de Benioff, resultó en una ligera mezcla de los océanos en algunas estaciones que contienen sales de cobre; debilidades como fallas, grietas y lagunas. Bloqueo o recepción de piedras intrusivas por parte del equipo de Toquepala.

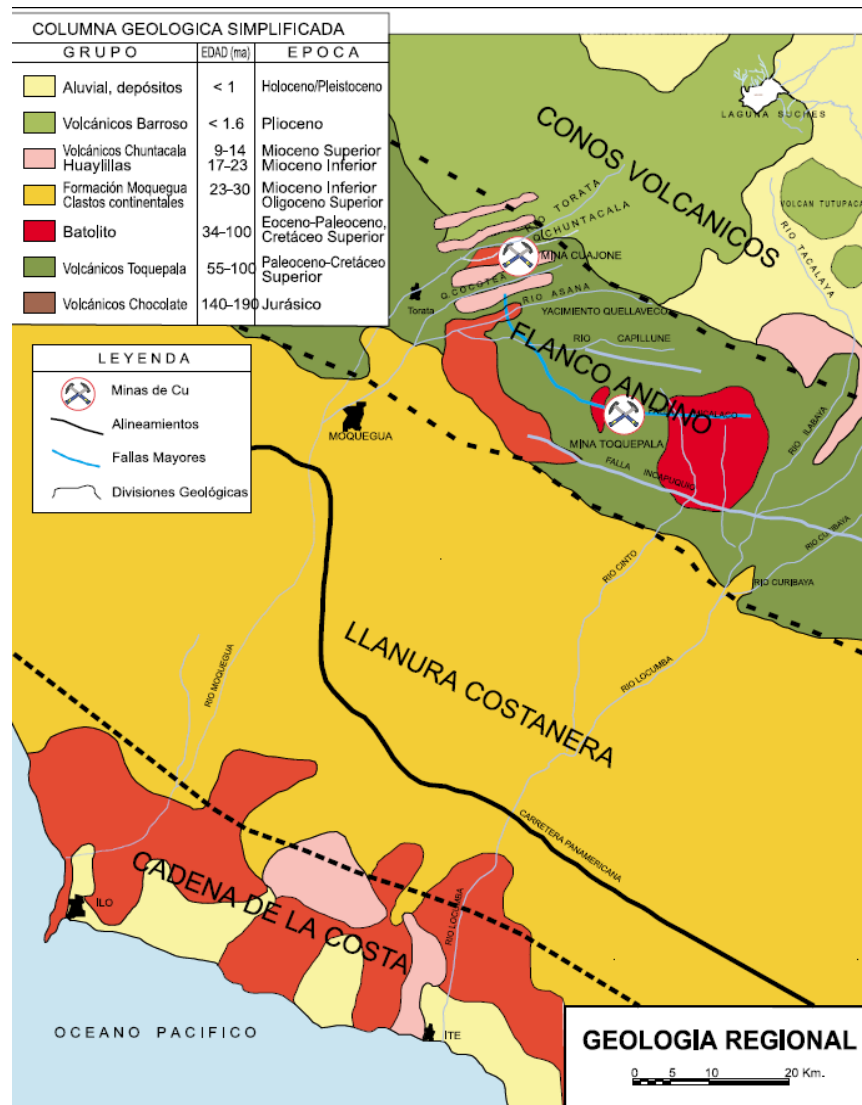
Los intrusivos que tenían entre 50 y 60 M.A. son los que provocaron la mineralización como podemos ver en los yacimientos de cobre de Quellaveco, Toquepala, Cerro Verde y Cuajone, las cuales están sustentadas principalmente por cuerpos ácidos a intermedios entre dacitas, monzonitas y latitas formando faja mineralizada en la región sub-provincia del Pacífico que anexa las regiones del norte de Chile (Concha & Valle, 1999).

2.2.2.7. Chimeneas de Brecha (Ti-chb)

Las zonas con material de cobre diseminado de Quellaveco, Cuajone y Toquepala están conectadas por estructuras tabulares de brechas, es decir, por una serie de secciones alargados o de forma irregular, rellenas con rocas fragmentadas de las paredes. En el caso de Toquepala y Quellaveco, denominadas brechas monitorean los contenidos de mineralización, mientras que en Cuajone, este es el contenido de postmineralización (Pachao, 2017).

Figura 3

Plano regional mina Cuajone



Fuente: Geología SPCC, 2015.

2.4. Geología Estructural

De acuerdo a lo citado por MINEDUC (2019), es la rama de la geología que se dedica a estudiar la corteza terrestre, sus estructuras y su relación en las rocas que las contienen. Estudia la geometría de las formaciones rocosas y la posición en que aparecen en superficie. Interpreta y entiende el comportamiento de la corteza terrestre ante los esfuerzos tectónicos y su relación espacial, determinando la deformación que se produce, y la geometría subsuperficial de estas estructuras.

2.4.1. Estructuras

Según CETEMIN (2014), ejemplos de estructuras geológicas son:

Fallas geológicas, son fracturas que separan bloques con movimiento relativo entre ellos. Según este movimiento se clasifican genéticamente como:

Fallas de salto en dirección o de desgarre

Son en general sub-verticales, y separan bloques que se desplazan lateralmente. Según sea el sentido relativo de desplazamiento se dividen en dextrosas (el bloque se mueve hacia la derecha) o sinestrosas (el bloque se mueve hacia la izquierda), tomando como criterio el bloque del observador y deslizando el contrario. También se conocen como fallas transcurrentes, pero este término se usa cuando la falla tiene escala regional.

Fallas de salto en buzamiento:

Separan bloques que se desplazan verticalmente. Dentro de las fallas de salto en buzamiento podemos encontrar, fallas normales o directas cuando el bloque superior se mueve hacia abajo. Son fallas generalmente asociadas a extensión. Y fallas inversas cuando el bloque superior se mueve hacia arriba. al contrario que las anteriores se asocian a compresión, con el consiguiente acortamiento del sistema. Dentro de la clasificación de falla normal e inversa podemos encontrar las de alto y bajo ángulo. A las fallas inversas de bajo ángulo se les llama también cabalgamiento.

Fallas oblicuas:

En las que hay una componente de salto en dirección y otra de salto en buzamiento.

Diaclasas:

Son fracturas sin desplazamiento transversal detectable. Son las fracturas más frecuentes en las rocas. Tienen extensión de milímetros hasta pocos metros. Algunas diaclasas muestran un relleno (secundario) de calcita, cuarzo, yeso u otros minerales. La principal diferencia con las fallas reside en el desplazamiento transversal relativo entre las paredes de esta. Pueden producirse por esfuerzos tectónicos, descompresión o por contracción de la roca por enfriamiento, deshidratación o recristalización.

Pliegues:

Son estructuras de deformación producto generalmente de esfuerzos compresivos. Se producen cuando las rocas se pliegan en condiciones de presión y temperatura altas, lo que les confiere la ductilidad necesaria para que se generen los pliegues.

Foliaciones:

Estructuras planares formadas por la alineación de minerales en planos preferenciales a través de la roca. Se producen a elevadas presiones y temperaturas y gases (CETEMIN, 2014).

2.5. Detonadores Electrónicos

Según lo citado por Paredes (2014), los detonadores electrónicos son dispositivos cuya función es detonar la carga explosiva, similar a un detonador pirotécnico, con la diferencia que presenta las siguientes características:

- Puede ser programable entre 0 a 15 000 milisegundos, con un incremento de 1 milisegundo, dando oportunidad a un amplio manejo de tiempos de amarre y contando con una exactitud del retardo programado de más menos 0,1% de milisegundos. Esto garantiza no tener traslapes, que guarda directa relación con la probabilidad de acoplamiento de las ondas de choque producidas por cargas detonadas simultáneamente.

- El detonador electrónico cuenta con un número de identificación único de fábrica que permite tener registrado cada detonador.
- Se realiza la comunicación bidireccional entre el control del equipo y el detonador. Para registrar o conectar un detonados, los cables tienen que ser insertados dentro de las ranuras terminales del conector, cualquier cable podría ser insertado dentro de cualquier ranura, pero un solo cable por ranura (Paredes, 2014).

2.5.1. Sistema de Iniciación electrónica

Todo el sistema de Iniciación Electrónica utilizada en Cuajone y durante las pruebas realizadas conforman el Sistema I-Kon de Orica, con la cual se han ejecutado las voladuras.

Figura 4

Componentes del sistema electrónico



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos – Cuajone, 2020.

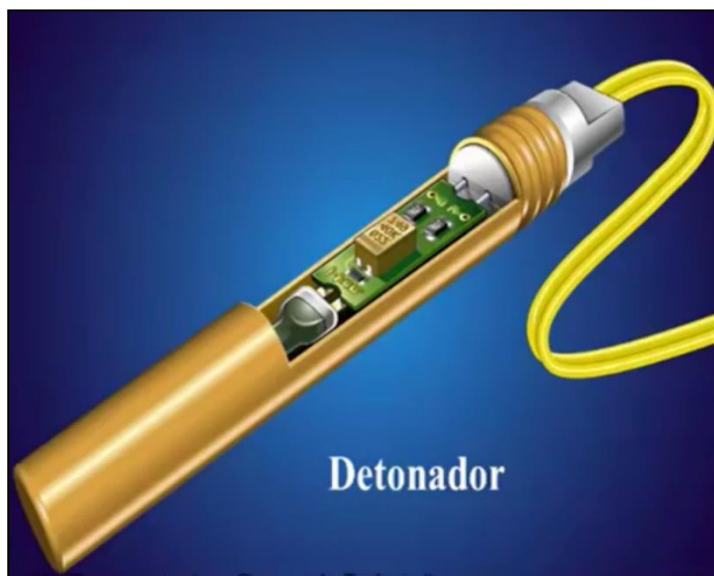
a) Detonador Electrónico I-Kon

La función es detonar la carga explosiva, relativo a un detonador pirotécnico, con la diferencia que tiene las siguientes características:

Este detonador puede ser programable entre 0 a 15,000 milisegundos, con un incremento de 1 milisegundo, dando oportunidad a un amplio intervalo de tiempos de amarre y contando con una exactitud del retardo programado de más menos 0.1% de milisegundos.

Figura 5

Detonador electrónico



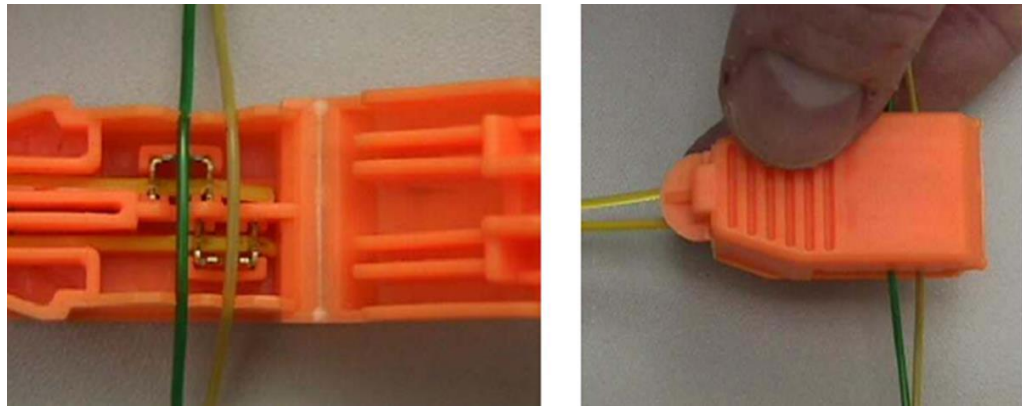
Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos – Cuajone, 2020.

El detonador electrónico cuenta con un número de identificación único de fábrica que permite tener registrado de cada detonador.

Se realiza la comunicación bidireccional entre el detonador y control del equipo. Para registrar un detonador, los cables tienen que ser insertados dentro de las ranuras terminales del conector, cualquier cable podría ser insertado dentro de cualquier ranura, pero un solo cable por ranura.

Figura 6

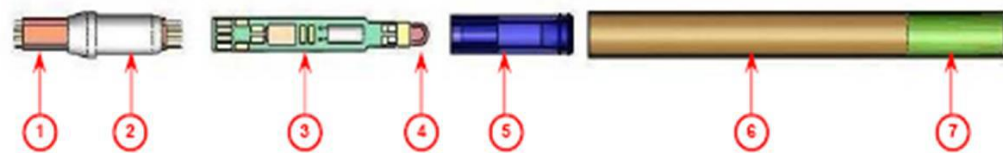
Conexión del detonador electrónico



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos – Cuajone, 2020.

Figura 7

Estructura interna de un detonador electrónico



- | | |
|------------------------------------|------------------------|
| 1 Cable descendente de 4-vías. | 5 H-Plug de seguridad. |
| 2 Tapón de crimpado. | 6 Cápsula de cobre. |
| 3 Placa de circuito impreso (PCB). | 7 Carga explosiva. |
| 4 Inflamador. | |

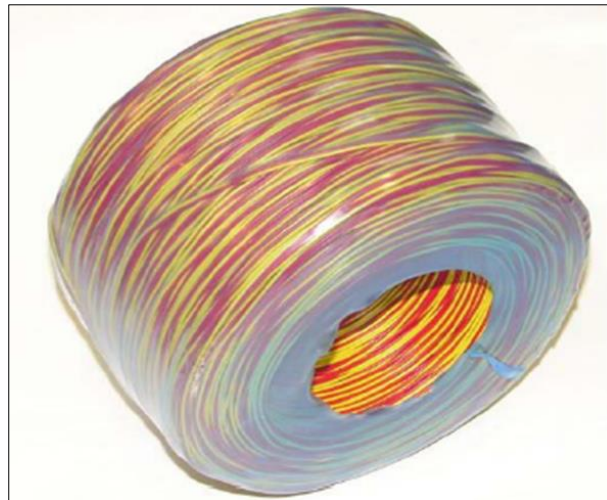
Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos – Cuajone, 2020.

b) Cable de conexión

El cable de conexión de dos vías, se utiliza para conectar los detonadores electrónicos en los proyectos de voladura, también sirve para la conexión del logger al blaster.

Figura 8

Cable de conexión



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos – Cuajone, 2020.

c) Logger

El Logger es el dispositivo del sistema de voladura electrónica, mediante el cual, se puede testear todos los taladros del

proyecto, a través del software Shot Plus I o en forma manual, su trabajo es el siguiente:

- Dispositivo verifica el estado del detonador.
- Lee y describe el ID del detonador en la memoria.
- Chequea automáticamente el detonador y el cable, mediante un test de continuidad de línea.
- Asigna tiempos de detonación.
- Tiene 5 voltios de salida.
- Cada logger tiene una capacidad de registrar 200 detonadores.

Figura 9

Logger



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos – Cuajone, 2020.

d) Blaster

Una vez efectuada la conexión, testeo y programación de tiempos de los taladros que conforman el proyecto de voladura, se procede con la detonación a través del blaster, el cual cumple las siguientes funciones:

Este equipo realiza un auto chequeo completo y automático de la funcionalidad del sistema y programación del detonador.

- Cuenta con una capacidad de 1 600 detonadores (control de 8 logger con 200 detonadores por logger). Único con códigos de armado y fuego.
- Único con una llave de activación digital.
- Trabaja con un voltaje de salida de 24 V.

Figura 10

Blaster – Iniciador de voladura



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos – Cuajone, 2020.

e) Software Shot Plus

Los datos del computador con los diseños de amarre y secuencia de salida, se lleva esta información al terreno y se procede a conectar cada detonador al logger, el cual le indica al detonador el tiempo de salida de acuerdo con el diseño previamente indicado y a su vez reconoce el estado de este, indicando si la línea descendente tiene problemas o existe alguna fuga de corriente

(comunicación bidireccional). El software se caracteriza por lo siguiente:

- Trabaja directamente con los detonadores electrónicos, y permite dar simulaciones de salida.
- Permite analizar los tiempos de amarre.
- Los amarres diseñados son descargados directamente al logger.

Figura 11

Programación de tiempos en Software Shot plus i

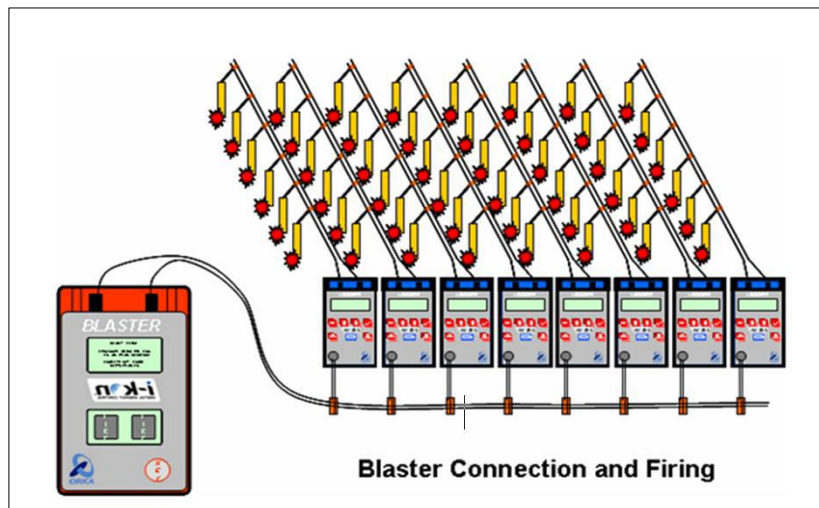


Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos – Cuajone, 2020.

Para una mejor visualización del sistema de voladura con detonadores electrónicos, se muestra el siguiente gráfico, en el cual se detalla, todos los componentes del sistema.

Figura 12

Circuito de voladura con detonadores electrónicos



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos – Cuajone, 2020.

2.6. Operaciones Mina

2.6.1. Perforación

Los taladros de perforación son hechos por perforadoras P&H 120A, BUCYRUS 49RIII, BUCYRUS 49 HR , P&H 320XPC y CAT MD6640 usando brocas de 11" y 12 ¼" de diámetro con 5"

para taladros de precorte. Para las perforaciones de los taladros se le adiciona 1 metro en promedio de sobreperforación al banco. Además, cuenta con el Sistema MineOps, aplicación tecnológica de los procesos en las operaciones mineras a tiempo real. En la fase 08 de la Unidad Minera Cuajone, hay 2 perforadoras constantes para el periodo de pruebas hechas con los detonadores electrónicos, estas son las perforadoras # 13 y # 14.

Tabla 2

Perforadoras Primarias

Modelo	Código
P&H 120A	D11
Bucyrus 49RIII	D13
Bucyrus 49HR	D14
P&H 320XPC	D16
P&H 320XPC	D17
CAT MD6640	D18

Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2020.

Tabla 3

Parámetros de Perforación por tipo de Terreno

Broca 12 ¼"	Pulldown (Klbs.)	R.P.M.	Presión de Aire (PSI)
Duro	80	60-65	47-52
Medio	70	70	47-52
Suave	60	80	47-52

Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2020.

Figura 13

Pantalla de visualización MineOps en perforadoras



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2020.

2.6.2. Voladura

La voladura es una tarea clave dentro las operaciones mineras, mina Cuajone es una mina de pórfido de cobre con más de 45 años, lo que significa que actualmente está realizando trabajos en niveles más profundos por ende se debe tener más cuidado y ponerle suma importancia a los parámetros de vibración en la búsqueda de estabilidad en los taludes para tomar el control operacional de los mismos. Operaciones mineras en una escala adecuada seguridad y excelente calidad.

Se dispone la actividad en 2 tipos de voladura: disparos primarios y disparos secundarios en donde el carguío del explosivo se realiza de una manera precisa y controlada a fin de no dañar las paredes de los bancos.

Se toma en cuenta también los protocolos y procedimientos de voladura, a fin de realizar las detonaciones dentro de los parámetros de seguridad en los proyectos.

Algunos de los factores que afectan en una voladura son: las propiedades y características de los explosivos que se van a utilizar (velocidad de detonación, densidad, presión de

detonación, distribución o simpatía), distribución de carga, secuencia de iniciación, tiempo de retardos entre los taladros y filas y propiedades del macizo rocoso.

a) Mezcla explosiva

La mezcla explosiva utilizada en la Unidad Minera Cuajone es un compuesto de Quantex 82: el cual contiene 80% de Emulsión y 20% de la sustancia denominada Nitrato Quantex.

Asimismo, se cuenta con el compuesto de mezcla Quantex 73, que consta de 70% de emulsión Slurrex G, 30% de nitrato Quantex (con una concentración mayor a 2% de diésel) y 0,15% de nitrato para la integridad de las muestras, diésel se mantiene constante.

Tabla 4

Matriz de densidad según proporción

Mezcla detonante gasificada	Densidad preliminar (gr/cc)
Mezcla 73	1,37
Mezcla 82	1,35

Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

b) Tiempos de retardo

La actividad de amarre es efectuada por la empresa contratista Orica que brinda un servicio post-venta al detonador electrónico, que de acuerdo con el área de voladura y geotecnia, define bajo criterios cuándo se efectúa cada detonación. El área de geotecnia proporciona sus recomendaciones para los tiempos de disparo. Tiempo entre taladros varían entre los 10 a 17 ms. Tiempo entre filas varían entre los 100 a 200 ms.

c) Accesorios para la voladura

- Booster

Es una carga de explosivo potente que no contiene accesorios y que tiene 2 funciones: completar el trabajo de iniciación del primer en la columna del explosivo y crear zonas de alta liberación de energía a lo largo de dicha columna.

Figura 14

Booster 2 Lb.



Fuente: Ficha técnica FAMESA.

- Nonel

Nonel (Fanel) es un producto por excelencia para la iniciación en el trabajo de minería, brindando acceso a conexiones seguras, eliminando conexiones defectuosas. También consta de dos elementos: fulminante de retardo, el segundo es un elemento de retardo, que le permite detonarlo en diferentes momentos; un tubo de choque fabricado con un equipo mecánico termoplástico, el cual, en su zona más interna está circundada por una abertura que deriva en una vibración cuya temperatura y presión son idóneas para iniciar al fulmimante de retardo.

Figura 15

Fanel



Fuente: Ficha técnica FAMESA, 2009.

- Detonador I-KON

El Sistema de Voladura I-KON es el más avanzado del mercado. Ha sido diseñado para uso en voladuras extensas de proyectos masivos y de alta complejidad operativa, en zonas elevadas y distantes. La aislación del cable del detonador Extreme i-kon™ III facilita el uso en condiciones adversas de minería, especialmente aptas para minas de metales. La resistente en la aislación única del cable del detonador Extreme i-kon™ III es fiable en minas en general.

Figura 16

I-KON Xtreme



Fuente: ORICA Cuajone, 2020.

2.6.3. Carguío

El proceso de carguío en el ciclo de minado viene a ser cargar el material volado en volquetes. Cuajone cuenta con 6 palas.

Tabla 5

Equipos de carguío

Modelo	Denominación	Capacidad Nominal (t)
P&H 2800XPB	P01	59
P&H 4100A	P03	73
BUCYRUS 495BII	P04	73
BUCYRUS 495HR	P05	100
BUCYRUS 495HR	P06	100
P&H 4100XPC	P07	105

Fuente: Jefatura de Operaciones U.M. Cuajone, 2020.

2.6.4. Acarreo

Sistema de movilización mediante volquetes en varias fases de la mina. El proceso de acarreo es directamente de la pala al volquete.

En términos de rampas para el tránsito de volquetes, este no es más del 10% dentro de mina del centro de extracción y menos que las rutas de la carretera, que se convierte en un recorrido de los volquetes cuando están acarreando. (Olazabal Javier, 2014).

Tabla 6

Equipos de acarreo

Modelo	Cantidad	Capacidad nominal (t)
CAT 793D	2	218
CAT 797F	18	363
KOMATSU 830E	2	218
KOMATSU 930E	17	290
KOMATSU 980E	6	366

Fuente: Área de Operaciones U.M. Cuajone, 2020.

2.7. Teoría de la voladura

2.7.1. Explosivo

Un material detonante de mezclas químicas que dados los estímulos suficientes, se produce una explosión química intempestiva. (Ames L.V., Perforación y Voladura de Rocas, 2012).

El explosivo es una sustancia que produce una gran cantidad de energía durante un corto período de tiempo, así como una presión

destruictiva y con un área circundante a varios metros a la redonda, dependiendo de la concentración de los compuestos.

Entonces de la definición anterior podemos describir a un material detonante de la siguiente manera:

- Primero, es una combinación de químicos bajo interacción.
- En segundo lugar, cuando se activa por un estímulo que acciona la detonación, el explosivo desarrolla una reacción abrupta denominada detonación.
- En tercer lugar, el producto de la detonación se escapa inmediatamente emitiendo gran volumen de gases a altas presiones y temperaturas.

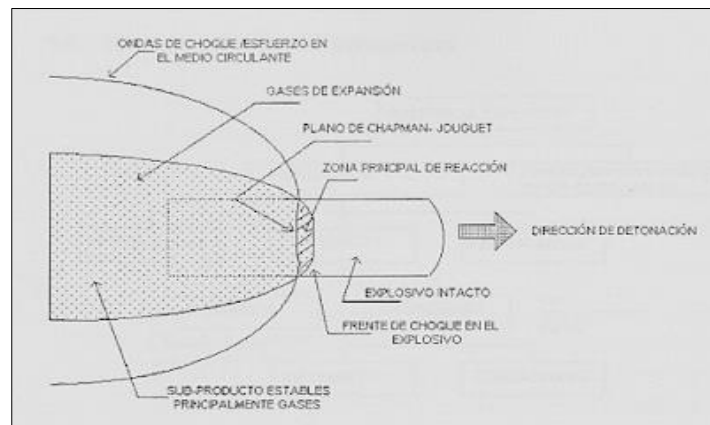
2.7.2. Detonación

La detonación es la reacción violenta que se caracteriza por una gran cantidad de liberación de productos gaseosos y produce una liberación de energías de altas temperaturas, los cuales tienen una alta concentración que hace que las áreas

circundantes sean comprometidas en diversos grados de presión.

Figura 17

Esquema de detonación



Fuente: Tecnología de Explosivos, Ames Lara, 2012.

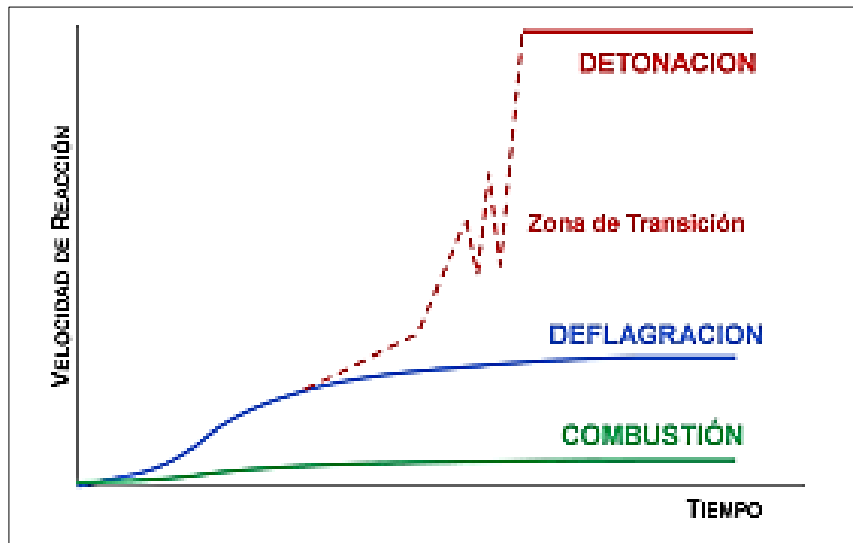
Por ende, quedan identificadas 2 energías producto de la reacción del explosivo: la primera energía de gas y la segunda energía de choque. La energía expresada como onda de choque, se propaga a través de la columna explosiva con la suficiente energía para activar a la masa explosiva restante provocando así una detonación a lo largo del taladro.

Tan pronto se libere la energía de choque, prosigue la energía del elemento gaseoso. La detonación de un explosivo libera grandes cantidades de gases.

Estas dos fuerzas accionan presión sobre el material circundante, esta presión ejercida provoca grietas, fragmentar y movimiento y/o desplazamiento de las rocas.

Figura 18

Desarrollo de una detonación



Fuente: Perforación y Voladura de Rocas en Minería, Bernaola Herrera, 2013.

Según Konya (1998), “La presión de un determinado impacto se cuantifica mediante la velocidad de detonación. Una estimación físico-química da como resultado, una representatividad solo de entre el 8% y 16% de la totalidad de energía contenida en el material explosivo como trabajo disponible. Otro elemento, el cual es el material gaseoso se asocia entre el 84% y 92% de la resultante final de la energía liberada”.

2.7.3. Mecanismo de fracturamiento de materiales rocosos

Al detonarse material explosivo inserto en material rocoso, las fases de trabajo se disgregan de la siguiente manera:

- Producción de un impacto fuerte debido a la onda de choque.
- Producción de gases con altas temperaturas y gran volumen.

Formándose ondas de choques violentas como resultado de la detonación de las explosiones que ocurren al interior de un taladro. Estas ondas hacen que la tensión se extienda a través de las rocas adyacentes y en presencia de una cara libre, esta presión también se refracte como una fuerza de tracción.

Según Bernaola, Castillo y Herrera (2013) "La primera onda de choque pasa por una roca cercana a una velocidad de unos 3000 a 5000 m/s, y el macizo rocoso es de 10 a 100 veces menos potente". Como resultado, tal presión por el esfuerzo de compresión y tracción hace que la roca se rompa circundante al taladro.

Después de la onda de choque (propagación de ondas de presión y aparición de ondas de tracción). Se tiene en mención que los gases hacen que las grietas se extiendan y se muevan hacia la roca fragmentada.

A) Energía de choque

En caso de la explosión, la carga entrante se esparce sobre las rocas. A medida que la fuerza creada por el material químico atraviesa las rocas genera un esfuerzo de tensión complementaria.

Esto crea grandes grietas alrededor del taladro debido a la presión y esto permitirá nuevas fracturas cada vez que la presión sea mayor.

De manera similar, el balanceo puede ocurrir cuando las ondas comprimidas se encuentran con una cara libre o se abren en el medio de ellas y también se observa una fuerte presión en el taladro.

Las ondas de choque pueden considerarse un tipo de onda de estrés. Al igual que una onda de estrés ordinaria, una onda de choque transporta energía y puede propagarse mediante un medio compacto. Como características se tiene que su velocidad aumenta con una presión o tensión creciente, hay un aumento de entropía cuando se forma una onda de choque.

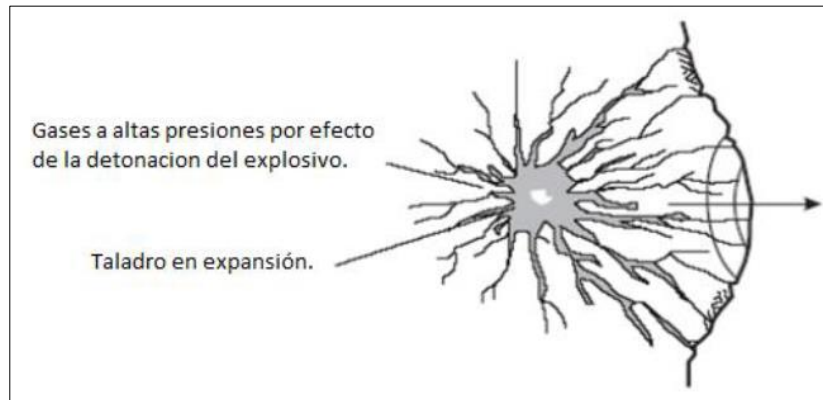
B) Energía gaseosa

La fracturación interna derivada como resultado de la presión de la roca se ven agravadas por la resistencia interna del gas explosivo, que entra y pasa mediante las grietas y fracturas. Las grietas se inclinana por una abertura más grande, en última instancia, hacen que la roca se

mueva hacia adelante. La energía producida por el gas, que se emplea a lo largo del lapso de liberación de las rocas, denominada comúnmente energía de empuje.

Figura 19

Detonación por altas presiones

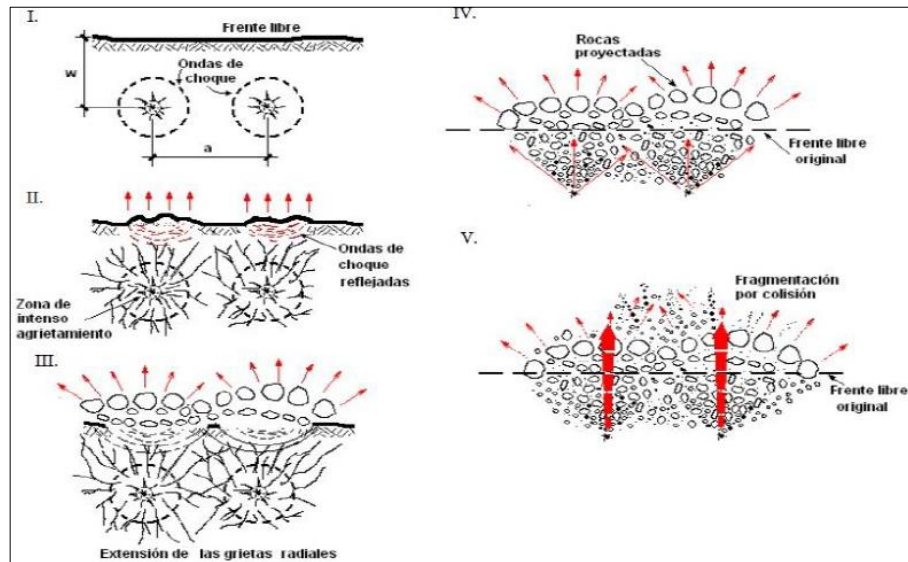


Fuente: NPTEL, 2004.

Los gases de alta presión finalmente escapan hacia la atmósfera con valores de presión de 100 Mpa y en ese instante se detiene el trabajo efectivo en la roca. Toda la energía liberada como resultado de la detonación, hasta el punto se denomina energía de fragmentación.

Figura 20

Proceso de desagregación



Fuente: Puig & Melián, 2003.

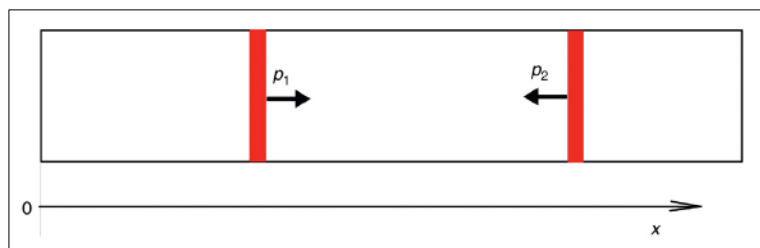
2.7.4. Colisión de ondas de choque

En la voladura de rocas, si se colocan dos o más detonadores (cebadores) en diferentes lugares de un barreno y se inician simultáneamente, se producirá una colisión de ondas de choque. A continuación, se mostrará cómo resolver un problema de colisión de este tipo, tomando TNT como ejemplo. Suponga una descarga de 15 GPa que viaja en dirección positiva

(descarga A) en el explosivo (unidimensional). En el mismo explosivo hay otro choque de 15 GPa que viaja en dirección negativa (choque B) en curso para una colisión frontal. Cuando las dos ondas de choque se acercan, la colisión provocará dos nuevas ondas de choque que se reflejan en cada dirección. Para resolver este problema, necesitaremos dos curvas Hugoniot para las nuevas ondas. Se debe tener en cuenta que las nuevas ondas viajan en dos direcciones diferentes. La figura 21 muestra las dos ondas de choque originales y la dirección X.

Figura 21

Dirección de colisión de choque



Fuente: Rock fracture and blasting: Theory and applications, Zong-Xian Zhang, 2016.

Comencemos primero con la curva de Hugoniot para la nueva onda en negativo en dirección X. Sabemos que esta curva Hugoniot viene del estado (p_1, μ_1) , y μ_1 es positivo; ver figura 21

y figura 22. Este estado fue alcanzado por un choque original en positivo en dirección X, en $\mu_0 = 0$ del material; la curva Hugoniot de este choque original es:

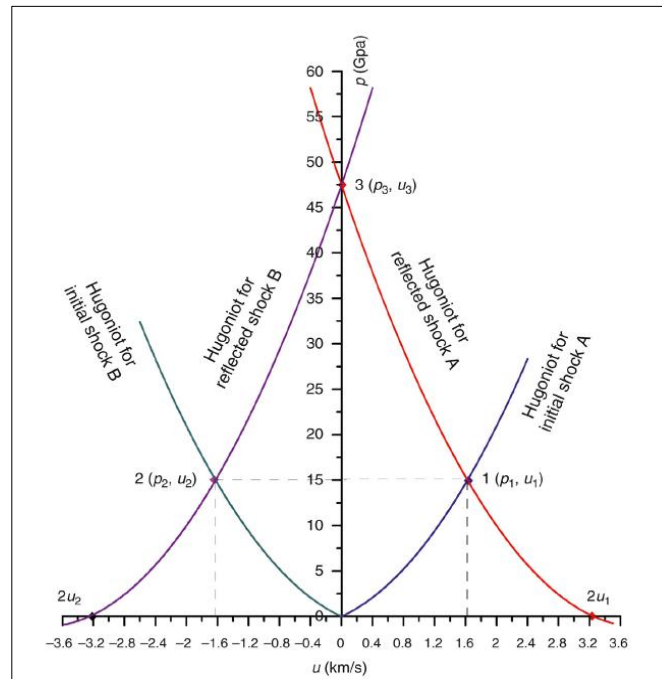
$$p = \rho_0 C_0 \mu + \rho_0 s \mu^2 \quad [1]$$

Considerando $p = p_1 = 15 \text{ Gpa}$, obtenemos $\mu_1 = 1.625 \text{ Km/s}$ de esta ecuación de Hugoniot. La curva de Hugoniot para el nuevo choque en la dirección negativa debe rotarse alrededor de este punto e interceptará la $p_0 = 0$, el eje en $2\mu_1$ (figura 22); su ecuación es:

$$p = \rho_0 C_0 (2\mu_1 - \mu) + \rho_0 s (2\mu_1 - \mu)^2 \quad [2]$$

Figura 22

Solución para una P3 debido a la colisión de 2 ondas de choque



Fuente: Rock fracture and blasting: Theory and applications, Zong-Xian Zhang, 2016.

Ahora consideremos la curva de Hugoniot para la nueva onda en dirección positiva X. Sabemos que esta curva Hugoniot viene del estado (p_2, μ_2) , y μ_2 es negativo; ver figura 21 y figura 22. Este estado fue alcanzado por un choque, llamado choque original en dirección negativa X, en $\mu_0 = 0$ del material; la curva Hugoniot de este choque original es:

$$p = \rho_0 C_0 (\mu_0 - \mu) + \rho_0 s (\mu_0 - \mu)^2 \quad [3]$$

Considerando que $p_2 = 15\text{GPa}$, $\mu_0 = 0$, obtenemos $\mu_2 = -1.625\text{ Km/s}$ de esta ecuación. La curva de Hugoniot para el nuevo choque en la dirección positiva debe rotarse alrededor de este punto e interceptará la $p_0 = 0$, el eje en $2\mu_2$ (figura 21); su ecuación es:

$$p = \rho_0 * C_0 * (\mu_0 - 2\mu_2) + \rho_0 * s * (\mu - 2\mu_2)^2 \quad [4]$$

La solución para la velocidad de la partícula después de la colisión se puede obtener igualando las dos ecuaciones de Hugoniot 2 y 4. Esto da lugar a:

$$\mu_3 = 0$$

Entonces, la presión en la interacción se puede obtener usando esta velocidad de partícula en cualquiera de las ecuaciones 2 o ecuación 4:

$$p_3 = 47.5\text{ GPa}$$

Obviamente, obtenemos $p_3 = 47.5 \text{ GPa} > p_1 + p_2 = 30 \text{ GPa}$. En otras palabras, la presión de choque causada por la colisión de la onda de choque es mucho mayor.

2.8. Definición de términos

- Burden:

Hace referencia a la distancia que hay entre el taladro a la cara más cercana. (ISSE, 2008)

- Carga explosiva:

Es la cantidad de material explosivo utilizado en un taladro, un túnel u otro proyecto para movimiento de material. (ISSE, 2008)

- Detonación:

Proceso físico-químico relacionada por la alta velocidad de reacción. Para las explosiones, la velocidad de las primeras moléculas que contienen gas es tan buena que no pierden su calor al llegar al área fija de la carga explosiva sino que las transmiten por choque, derivando en

altos niveles de calor y una explosión con generación de nuevos gases.
(EXSA, 2012)

- Detonador:

Dispositivo que contenga un explosivo primario, que se utilice para activar y dar inicio a la detonación. Un detonador no posee como límite los 10 gramos de explosivo. Los términos abarcan, pero no se limitan a: detonadores electrónicos y de retardo, conexiones eléctricas, cables de seguridad y detonadores no eléctricos, cables o cualquier otra cosa para reemplazar al detonador. (ISSE, 2008)

- Detonador Electrónico:

Por lo general consiste en un detonador eléctrico instantáneo y de una unidad electrónica. Se hace notorio un circuito integrado o microchip, que constituye la parte central y principal 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 tiene circuitos de

seguridad internos. La otra unidad es un detonador eléctrico instantáneo ya explicado en la sección Sistema Eléctrico. (López, 2006).

- Emulsión:

Material explosivo que tiene cantidades sustanciales de oxidantes disueltos en gotas de agua, rodeadas de un combustible no miscible. (ISSE, 2008)

- Espaciamiento:

Distanciamiento entre taladros. En voladura de bancos, la distancia se mide perpendicular al burden y paralelo a la cara libre. (ISSE, 2008)

- Explosión:

Reacción química que implica una expansión extremadamente rápida de gases, generalmente asociados con la liberación de calor. (Curo, 2019)

- Explosivo:

Cualquier dispositivo, compuesto químico o mezcla, cuyo propósito primordial es el de funcionar a través de una explosión. (ISSE, 2008)

- Fragmentación:
Ruptura de una masa sólida en pedazos, por efecto de una voladura.
(ISSE, 2008)

- Macizo rocoso:
Es el conjunto de los bloques de matriz rocosa y de las discontinuidades. (Curo, 2019)

- Malla:
Diseño geométrico en la que se disponen los taladros de un proyecto de voladura, considerando técnicamente la relación entre espaciamiento y burden. (Curo, 2019)

- Retardo:
Tiempo predeterminado entre los pulsos de detonación o iniciación para permitir el disparo de cargas explosivas en los taladros manera distanciada. (Curo, 2019)

- Sensibilidad:

Propiedad de propagación del cartucho a cartucho de un explosivo, bajo ciertas condiciones de prueba. Se menciona como la distancia a través del aire a la que medio cartucho cebado detonará otro medio cartucho no cebado. (Curo, 2019)

- Voladura:

El disparo de materiales explosivos con el objetivo de romper el macizo rocoso, generar ondas sísmicas y/o mover material. (Curo, 2019)

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación

Para lograr los objetivos trazados en esta tesis, lo cual se desarrolló ajustando al método técnico - científico correspondiente a una investigación de nivel descriptivo.

El diseño empleado corresponde al tipo observacional o no experimental - descriptivo, además durante el periodo de pruebas de las diferentes voladuras se llevó a cabo la observación y llevada de un registro donde se muestre los parámetros utilizados en los diferentes escenarios del diseño de carga y reportes post voladuras para analizar y discutir resultados en cuanto a la fragmentación. Durante la fase analítica se realizaron simulaciones de voladuras en softwares especializados, así como en programas de Split Online centrado en la fragmentación.

3.2. Población y muestra

El proyecto se dio lugar en la fase 08 de la Unidad Minera Cuajone. La población es todos los disparos que se ejecutaron en la roca toba cristal en la mina Cuajone, por un total de 2 048 taladros de producción para las pruebas, los cuales se ejecutaron en zonas altamente competente y de mayor dureza de la roca de la fase 08.

Cabe señalar que, para efectos del estudio como muestra se tiene los disparos en la roca de la fase 08.

Mediante los 4 diseños de carga con el uso de detonadores electrónicos se obtuvieron distintos escenarios en fragmentación P (80) y Dig Rate (Velocidad de excavación), a continuación, se muestra los resultados por tipos de diseños presentados en la presente tesis mediante la siguiente tabla:

Tabla 7*Datos poblacional y muestral*

PROYECTO	PROYECTO	FASE	TIPO DE ROCA	F.P. TEÓRICO	P(80)	DIG RATE
PROY-1-1	418	8	T.C.	0.52	12.62	6930
PROY-1-2	428	8	T.C.	0.51	12.62	6925
PROY-1-3	436	8	T.C.	0.49	12.62	6925
PROY-1-4	438	8	T.C.	0.49	12.62	6925
PROY-1-5	440	8	T.C.	0.49	12.62	6935
PROY-1-6	442	8	T.C.	0.49	12.62	6936
PROY-1-7	444	8	T.C.	0.49	12.58	6936
PROY-1-8	446	8	T.C.	0.50	12.58	6925
PROY-1-9	450	8	T.C.	0.50	12.58	6928
PROY-1-10	451	8	T.C.	0.50	12.58	6930
PROY-1-11	458	8	T.C.	0.50	12.61	6930
PROY-1-12	460	8	T.C.	0.50	12.61	6929
PROY-1-13	462	8	T.C.	0.50	12.61	6929
PROY-2-1	464	8	T.C.	0.40	14.82	6890
PROY-2-2	510	8	T.C.	0.41	14.69	6890
PROY-2-3	514	8	T.C.	0.41	14.71	6892
PROY-2-4	516	8	T.C.	0.41	14.70	6892
PROY-2-5	518	8	T.C.	0.41	14.69	6890
PROY-2-6	528	8	T.C.	0.41	14.67	6895
PROY-2-7	530	8	T.C.	0.41	14.69	6898
PROY-2-8	532	8	T.C.	0.41	14.63	6896
PROY-2-9	538	8	T.C.	0.41	14.70	6894
PROY-2-10	544	8	T.C.	0.41	14.69	6892
PROY-3-1	758	8	T.C.	0.48	12.51	6978
PROY-3-2	765	8	T.C.	0.48	12.45	6972
PROY-3-3	770	8	T.C.	0.48	12.40	6972
PROY-3-4	810	8	T.C.	0.47	12.37	6971
PROY-3-5	811	8	T.C.	0.47	12.30	6969
PROY-3-6	812	8	T.C.	0.47	12.20	6959
PROY-3-7	814	8	T.C.	0.47	12.48	6972

PROY-3-8	809	8	T.C.	0.47	12.51	6973
PROY-3-9	820	8	T.C.	0.47	12.40	6980
PROY-3-10	815	8	T.C.	0.47	12.39	6965
PROY-3-11	821	8	T.C.	0.47	12.40	6969
PROY-3-12	816	8	T.C.	0.48	12.41	6971
PROY-3-13	817	8	T.C.	0.48	12.39	6971
PROY-3-14	817	8	T.C.	0.49	12.39	6971
PROY-3-15	822/823	8	T.C.	0.48	12.40	6973
PROY-4-1	824	8	T.C.	0.44	11.72	7346
PROY-4-2	808	8	T.C.	0.44	11.85	7351
PROY-4-3	811	8	T.C.	0.44	11.75	7348
PROY-4-4	809/812	8	T.C. / CB	0.44	11.78	7343
PROY-4-5	814	8	T.C.	0.44	11.83	7346

Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2020.

Se obtiene los siguientes datos con respecto a:

a) Distribución muestral

Para la distribución muestral se requiere datos de nuestra población, población media y nuestra desviación poblacional y la cantidad de proyectos como muestra dado como “n” que son obtenidos de la Tabla 07.

Donde:

N: Dato poblacional

\bar{N} : Promedio poblacional

n: Muestra

σ : Desviación poblacional

$$N = 43$$

$$\bar{N} = \mu = 12,93$$

$$n = 5$$

$$\sigma = 1,0181$$

$$n \left(\mu, \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \quad [5]$$

$$n \left(12,93, \frac{1,0181}{\sqrt{5}} \right)$$

$$n = (12,93; 0,4553)$$

b) Probabilidad media para $\bar{X} < 11.80''$

$$P(\bar{X} < 11,80'')$$

Donde:

Z: Desviación estándar comprendida entre el promedio y un cierto valor de variable X

S: Desviación estándar muestral

μ : Población media

$$Z_0 = \frac{\bar{X} - \mu}{s} \quad [6]$$

$$Z_0 = \frac{11,80 - 12,93}{0,4553}$$

$$Z_0 = -2,48$$

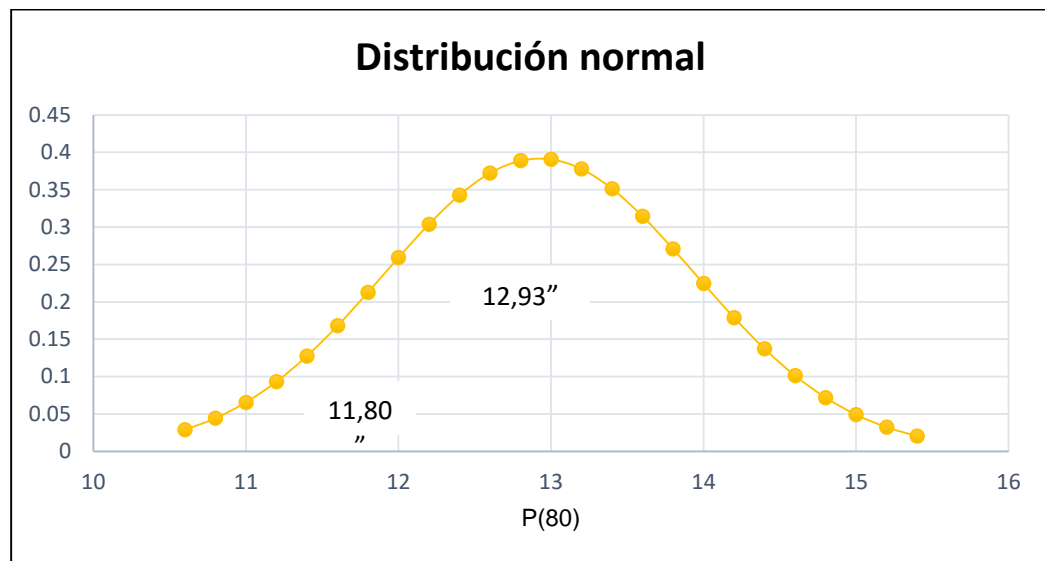
$$Z = -0,9934$$

Para la probabilidad de valores menores a un P (80) ideal en zona de desmonte y con nuestro dato poblacional, el cual involucra distintos factores, se tiene que muestra un porcentaje del (100% - 99,34%) = 0,66%.

Se indica que los valores probabilísticos cuando mayor se acerquen a la media poblacional aumentará su valor porcentual, en este caso nuestra muestra consiste en 6 proyectos de los cuales 2 proyectos se dispararon en una fecha común. Obteniendo un valor del 0,66 % porcentual, dando en claro la cantidad de proyectos realizados con el diseño de carga 04 con respecto a los demás diseños anteriores.

Figura 23

Distribución normal (Campana de Gauss)



Fuente: Elaboración propia.

3.3. Operacionalización de variables

- Variable Independiente: Fragmentación de la Roca

Indicadores:

- Malla de perforación y voladura
- Efecto del parámetro de fragmentación
- Velocidad de excavación de la pala
- Velocidad de chancado
- Indicador P(80)

- Variable Dependiente: Uso de doble iniciador electrónico

Indicadores:

- Detonadores electrónicos
- Mallas de voladura e iniciación
- Retardadores
- Diseño de carga de taladros
- Potencia del explosivo

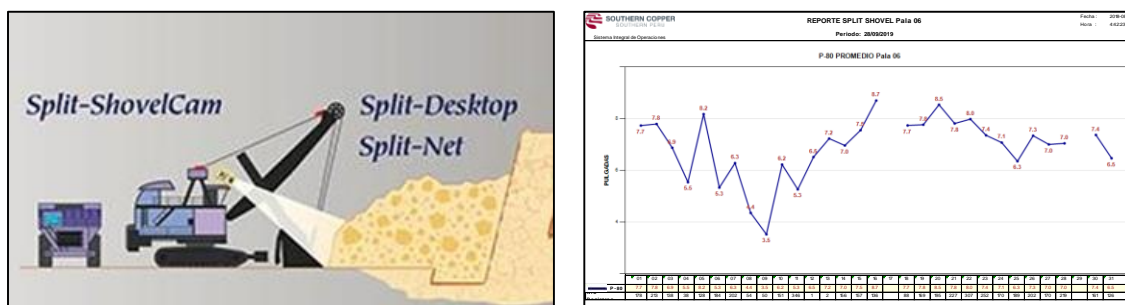
3.4. Técnicas e instrumentación para recolección de datos

Una adecuada elaboración del diseño de carga para los proyectos de prueba de la fase 08, aplicando una doble iniciación de carga deck en cada uno de los taladros de producción.

Otro método utilizado en este análisis es el registro de P (80) de los fragmentos a tiempo real es obtenido del sistema SplitOnline, el sistema captura imágenes automáticamente para que se actualice inmediatamente con los resultados de la fragmentación de rocas así como las velocidades de excavación, que fueron obtenciones en la fase 08.

Figura 24

Sistema Split Shovel de Pala 06



Fuente: Asistencia Técnica - EXSA.

3.5. Procesamiento y análisis de datos

Esta sección señala el procesamiento de la información y análisis de datos, las similitudes halladas en la observación y medición del desempeño de la detonación. Los datos recabados al inicio y en la sección de recopilación de información en el que se contrastó el nuevo diseño del material. Los aspectos en contraste con esto son: diseño de carga, fragmentación, velocidad de excavación, análisis de costo para cada diseño realizado.

En la zona de desmonte de la fase 08 se han desarrollado varios diseños de carga y se han presentado hasta 04 diseños que se han

utilizado con frecuencia; sin embargo, los primeros se han sido excluyendo en base a los resultados de la fragmentación. El diseño 04 está considerando carga deck (doble iniciación electrónica).

Figura 25

Vista de roca Toba Cristal de Fase 08



Fuente: Asistencia Técnica - EXSA.

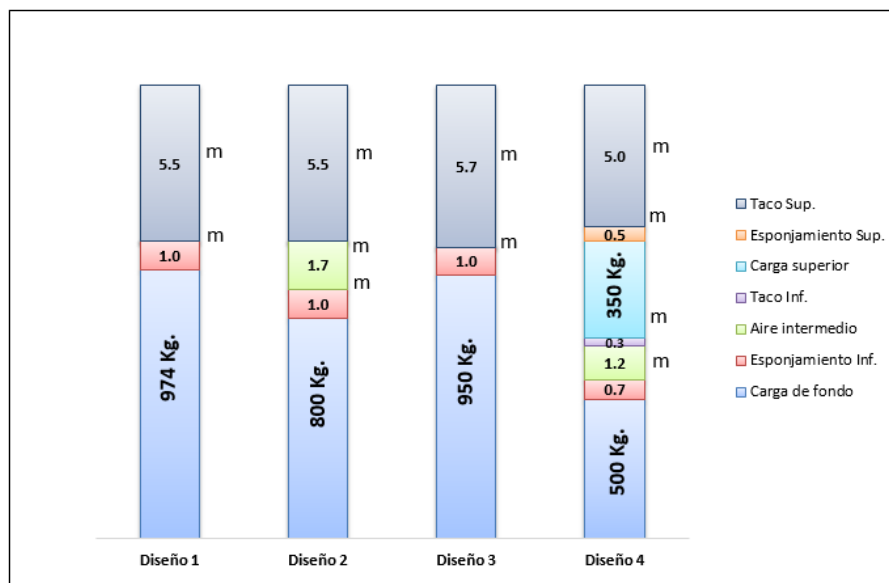
3.5.1. Diseños de carga aplicado en toba cristal

Se analizaron varios escenarios resultantes como se puede visualizar en la figura 26 donde se contrastan los distintos esquemas de carga que se utilizaron en la fase 8 de la Unidad Minera Cuajone.

Con el diseño 04 (actualmente) es posible aminorar los indicadores de factor de carga de 0,50 kg/t a 0,44 kg/t, lo que resulta una disminución del 12,73%.

Figura 26

Esquemas de carga ejecutados en Toba Cristal



Fuente: Asistencia Técnica - EXSA.

Tabla 8

Parámetros en diseños de carga

Estándares	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3	Diseño 4
Espac. X Burden (m)	8 x 7	8 x 7	8 x 7	8 x 7
MEQ 80/20 (kg/tal)	974	800	950	850
Tonelada rota /Tal (t)	1945	1945	1945	1945
Elemento de potencia (kg/t)	0,50	0,41	0,49	0,44

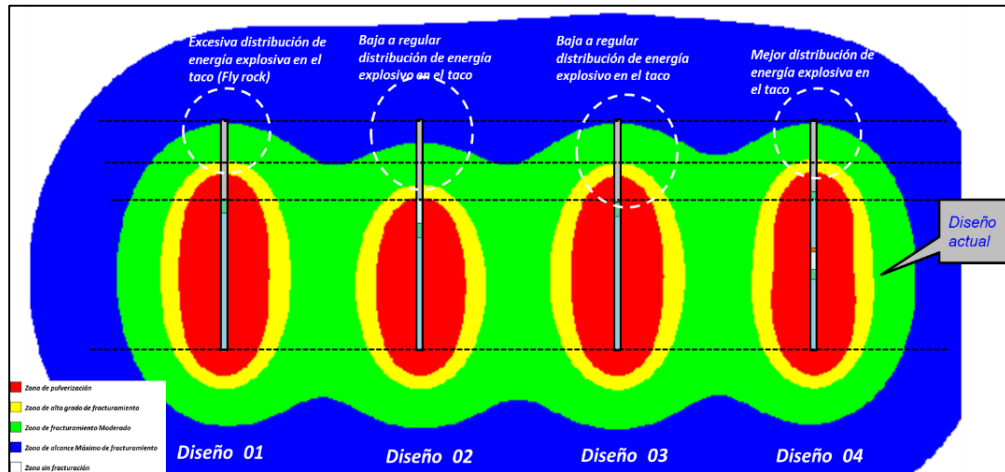
Fuente: Elaboración propia.

3.5.2. Esquema de la energía según los diseños empleados

Para mostrar la cantidad de energía explosiva de la que se ha puesto en la producción y poder elegir el mejor método, se lleva a cabo el monitoreo mediante el Jk Simblast como se observa en la figura 27, el halo 04 muestra una mejora en la distribución de la energía en la roca circundante.

Figura 27

Distribución de halos energéticos de los 04 diseños



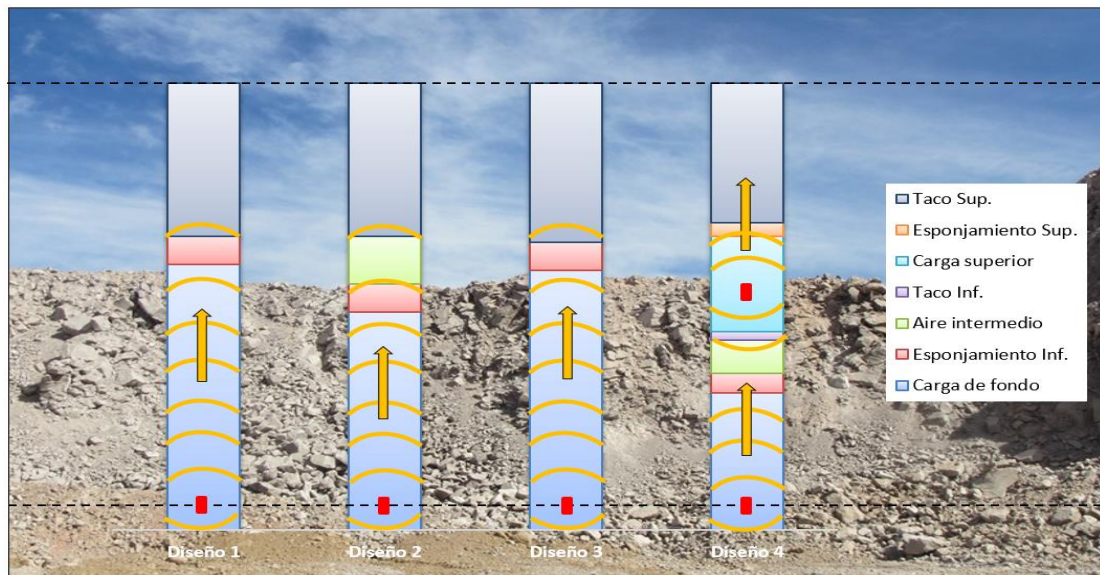
Fuente: Asistencia Técnica - EXSA.

3.5.3. Representación de la onda de choque

La aplicación de doble iniciación electrónica en el diseño 04, está basado en el principio de colisión, es decir, al momento en que dos ondas convergen, la presión en el punto terminal es largamente superior según la magnitud de las dos primeras presiones (el análisis sugiere que ésta es favorable para la fractura de rocas). En la figura 28 podemos comprender mejor cómo las ondas dirigen la forma en que se utilizan.

Figura 28

Líneas de la onda según esquemas empleados en T.C.



Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

3.5.4. Análisis de P (80)

Los resultados de P (80) y Dig Rate encontrados en la observación se han analizado con base a los diseños de carga. El diseño 04 ha proveído resultados viables para seguir empleándose en la fase 08.

Con el diseño 04 (actual) se ha logrado reducir el P (80) de 14,69 pulg. a 11,8 pulg. que significa una reducción del P (80) en 19,67 %.

Tabla 9

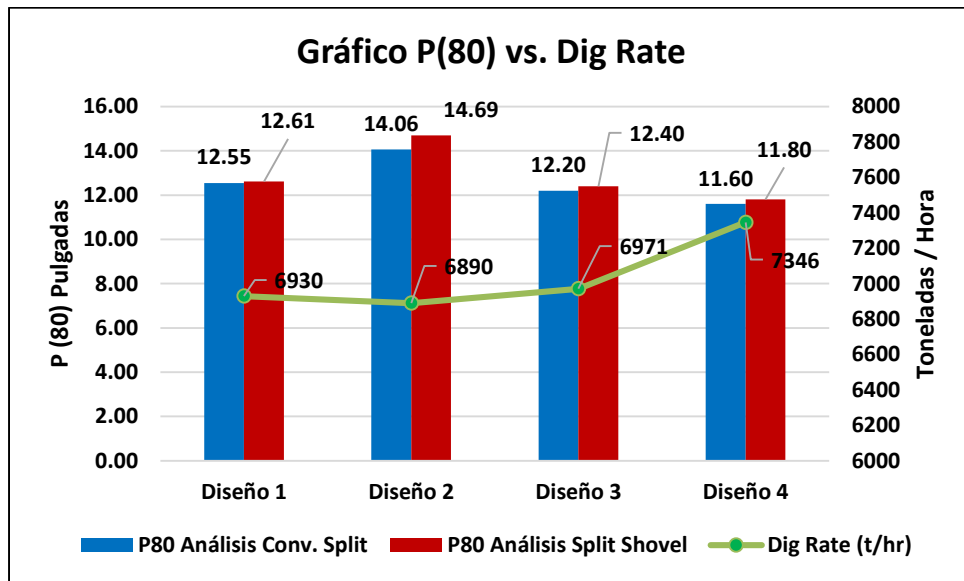
Resultados según diseños sobre carga

P80 v s. Dig Rate	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3	Diseño 4
P(80) Análisis Conv. Split	12,55	14,06	12,20	11,60
P(80) Análisis Split Shovel	12,61	14,69	12,40	11,80
Dig Rate (t/hr.)	6930	6890	6971	7346
Minado por Pala	P06/P07	P06/P07	P06	P06

Fuente: Elaboración propia.

Figura 29

Gráfico P(80) vs. Dig Rate



Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

3.5.5. Distribución de tamaño de partículas

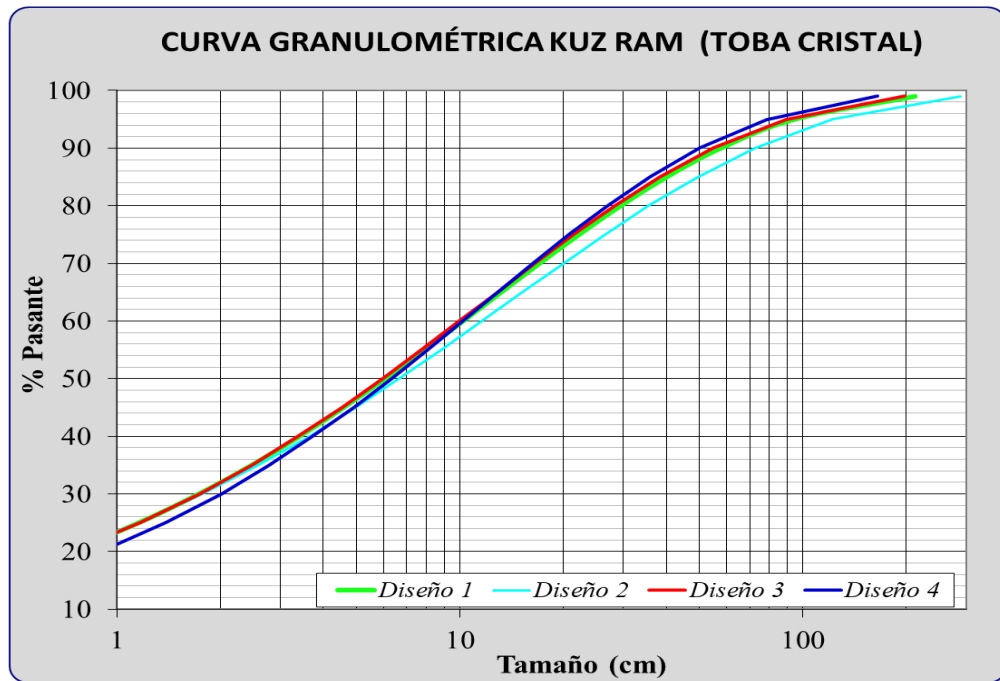
Para definir la uniformidad en la fragmentación se tiene que tener en cuenta los índices de uniformidad. El coeficiente de uniformidad de Cunningham denominado “n”, es el indicador de uniformidad del tamaño de los fragmentos distribuidos. Es recomendable valores de $n > 1,5$ por lo cual, valores altos indican tamaños uniformes y los valores

bajos indican un amplio rango de tamaños incluyendo fragmentos finos y/o grandes.

La curva granulométrica del diseño 04 indica que se tiene una fragmentación uniforme post-voladura en comparación a los otros diseños anteriores como se puede visualizar en la figura 30.

Figura 30

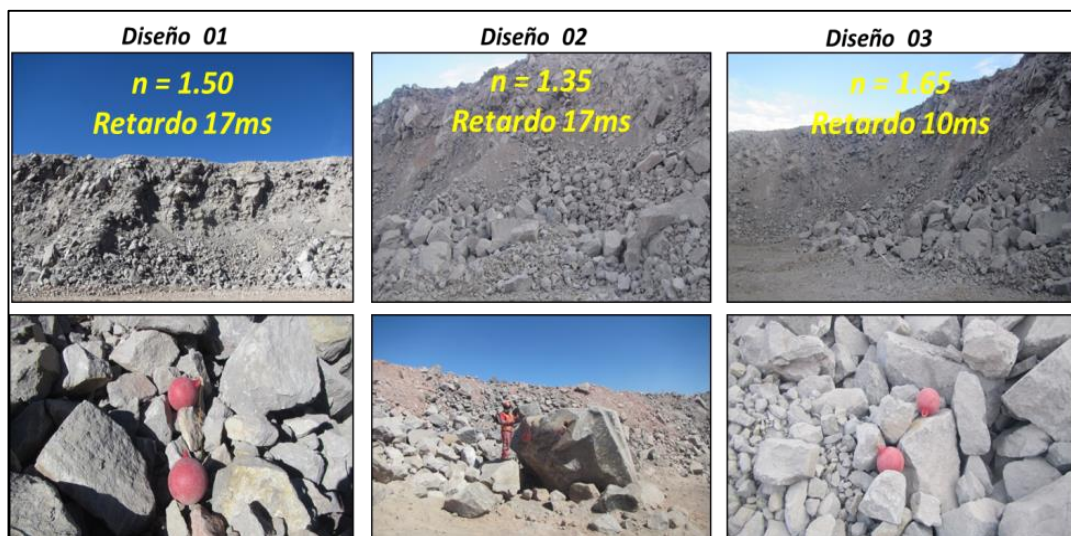
Amplitud de los diseños de carga



Fuente: Asistencia Técnica - EXSA.

Figura 31

Vista de frentes de minado sin doble iniciación electrónica



Fuente: Asistencia Técnica - EXSA.

3.5.6. Estudio de costos

Los costos nos indican la representación del resultado de fragmentación conseguido en la zona de desmonte de la fase 08 con los diseños que se han realizado. Para realizar el análisis de costos de manera porcentual se considera como línea base el Diseño 01.

En la Tabla 10 se muestra el detalle de costos de voladura que se tiene con los diferentes diseños.

Tabla 10*Análisis de costos*

Costos	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3	Diseño 4
U.S.\$ x MEQ 80/20	447,46	367,52	436,43	390,49
U.S.\$ x Ikon	23,80	23,80	23,80	47,60
U.S.\$ x Booster	5,34	5,34	5,34	10,68
U.S.\$ x Fanel	1,71	1,71	0,00	0,00
Costo \$ / Taladro	478,31	398,37	465,57	448,77
Ahorro \$	0,00	79,94	12,74	29,54
Ahorro %	0,00%	16,71%	2,66%	6,18%

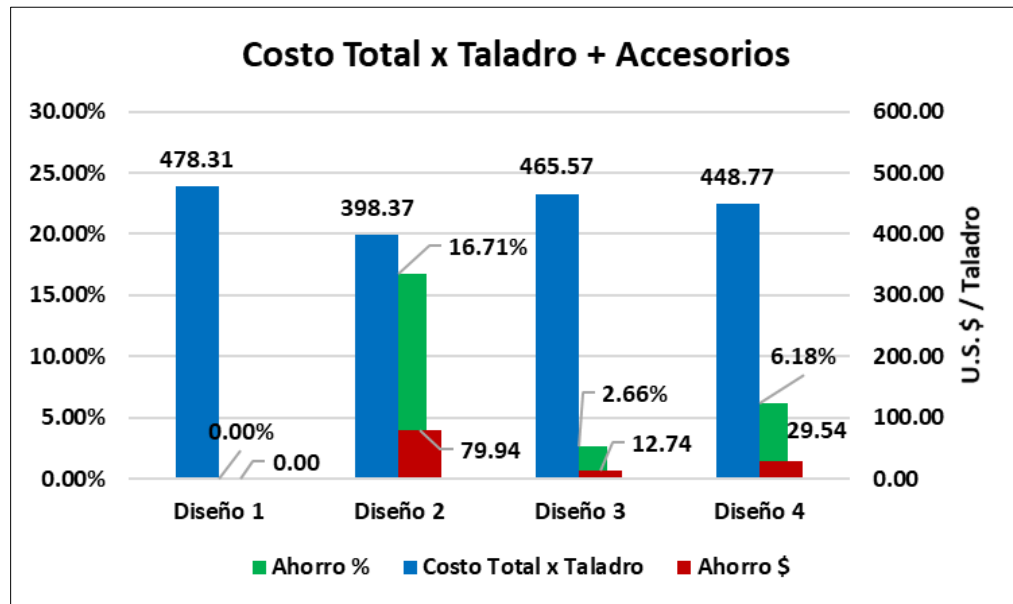
Fuente: Elaboración propia.

Con el diseño N° 4 se está obteniendo satisfactoria la reducción de los costos en Perforación y Disparos en un 6,18 % (US\$ 29,54/ tal.) como se observa en la Tabla 10.

Al respecto a la roca Toba Cristal con el diseño N° 4 se ha disparado **2 048 taladros** de producción hasta el Proyecto 3550-814 que significan un ahorro de **US\$ 60 497,92**.

Figura 32

Costos de los 04 diseños



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Resultados

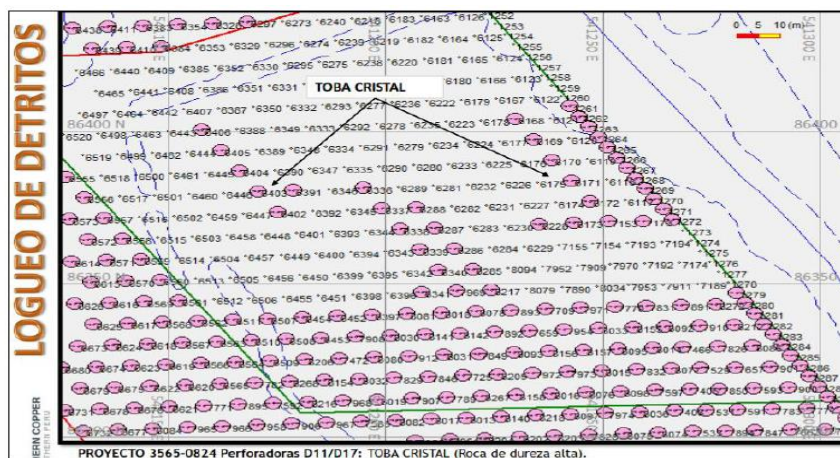
Se consideró los siguientes proyectos dentro las pruebas para doble iniciación electrónica.

4.1.1. Proyecto de voladura 3565-824

Nº de Taladros	: 200 de producción y 34 de buffer
Factor de potencia	: 0,44 kg/t
Tipo de roca	: Toba Cristal (TC)

Figura 33

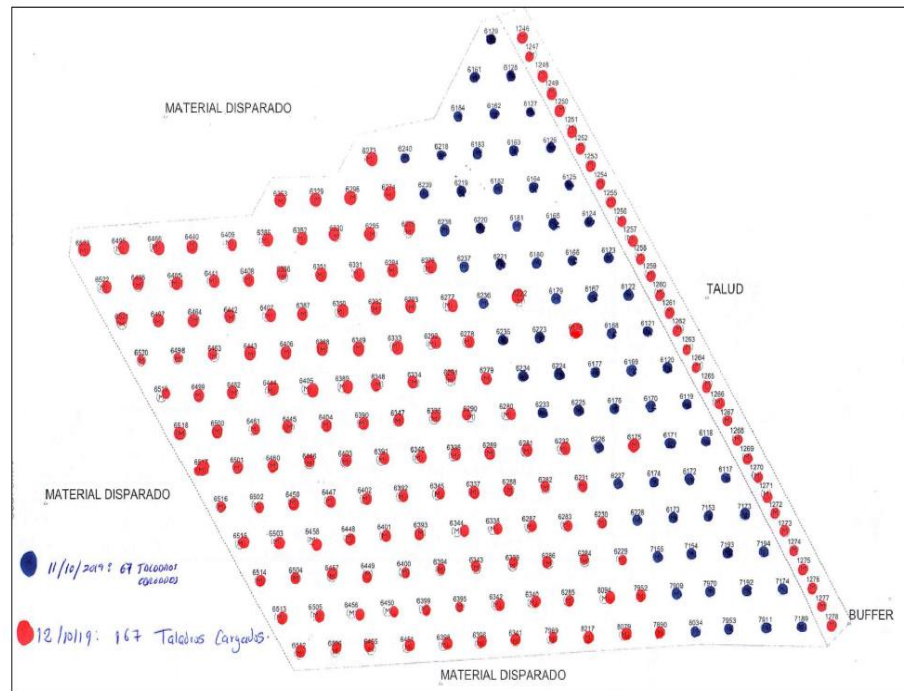
Logueo de detritus del Proyecto 3565-0824



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

Figura 34

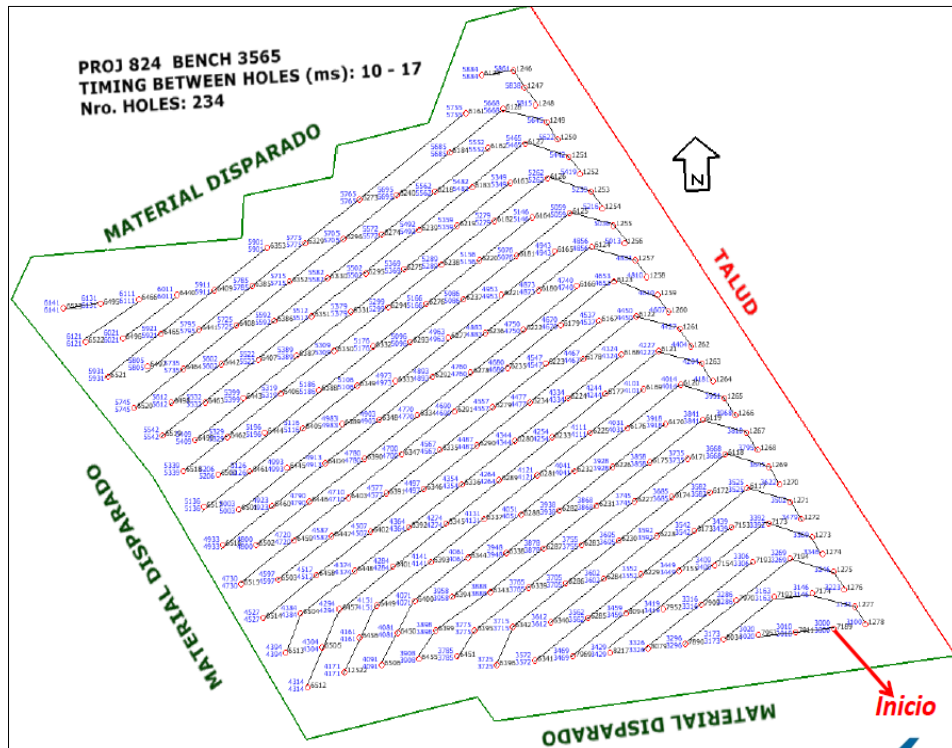
Desarrollo del carguío



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

Figura 35

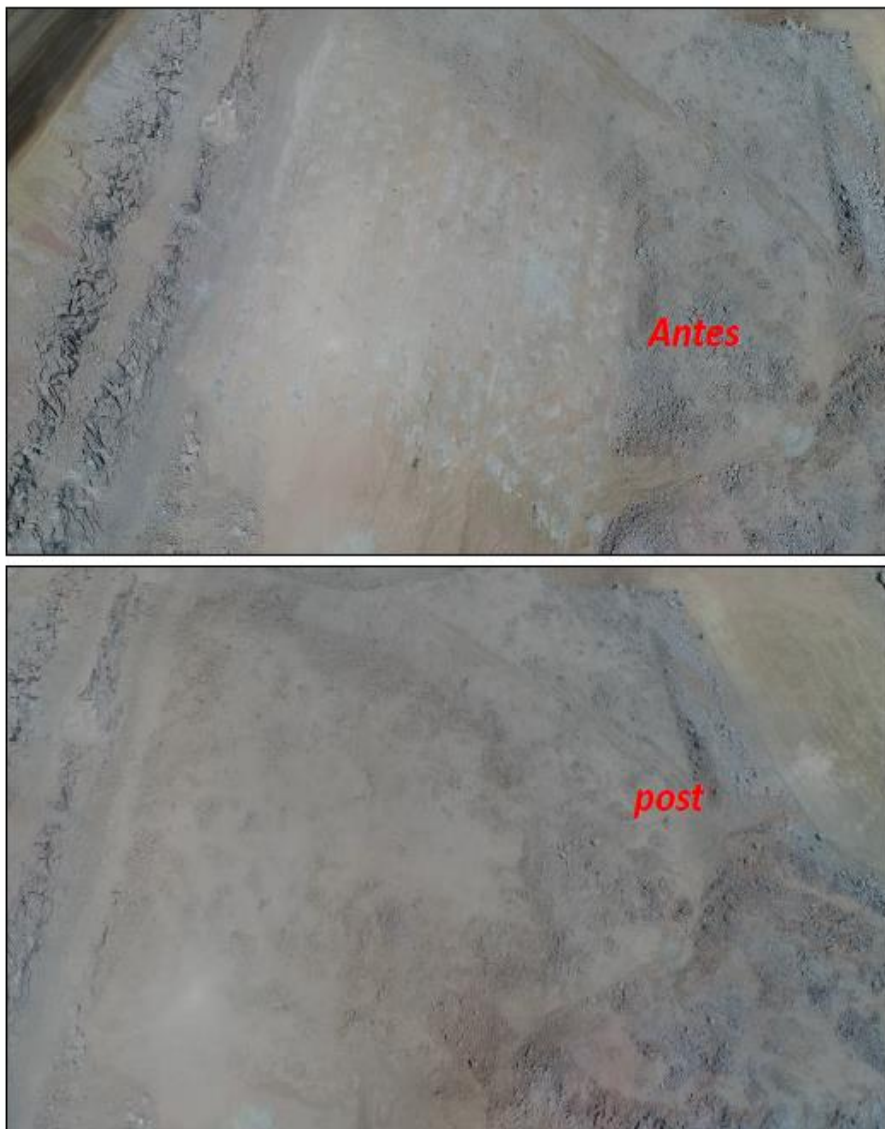
Diseño de amarre



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

Figura 36

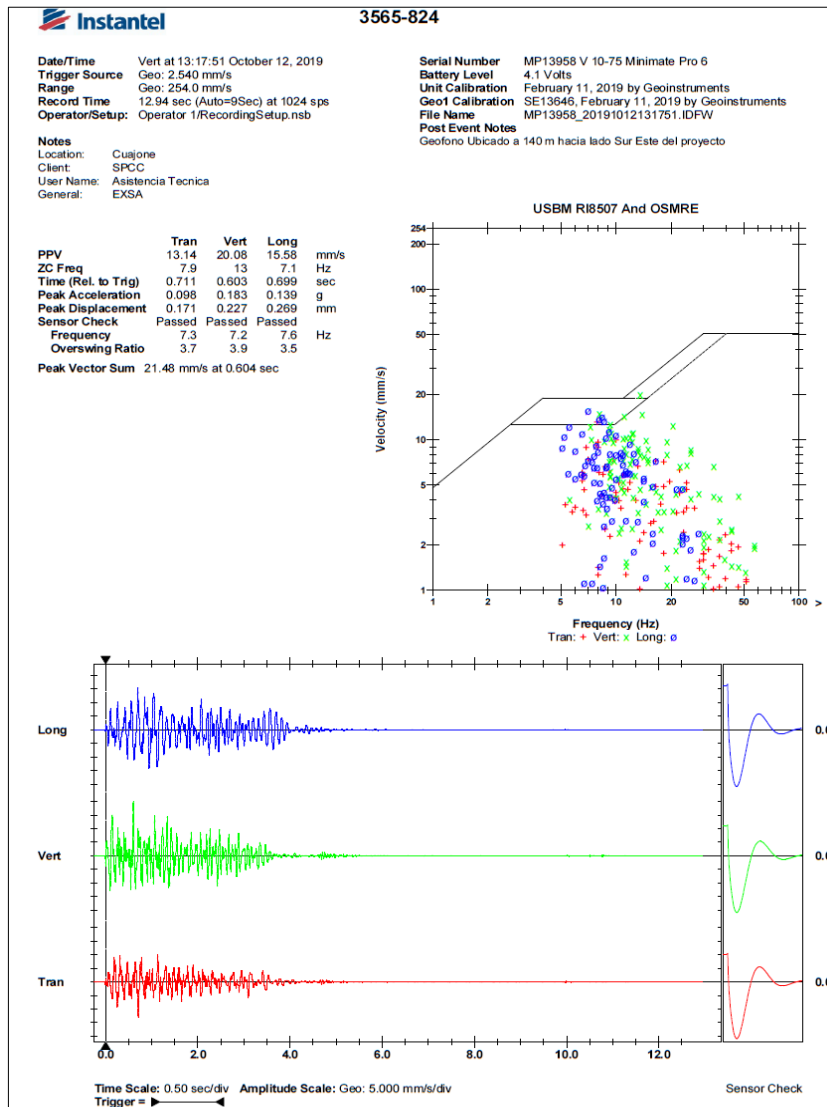
Antes y post voladura de proyecto 3565-824



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

Figura 37

Reporte de vibraciones proyecto 3565-824



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

REPORTE:

- El Proyecto 3565-824 en fase 8, se inició con la carga el día 11 de octubre, se disparó el día 12 de octubre; en total 02 días de permanencia del explosivo. Se cargaron y dispararon 234 taladros en total (34 Buffer + 200 Producción en TC).
- El espaciamiento de todo el proyecto fue 8,0 m y se ha presentado rocas: como roca principal TC con F.P. 0,44 kg/t (deck 500 kg y 350 kg, total 850kg) y los taladros de buffer con 400 kg.
- Se usó MEQ 80/20 con una densidad de copa de 1,10 gr/cc, cuyo esponjamiento aprox. fue de 1,0 m en todos los taladros de producción.
- Se ha monitoreado vibraciones a 154 m lado este (talud), cuyo registro es 21,48 mm/s menor al límite.
- Postdisparo no se aprecia generación de gases nitrosos.

4.1.2. Proyecto de voladura 3550-808

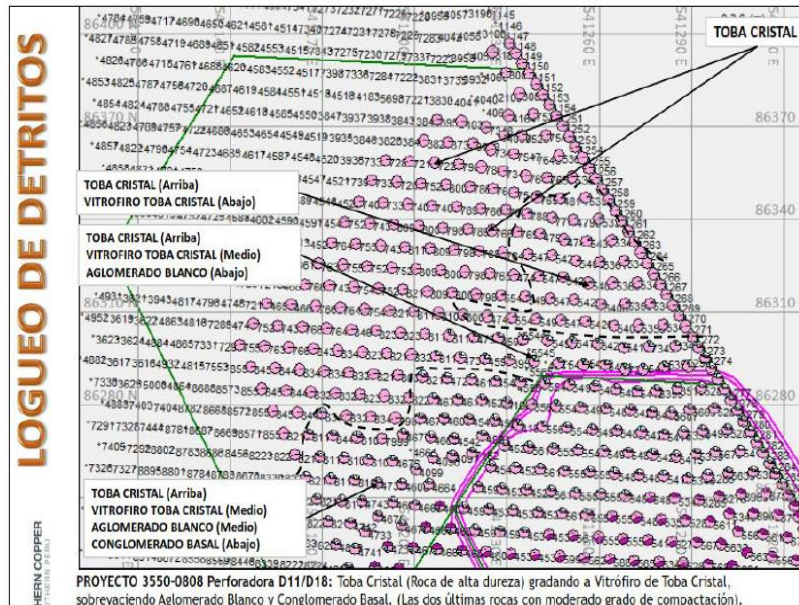
Nº de Taladros : 339 de producción y 32 de buffer

Factor de potencia : 0,44 kg/t

Tipo de roca : Toba Cristal, Vitrofiro Toba Cristal, Aglomerado blanco y Conglomerado basal

Figura 38

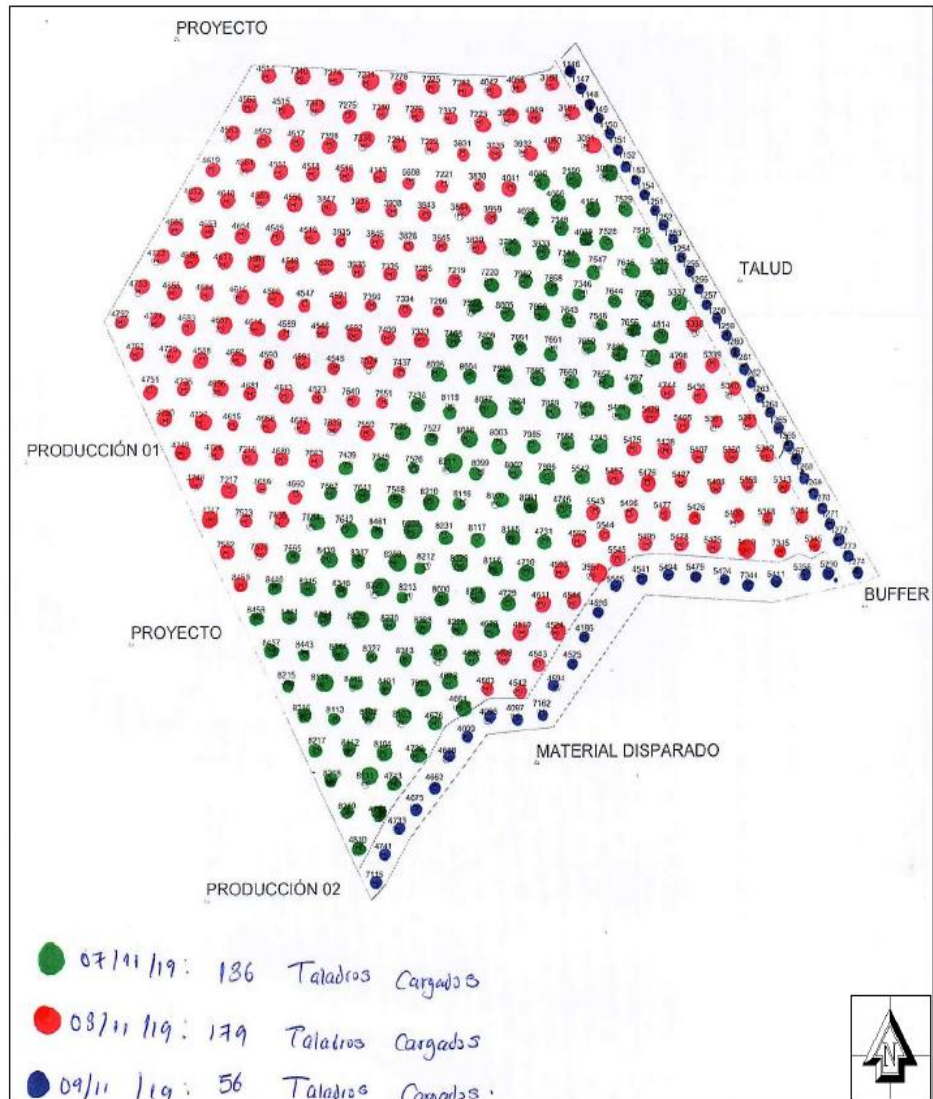
Logueo de detritos del Proyecto 3550-0808



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

Figura 39

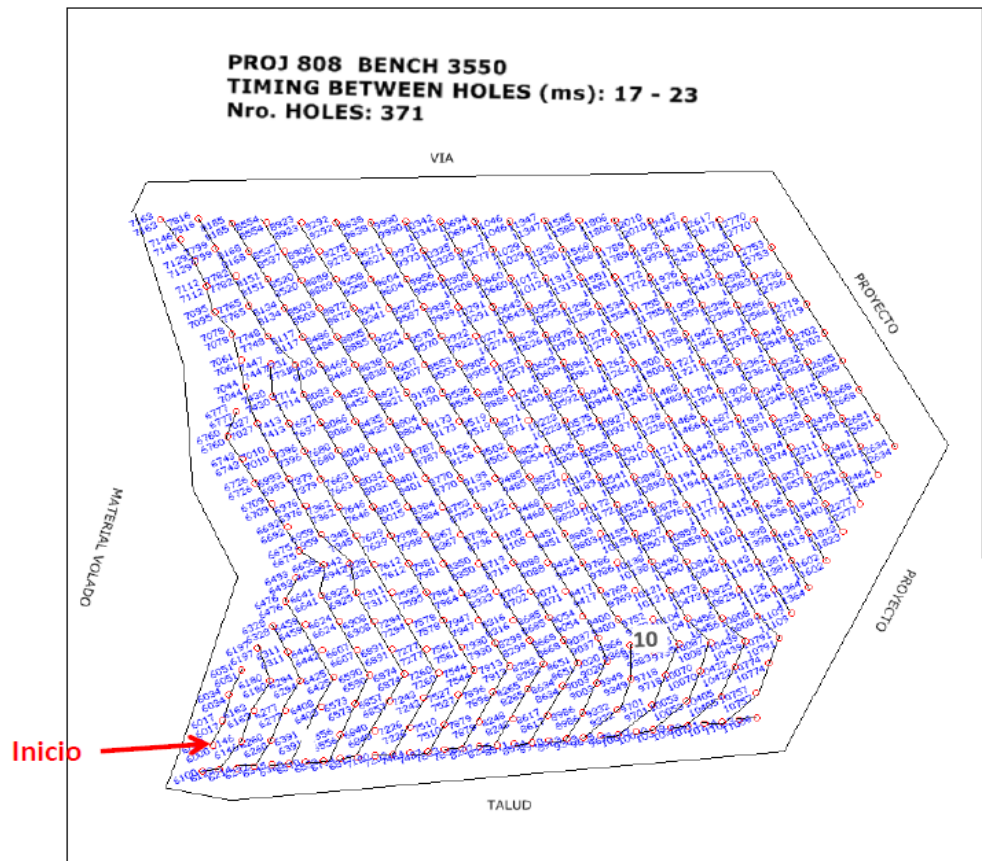
Desarrollo del carguío



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

Figura 40

Diseño de amarre



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

Figura 41

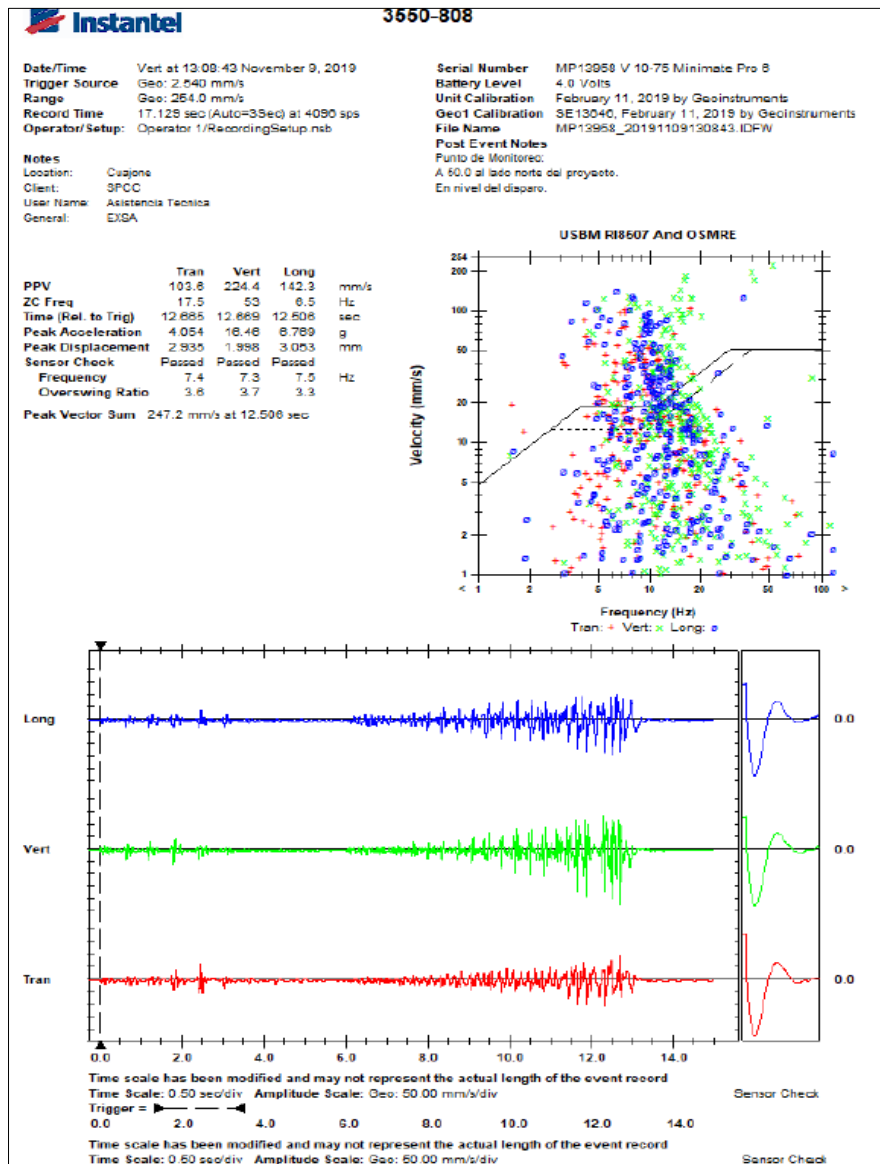
Antes y post voladura de Proyecto 3550-808



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

Figura 42

Reporte de vibraciones de proyecto 3550-808



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

REPORTE:

- El Proyecto 3550-808 en fase 8, se inició con la carga el día 07 de noviembre, se disparó el día 09 de noviembre; en total 03 días de permanencia del explosivo.
- Se cargaron y dispararon 371 taladros en total (339 prod+32 buffer). Con deck y prima Ikon + booster. Para T.C. son 316 taladros de producción.
- El espaciamiento de todo el proyecto fue 8.0 m con roca TC (Desmonte), con F.P. 0,44 kg/t con 850 kg de carga deck (500 kg inferior + 350 kg superior). Y en taladros al material disparado se redujo el espaciamiento a 6,5 m con carga deck (800 kg abajo + 30 kg arriba).
- Se usó MEQ 80/20 con densidad de copa de 1,10 gr/cc, cuyo esponjamiento aprox. fue de 1,0 m en todos los taladros de producción.
- Se ha realizado el monitoreo de vibraciones a 50 m al lado norte, en el nivel del disparo, cuyo registro de VPP fue 247,2 mm/s (debajo del límite).
- Postdisparo no se aprecia generación de gases nitrosos.

4.1.3. Proyecto de voladura 3550-811

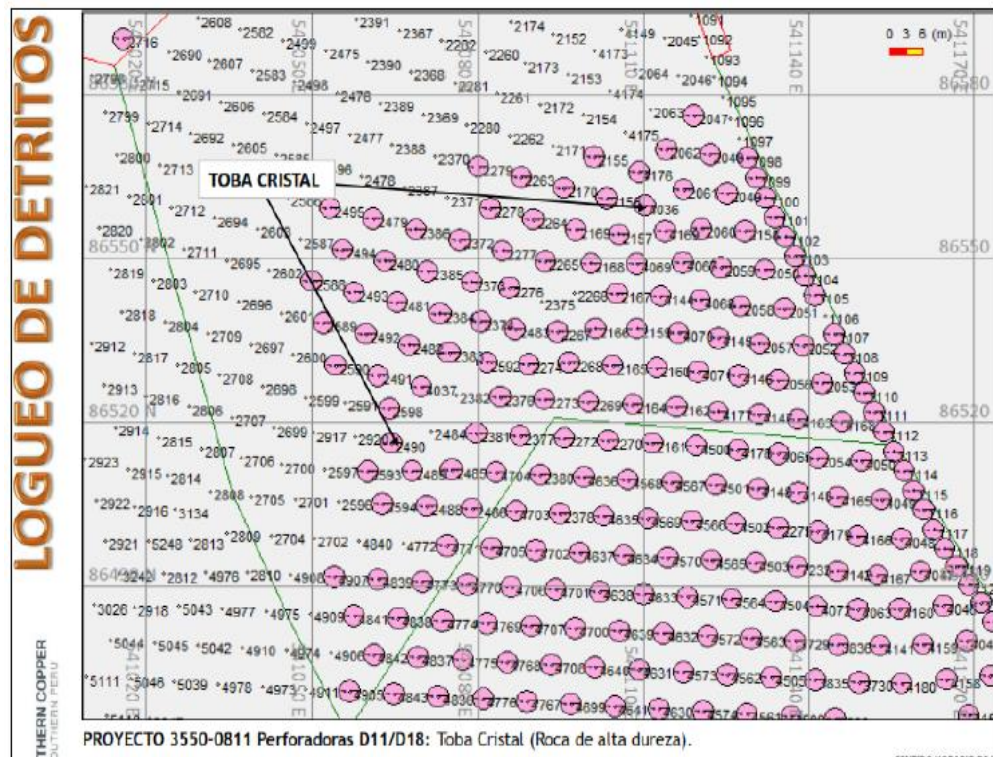
Nº de Taladros : 525 de producción y 73 de buffer

Factor de potencia : 0,44 kg/t

Tipo de roca : Toba Cristal (TC)

Figura 43

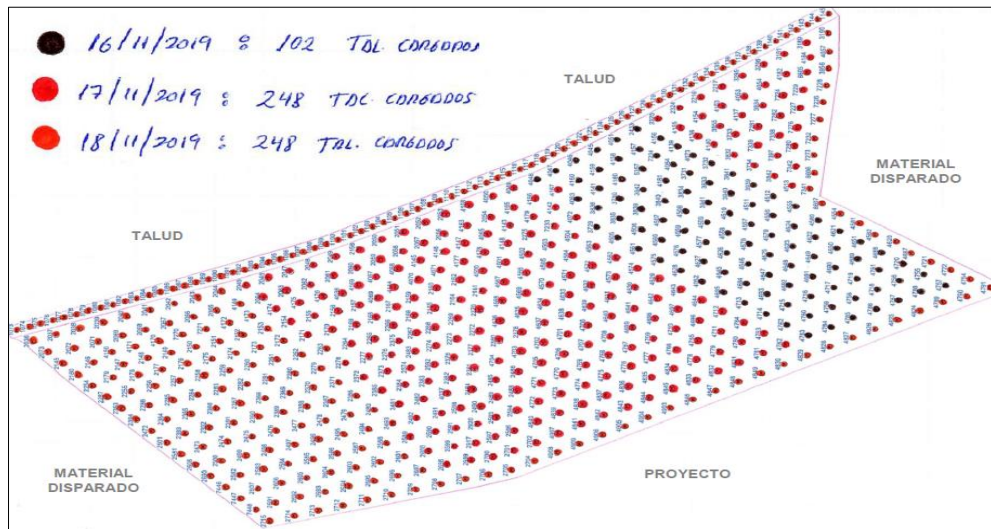
Logueo de detritos del Proyecto 3550-0811



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

Figura 44

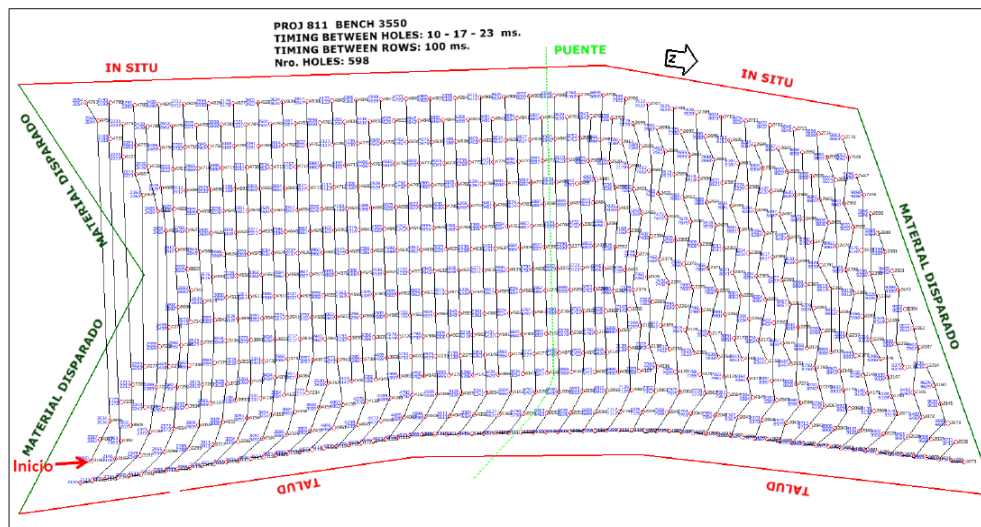
Desarrollo de carguío



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

Figura 45

Diseño de amarre



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

Figura 46

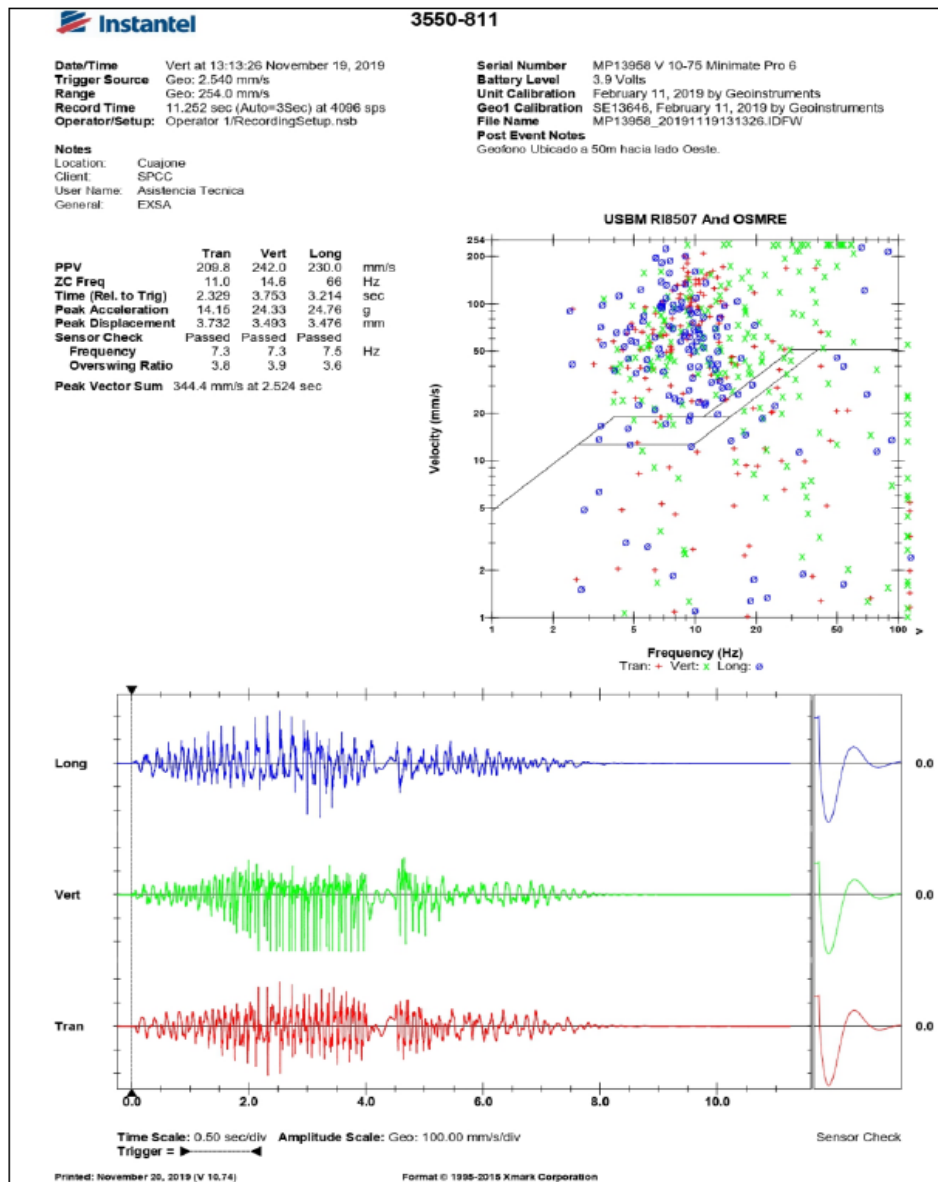
Antes y post voladura de Proyecto 3550-0811



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

Figura 47

Reporte de vibraciones de proyecto 3550-811



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

REPORTE:

- El Proyecto 3550-811 en fase 8, se inició con la carga el día 16 de noviembre, se disparó el día 19 de noviembre; en total 04 días de permanencia del explosivo.
- Se cargaron y dispararon 598 taladros en total (525 producción + 73 buffer). Con deck y prima Ikon + booster. Para T.C. se tiene 505 taladros de producción.
- El espaciamiento de todo el proyecto fue 8,0 m con roca TC (Desmonte), con F.P. 0,44 kg/t con 850 kg de carga deck (500 kg inferior + 350 kg superior).
- MEQ 80/20 con densidad de copa de 1,10 gr/cc, cuyo esponjamiento aprox. fue de 1,0 m en todos los taladros de producción.
- Se ha realizado el monitoreo de vibraciones a 50 m al lado norte, en el nivel del disparo, cuyo registro de VPP fue 344,4 mm/s.
- Postdisparo se aprecia generación de gases nitrosos nivel 1B en taladros que detonaron después del puente de 500 ms del diseño de amarre.

4.1.4. Proyecto de voladura 3550-809

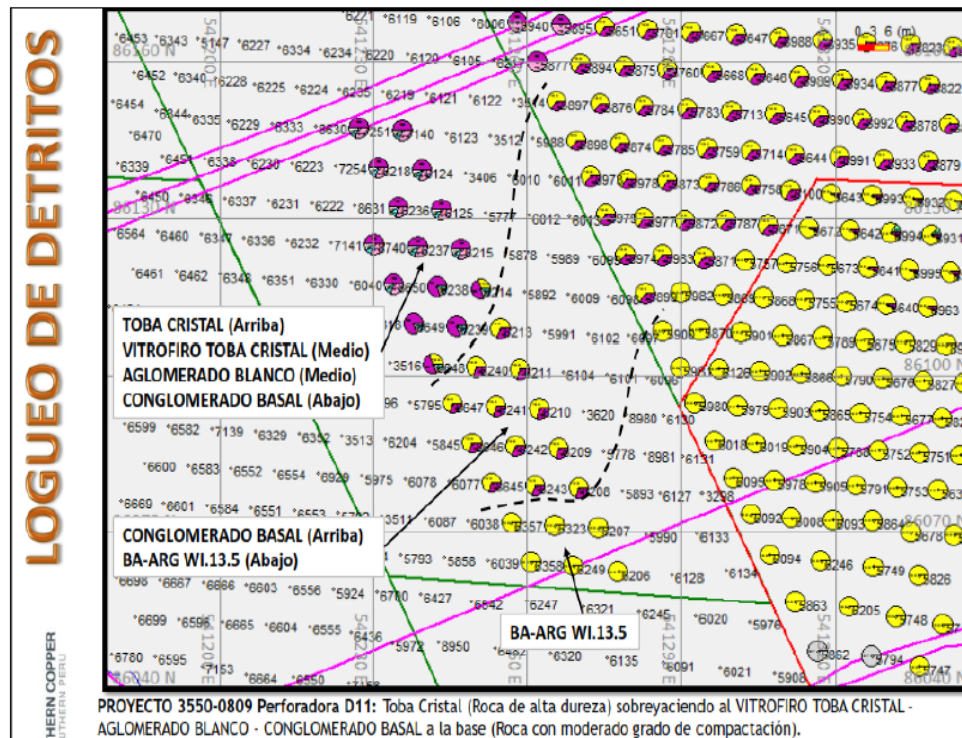
Factor de potencia : 0,44 kg/t

Tipo de roca : Toba Cristal, Andesita

Basáltica Argílica, Conglomerado basal

Figura 48

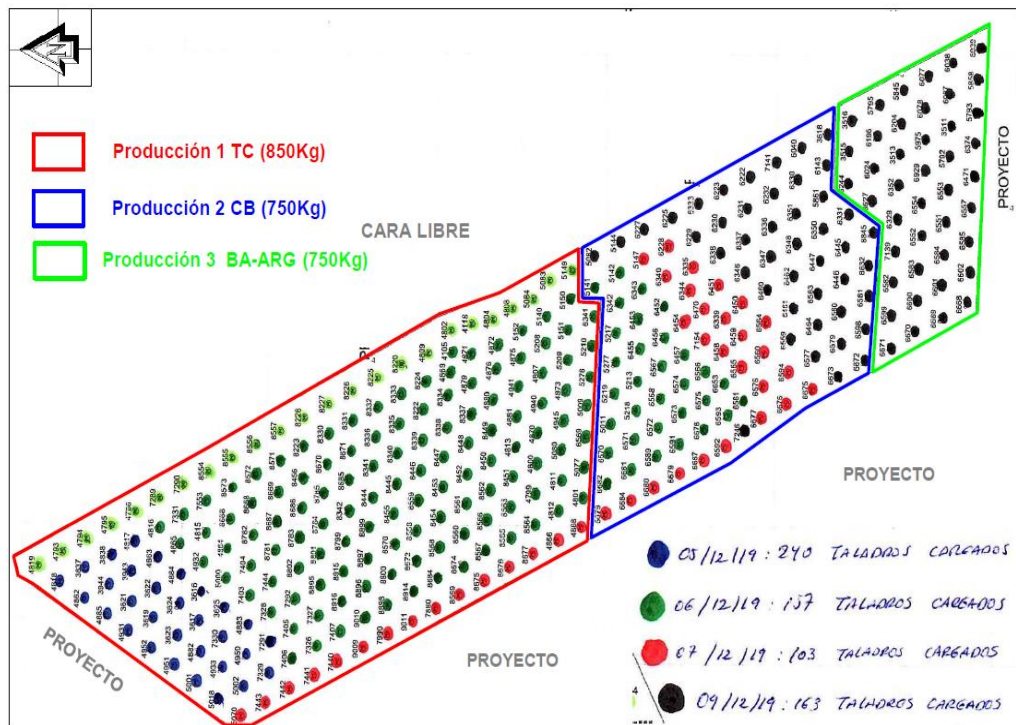
Logeo de detritos del Proyecto 3550-0809



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

Figura 49

Desarrollo de carguío



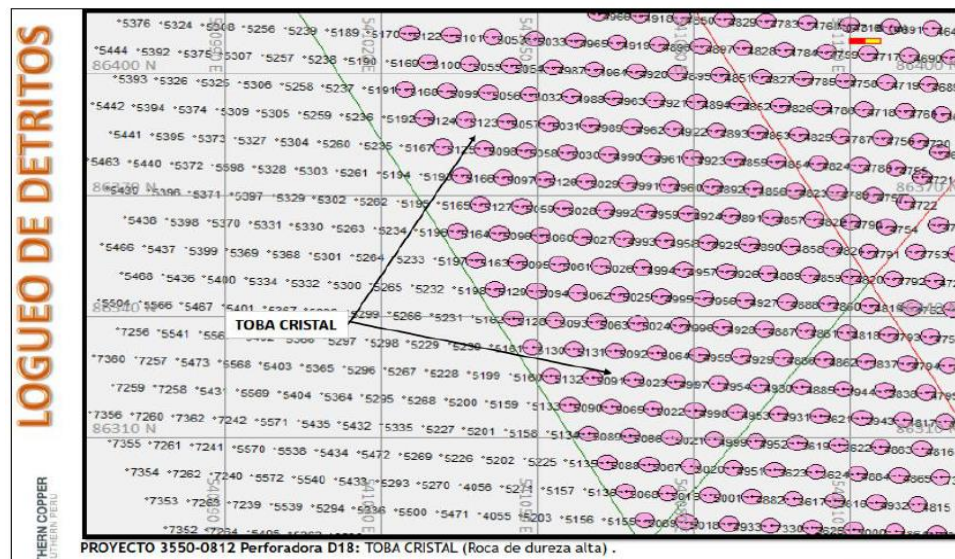
Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos – Cuajone, 2019.

- Proyecto 3550-809 en el fase 8, espaciamento fue de 8 metros en Toba Cristal con un F.P. 0,44 kg/t (850 kg); 8,5 m. en Conglomerado Basal con F.P. 0,31 kg/t (750 kg); 8,5 m en BA-ARG con un F.P. de 0,2 kg/t (500 kg)

4.1.5. Proyecto de voladura 3550-812

Figura 50

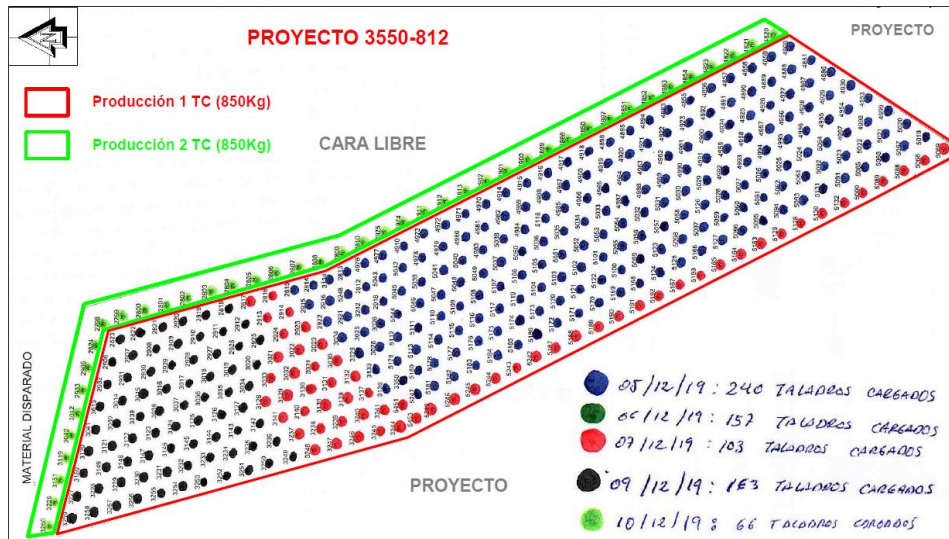
Logueo de detritos del Proyecto 3550-0812



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cujone, 2019.

Figura 51

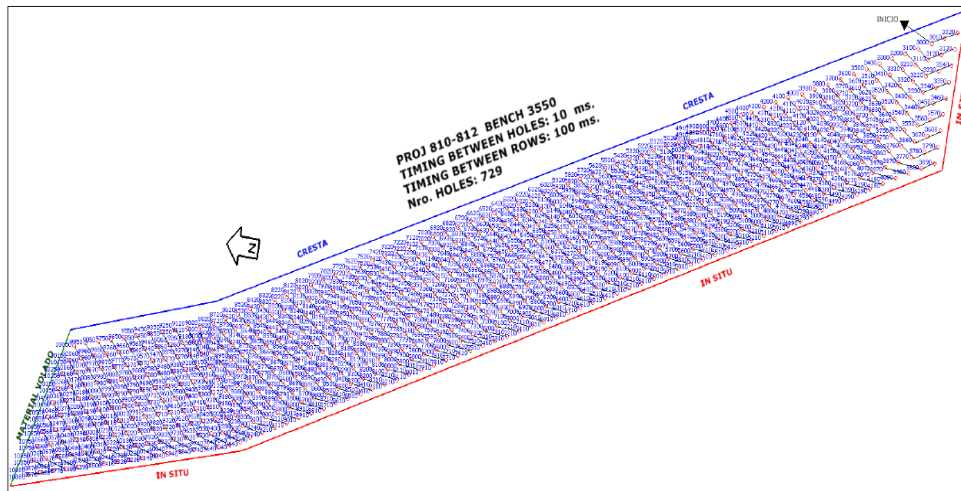
Detalle de carguío



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

Figura 52

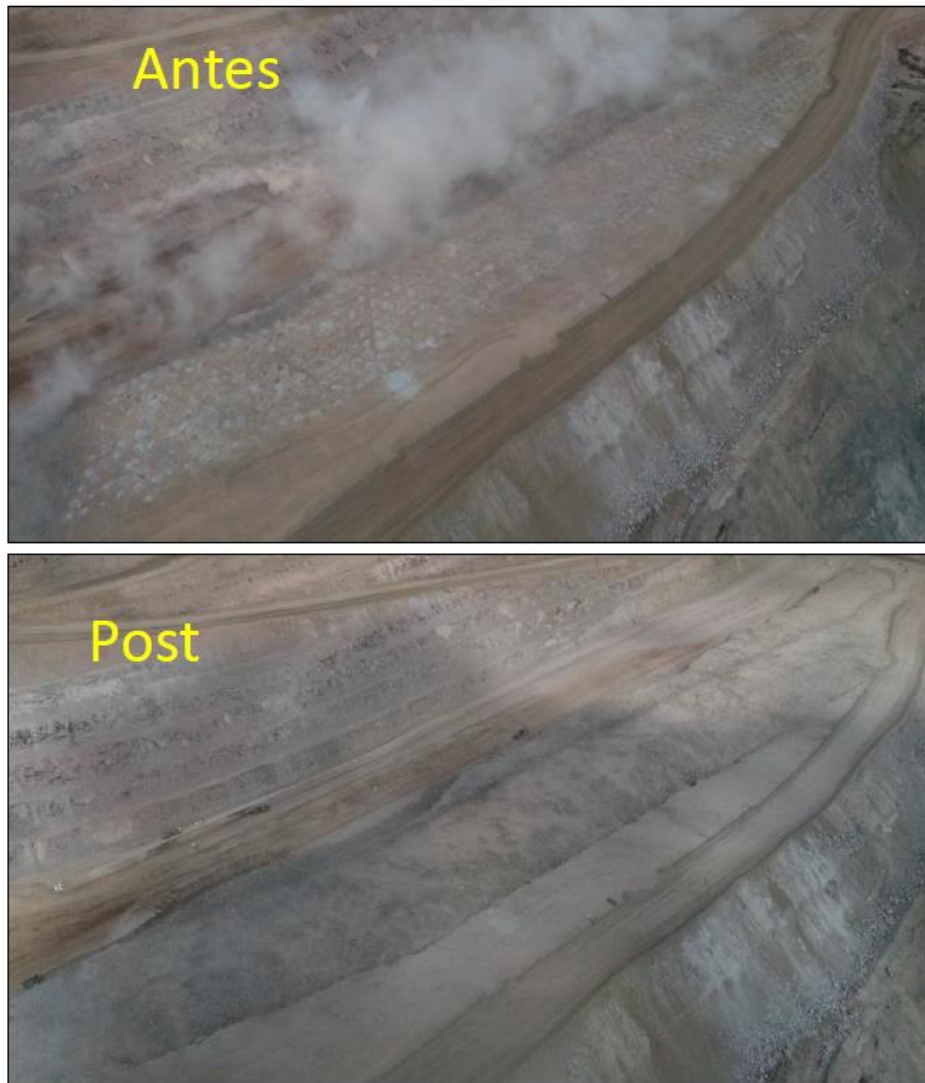
Diseño de amarre del Proyecto 3550-0812



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

Figura 53

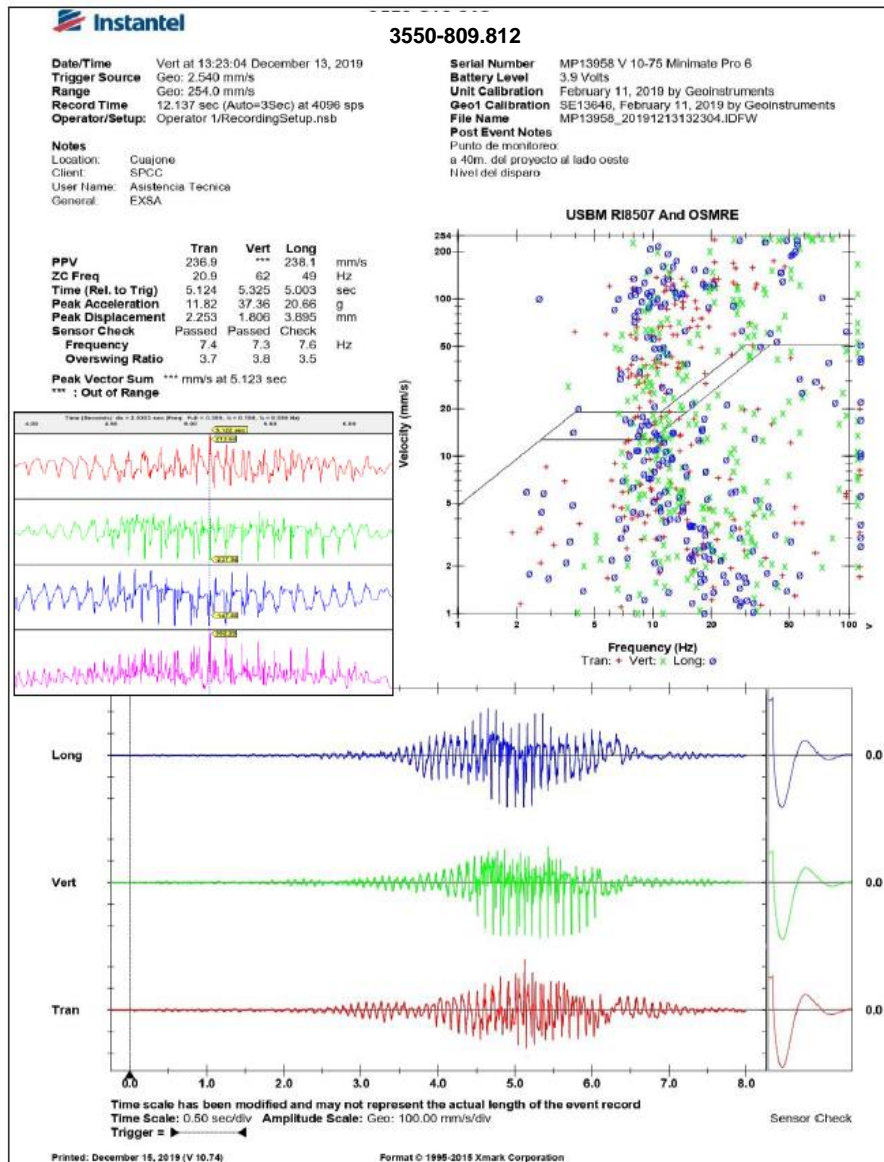
Antes y post voladura del Proyecto 3550-0812



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2019.

Figura 54

Reporte de vibraciones del proyecto 3550-809.812



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cujajone, 2019.

REPORTE:

- El Proyecto 3550-809/812 en fase 8, se inició con la carga el día 05 de diciembre, se disparó el día 13 de diciembre; en total 09 día de permanencia del explosivo.
- Se cargaron y dispararon 729 taladros de producción, Prima Ikon + booster, se usó Ikon + booster + Fanel en taladros con limite a material disparado. Para el proyecto 3550-812 en roca T.C. se cargó 663 taladros de producción.
- El espaciamiento fue de 8,0 m en roca T.C. con F.P. 0,44 kg/t (850 kg); 8,5 m en C.B. con F.P. 0,31 kg/t (750 kg); 8,5 en BA-ARG con F.P. 0,2 kg/t (500 kg).
- Se usó MEQ 80/20 con densidad de copa de 1,10 gr/cc, cuyo esponjamiento aprox. fue de 1,0 m en todos los taladros de producción.
- Se ha realizado el monitoreo de vibraciones a 40 m. al lado norte, en el nivel del disparo, cuyo registro de VPP fue 320,5 mm/s.
- Postdisparo, se aprecia generación de gases nitrosos nivel 2A en 8 taladros con 9 días de tiempo de carguío.

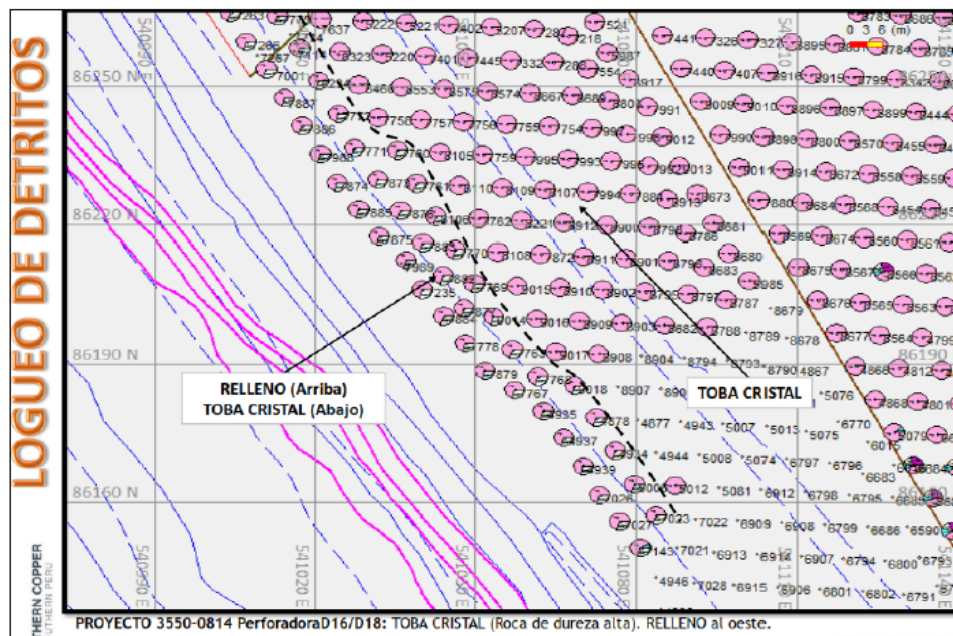
4.1.6. Proyecto de voladura 3550-814

Factor de potencia : 0,44 kg/t

Tipo de roca : Toba Cristal

Figura 55

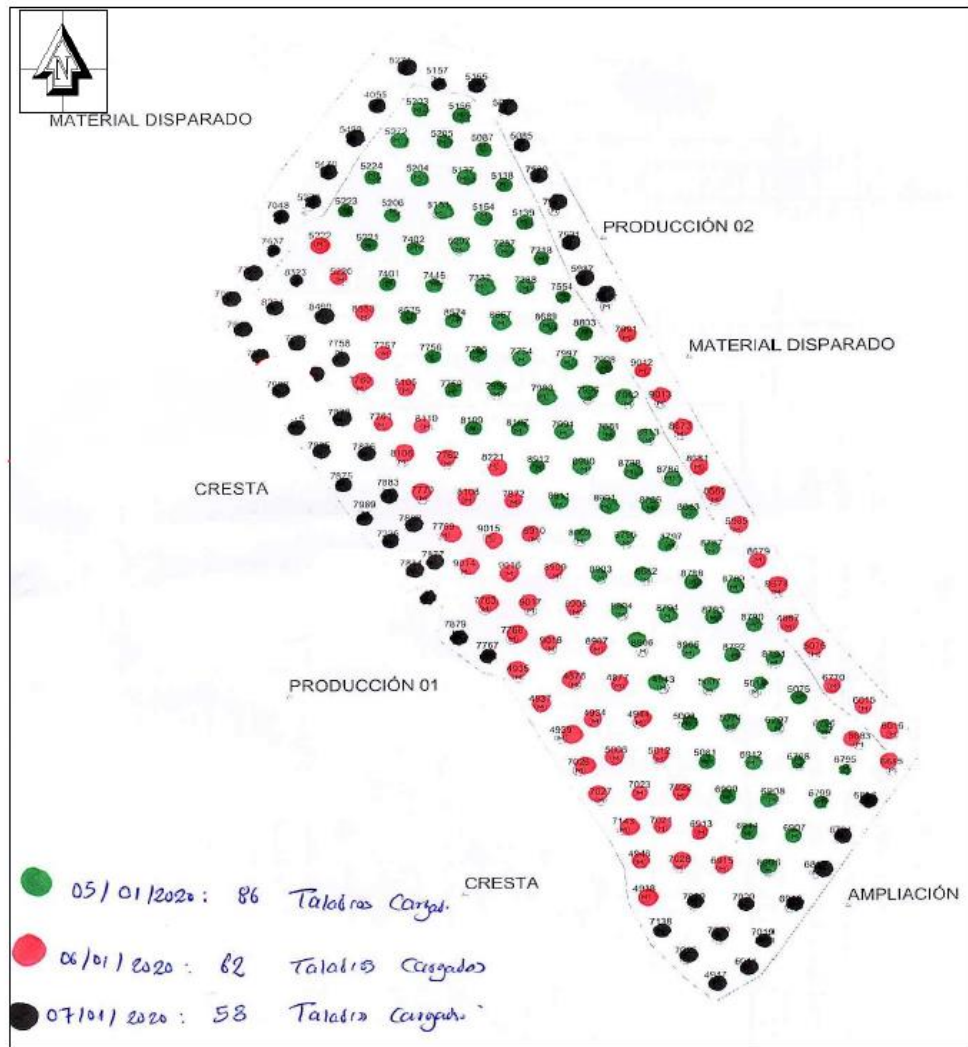
Logueo de detritos del Proyecto 3550-0814



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2020.

Figura 56

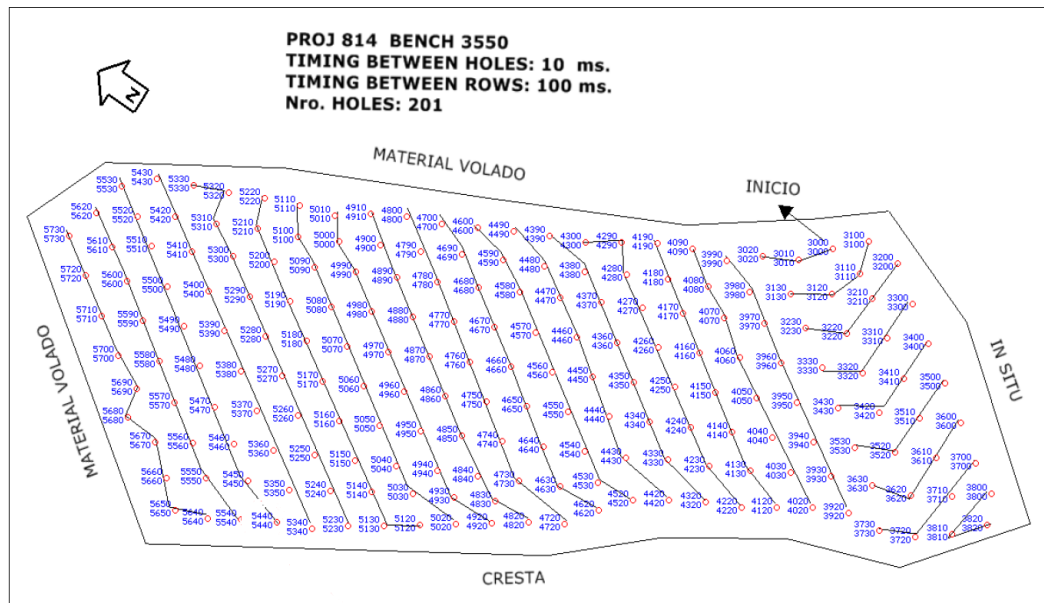
Detalle de carguío



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2020.

Figura 57

Diseño de amarre del Proyecto 3550-0814



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2020.

Figura 58

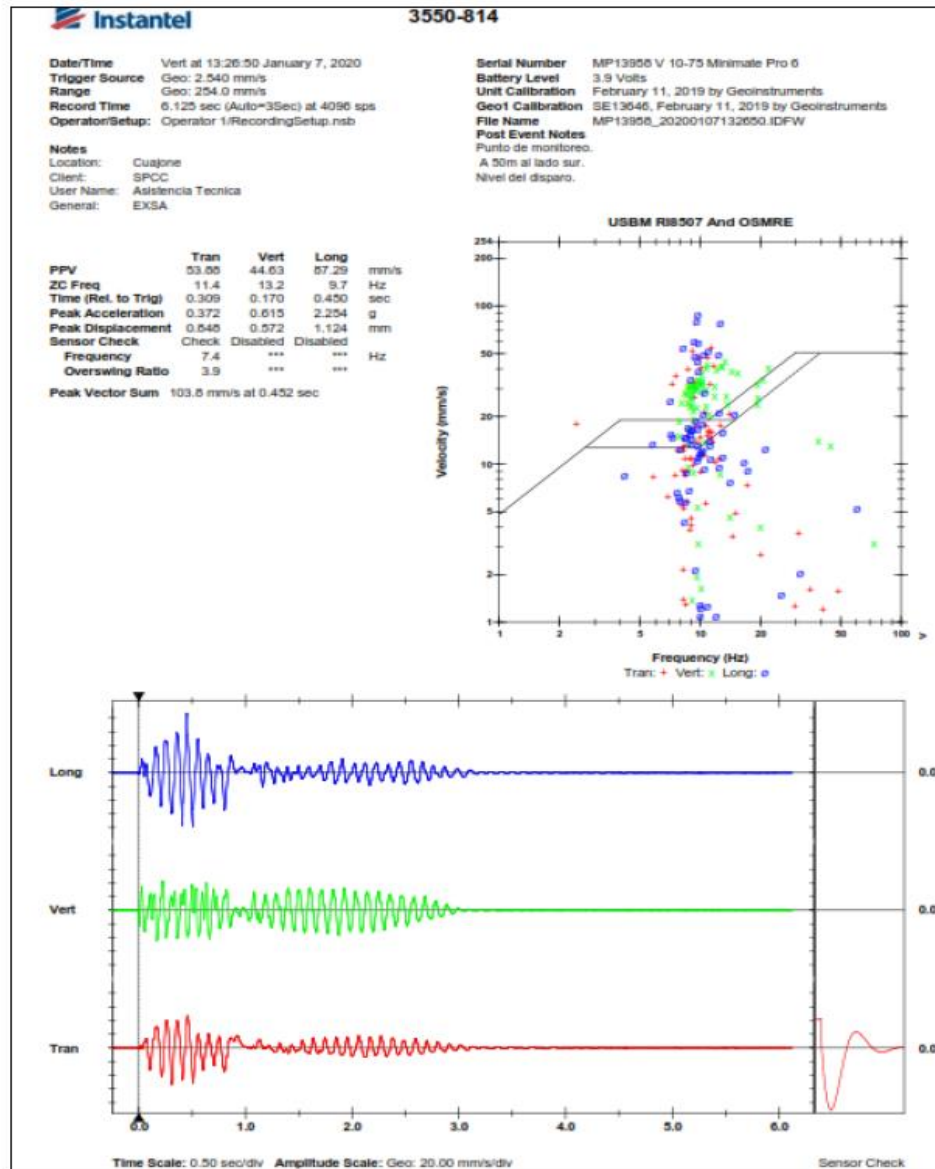
Antes y post voladura del Proyecto 3550-0814



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2020.

Figura 59

Reporte de vibraciones de proyecto 3550-814



Fuente: Jefatura de Perforación y Disparos U.M. Cuajone, 2020.

REPORTE:

- El Proyecto 3550-814 en fase 8, se inició con la carga el día 05 de enero, se disparó el día 07 de enero; en total 03 días de permanencia del explosivo.
- Se cargaron 201 taladros, de los cuales 169 son en roca T.C.
- Malla triangular equilátera con espaciamiento de 8,0 m. para roca TC con F.P. 0,44 kg/t (850kg: carga con deck 500 kg+350 kg), en taladros al perímetro disparado se usó carga satelital y en taladros de cresta carga corrida con un fanel adicional.
- Se usó MEQ 80/20 con una densidad de copa de 1,10 gr/cc, cuyo esponjamiento aprox. fue de 1,0 m en todos los taladros de producción.
- Se ha realizado el monitoreo de vibraciones a 50 m al lado sur, cuyo registro de VPP fue 103,5 mm/s está ligeramente por debajo del límite permisible.
- Post disparo se aprecia un esponjamiento de material de 4,0 m. aproximadamente con fragmentación superficial buena y no se aprecia sobre rotura al perímetro in situ. Se tapó con gravilla.

4.2. Discusión

Durante el análisis de fragmentación de calidad que dio como resultado en mina Cuajone se obtuvieron datos mediante el Split Online en los diseños del 1 al 4 respectivamente de: 12,61"; 14,69"; 12,40"; 11,80".

Para el caso de Mina Cuajone la mejor calidad de fragmentación obtenida fue del diseño 04 (doble iniciación electrónica). Los resultados se corroboran, ya que se obtuvo una mejora de 19,67 % de reducción de fragmentación P80.

Otro aspecto muy importante que cabe resaltar, son las velocidades de excavación (Dig Rate) cuando se tienen cambios significativos de fragmentación P80, en todos los casos observados se nota que hay gran variabilidad, Dig Rate aumenta de 6 930 t/hr a 7 346 t/hr, es decir, tenemos un incremento del Dig Rate en 6%.

CONCLUSIONES

1. Se demostró que el uso de doble iniciador electrónico logró mejorar resultados tanto operativos y económicos en el proceso de voladura de la fragmentación en campo.
2. En la zona de roca de Toba Cristal se ha empleado diversos diseños para efectuar las operaciones de carga y se han tenido hasta 04 diseños que se usaron con mayor frecuencia. No obstante, los iniciales han sido sometidos a un contraste, estableciéndose la permanencia del diseño 04 para el tipo de terreno.
3. Existen diversas circunstancias que ejercen influencia en los resultados de voladura en este caso son los diseños de carga que se han ido empleando. Además de la utilización del explosivo QUANTEX 80/20 y la distribución del mismo en la columna del taladro, en los diseños de carga se han empleado con la misma malla y el factor de potencia más alto usado arroja 0,50 kg/t (974 kg) en el diseño 01 y el factor de potencia que actualmente se usa es 0,44 kg/t (850 kg con Deck).

4. Considerando el diseño 01 como línea base con costo de disparo 100% (US\$ 478,4 por taladro); actualmente (diseño 04) obtenemos un ahorro de 6,18 % (US\$ 29,54 por taladro) y con los proyectos mencionados en el presente estudio de investigación, en los cuales se han disparado 2 048 taladros de producción en roca Toba Cristal, lo que significa un ahorro de US\$ 60 497,92.

5. Las gráficas de P80 vs Dig Rate nos indican que el P80 se ha reducido de 14,69 pulgadas a 11,8 pulgadas, es decir, tenemos un 19,67% de reducción de P80; y el Dig Rate aumenta de 6 930 t/hr a 7 346 t/hr, tenemos un incremento del Dig Rate en 6%.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que se sugieren en la presente tesis son las siguientes:

1. Realizar voladuras masivas con proyectos de paños más grandes, es decir mayor número de taladros (mayores de 500 taladros) para reducir la fragmentación con sobre tamaño.
2. Dar importancia al conocimiento sobre el desenvolvimiento desde el punto de vista geotécnico y las variables que intervienen en la resistencia dinámica del material rocoso a fin de obtener estándares adecuados para establecer valores óptimos en la fase de voladura.
3. Ejecutar el control de calidad de manera semanal y reportes estadísticos sobre la mejora continua con el actual diseño de voladura para taladros de producción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ames, V., & León, G. (2007). *Tecnología de Explosivos (Segunda ed.)*. Lima.
- Bellido, E. (1979). *Geología del cuadrángulo de Moquegua*. Lima, Perú: INGEMMET.
- CETEMIN. (2014). *Geología Estructural*. Perú: Obtenido de: <https://1library.co/document/ydm8141y-geologia-estructural.html>.
- Clark A., Tosdal R., Farrar E., Plazolles A. (1990). *Geomorphologic Environment and Age of Supergene Enrichment of the Cuajone, Quellaveco and Toquepala Porphyry Copper Deposits, Southeastern-Perú*.
- Concha, O., & Valle, J. (1999). *Prospección, exploración y desarrollo del yacimiento de cuajone. SOUTHERN PERU COPPER CORPORATION: Prospección, exploración y desarrollo del yacimiento de Cuajone*.
- Condori Castro, Samuel (2015). *Uso de Emulsión Gasificable Quantex para reducir costos de voladura en mina Cuajone – UNSA*.

Contreras Fajardo, Raúl (2016). *Modelo matemático e informe de vulnerabilidad sísmica en el marco del proyecto de inversión pública: "Instalación del laboratorio de estructuras – Sencico"* – SENCICO.

Curo Quispe, Freddy (2019). *Diseño de parámetros de voladura en rocas mineralizadas con alteración hidrotermal tipo Filica Potásica en yacimientos tipo Pórfido de cobre mina Cuajone* – UNAM.

EXSA. (s.f.). *Manual Práctico de Voladura*. Edición Especial.

Hinostroza Sierra, J. (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* – UNMSM.

Huerta Valer, G. (2019). *Análisis comparativo de la eficiencia de la triple iniciación electrónica en voladura versus la iniciación electrónica simple y doble en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto* – Universidad Continental.

Konya, C., & Albarrán, E. (1998). *Diseño De Voladuras*. México D.F.: Ediciones Cuicatl.

- López Jimeno, C., López Jimeno, E., & García Bermúdez, P. (2003). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid: IGME.
- Mamani Valdez, Y. (2018). *Optimización de la fragmentación con el uso de detonadores electrónicos en mina Toquepala* – UNJBG.
- Manrique y Plazolles. (1974). *Geología de Cuajone*. Trabajo presentado al Tercer Congreso Peruano de Geología.
- MINEDUC. (2019). *Geología Estructural*. Guatemala: Obtenido de: <https://www.mineduc.gob.gt/DIGECADE/documents/Telesecundaria/Recursos%20Digitales/3o%20Recursos%20Digitales%20TS%20BY-SA%203.0/CIENCIAS%20NATURALES/U6%20pp%20130%20geologia.pdf>.
- Herrera, M. (2011). *Informe final: Voladuras efectuadas con detonadores electrónicos en el sector de yeso anhidrita de la mina Toquepala, Southern Perú*. Toquepala, Perú.
- Paredes, R. (2014). *Empleo de detonadores electrónicos para optimizar la fragmentación en sector yeso anhidrita en mina modelo a tajo abierto - Toquepala*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín – Arequipa.

Pachao, G. (2017). *Control Estructural y Tipos de Rutura del Sector Este del Tajo Cuajone* – UNSA.

Park Gerald. (1998). *Petrographic and Lithogeochemical Alteration Study of the Cuajone and Toquepala Porphyry Copper Deposits, Perú.*

Rodriguez Dorregaray, F. (2019). *Gestión del transporte y acarreo de mineral y desmonte en Mina Cuajone de Southern Peru Copper Corporation* – UNCP.

Southern Perú Copper Corporation. (2015). *Informe Interno de Southern Perú Copper Corporation (ISPCC)* . Perú: ISPCC.

Xian Zhang, Z. (2014). *Effect of double – primer placement on rock fracture and ore recovery* – University Centre in Svalbard.

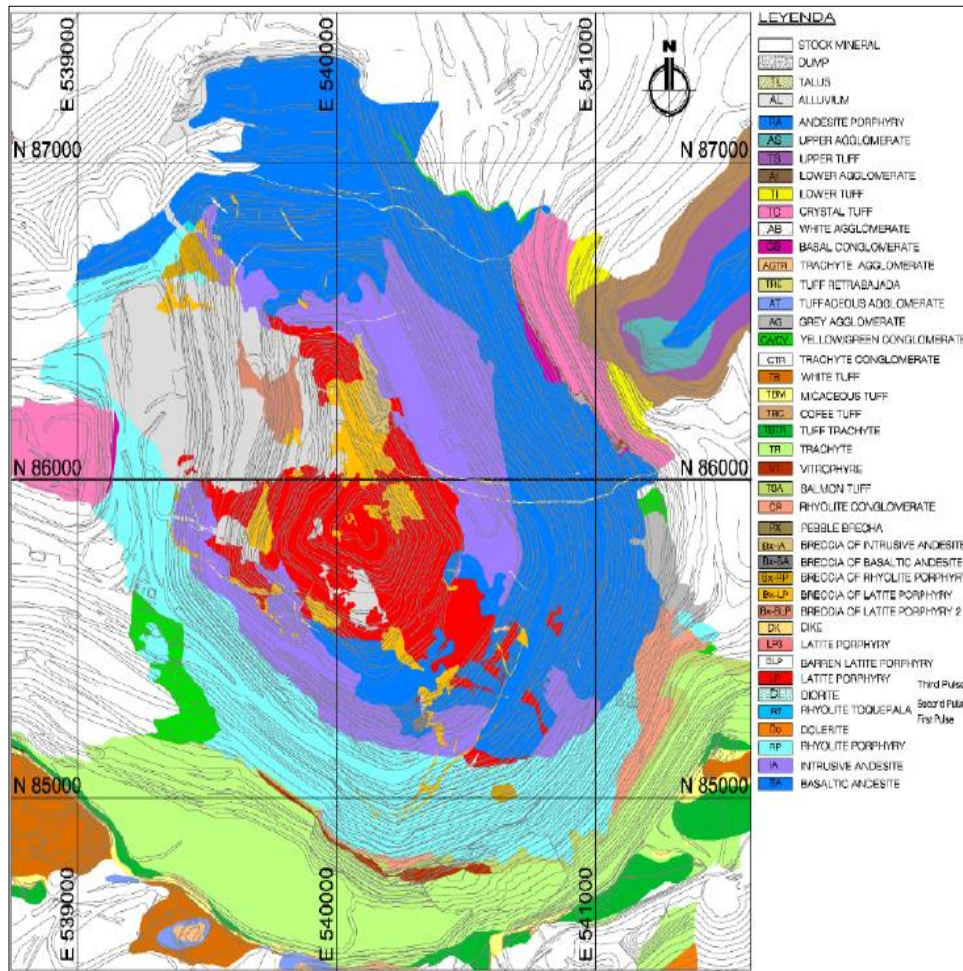
Xiao Jun, Zhang (2018). *The Application of Deck Charge Technology in Hua Neng open pit mine* – University of Science and Technology Beijing.

ANEXOS

Anexo 1. Plano Geológico Cuajone

Figura 60

Plano Geológico Cuajone



Fuente: Informe Interno Geología SPCC, 2015.

Anexo 2. Normativa de Control de Vibraciones

En la mayoría de países desarrollados existen normativas de control que tienen como objetivo regular las vibraciones generadas en las diferentes actividades, proponiendo criterios de limitación de las mismas, e incluso, en ciertos casos, brindando pautas sobre el mejor procedimiento a seguir si se va a realizar un proyecto que lleve implícito la utilización de explosivos.

Los límites admisibles establecidos por estas organizaciones equivalen a patrones ambientales, los cuales deben ser respetados por toda empresa constructora y/o minera. Los límites en la normativa son similares a los patrones de calidad de aire y del agua, todos equivalen al concepto de capacidad de asimilación del medio.

Normativa Internacional

Trabajos de campo realizados en diversos países europeos, USA, Canadá y en Australia propusieron diferentes valores de velocidad máxima de partícula, tratando de esta manera evitar daños al entorno de un proyecto. Los valores propuestos se sitúan usualmente entre el rango de 10 - 50 mm/s.

Las normas internacionales de los países del entorno europeo más relevantes son las siguientes:

- Gran Bretaña: BS 7385
- Suecia: SS460 48 66
- Portugal NP-2074
- Internacional: ISO 2631
- Estados Unidos: USBM RI 8507
- Alemania: DIN 4150
- Norma Unión Europea
- Francia: GFEE

Norma USBM RI 8507

El USBM es una organización líder en el campo de la investigación de los efectos de una voladura, analizando desde hace varias décadas la generación de vibraciones, su propagación y el impacto que tienen en los distintos proyectos relacionados a la industria minera.

Los valores que se propusieron son mostrados en la tabla siguiente.

Tabla 11

Valores representativos USBM RI8507

Frecuencia Hz	VPP mm/s
1.0 - 2.6	5 - 12.7
2.6 - 10	12.7
10 - 40	12.7 - 50.8
40 - 100	50.8

Fuente: USBM RI8507.

Como parte del proyecto de investigación dentro del marco de las normas internacionales sobre el control de vibraciones, Mina Cuajone se rige a la normativa internacional USBM RI8507 la cual tiene varios procedimientos para determinar los límites de velocidades de vibración de partícula, dependiendo del nivel de monitoreo disponible. El área de Geotecnia Cuajone tiene límites VPP representativos que mediante estudios de campo se consolidaron en la siguiente Tabla 12 para los distintos tipos de roca.

Tabla 12

Limite VPP por Tipo de Terreno

TIPO DE ROCA	UNIDAD	ENSAYOS MECÁNICOS	PROPIEDADES MECÁNICAS DINÁMICAS	MÓDULOS DINÁMICOS		VPP Crit.
		UCS Mpa	E Gpa	Velocidad (m/s) Vp	Vs	mm/s
Latita	UGB1	79.6	79.5	5684.07	3473	146
	UGB2	103.6	67.2	5228.48	3189.56	183
Riolita Porfiritica	UGB3	72.9	44.3	4383.6	2521.34	151
	UGB4	28.8	60.5	5177.92	3028.59	121
Andesita	UGB5	122.5	67.4	5352.71	3193.64	213
	UGB6	78.5	74.2	5362.88	3215.82	173
Basaltica	UGB7	86.3	81.4	5704.47	3496.42	183

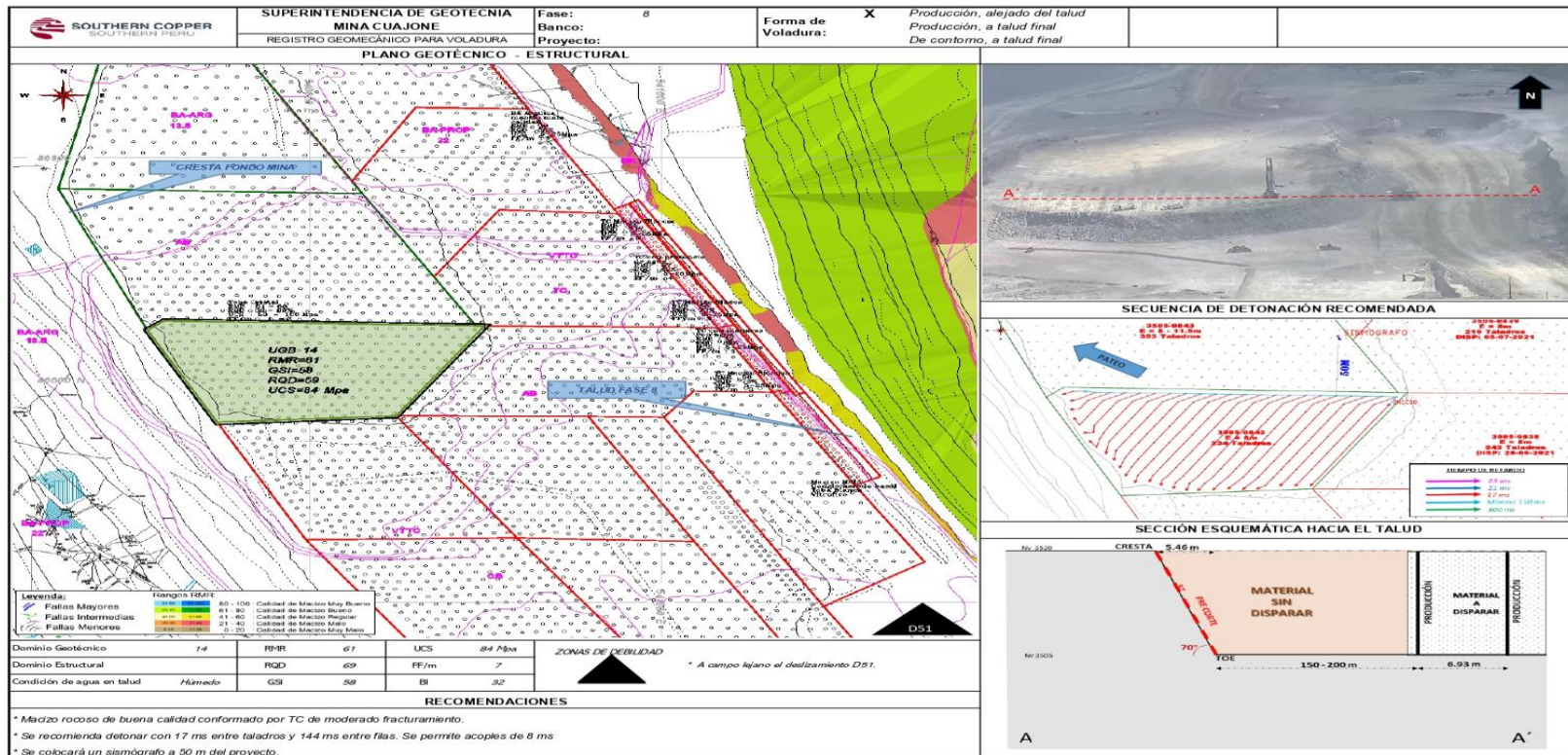
	UGB8	133.9	85.84	5943.25	3494.91	180
Andesita	UGB9	69.7	65.1	5239.05	3067.33	137
Intrusiva	UGB10	175.0	62.8	5252.89	3019.73	223
Brecha	UGB11	204.8	80.1	5725.26	3375.24	170
Andesita	UGB12	121.1	68.4	5319.55	3250.46	166
Toba Inferior	UGB13	17.5	12.6	2792.25	1615.41	84
Toba Cristal	UGB14	83.7	15.2	2904.08	1527.4	259
Traquita	UGB16	123.0	38.1	4307.87	2548.92	237
Toba Blanca	UGB17	15.3	7.1	2223.74	1214.35	91
Toba Salmon	UGB18	21.9	11.8	2678.66	1595.86	92
Vitrofiro	UGB19	83.1	49.1	4912.21	2909.86	127

Fuente: Área de Geotecnia U.M. Cuajone, 2020.

Anexo 3. Registro geomecánico en Toba Cristal

Figura 61

Registro Geomecánico en Toba Cristal



Fuente: Área de Geotecnia Mina SPCC, 2020.