

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

**CONTROL DE VIBRACIONES PRODUCTO DE VOLADURAS CERCANAS A
ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN LA CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA DE
AGUA DE CONTACTO - PROYECTO MINERO QUELLAVECO - MOQUEGUA**

PRESENTADO POR:

BACH. VICMAN QUISPE CONCHA

PARA OPTAR AL TÍTULO

PROFESIONAL DE

INGENIERO DE MINAS

ASESOR:

DR. FLORENTINO YANA JAHUIRA

CUSCO - PERÚ

2025



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor FLORENTINO YANA JAHUIRS.....
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: "CONTROL DE VIBRACIONES PRODUCIDO DE
VOLADIZOS CERCANOS A ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN LA CONSTRUCCIÓN
DE LA PRESA DE AGUA DE CONTACTO- PROYECTO MINERO QUELLAVECO -
MOQUEGUA".....

Presentado por: VICTOR GUISPE CONCHA..... DNI N° 44995780.....;
presentado por: DNI N°:
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO DE MINAS.....

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de
Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 09%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	<u>X</u>
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 30 de SEPTIEMBRE de 2025.....

Florentino Yana Jahuirs
Firma

Post firma FLORENTINO YANA JAHUIRS

Nro. de DNI 23962852

ORCID del Asesor 0000-0002-7369-4416

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 272591505661785

VICMAN QUISPE CONCHA

“CONTROL DE VIBRACIONES PRODUCTO DE VOLADURAS CERCANAS A ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN LA CONSTRUC...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:505661785

126 páginas

Fecha de entrega

30 sep 2025, 10:05 a.m. GMT-5

21.159 palabras

Fecha de descarga

30 sep 2025, 10:31 a.m. GMT-5

116.113 caracteres

Nombre del archivo

“CONTROL DE VIBRACIONES PRODUCTO DE VOLADURAS CERCANAS A ESTRUCTURAS DE CONCRET....pdf

Tamaño del archivo

4.4 MB

9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
100 caracteres sospechosos en N.º de página
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

A mis queridos padres, Filomena Concha Pocohuanca y Cirilo Quispe Sisaya, quienes con su esfuerzo, sacrificio y amor incondicional me han brindado las bases para alcanzar mis metas personales y profesionales.

A mis hermanos Mabelina Quispe Concha y Maxelo Serrano Concha, por su apoyo constante, comprensión y motivación en cada etapa de mi vida universitaria

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por los conocimientos impartidos, las experiencias compartidas y la guía brindada a lo largo de mi formación profesional.

Agradezco a mi asesor, el Dr. Florentino Yana Janahuir, por su paciencia, dedicación y valiosas orientaciones que hicieron posible el desarrollo de la presente investigación, contribuyendo significativamente a mi crecimiento académico y profesional.

RESUMEN

Con este estudio se pretende controlar las vibraciones producto de voladuras de rocas para que no dañen las estructuras de concreto consolidadas y sin consolidar en la construcción de la presa de agua de contacto en el Proyecto Minero Quellaveco en Moquegua las cuales se encontraban a distancias entre 13 a 58 metros de las voladuras.

La metodología empleada es experimental, ya que se aplicarán los conocimientos técnicos en diseño de voladuras y los resultados de las mediciones de las vibraciones de voladuras para determinar los subsecuentes diseños de cargas y así disparo a disparo evitar daños a las estructuras de concreto mediante la propuesta de cálculo de VPP desarrollada por Devine.

Como resultado se pudo controlar las vibraciones de voladura mediante diseños de malla de perforación y cargas de taladros secuenciados con tiempos que no acoplen sus cargas y se mantengan por debajo de los límites máximos permisibles del proyecto que varían para concretos consolidados y no consolidados teniendo el mayor registro de vibraciones en una estructura consolidada de 44.44 mm/s. Concluyendo por tanto que mediante la aplicación del método de distancia escalada y la simulación de las voladuras se pudo controlar las vibraciones producto de voladuras para evitar que dañen estructuras de concreto en la construcción de la presa de agua de contacto en el Proyecto minero Quellaveco.

Palabras clave: Monitoreo de vibraciones, Carga operante, Diseño de mallas, Diseño de cargas.

ABSTRACT

This study aims to control vibrations from rock blasting to prevent damage to consolidated and unconsolidated concrete structures during the construction of the contact water dam at the Quellaveco Mining Project in Moquegua. These structures were located at distances between 13 and 58 meters from the blast sites.

The methodology used is experimental, as technical knowledge in blast design and the results of blast vibration measurements will be applied to determine subsequent load designs, shot by shot, and thus avoid damage to the concrete structures using the VPP calculation proposal developed by Devine.

As a result, blast vibrations were controlled through drill pattern designs and sequenced drill loads with times that did not couple their loads and remained below the maximum permissible limits of the project, which vary for consolidated and unconsolidated concrete. The highest vibration recorded on a consolidated structure was 44.44 mm/s. Concluding therefore that by applying the scaled distance method and simulating blasting, it was possible to control the vibrations caused by blasting to prevent them from damaging concrete structures in the construction of the contact water dam at the Quellaveco Mining Project.

Keywords: Vibration monitoring, load per drill, Blast pattern, Load design.

Contenido

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INTRODUCCION	1
CAPÍTULO I	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Descripción del problema	3
1.2.1. Problema general.....	4
1.2.2. Problemas específicos	4
1.3. Delimitación de la investigación.....	5
1.3.1. Delimitación temporal.....	5
1.3.2. Delimitación espacial	5
1.4. Justificación e importancia del problema	5
1.5. Objetivos.....	6
1.5.1. Objetivo General	6
1.6. Hipótesis	7
1.6.1. Hipótesis general	7
1.6.2. Hipótesis específicas.....	7
1.7. Variables e indicadores.....	8
1.7.1. Operacionalización de variables	8
CAPÍTULO II	9
MARCO TEORICO.....	9
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	9
2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES	9
2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES	11

2.2. Marco contextual	13
2.2.1. Minería a tajo abierto	13
2.2.2. Vibraciones por voladura	13
2.2.2.1. Tipos de ondas	15
2.2.2.2. Parámetros de las ondas	17
2.2.2.3. Velocidad de partícula	19
2.2.2.4. Monitoreo de vibraciones	19
2.2.2.5. Sismógrafos	21
2.2.2.6. Reducción de niveles de vibración por voladuras	21
2.2.3. Predicciones de vibraciones	22
2.2.3.1. Campo lejano	24
2.2.3.2. Campo cercano	24
2.2.4. Normativa de control de vibraciones	26
2.2.4.1. Norma peruana	26
2.2.4.2. Normas internacionales	28
2.3. Definición de términos	32
2.3.1. Presa de aguas contactadas	32
2.3.2. Ley de atenuación	32
2.3.3. Fly rock	32
2.3.4. Carga operante	32
2.3.5. Factor de carga	32
CAPÍTULO III	33
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	33
3.1. Tipo de Investigación	33
3.2. Nivel de investigación	34
3.3. Población y muestra	34
3.3.1. Población	34

3.3.2. Muestra	34
3.3.3. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos.....	34
3.3.3.1. Técnicas de recolección de datos	34
3.3.3.2. Instrumentos de recolección de datos.....	35
3.3.3.3. Procesamiento de datos.....	35
CAPITULO IV	36
CONTROL DE VIBRACIONES DE VOLADURA CERCANAS A LA CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA DE AGUAS DE CONTACTO	36
4.1. Diseño y construcción de la presa de agua de contacto	36
4.1.2. Descripción del proyecto de construcción de presa de agua de contacto en Mina Quellaveco	37
4.2. Operaciones unitarias	54
4.2.1. Diseño de bancos	54
4.2.2. Perforación.....	55
4.2.2.1. Diseño de malla de perforación	57
4.2.3. Voladura.....	58
4.2.3.1. Explosivos y accesorios utilizados	58
4.2.3.2. Diseño de cargas	60
4.2.3.3. Factor de voladura	62
4.2.3.4. Evaluación de voladura.....	62
4.2.3.4.1. Información técnica.....	63
4.2.3.5. Fallas de voladura.....	63
4.3. Evaluación de las vibraciones producto de la voladura.....	63
4.3.1. Simulación de vibraciones.....	63
4.3.2. Instrumentos de medición de vibraciones	64
4.3.3. Monitoreo de vibraciones	65
4.3.4. Alcance de las vibraciones.....	66

4.3.4.1. Campo lejano	66
4.3.4.2. Campo cercano.....	67
4.3.5. Evaluación de los efectos de las vibraciones en la presa	67
4.3.6. Control de vibraciones.....	68
4.3.6.1. Normativas de control de vibraciones	68
4.3.6.2. Medidas de control o mitigación de vibraciones.....	69
CAPITULO V	70
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	70
5.1. Secuencia para control de vibraciones.....	70
5.2. Programación de voladuras	71
5.3. Voladuras	72
5.3.1. Diseño de mallas y cargas	72
5.3.2. Secuencia de tiempos de salida.....	76
5.3.3. Monitoreo de vibraciones	78
5.3.4. Ley de atenuación	79
5.3.5. Predicción sísmica	84
5.4. Discusión de resultados	86
5.5. Posibles consecuencias en la presa de aguas de contacto por efecto de las vibraciones	87
5.6. Probabilidad de incumplimiento de las medidas de control de las vibraciones	88
Conclusiones	90
Recomendaciones	91
Referencias bibliográficas	92
Anexos	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Propagación de un movimiento ondulatorio en un medio</i>	14
Figura 2. Ciclo de esfuerzo de la roca.....	14
Figura 3. Tipos de Ondas	16
Figura 4. Ejemplo de Onda de vibraciones.....	18
Figura 5. Representación gráfica de los diferentes efectos mecánicos de un disparo	23
Figura 6. <i>Curvas para los valores especificados en Tabla 8.</i>	31
Figura 7. Ubicación general del proyecto de Presa de agua de contacto.....	37
Figura 8. Esquema general de proyecto.....	53
Figura 9. Sección de área de voladura de ejemplo	54
Figura 10. Área de voladura de ejemplo en relación con presa de agua contactada.	55
Figura 11. Perforadora Track drill	56
Figura 12. Perforadora martillo neumático	56
Figura 13. Modelos generales de carga para talados de 2" y 1.5"	61
Figura 14. Simulación de vibraciones para taladros de 2"	64
Figura 15. Simulación de vibraciones para taladros de 1.5"	64
Figura 16. Drone Phantom 04 de DJI	65
Figura 17. Sismógrafo Vibracord	65
Figura 18. <i>Zonas de monitoreo de voladuras</i>	66
Figura 19. <i>Imágenes referenciales de Software I-Blast 8.0</i>	67
Figura 20. Ciclo de control de vibraciones.....	71
Figura 21. Fechas de voladura.....	71
Figura 22. Esquema de diseño de malla de perforación	73
Figura 23. Profundidad de taladros	75
Figura 24. Diseño de cargas	76
Figura 25. Ejemplo de amarre en software I-Blast	77
Figura 26. Carga operante máxima por retardo	77
Figura 27. Ubicación de puntos de monitoreo de vibraciones	79
Figura 28. Estimación de K y Alfa en el software I-Blast	80
Figura 29. Estimación de k y Alpha en software I-Blast.....	82

Figura 30. Estimación de k y α en software I-Blast.....	83
Figura 31. Predicción sísmica de voladura.....	84
Figura 32. Comparación de registros de vibraciones reales vs simulados	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables	8
Tabla 2. Tipos de Ondas.....	16
Tabla 3. Velocidad Pico Partícula máxima.....	26
Tabla 4. <i>Efectos de la VPP sobre el macizo rocoso</i>	27
Tabla 5. <i>Valores de prevención propuestos por la USBM (1980)</i>	29
Tabla 6. <i>Valores límite del criterio de prevención de daños UNE 22.381-93</i>	29
Tabla 7. Valores de referencia para la velocidad de vibración que se utilizarán al evaluar los efectos de la vibración a corto plazo en las estructuras.....	30
Figura 6. <i>Curvas para los valores especificados en Tabla 8.</i>	31
Tabla 9: Técnicas e instrumentos	34
Tabla 10. <i>Características perforadoras Track drill</i>	56
Tabla 11. Características perforadora martillo neumático.....	57
Tabla 12. Explosivos de Fabricante FAMESA	58
Tabla 13. Explosivos de Fabricante ENAEX.....	59
Tabla 14. Burden y espaciamiento calculado	60
Tabla 15. Cantidad de carga calculada.....	61
Tabla 16. Características de la roca	63
Tabla 17. <i>Límite de VPP para diferente antigüedad de concreto</i>	69
Tabla 18. Cantidad de explosivos en voladura 04	74
Tabla 19. Cantidad de accesorios en voladura 04.....	74
Tabla 20. Parámetros de diseño geométrico de voladura 04.....	75
Tabla 21. Características de voladura 04	75
Tabla 22. Límites máximos de vibraciones para concretos en consolidación (según madurez)	78
Tabla 23. Registro de monitoreos de vibraciones de voladuras de prueba	82
Tabla 24. Registro de monitoreos de vibraciones de voladuras masivas	83
Tabla 25. Predicción sísmica de las voladuras realizadas.....	85

INTRODUCCION

El presente trabajo de investigación es parte de un trabajo de consultoría realizado por la empresa DNA Blast a la Empresa JJC encargada de la construcción de la presa de aguas contactadas en la Mina Quellaveco en el año 2021, en el cual DNA Blast se encargaba de diseñar voladuras que técnicamente no dañen estructuras de concreto cercanas.

Los límites máximos de vibraciones que soportan las estructuras de concreto cercanas fueron determinados por la empresa que desarrollo el proyecto de construcción, al ser un proyecto de obra civil la actividad de voladura estaba programada como una de las primeras actividades con el objetivo de llegar a la topografía requerida, no obstante al mismo tiempo se desarrollaban otras actividades como la construcción de la plataforma de bombas y un plinton donde se realizaba inyección de concreto para estabilizar la roca, en ambos casos se tenía concreto con poco tiempo de maduración.

En ese sentido en la investigación se recoge información real de las medidas que se tomaron para controlar las vibraciones producto de voladuras enfocadas en los diseños de mallas y cargas y secuenciamiento de las voladuras.

La investigación se estructuro en los siguientes capítulos:

En el Capítulo I, se presenta el planteamiento del problema, donde se desarrolla el problema objeto de investigación, los objetivos, la justificación y delimitación, la hipótesis y el diseño metodológico, y se da una descripción general de la operación minera.

A continuación, en el Capítulo II, se desarrolla el Marco Teórico, profundizando en los antecedentes de la investigación tanto nacionales como internacionales, así como las bases teóricas y conceptuales.

Seguidamente en el Capítulo III, se hace una descripción de la metodología de investigación.

En el Capítulo IV: se muestra cómo se controló las vibraciones de voladura cercanas a la presa de agua de contacto.

Luego en el Capítulo V, Se hace el análisis de las voladuras y se presentan los resultados obtenidos.

Finalmente, el estudio culmina con la presentación de los resultados, las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

Al realizar voladura de rocas en minas superficiales se busca realizar una apropiada fragmentación en la roca por un lado y evitar dañar el macizo rocoso por el otro, el daño que realizan las voladuras se cataloga en dos tipos campo cercano y campo lejano cuya definición en términos de distancia al origen de la explosión puede variar de acuerdo a algunos autores, en este estudio nos abocaremos al campo lejano.

En nuestro estudio la problemática se genera ya que se centra en la construcción de una presa en la cual hay varias actividades que se vienen realizando en paralelo: movimiento de tierras, inyección de concreto en grietas, construcción de estructuras de concreto como parte de la presa y la existencia de un túnel de concreto, en ese contexto lo que se busca es realizar voladuras y evitar cualquier daño a los antes mencionados.

1.2. Formulación del problema

A nivel mundial y nacional existen varios parámetros para delimitar daños a construcciones o estructuras en función de la velocidad pico partícula (VPP), no obstante, en nuestro caso particular de estudio tenemos parámetros impuestos en función del tiempo de fraguado del concreto de las estructuras a cuidar, sin embargo, los otros criterios se tomarán en cuenta como referentes.

La intención de este trabajo es realizar diseños de malla y cargas con los cuales se fragmente la roca y se esté bajo los parámetros de VPP del proyecto basándonos en la teoría de Devine para modelar vibraciones y definir las cargas siguiendo este mismo proceso disparo a disparo para tener data actualizada y evitar errores.

1.2.1. Problema general

¿De qué manera se puede controlar las vibraciones producto de voladuras de rocas para que no dañen las estructuras de concreto en la construcción de la presa de agua de contacto - Proyecto Minero Quellaveco - Moquegua?

1.2.2. Problemas específicos

- a) ¿Cuáles serán los diseños de mallas y cargas que fragmenten apropiadamente la roca y que eviten el daño por vibraciones a las estructuras de concreto en la construcción de la presa de agua de contacto - Proyecto Minero Quellaveco - Moquegua?
- b) ¿Las vibraciones producto de las voladuras estarán debajo de los límites permisibles de las estructuras de concreto en la construcción de la presa de agua de contacto - Proyecto Minero Quellaveco - Moquegua?

1.3. Delimitación de la investigación

1.3.1. Delimitación temporal

La presente investigación se desarrolló entre los años **2020 y 2021**, periodo en el cual se ejecutaron las actividades principales de construcción de la **presa de aguas contactadas** del Proyecto Minero Quellaveco. Este marco temporal permitió realizar el monitoreo y análisis de vibraciones generadas por voladuras durante las etapas críticas de excavación y conformación de estructuras de concreto, obteniéndose así datos representativos de las condiciones reales de operación.

1.3.2. Delimitación espacial

El estudio se llevó a cabo en el Proyecto Minero Quellaveco, ubicado en la región Moquegua – Perú, específicamente en la zona destinada a la construcción de la presa de aguas contactadas. El área de investigación comprendió tanto los frentes de voladura empleados en el movimiento de material como los puntos de control situados en las inmediaciones de la presa de concreto, lo que permitió evaluar con precisión la propagación de las ondas sísmicas hacia estructuras sensibles dentro del área de influencia directa.

1.4. Justificación e importancia del problema

La investigación se basa en el control de vibraciones producto de voladuras de rocas para que no dañen las estructuras de concreto en la construcción de la presa de agua de contacto en el Proyecto Minero Quellaveco ubicado en Moquegua; la importancia de este radica en que al no hacerlo generaría que las estructuras de concreto sufran daños y queden fuera de los parámetros de

construcción que la empresa JJC Contratistas Generales asume como parte de su contrato.

Para la realización de este estudio es necesario contar con profesionales especializados en esta etapa del proyecto los cuales tengan la expertise en temas de voladura y que cuenten con los equipos necesarios, tanto sismógrafos, drones, estación total y software especializado. Una vez hecho el diseño de cargas y de malla, JJC Contratistas Generales es la encargada de la perforación de los taladros y ENAEX es la encargada de cargar los taladros y realizar todo el proceso de disparo.

Este estudio beneficia en la ejecución correcta de una obra civil de alta ingeniería generando los espacios necesarios para la ubicación de las estructuras de concreto y sin dañar las existentes y las que se vayan realizando durante las voladuras.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Controlar las vibraciones producto de voladuras de rocas mediante el método de distancia escalada para que no dañen las estructuras de concreto en la construcción de la presa de agua de contacto - Proyecto Minero Quellaveco – Moquegua.

1.5.2. Objetivos específicos

- a) Determinar los diseños de mallas y cargas para fragmentar las rocas y para evitar el daño a las estructuras de concreto en la construcción de la presa de agua de contacto - Proyecto Minero Quellaveco - Moquegua.

- b) Monitorear las voladuras para determinar si las vibraciones están por debajo de los límites permisibles en la construcción de la presa de agua de contacto - Proyecto Minero Quellaveco - Moquegua.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

Mediante la aplicación del método de distancia escalada, se controla las vibraciones producto de voladuras para evitar que dañen las estructuras de concreto en la construcción de la presa de agua de contacto - Proyecto Minero Quellaveco - Moquegua.

1.6.2. Hipótesis específicas

- a) Se debe determinar nuevos diseños de mallas y cargas conforme se va avanzando y obteniendo nueva información de las vibraciones de voladuras para evitar el daño a las estructuras de la presa de agua de contacto - Proyecto Minero Quellaveco - Moquegua.
- b) Las vibraciones producto de las voladuras estarán debajo de los límites permisibles de las estructuras de concreto en la construcción de la presa de agua de contacto - Proyecto Minero Quellaveco - Moquegua.

1.7. Variables e indicadores

1.7.1. Operacionalización de variables

Tabla 1. *Operacionalización de variables*

Variables		Indicadores	Unidades
Dependiente	Vibraciones producto de voladuras	Velocidad partícula pico	mm/s
Independiente	Diseño de cargas	Cantidad de carga explosiva por retardo	Kg
	Estructuras de concreto cercanas	Distancia	m

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

a) Rozas (2020) en su investigación titulada: "Impacto de las vibraciones inducidas por tronaduras en fases 13 y 14 de la explotación a rajo abierto sobre la planta de procesamiento" realizado en la Universidad de Chile (Chile). Tuvo como objetivo principal estudiar las vibraciones generadas por tronadura en una compañía minera, y en base a estos resultados establecer alertas, modelos de vibración y recomendaciones técnicas con el propósito de mantener la integridad de la infraestructura de la planta de procesamiento, desarrollando una tesis del tipo aplicada de diseño experimental, se llegó a la conclusión de realizar el monitoreo de vibraciones en siete lugares estratégicos y se identificó que los de mayor

vulnerabilidad son la Cepa 4 de la correa CV7, cañerías HDPE en la pila 4 y pila 12^a, el silo 2 y fundación 2, recomendando reforzar las estructuras con el propósito de mitigar el efecto de las tronaduras a escala global mediante la minimización de la carga total detonada, distribuir las cargas singulares o pozos, o modificar los tiempos de salida de estos.

b) Diaz (2021) en su investigación "Modelo predictivo de daño inducido por vibraciones originadas de tronadura en campo cercano y lejano en minera los pelambres". Realizada en la Universidad de Chile (Chile). Establece como objetivo general el estudio del efecto de las vibraciones producidas por la tronadura tanto en campo cercano y campo lejano, cómo ésta afectan al macizo rocoso circundante situado en Minera Los Pelambres para las fases 7, 9, 10 y 11. Para lo cual plantea su trabajo de tipo experimental de alcance correlacional, teniendo como resultados unos ábacos de distancias (m) vs VPP (mm/s) con curvas de largo de cargas (m), concluyendo en relación al campo lejano que el modelo que mejor se ajusta a la tronadura en Minera Los Pelambres, es el realizado considerando la variable explosivo.

c) Moraga (2018), en su investigación "Características geológicas y geotécnicas generales que intervienen en la tronadura y el efecto de daño en el campo lejano en minería a rajo abierto" realizada en la Universidad de Concepción (Chile). Tuvo como objetivo general analizar las variable geológicas y geotécnicas más relevantes que inciden en la generación de daño sobre los macizos rocosos en campo lejano adaptando la ecuación de Wong y Pang (1992), con el fin de establecer un criterio de evaluación de

daño que sea representativo y aplicable en el control de estabilidad de taludes en minería a rajo abierto, considerando el proceso desde la generación de energía explosiva, su transmisión por el macizo rocoso y su interacción con un mecanismo de inestabilidad. Siendo este estudio basado netamente en recopilación bibliográfica orientado a un análisis para establecer un criterio de evaluación, adicionalmente se hace una recopilación de criterios de atenuación de onda sísmicas usados en minería, concluyendo que la geología y la geotecnia cumplen un rol fundamental en la zona crítica de cuidado, ya que controlan los tipos de inestabilidad, tanto a nivel de banco como de interrampa.

2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

a) Cornejo & Huamán (2020), en su tesis de titulación titulada "Estimación de un modelo predictivo de vibraciones inducidas por voladura en campo medio y campo lejano para el cuidado de estructuras en una mina superficial en proceso de cierre" realizada en la Pontificia universidad Católica del Perú. Establecieron como objetivos generales primero el generar un modelo matemático de predicción de vibraciones inducidas por voladuras en el tajo y como segundo proponen un límite operativo en las cargas de los taladros en base al modelo predictivo para el cuidado de taludes finales y estructuras cercanas a las operaciones mineras; para lo cual desarrollan la investigación de tipo aplicativo de alcance correlacional tomando datos históricos y datos actuales para la elaboración de su modelo basado en la teoría de Devine de la distancia escalada para predecir la velocidad pico partícula (VPP), teniendo como metodología la reducción de registros en base a estándares operativos, seguido de una discriminación

de estadística robusta y regresión lineal. De esta manera obtuvieron ábacos de distribución de cargas para predecir la VPP a una determinada distancia, que permite limitar los explosivos para un mejor cuidado de las estructuras.

b) Diaz & Marín (2019) en su investigación "Efectos de las vibraciones generadas por voladura de una empresa minera, en las viviendas del caserío de Pilacones, 2019". Realizado en la Universidad Privada del Norte. Tuvieron como objetivo general determinar la influencia de las vibraciones generadas por voladura de una empresa minera, en las viviendas del caserío de Pilacones, 2019; desarrollando su investigación de tipo aplicada con un diseño no experimental, ya que se hizo una recopilación de percepciones ya existentes con alcance descriptivo transversal. Tomaron como población a las 189 familias del Caserío de Pilacones según el Censo del INEI 2017 y como muestra a 60 familias. Como resultados se tuvo que según la percepción de la población el 98.3% considera que sus viviendas han sido afectadas por las vibraciones producto de voladuras, concluyendo que hay daños en 59 viviendas de 60 ósea 98.3%, identificando que en 1 vivienda se encontró grietas menores, 17 grietas ligeras, 37 grietas severas y desprendimiento localizados y en 4 viviendas colapso.

c) Maypú (2020) en su investigación "Control de vibraciones por voladura para minimizar los efectos de daño en mina Cuajone de SPCC - año 2017 " realizada en la Universidad Nacional Santiago Antúñez de Mayolo. Planteo como objetivo general de su estudio determinar el control adecuado de vibraciones por voladuras para minimizar los efectos de daño en la mina

Cuajone - Southern Perú Copper Corporation, en el año 2017; siendo su trabajo del tipo aplicada, cuasi experimental, tomando como población la Fase de minado 6ª donde se ejecutaron los proyectos de perforación, voladura y monitoreo de vibraciones, en el año 2017 y como muestra se tomaron los análisis de registros sísmicos en campo lejano respecto al deslizamiento 50 en la fase 6A este en los bancos 3115 y 3100, en el año 2017. Como resultado del análisis se determinó conveniente manteniendo un equilibrio entre la fragmentación y el daño a los taludes el uso de retardos de 17ms entre taladros y 100ms de retardo entre filas concluyendo que con estos parámetros se reduce favorablemente el impacto del daño logrando bajar por debajo del nivel I de la norma UNE 22-381-93.

2.2. Marco contextual

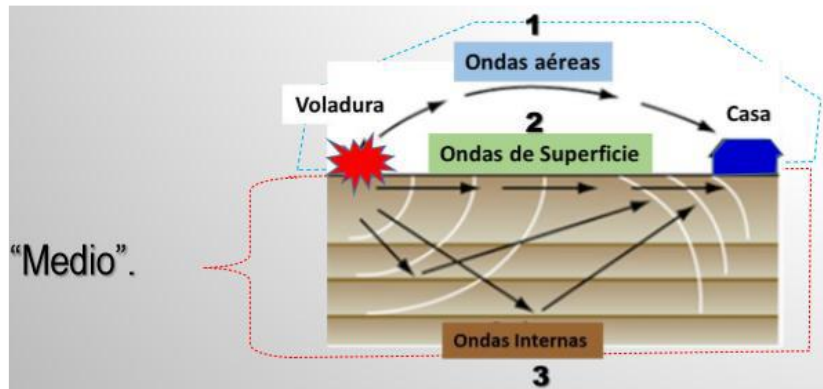
2.2.1. Minería a tajo abierto

a minería a cielo abierto, también conocida como minería a cielo abierto, es una técnica de minería a cielo abierto que extrae minerales de un tajo abierto en el suelo. Es el método más común en todo el mundo para la extracción de minerales y no requiere métodos de extracción ni túneles. Esta técnica de minería a cielo abierto se utiliza cuando los yacimientos minerales se encuentran relativamente cerca de la superficie terrestre. Las minas a cielo abierto a veces se denominan "canteras" cuando producen materiales de construcción y piedra dimensional.

2.2.2. Vibraciones por voladura

Se entiende por vibraciones los fenómenos de transmisión de energía mediante la propagación de un movimiento ondulatorio a través de un medio.

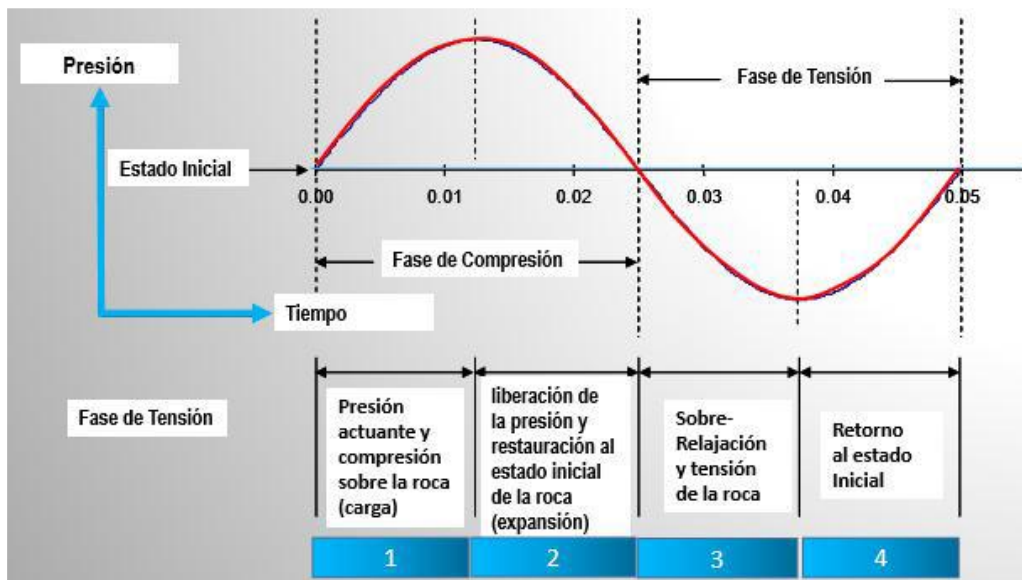
Figura 1. Propagación de un movimiento ondulatorio en un medio



Fuente: Gráfico tomado de ISEE Blasters Handbook (2011).

El fenómeno de vibraciones queda caracterizado por una fuente o emisor, esto es, un generador de vibraciones, y por un objeto o receptor de las mismas. El fenómeno de las vibraciones se manifiesta mediante un movimiento ondulatorio debido al paso de fases alternativas de compresión y tensión.

Figura 2. Ciclo de esfuerzo de la roca



Fuente: Gráfico tomado de ISEE Blasters Handbook (2011).

La detonación de un explosivo contenido en un taladro localizado en un macizo rocoso genera de una forma casi instantánea un gran volumen de gases a altas temperaturas y elevadas presiones. La aplicación brusca de estas presiones tan

elevadas sobre las paredes del taladro simula un choque o impacto brusco, provocando en cada punto del macizo deformaciones axiales y tangenciales en diferentes direcciones, produciendo de esta manera la rotura del macizo en sus proximidades.

El explosivo por ser un agente químico, al momento de ser usado no trabaja completamente en la acción de fragmentación trabajando entonces con una determinada eficiencia, lo que nos muestra que no toda la energía es utilizada para causar la fragmentación sino un porcentaje de esta es liberado al ambiente propagándose a través del macizo rocoso, napa freática y aire; desplazándose a diferentes velocidades. La amplitud de este movimiento ondulatorio disminuye a medida que nos alejamos del punto principal de detonación.

2.2.2.1. Tipos de ondas

El efecto de las vibraciones por efecto de una voladura busca ser descrito por algunas ecuaciones clásicas de ondas elásticas, sin embargo, aunque hasta la fecha es el modelo simplificado que mejor se adecúa para el análisis de este fenómeno, estos cálculos no son totalmente confiables debido a ciertos problemas como atenuación, dispersión, superposición y cambio de longitud de onda que suelen manifestarse. Básicamente podemos separar en dos grupos los tipos de ondas elásticas.

- Ondas Internas, que se propagan por el interior del sólido rocoso en nuestro caso y dentro de las cuales se encuentran las ondas longitudinales, de compresión o principales P y las ondas transversales, de cizalladura o secundarias S.
- Ondas de superficie, que únicamente se transmiten por la superficie del material y entre las que se encuentran: las ondas Rayleigh R y las ondas

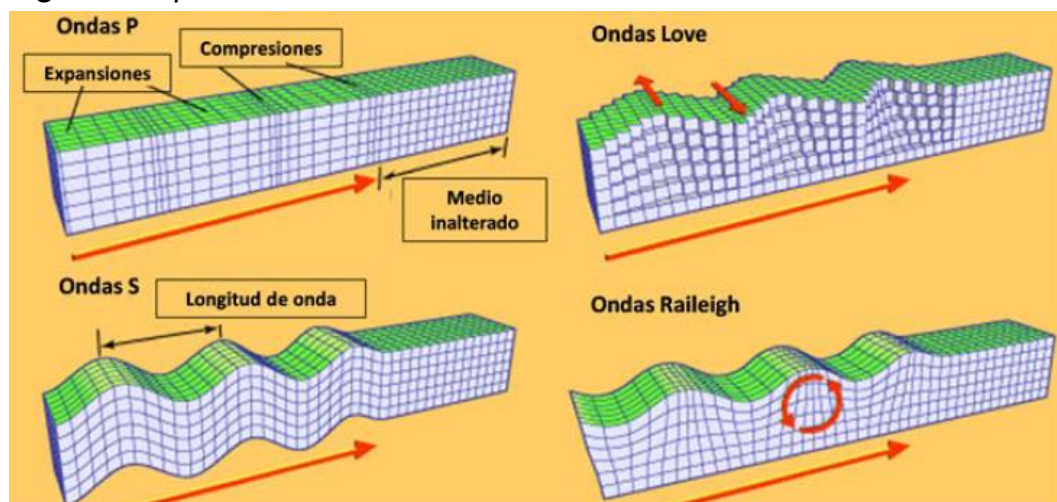
Love L; son las principales, si bien ya se ha indicado que existen las llamadas ondas acopladas y ondas hidrodinámicas.

Tabla 2. Tipos de Ondas

Tipos de Ondas		Características
Ondas Internas	Ondas P	- No deforman la roca, la estiran y comprimen como acordeón - Provocan la oscilación en la misma dirección de la propagación de la onda. - Son las ondas más rápidas - Velocidad de propagación y frecuencia son altas
	Ondas S	- Generan oscilación de partículas en una dirección transversal a la dirección de propagación de la onda (perpendicular a ondas P) - Frecuencia alta y velocidad algo menor que onda P
Ondas Superficiales	Ondas R	- Originan oscilaciones elípticas en el plano donde se propagan por las superficies de separación de materiales distintos - Producen efecto de compresión dilatación y cizalla. Su velocidad es el 90% de las ondas S - Frecuencia baja - Es la que transporte mayor energía y es la que representa mayor peligro para las estructuras
	Ondas L	- Originan oscilaciones elípticas, pero entre capas de terreno y atmosfera. - Velocidad similar a ondas R - Frecuencia baja

Fuente: Adaptado de Valdivia (2017).

Figura 3. Tipos de Ondas



Fuente: Bernaola (2013)

Los frentes de cada una de las ondas tienen una forma diferente, las ondas P se propagan por tracciones y compresiones sucesivas del medio, y en el momento que alcanzan una superficie libre o cambian del medio donde se encontraban, influidas por esta discontinuidad, sufren el fenómeno de reflexión y refracción originándose las ondas S. Estas ondas P y S se propagan en todas las direcciones, también son conocidas con el nombre de ondas de volumen. En las interfaces del terreno las ondas de volumen dan lugar a las ondas de superficie, las cuales se propagan en este límite. Por lo tanto, estas ondas superficiales tienen dos orígenes, la propia detonación del explosivo y el rebote de las ondas internas al incidir sobre la superficie.

2.2.2.2. Parámetros de las ondas

Según Exsa (2015), las vibraciones generadas por las voladuras se consideran como ondas de tipo sinusoidal, donde los parámetros básicos de análisis son:

- a) Desplazamiento:** Representa el movimiento de una partícula en un instante de tiempo desde su posición de equilibrio. Su unidad está dada en milímetros o pulgadas.
- b) Velocidad:** Es la razón de cambio del desplazamiento, comúnmente se mide en pulgadas por segundo (pulg/seg) o milímetros por segundo (mm/seg). Esta es la velocidad o excitación de las partículas de tierra ante el paso de un frente de onda por el macizo rocoso. La amplitud de la vibración, medida como velocidad de partícula, es universalmente considerada como el mejor indicador del esfuerzo inducido en el macizo rocoso, y por lo tanto considerado como el mejor indicador del potencial daño y el potencial efecto de fragmentación en la roca.

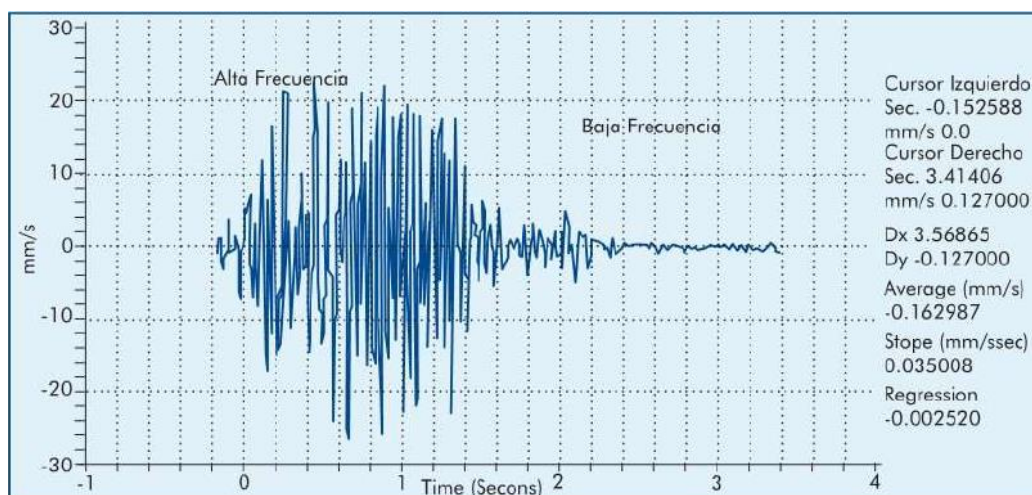
c) Aceleración: Representa el rango de cambio de velocidad de la partícula respecto al tiempo. Su unidad está en pulg/s² o mm/s².

d) Amplitud: Es el desplazamiento máximo de un punto del terreno desde su posición de reposo, usualmente definida en términos de velocidad en pulg/s o mm/s

e) Frecuencia: La frecuencia de las vibraciones indica el número de veces por segundo que la onda de propagación pasa por un ciclo completo de compresión y tensión (Hertz o ciclos por segundo). El factor que tiene una gran influencia en esto es la dimensión de la carga, columnas grandes de carga tienden a producir bajas frecuencias. Sin embargo, otros importantes factores influyen, como los módulos de la roca y la razón de carga producida por la detonación (es decir la velocidad de detonación).

Si la frecuencia es baja, el desplazamiento es mayor, por lo que se produce un mayor daño en el medio en que se transmite la vibración.

Figura 4. Ejemplo de Onda de vibraciones



Fuente: Exsa (2015)

2.2.2.3. Velocidad de partícula

De acuerdo a Cornejo & Huamán (2020), se considera dos conceptos principales: la velocidad de propagación de la Onda P (V_p) y la Velocidad Pico Partícula (VPP o PPV por sus siglas en inglés). La VPP es la velocidad de oscilación máxima que alcanza una partícula en un espacio de tiempo en las tres dimensiones posibles de movimiento.

El movimiento de una partícula es causado en casi su totalidad por las ondas internas, P y S, por ello la velocidad de la Onda P es la que genera movimientos oscilatorios sobre las partículas. Este movimiento tiene un desplazamiento, una velocidad y una aceleración, pero los monitoreos con sismógrafos se enfocan en la medición de la velocidad de la partícula.

2.2.2.4. Monitoreo de vibraciones

En el Manual de ENAEX (2014), la medición vibraciones tiene como objetivo principal detectar y registrar el movimiento vibratorio de la tierra. Estas medidas deben describir de la mejor forma el evento “vibraciones”, para lo cual se requiere medir tres componentes ortogonales que definan: amplitud, velocidad y aceleración de la partícula, en función del tiempo.

A continuación, se describe cada una de estas componentes:

- Longitudinal: Normal a la dirección de la tronadura en el plano horizontal.
- Transversal: Perpendicular a la dirección de la tronadura en el plano horizontal.
- Vertical: Perpendicular a la dirección de la tronadura en el plano vertical.

El principal problema asociado a este tipo de mediciones, establecer un punto fijo en el espacio, en el cual esta se hará efectiva, ya que al pasar la energía sísmica, el ambiente desplaza todo lo que está en superficie, incluyendo a

quien está haciendo la medición y su instrumental. Actualmente existen instrumentos que superan este inconveniente, estableciendo un punto de referencia que permanece fijo durante el paso de la onda sísmica.

Para obtener un registro preciso, es esencial que el sensor mantenga contacto fijo con la tierra u otra superficie durante el paso de la vibración. Si el sensor se orienta en dirección horizontal y/o pierde contacto en dirección vertical, el resultado obtenido con el sismógrafo será erróneo. Es necesario alinear correctamente el sensor con la tronadura, esta operación se facilita aún más, marcando una flecha sobre el sensor y nivelándolo exactamente. Es importante también hacer notar que, si las mediciones se hacen dentro de una estructura o con el sismógrafo fijado sobre ésta, las vibraciones de tierra no serán registradas. La medición obtenida es la respuesta de la estructura a las vibraciones.

Según Bernaola (2013), es preciso hacer una distinción entre aspectos bien diferenciados del fenómeno de la vibración. Uno de ellos es la propagación o transmisividad de la vibración por el medio y otro es el movimiento propio que el paso de la vibración genera en las partículas del medio. Cabe entonces diferenciar entre dos tipos de velocidades:

- Velocidad de Onda o de propagación es aquella con la que la vibración se propaga por el medio
- Velocidad de partícula es aquella relativa a las oscilaciones que experimenta la partícula, excitada por el paso de la onda de energía vibratoria.

2.2.2.5. Sismógrafos

Como mencionan Cornejo & Huamán (2020) el sismógrafo es un equipo especial para la medición de vibraciones generadas por voladuras. Consta de tres componentes principales: geófono triaxial, equipo receptor y micrófono. El más importante de ellos es el geófono triaxial, encargado de la medición mediante impulsos eléctricos en las tres dimensiones: vertical, longitudinal y transversal. El equipo receptor interpreta las señales electrodinámicas emitidas por las bobinas del geófono y procesa la información para obtener la VPP. Adicionalmente se realiza el monitoreo de la onda sónica mediante el uso de un micrófono.

Este equipo debe ser calibrado anualmente para certificar su operatividad y se deben seguir los procedimientos adecuados para su utilización con una correcta configuración de acuerdo al tipo de geófono y los límites que este puede soportar.

2.2.2.6. Reducción de niveles de vibración por voladuras

Según Exsa (2015), Un excesivo nivel de vibración en una voladura de producción señala una sobrecarga o una inadecuada secuencia de tiempos de salida. Aunque cada caso requiere un análisis particular, se sugieren algunas medidas para aminorarlo:

1. Minimizar la carga de explosivo por unidad de microretardo:
 - a. Reduciendo el diámetro de perforación
 - b. Acortando la longitud de los taladros
 - c. Seccionando y espaciando las cargas dentro de los taladros, e iniciándolas en tiempos escalonados (decks)

- d. Utilizar el mayor número de detonadores o tiempos de retardo posibles (con explosores secuenciales de micro retardo eléctricos o no eléctricos disponibles, esto naturalmente en voladuras con gran número de taladros o con muchas cargas espaciadas).
2. Reducir el número de taladros con detonadores instantáneos, ya que éstos producen más impacto.
3. Elegir un tiempo de retardo entre barrenos y filas efectivas que evite una fuerte superposición de ondas y permita un buen desplazamiento de la roca disparada.
4. Disponer la secuencia de iniciación de modo que ésta progrese desde el extremo más próximo a la estructura a proteger alejándose de la misma.
5. Utilizar el consumo específico adecuado, ya que un consumo excesivo da lugar a una sobrecarga innecesaria acompañada de grandes efectos perturbadores.
6. Disponer el esquema de taladro con una relación $H/B > .$
7. Controlar la perforación para que las mallas reales coincidan con las nominales.
8. Emplear sobre perforaciones con las longitudes mínimas necesarias para un buen arranque.
9. Disponer los frentes con la mayor superficie libre posible.
10. Crear pantallas o discontinuidades entre las estructuras a proteger y las voladuras, por ejemplo, con una cortina de taladros de precorte.

2.2.3. Predicciones de vibraciones

De acuerdo a Bernaola (2013) de forma genérica, el nivel de vibración recibida en un punto, expresado como valor de velocidad de vibración V , es función directa

de la carga de explosivo empleado Q , e inversa de la distancia D entre el punto de disparo y el punto de registro. Esto se puede expresar de forma genérica:

$$V = K * Q^{\alpha} * D^{\beta}$$

Siendo:

V = Velocidad de vibración (mm/s)

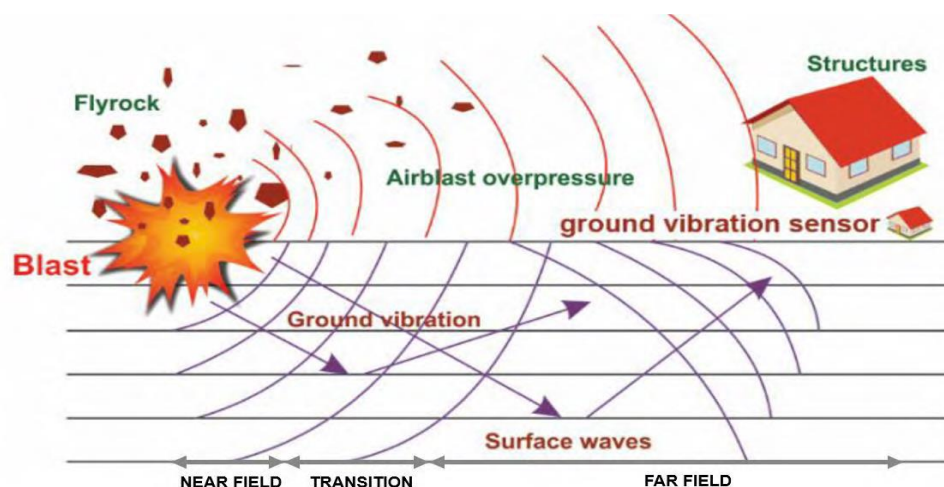
Q = Carga de explosivo (kg)

D = Distancia (m)

K , α y β son constantes que engloban la geología del terreno, la geometría de las cargas, las diferencias de cota entre los puntos de disparo y de medida, el tipo de propagación, el nivel de “aprovechamiento” de la energía en generar vibraciones, etc.

Por lo tanto, uno de los objetivos de un estudio de vibraciones es hallar el valor de las constantes K , α y β a través de un ajuste mínimo – cuadrático, realizado con los valores V , Q y D tomados en los ensayos.

Figura 5. Representación gráfica de los diferentes efectos mecánicos de un disparo



Fuente: Cornejo & Huamán (2020)

2.2.3.1. Campo lejano

El modelo para la predicción de vibraciones en campo lejano más utilizado es el de Devine, para ver el desarrollo de la formula revisar el anexo 02. Al hablar de campo lejano el estudio se basa en el efecto de la voladura en el entorno, y campo cercano el efecto de la voladura en la roca misma. Se suele asumir como campo lejano a una distancia $d > 3-5$ veces la longitud de la carga. Se tiene:

$$VPP = K * \left[\frac{d}{W^{1/2}} \right]^{-a}$$

Donde:

VPP = Velocidad de partícula

d = Distancia de monitoreo

W = Carga operante

K = Factor de Amplitud

a = Factor de atenuación

Como se mencionó en el párrafo anterior correspondiente a la ley de transmisividad, los parámetros a y K están ligados a características del terreno y explosivo. En este caso se tiene que el parámetro “a” corresponde a la geometría del frente de onda de expansión y de atenuación de la roca. Mientras que el coeficiente K indica la eficiencia del explosivo y cómo la presión de detonación se transfiere a la roca (Exsa, 2015).

2.2.3.2. Campo cercano

En lo que respecta a las mediciones en campo cercano, el modelo más aceptado es el de Holmberg y Pearson (Anexo 03).

Se tiene:

$$PPV = Ky^a \left[\int_0^H \frac{dh}{[R_0^2 + (R_i * \tan \phi - h)^2]^{\beta/2\alpha}} \right]^a$$

Donde:

PPV: Velocidad pico partícula

K: Constante empírica del terreno

y: Factor relacionado con la carga explosiva unitaria o la energía liberada

a: Exponente de atenuación empírico (similar al de la ley de vibración clásica)

H: Altura o longitud de columna explosiva (profundidad de carga)

h: Variable de integración

*R*₀ : Distancia mínima o radio perpendicular entre el punto de medición y el eje de la columna de explosivo

*R*_i: Distancia inclinada al punto de observación (radio desde el origen de la onda sísmica hasta el receptor)

α: Parámetro de propagación del medio (relacionado con la geometría de propagación)

β: Factor que representa el tipo de onda sísmica y el modo de atenuación en el macizo.

Donde ϕ es el ángulo entre la recta que pasa tanto por el punto de la carga del taladro como por el punto de la medición (siendo *R* la distancia de esta recta) y la recta horizontal. La ecuación, se integra desde 0 hasta la altura *H* del taladro cargado. A diferencia del modelo de Divine, esta ecuación nos indica que la carga lineal es el factor que más impacto tiene en la vibración y daño. Ambos modelos nos indican que la Velocidad Pico Partícula está determinada por la ubicación respecto a la carga, características del explosivo

y geometría del taladro que en este caso determinará la carga lineal “y” (Exsa, 2015).

2.2.4. Normativa de control de vibraciones

Para el control de vibraciones provocadas por voladuras, se debe tener en cuenta el contexto geográfico y demográfico donde se encuentra el foco de emisión. De primera mano, se deben conocer las frecuencias predominantes que poseen estas ondas. Normalmente en una operación minera, se buscan no tener frecuencias bajas, ya que por lo general tienen resona con la frecuencia límite de las rocas, entonces, se tiende a cambiar los diseños para que estas sean de frecuencias relativamente altas.

Una vez conocida la predominancia de frecuencias, se controlan los límites de velocidad de partícula que puede resistir la estructura a esa frecuencia, para este propósito existen Cuadros que proponen los máximos niveles de vibración de acuerdo al tipo de construcción o instalación que se encuentre cerca de la voladura.

2.2.4.1. Norma peruana

Como única norma nacional se tiene a la Guía Ambiental para la Perforación y Voladura en Operaciones Mineras publicada por el MINEM en 1995, donde en su segundo capítulo especifica los límites de vibraciones de acuerdo al tipo de suelo, las características de la estructura y edad de la misma. Esta norma, en concordancia con la Ley de Transmisividad, propone una distancia escalada (Ds), la cual es utilizada como factor para limitar la carga máxima operante sin monitoreo sísmico.

Ver Tabla 03.

Tabla 3. Velocidad Pico Partícula máxima

Distancia (D) desde el área de voladura en pies	Velocidad de partícula pico máxima permitida (Vmax) para vibración de tierra en pulgadas/segundo	Factor de distancia a escala por aplicación sin monitoreo sísmico (Ds)
0 a 300	1,25	50
301 a 5000	1,00	55
5001 a más	0,75	65

Fuente: Tomado de Minas (1995), pp. 23.

Esta norma también menciona los ajustes que se deben dar a determinada distancia escalada para los monitoreos de vibraciones realizados con geófonos triaxiales. De esta manera se evitan daños en las estructuras (cercanas o lejanas) al superar los límites de acuerdo a la VPP y a la Velocidad de propagación de la Onda P en el macizo rocoso. Ver tabla 4.

Tabla 4. *Efectos de la VPP sobre el macizo rocoso*

Velocidad de Partícula Pico (Pulgadas/segundo)	Efectos en masa de roca
Menos de 10	No hay fractura de rocas intactas
De 10 a 15	Puede ocurrir rebanado tensional menor; pueden ocurrir algunas caídas de rocas
De 25 a 100	100 rajaduras tensionales fuertes y cierta rajadura radial, fracturas
Más de 100	Rotura completa de masas de rocas

Fuente: Tomado de Minas (1995), pp. 24.

Como se puede observar, por un lado, esta norma asume que el daño sobre el macizo rocoso es igual para todos los tipos de roca, sin tomar en cuenta la verdadera velocidad de propagación ni los límites de elasticidad de las rocas. Por otro lado, se tiene que los límites se encuentran en pulgadas por segundo y al ser convertidos en milímetros por segundo, la unidad más usada en este tipo de mediciones, proponen valores muy elevados y no se tiene en consideración el material con el que están fabricadas las construcciones.

Debido a estos factores es que se considera que esta guía se encuentra desfasada y requiere de ajustes más conservadores a la realidad actual de la minería en el Perú.

2.2.4.2. Normas internacionales

A nivel internacional, diversos países propusieron límites sobre las vibraciones inducidas por voladuras. Algunas de estas normativas son las más utilizadas en la industria minera; consideran criterios de daño estructural de acuerdo a la frecuencia.

predominante y al límite de VPP, para así incrementar el control en las voladuras y que las construcciones aledañas no sufran daño alguno.

Existen muchas normas internacionales de excelencia proveniente de aquellos considerados como países mineros. Sin embargo, para casos prácticos de la investigación se consideran 3 normas: la estadounidense, española y alemana.

El gobierno de los Estados Unidos, propone la norma USBM RI 8507, mediante su oficina de asuntos mineros, cuyos estudios realizados acerca del daño de las vibraciones fueron pioneros en el campo de investigación. Con la utilización de sismógrafos especializados en monitoreo de voladuras, se pudieron determinar valores límites de VPP, los cuales, en un principio fueron muy altos, y se fueron ajustando al segmentarlos por rangos de frecuencias. Finalmente, se ajustaron de acuerdo al tipo de estructura a cuidar. De esta manera, en 1980 se proponen los valores que se usan actualmente, ya claramente ajustados.

Destacan tres tipos de estructuras a cuidar y las diferentes frecuencias que pueden afectarlas. Se puede resaltar que una vibración de alta frecuencia

normalmente no afecta a ningún tipo de estructura y por ello el límite de VPP es mucho más alto, es por ello que, en las voladuras controladas, las frecuencias de ondas generadas deben ser elevadas, como se puede observar a continuación.

Tabla 5. Valores de prevención propuestos por la USBM (1980)

PPV máx (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Estructuras
12,7	2,7 - 7	Casas con paredes de escayola
19	4 – 12	Casas modernas con interiores de yeso prefabricado
50,8	+40	Sin restricción

Fuente: Tomado de “Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting” de United States Bureau of Mines, 1980.

Siguiendo un criterio similar, en el Cuadro 5 se tiene la Norma UNE 22.381.93 utilizada en España. La cual indica tres tipos de edificaciones a cuidar según su estructura y su valor histórico: I para edificios fortificados, II para edificios comerciales, viviendas y construcciones arqueológicas de baja sensibilidad y III para edificaciones arqueológicas considerablemente sensibles.

Tabla 6. Valores límite del criterio de prevención de daños UNE 22.381-93

Valores límite del criterio	Frecuencia (Hz)		
	2-15	15-75	>75
	Velocidad (mm/s)	Desplazamiento (m)	Velocidad (mm/s)
Grupo I	20	0.212	100
Grupo II	9	0.095	45
Grupo III	4	0.042	20

Tomado de Norma Española UNE 22381:1993 Control de vibraciones producidas por voladuras, por la Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR UNE, pp. 7.

Por último, el gobierno alemán, propone límites en la parte 3 de la norma DIN-4150: Efectos de la vibración en estructuras. El parámetro que considera la norma DIN-4150 es el valor absoluto de la velocidad pico partícula en las 3 dimensiones (verticales, transversales y radiales). Esta velocidad debe ser medida en los cimientos de la estructura. También se realiza medición en la parte más alta de la misma, que a su vez permitirá obtener también la medición de velocidad horizontal en la parte baja. Es importante considerar que la norma nos indica que en caso de mediciones de frecuencias bajas se debe tener un cuidado especial. (Del Castillo, 2018)

La Cuadro 06 y Figura 06 presentadas a continuación dan criterios guía para valores máximos de la velocidad de la partícula en los cimientos de la estructura y en el plano horizontal del piso más alto de la misma.

Tabla 7. Valores de referencia para la velocidad de vibración que se utilizarán al evaluar los efectos de la vibración a corto plazo en las estructuras.

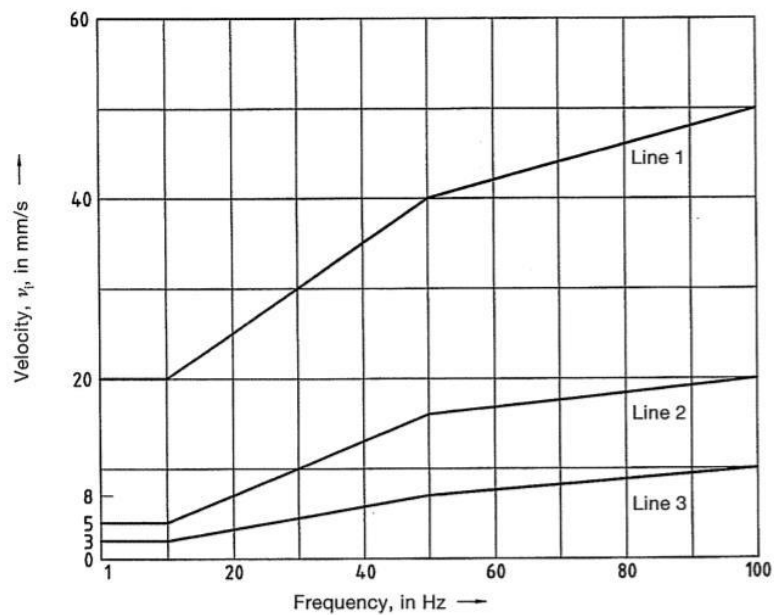
Línea	Tipo de estructura	Valores máximos de Vi en mm/s			
		Vibración en la cimentación a la frecuencia de			Vibración
		1 Hz a 10 Hz	10 Hz a 50 Hz	50 Hz a 100 Hz*	
1	Edificios para uso comercial, industrial o diseños similares	20	20 a 40	40 a 50	40
2	Edificios asimilables a viviendas	5	5 a 15	15 a 20	15
3	Estructuras que por su particular	3	3 a 8	8 a 10	8

	sensibilidad a la vibración no pueden ser clasificados en las líneas 1 y 2 (Ej. Edificios históricos)				
--	---	--	--	--	--

Tomado de “Norma DIN 4150-3”, Structural Vibration in Buildings. Effects of Vibration on Structures, German Standard, de Deutsches Institut Fur Normung E.V, 1999-02, pp. 4.

Nota (*). Para frecuencias superiores a 100 Hz, los valores dados en esta columna pueden utilizarse como valores mínimos.

Figura 6. Curvas para los valores especificados en Tabla 8.



Tomado de Norma DIN 4150-3 Structural Vibration in Buildings. Effects of Vibration on Structures, German Standard, de Deutsches Institut Fur Normung E.V, 1999-02. pp. 5.

Finalmente, es preciso recordar que los instrumentos que se empleen para realizar las mediciones deben cumplir las condiciones detalladas en la norma DIN 4150-1 y deben seguir los procedimientos detallados en la norma DIN 4150-2.

2.3. Definición de términos

2.3.1. Presa de aguas contactadas

El término presas de aguas contactadas se refiere a presas que están diseñadas para permitir el paso del agua a través de ellas de manera controlada, ya sea para riego, generación de energía, o simplemente para permitir el flujo natural del agua después de pasar por la presa.

A diferencia de las presas de almacenamiento, que están diseñadas para acumular grandes volúmenes de agua, las presas de agua contactadas permiten que el agua fluya a través de ellas, ya sea a través de compuertas, canales, o incluso por encima de la estructura de la presa en ciertos casos.

2.3.2. Ley de atenuación

Es un modelo matemático que predice la aceleración que se produce a una distancia determinada desde el epicentro.

2.3.3. Fly rock

Es un peligroso fragmento de roca lanzado fuera del área controlada durante una voladura, común en minería y construcción. Esta roca puede causar graves daños a equipos, estructuras y personas cercanas.

2.3.4. Carga operante

La carga explosiva operante se refiere a la cantidad de explosivo que se detona por taladro y la secuencia de detonación que determina la cantidad de explosivo detonado en un instante

2.3.5. Factor de carga

Determina la cantidad de explosivo utilizado por cada metro cúbico o tonelada de roca fragmentada.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de Investigación

El tipo de investigación será aplicada de diseño experimental (Hernández et al., 2014), ya que se aplicarán los conocimientos técnicos en diseño de voladuras y los resultados de las mediciones de las vibraciones de voladuras para

determinar los subsecuentes diseños de cargas y así disparo a disparo evitar ocasionar daños a las estructuras de concreto.

3.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación es correlacional (Hernández et al., 2014), ya que lo que se busca es a partir de simulación la relación entre el diseño de cargas y las vibraciones producidas para nuestro proyecto y lugar de aplicación evitando que estas superen lo permitido para conservar la integridad de las estructuras de concreto.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

Todas las 09 voladuras realizadas en la construcción de la presa de aguas contactadas.

3.3.2. Muestra

La muestra es por conveniencia, no probabilista y está constituida por 09 voladuras.

3.3.3. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

3.3.3.1. Técnicas de recolección de datos

Las técnicas e instrumentos para la recolección de datos de la presente investigación se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 9: *Técnicas e instrumentos*

Técnicas	Instrumentos
-----------------	---------------------

Observación	Visita en campo
Monitoreo	Registro de vibraciones de voladura
Análisis documental	Revisión de bibliografía
Medición con aparatos	Estación total, GPS diferencial, drones

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.2. Instrumentos de recolección de datos

La información de campo fue recolectada acorde a la necesidad informativa, la topografía fue levantada con el soporte de Drones con puntos de referencia ubicados con la ayuda de una estación total. Para el monitoreo de vibraciones se empleó sismógrafos triaxiales ubicados en 3 puntos específicos donde habían estructuras a cuidar, estas coordenadas fueron levantadas mediante GPS diferencial.

3.3.3.3. Procesamiento de datos

Se hará la recolección de los datos de campo de forma visual, la topográfica mediante instrumentos topográficos entre ellos Drones, estación Total, y la información de las vibraciones de voladura con sismógrafos; los cuales se procesarán con ayuda del uso de los softwares Excel, Iblast, Mineplan.

CAPITULO IV

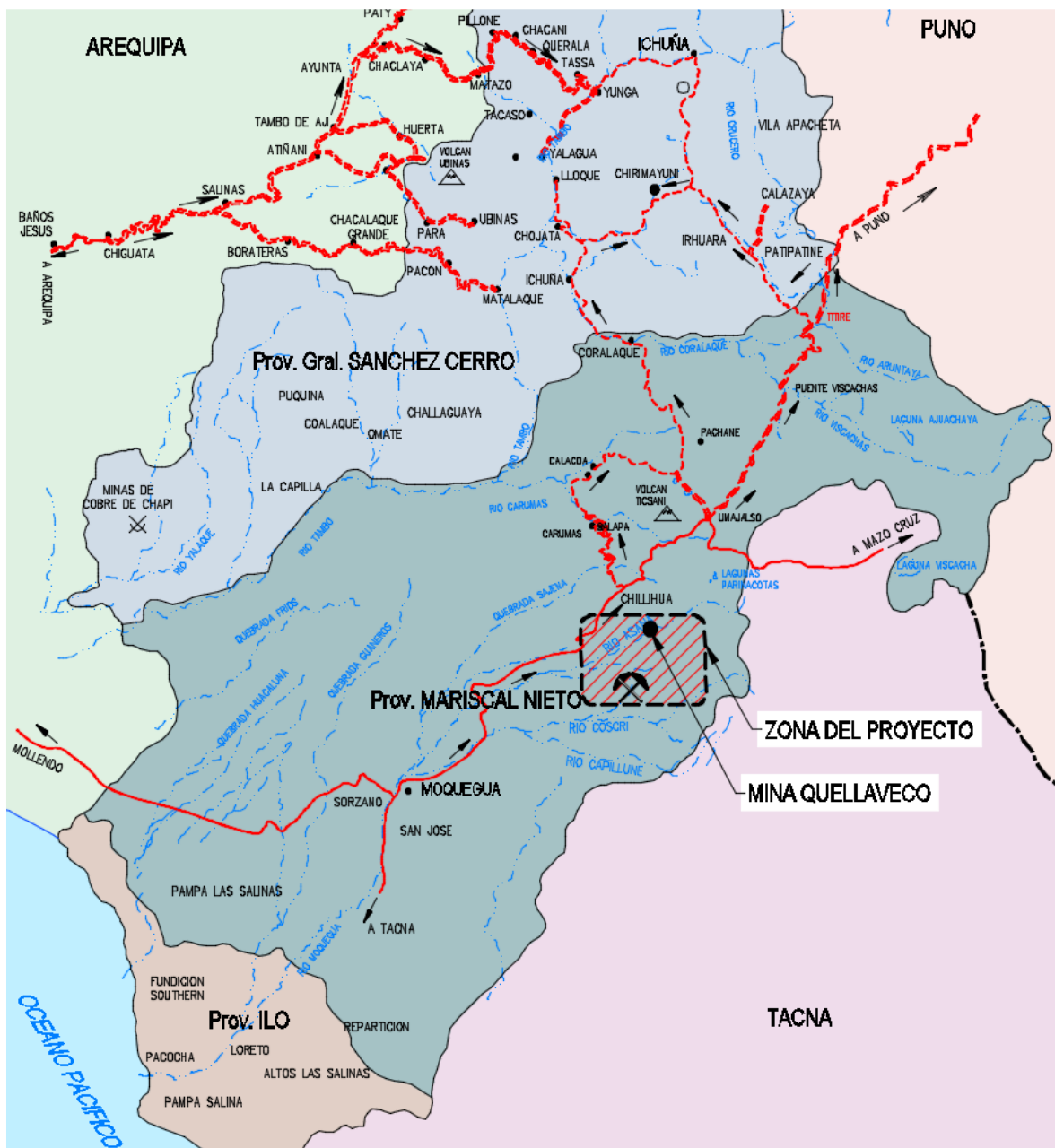
CONTROL DE VIBRACIONES DE VOLADURA CERCANAS A LA CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA DE AGUAS DE CONTACTO

4.1. Diseño y construcción de la presa de agua de contacto

4.1.1. Ubicación de la presa de agua de contacto

El Proyecto se encuentra ubicado políticamente en el distrito de Torata, provincia de Mariscal Nieto, departamento de Moquegua, cerca al límite con la región Puno aproximadamente a 1.246 km desde la ciudad de Lima (a unas 21 horas en transporte terrestre).

Figura 7. Ubicación general del proyecto de Presa de agua de contacto



El proyecto se encuentra en el cauce del río Asana, inmediatamente aguas abajo del botadero proyectado para la Mina Quellaveco (en las cercanías de la localidad de Tala).

4.1.2. Descripción del proyecto de construcción de presa de agua de contacto en Mina Quellaveco

Anglo American Quellaveco S.A., (AAQSA), posee los derechos sobre el yacimiento Quellaveco, que comprende una nueva mina de cobre y

molibdeno y concentradora ubicada al noreste de Moquegua en el sur de Perú; aproximadamente 130 km de Arequipa y 34 km en línea recta de Moquegua. La

mina de tajo abierto está a 3.500 m.s.n.m. en el Valle Quellaveco y la concentradora está en el Valle Papujune a una elevación entre 3.400 y 3.700 m.s.n.m.

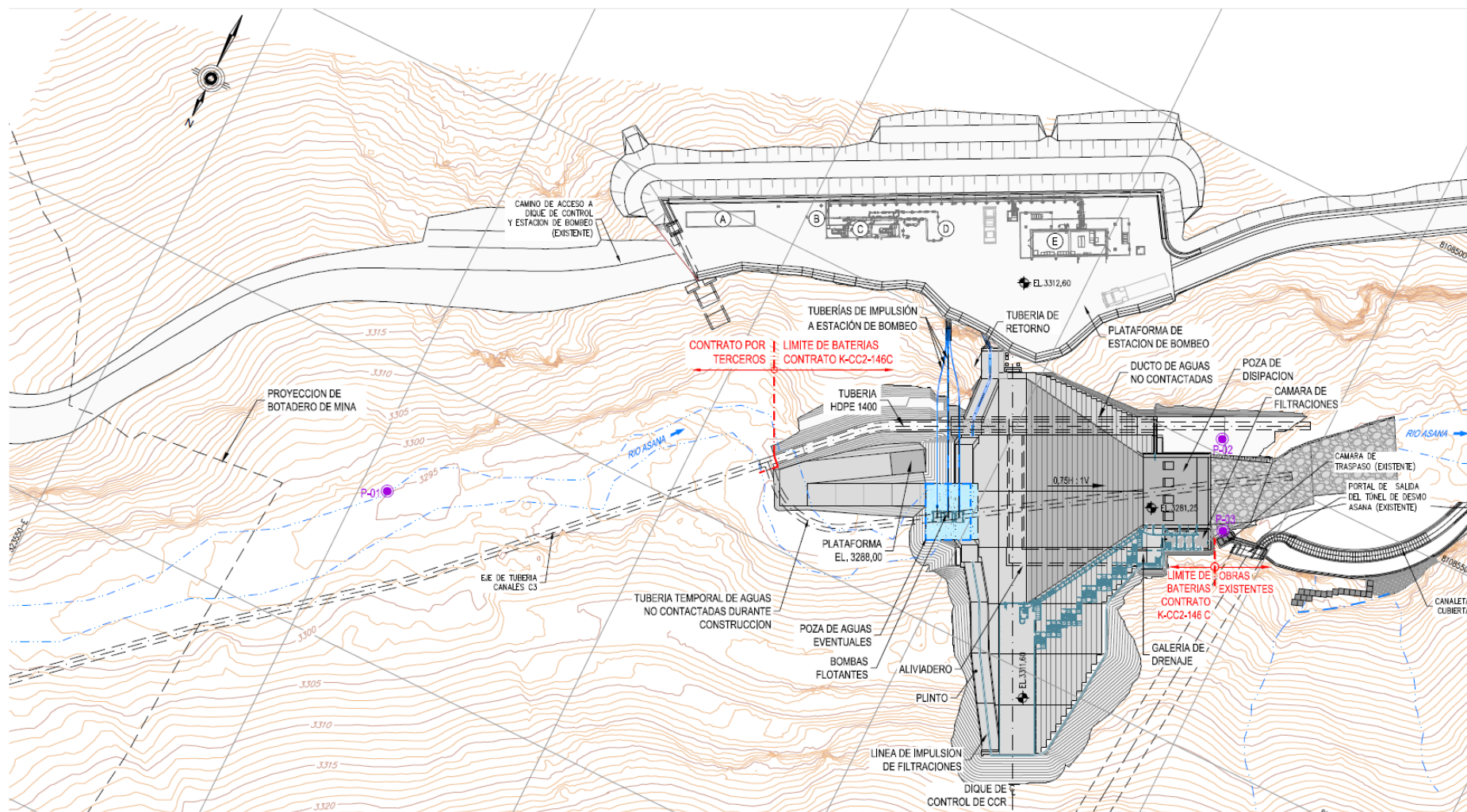
El proceso de explotación del yacimiento requiere del acopio de estéril en el botadero principal ubicado en el cauce del río Asana cuyas aguas habrán sido previamente desviadas por un túnel de desvío de 7,60 km de longitud aproximadamente. Adicionalmente, se ha considerado la construcción de obras de saneamiento en las laderas para el manejo de aguas contactadas y no contactadas. Las aguas contactadas serán captadas aguas abajo de plataformas y estructuras, con la finalidad de evitar que se mezclen con aguas no contactadas.

Estas aguas serán derivadas a pozas de acumulación. Las aguas no contactadas serán captadas mediante canales de contorno aguas arriba de plataformas y obras, y su finalidad es interceptar aguas de escorrentía en las cuencas aportantes a la quebrada del río Asana, y desviarlas a su cauce natural. Los canales de contorno se construyen en distintas etapas y para distintos periodos de retorno.

Adicionalmente, para la operación del botadero de la mina se ha considerado ejecutar una serie de obras al pie del botadero, cuyo propósito es el manejo de aguas contactadas durante la etapa de construcción, así como de operación.

Asimismo, según se especifica en la Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Quellaveco, durante la construcción de las obras deberá de protegerse el agua de los ríos, con la finalidad de evitar su contaminación. Esto forma parte de un compromiso realizado por AAQSA.

Figura 8. Esquema general de proyecto



Fuente: Especificaciones técnicas del proyecto de construcción de presa de agua de contacto CCR- Mina Quellaveco, Fluor (2019).

4.2. Operaciones unitarias

4.2.1. Diseño de bancos

El diseño de los bancos depende de 3 factores.

- **Topografía:** En cuanto a la topografía el terreno superficial natural constaba de rocas meteorizadas que fueron desprendidas y cargadas con excavadoras del proyecto hasta encontrar roca dura que es donde se comienza a realizar los trabajos de perforación y voladura.

Seguidamente se fue avanzando ordenadamente con las voladuras con la intención de generar plataformas, por lo que los diseños de perforación constaban de alturas de taladros diferentes en las mallas.

- **Diseño de fundación de la Presa:** Las alturas de las voladuras inicialmente dependieron de las características de los equipos de perforación en el proyecto, sin embargo, como limite se tenia los niveles de fundación de la presa, con el objetivo de no generar una sobre perforación se tuvo constantemente control topográfico.
- **Avance en perforación:** Operativamente las voladuras también estuvieron condicionadas por las velocidades de perforación, otras actividades paralelas (movimiento de materiales, movimiento de tierras, inyección de concreto), por lo que la programación de las voladuras atendía a acuerdos con el área operativa, perforación y voladura y de planificación.

Figura 9. Sección de área de voladura de ejemplo

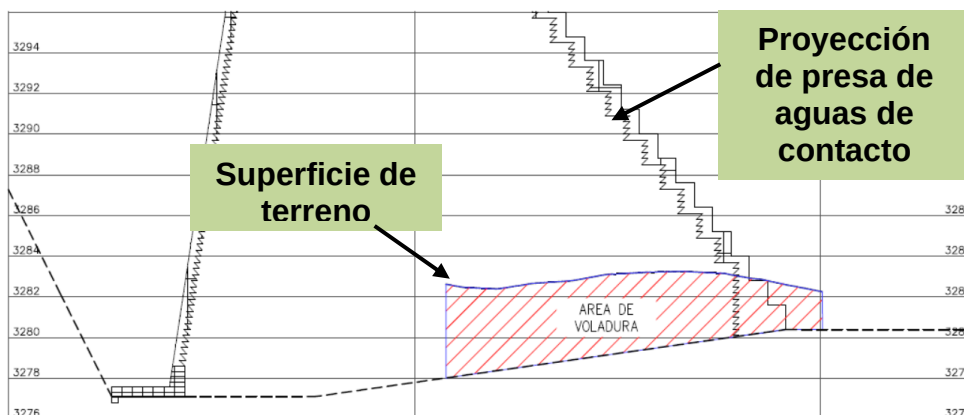
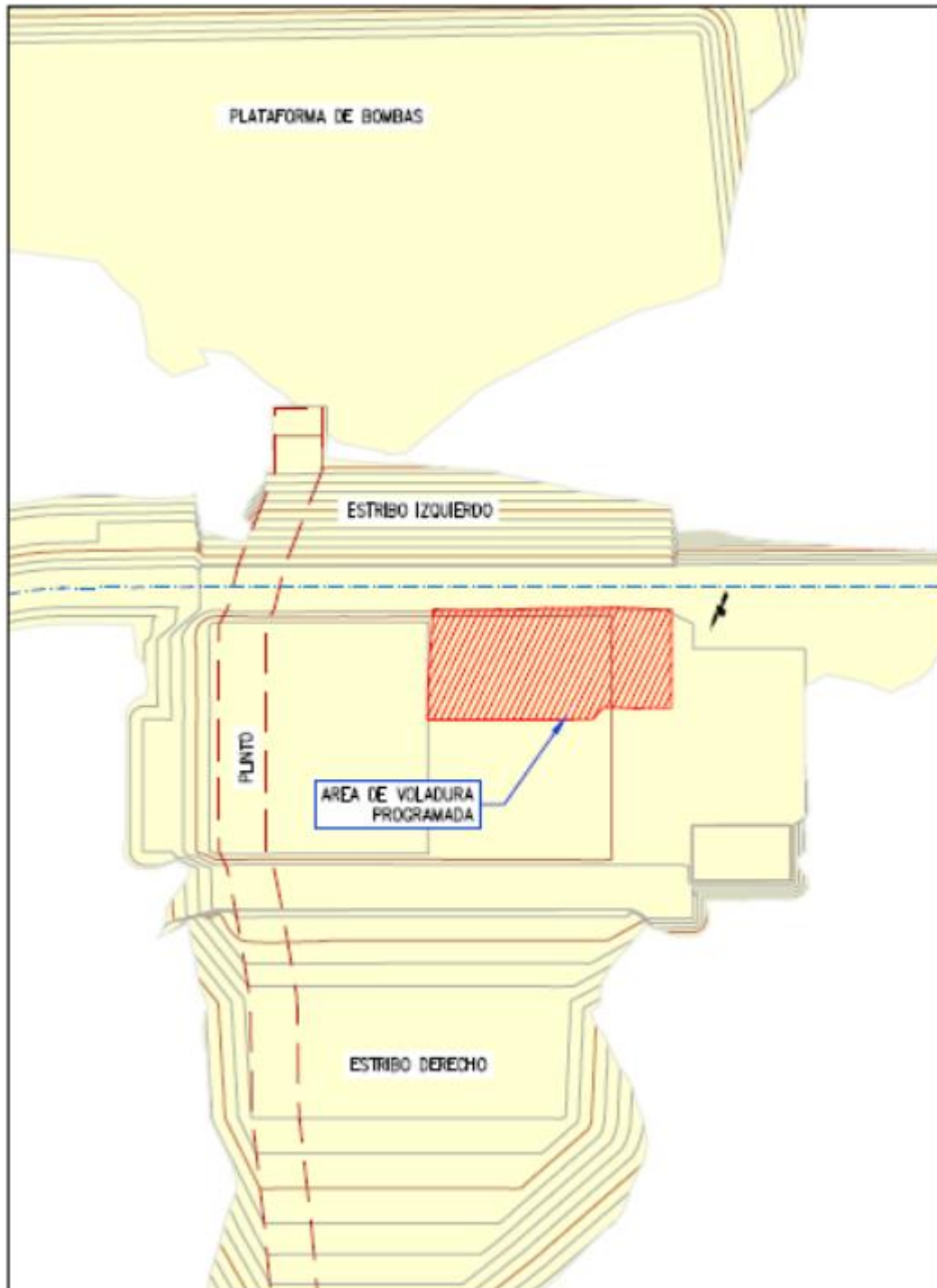


Figura 10. Área de voladura de ejemplo en relación con presa de agua contactada.



4.2.2. Perforación

Para la ejecución de la voladura se cuenta con los siguientes equipos de perforación.

Figura 11. *Perforadora Track drill*



Fuente: Fotografía tomada por el autor (2021)

Tabla 10. *Características perforadoras Track drill*

Equipo de perforación	Track drill
Marca del equipo	SOOSAN
Modelo	STD 11
Diámetro broca	TD45 de 2" – 3"
Barra de perforación	MF T45 de 12"

Fuente: Recogida en campo por el autor

Figura 12. *Perforadora martillo neumático*



Fuente: Fotografía tomada por el autor (2021)

Tabla 11. Características perforadora martillo neumático

Equipo de perforación	Martillo neumático
Marca del equipo	ATLAS COPCO
Modelo	YT-27
Diámetro broca	1.5"
Barra de perforación	3, 5, 8 y 10 pies

Fuente: Recogida en campo por el autor

4.2.2.1. Diseño de malla de perforación

Para el diseño de la geometría de perforación utilizaremos la fórmula de López Jimeno para diámetros mayores a 165 mm o 6.5pulgadas, para diámetros menores el burden será afectado por un coeficiente reductor de 0.9.

$$B = 0.76xDxf$$

f = Factor de corrección ($Fr * Fe$)

Fr = Factor de corrección de roca

Fe = Factor de corrección de explosivo

$$E = 1.15B$$

$$Fr = \left(\frac{2.7 * 3500}{\delta r * VC} \right)^{0.33}$$

$$Fe = \left(\frac{\delta e * VD^2}{1.3 * 3660^2} \right)^{0.33}$$

Donde:

B = Burden (m)

E = Espaciamiento (m)

D = Diámetro de taladro (pulg.)

f = Factor de corrección ($Fr * Fe$)

Fr = Factor de corrección de roca

Fe = Factor de corrección de explosivo

δr = Densidad de roca (g/cm³)

δe = Densidad de explosivo (g/cm³)

VC = Velocidad sísmica de propagación del macizo rocoso (m/s)

VD = Velocidad de detonación del explosivo (m/s)

Rh = Relación de rigidez (>3)

4.2.2.2. Problemas de perforación.

Los problemas de perforación que se podrían presentar durante esta actividad más haya de fallas programadas u no programadas en el equipo de perforación fueron taladros desviados, longitudes diferentes a las del diseño; por lo que se hacia el marcado de los taladros y se colocaba estacas donde indicaba la altura de cada taladro, y el personal destinado a la tarea además del operador también se contaba con ayudante de piso, con wincha de medición para el control de profundidades y una varilla para verificar la inclinación de la perforación.

4.2.3. Voladura

4.2.3.1. Explosivos y accesorios utilizados

Durante la etapa de construcción del proyecto Minero Quellaveco se cuenta con polvorines con diferentes productos explosivos que están a disposición de todos los proyectos de voladuras de rocas que se dan.

A continuación, se muestra los explosivos y accesorios de voladura con los que se contaba en el proyecto a la fecha de ejecución de las voladuras en el proyecto de construcción de presa de agua de contacto, estas cantidades de Stock van variando durante la ejecución del proyecto no solo por el consumo de las voladuras en la presa de aguas contactadas sino también por otros proyectos que se estuvieron desarrollando en paralelo dentro de la Mina Quellaveco.

Tabla 12. *Explosivos de Fabricante FAMESA*

Descripción	Unidad	Stock
Explosivos		
Emulnor 5000 1' x 8'	Kg	660.844
Superfam dos	Kg	2350
Emulnor 5000 2 x 16	Kg	3442.521
Cordón detonante	M	376
Accesorios		
Fanel dual 6.0 M 800MS	Und.	1161

Fanel dual 10.0 M 800MS	Und.	398
Fanel LSEF línea 500m silen. De encendido	Und	15
Fanel CTD 42 MS 6.5 mts	Und.	453
Fanel CTD 25 MS 6.5 mts	Und.	682
Fanel CTD 17 MS 6.5 mts	Und.	197
Fanel CTD N° 109 MS	Und.	299

Tabla 13. Explosivos de Fabricante ENAEX

Descripción	Unidad	Stock
Explosivos		
Anfo Premium	Kg	16575
Enaline D (K20 1 ¼" x 12m 2U 21K 10R BR	Kg	2068
Emultex PG 3" x 16" 10U caja 23 kg	Kg	3519
Cordón detonante N°05 Britacord	m	4977
Cordón detonante 80 GR m	m	1900
Iniciadores		
APD-P-225 CAP 60U Caja 13.5 kg	Und	2491
Detonadores electrónicos		
Det. Electr Davey 15m ref mv5	Und.	315
Detonadores no electrónicos bidireccional		
Det. NE Fanel dual 10 m 800/17ms	Und.	0
Det. NE Fanel dual 12 m 800/17ms	Und.	2481
Det. NE Fanel dual 18 m 800/17ms	Und.	917
Detonadores no electrónicos unidireccionales		
Det NE Fanel CTD 6 M – 0MS	Und.	109
Det NE Fanel CTD 6 M – 17MS	Und.	301
Det NE Fanel CTD 6 M – 25MS	Und.	190
Det NE Fanel CTD 6 M – 35MS	Und.	108
Det NE Fanel CTD 6 M – 42MS	Und.	164
Det NE Fanel CTD 6 M – 65MS	Und.	102
Det NE Fanel CTD 6 M – 100MS	Und.	94
Línea de disparo P 500M	Und.	6
Otros		
Cable disparo 1000 metros Davey Bickford P	M	12750

Por experiencia, stock y porque se acomoda a las dimensiones de las perforaciones se elige como explosivo la emulsión encartuchada (Emultex CN) en sus presentaciones 1 ½" * 16 y 1*8", de acuerdo a esto se tiene los siguientes valores para el burden y espaciamiento como cálculo inicial:

Tabla 14. *Burden y espaciamiento calculado*

Diámetro de taladro	2"	1.5"
Densidad de explosivo (gr/cm3)	1.22	1.22
Velocidad de detonación (m/s)	5000	5000
Factor de explosivo (F_e)	1.20	1.20
Factor de roca (F_r)	1.09	1.09
Factor de corrección (f)	1.31	1.31
Burden teórico (m)	1.99	1.49
Burden Real (m)	2	1.5
Espaciamiento (m)	2.3	1.7

Los parámetros de perforación mostrados en la tabla anterior, fueron calculados a partir de la fórmula de López Jimeno descrita líneas arriba.

4.2.3.2. Diseño de cargas

Para tener la primera aproximación de la carga por taladro se hizo empleo de la fórmula de KONYA.

$$d_c = \frac{\delta e * D^2 * \pi}{4000}$$

Donde:

d_c = Factor de carga lineal (kg/m)

δe = Densidad del explosivo (gr/cm3)

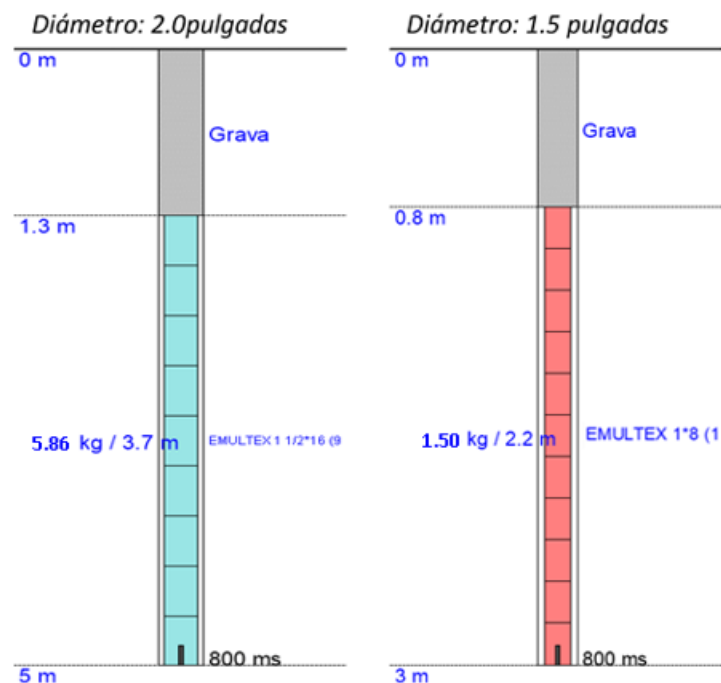
D = Diámetro del taladro (mm)

De acuerdo a nuestros datos y explosivo seleccionado preliminarmente se obtuvo los siguientes valores.

Tabla 15. Cantidad de carga calculada

Diámetro de taladro (pulg)	2"	1.5"
Densidad de explosivo (gr/cm3)	1.22	1.22
Diámetro de explosivo (mm)	38.1	25.4
Diámetro de taladro (mm)	50.8	38.1
Factor de carga lineal (kg/m)	1.39	0.62
Longitud de Taco (m)	1.3	0.8
Longitud de carga (m)	3.7	2.2
Carga por taladro (kg)	5.15	1.36
Factor de carga (kg/m3)	0.22	0.18

Figura 13. Modelos generales de carga para talados de 2" y 1.5"



Estos valores son teóricos y serán sujetos a modificaciones, conforme se vayan analizando los resultados obtenidos en los taladros de prueba y voladuras masivas.

4.2.3.3. Factor de voladura

El factor de voladura o factor de carga representa la cantidad de explosivo empleada para volar un determinado volumen de roca, su cálculo se realiza aplicando la siguiente ecuación.

$$\text{Factor de Voladura} = \frac{\text{Cantidad de explosivo (kg)}}{\text{Volumen de roca fragmentada (m}^3\text{)}}$$

Factor de voladura para taladros de 2”:

$$\begin{aligned}\text{Factor de Voladura} &= \frac{\frac{1.22\text{gr}}{\text{cm}^3} * \left(\frac{3.81\text{cm}}{2}\right)^2 * 3.1416 * 370\text{cm}}{2\text{m} * 2.3\text{m} * 5\text{m}} \\ \text{Factor de Voladura} &= \frac{5.15\text{ kg}}{23\text{m}^3} = 0.22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\end{aligned}$$

Factor de voladura para taladros de 1.5”:

$$\begin{aligned}\text{Factor de Voladura} &= \frac{\frac{1.22\text{gr}}{\text{cm}^3} * \left(\frac{2.54\text{cm}}{2}\right)^2 * 3.1416 * 220\text{cm}}{1.5\text{m} * 1.7\text{m} * 3\text{m}} \\ \text{Factor de Voladura} &= \frac{1.36\text{ kg}}{7.65\text{m}^3} = 0.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\end{aligned}$$

4.2.3.4. Evaluación de voladura

Hay varios factores a evaluar en una voladura de rocas, tales como, las vibraciones, la granulometría, la proyección de las rocas voladas, el esponjamiento, no obstante, el foco de este trabajo de investigación y el motivo de contratación de personal especializado para el diseño de las voladuras en el proyecto de construcción de la presa de aguas contactadas, fue el control de las vibraciones, no obstante, los otros factores fueron tomadas también en cuenta a la hora de diseñar las voladuras.

4.2.3.4.1. Información técnica

De acuerdo a los informes técnicos las zonas donde se realizará voladura la roca presente es la Riolita con las siguientes características.

Tabla 16. *Características de la roca*

Roca	Riolita
Densidad de roca (kg/m³)	2,610.0
Velocidad de onda P (m/s)	2,800.00
Resistencia a la tracción (Mpa)	16.16
Resistencia a la compresión (Mpa)	2020.00
Módulo de Young	21.00
Coeficiente de Poisson	0.30

4.2.3.5. Fallas de voladura

Las fallas de voladura más complicadas que se pudo tener fueron:

- Tiros cortados: La secuencia de salida con retardos pirotécnicos aseguraba que no se produzca cortes de mecha.
- Tiros quedados: La carga explosiva fue suficiente para evitar tiros quedados, logrando en todas las voladuras el objetivo de fragmentar la roca.
- Personal dentro del área de influencia de voladura: se tuvo control riguroso y se desarrolló de forma seria los protocolos de evacuación por voladura, asegurándose que todo el personal cercano a la obra conociera la fecha, hora y lugar de las voladuras, bloquero de acceso y barrido sistemático para asegurarse de que no haya personas ni equipos cerca de la zona a volar.

4.3. Evaluación de las vibraciones producto de la voladura

4.3.1. Simulación de vibraciones

Seguidamente se muestran los resultados de simulación con las cargas calculadas.

Figura 14. Simulación de vibraciones para taladros de 2”

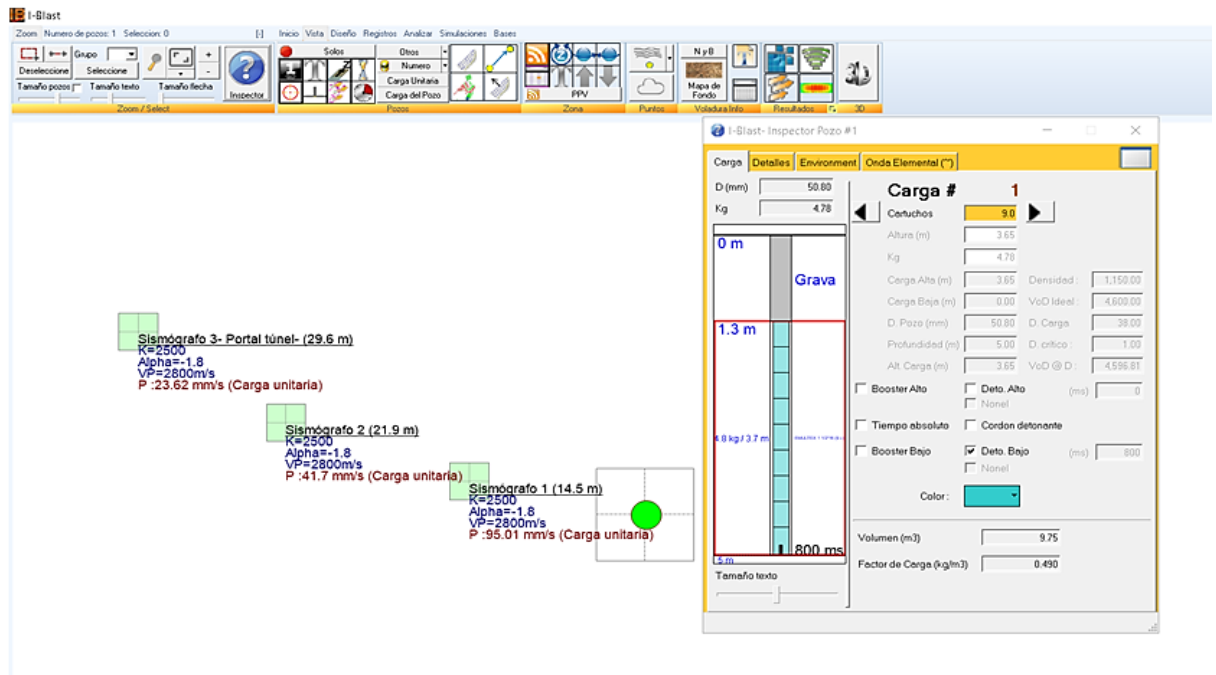
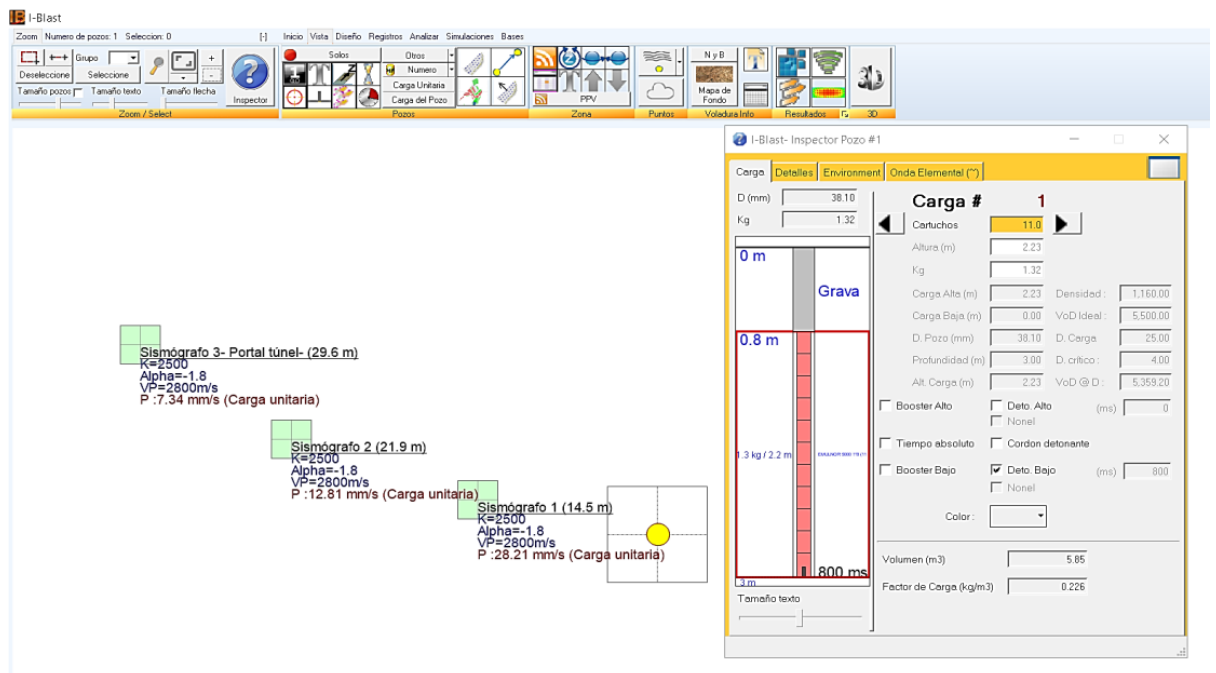


Figura 15. Simulación de vibraciones para taladros de 1.5”



4.3.2. Instrumentos de medición de vibraciones

Para realizar el monitoreo de vibraciones y hacer un correcto pronóstico de estas se requiere por un lado un equipo de monitoreo de vibraciones y por otro un equipo que nos permita obtener la topografía de la zona, los equipos

empleados son un sismógrafo de la marca Vibracord y un drone de la marca DJI modelo Phantom 04.

Figura 16. *Drone Phantom 04 de DJI*



Figura 17. *Sismógrafo Vibracord*



4.3.3. Monitoreo de vibraciones

El monitoreo de las vibraciones se realizó en 3 puntos críticos donde se tenía o se estuvo haciendo estructuras de concreto:

- Portal del túnel (01)
- Estribo derecho plinto (02)
- Plataforma de bombas (03)

La zona de voladuras se encuentre relativamente entre todas estas estructuras de concreto a controlar como se ve en la figura siguiente:

Las distancias variaron de acuerdo a la ubicación de las voladuras y la profundización en el terreno, pero como valores referenciales se puede indicar las siguientes distancias:

- Distancia a portal del túnel: 30m

- Distancia a estibo derecho: 22m
- Distancia a plataforma de bombas: 19m

Figura 18. Zonas de monitoreo de voladuras



4.3.4. Alcance de las vibraciones

4.3.4.1. Campo lejano

Caracterizado por vibraciones que se propagan como ondas, con menor influencia de la carga explosiva, con un comportamiento más predecible.

Para la medición se pueden utilizar modelos de vibraciones basados en la propagación de las ondas, con instrumentación ubicada a distancias mayores de la voladura.

Es clave para evaluar el impacto de las voladuras en el contorno, estabilidad de taludes, salud de estructuras cercanas y el impacto en la fauna.

No existe una medida exacta que defina un límite entre campo cercano y campo lejano, sin embargo, como calculo practico se puede decir que:

$$\text{Campo lejano} > 5 * \text{largo de carga}$$

Para nuestro caso sería:

$$\text{Campo lejano} > 3.7\text{m} * 5$$

$$\text{Campo lejano} > 18.5\text{m}$$

4.3.4.2. Campo cercano

Es caracterizado por vibraciones intensas y complejas, alta influencia de la carga explosiva, geometría de la voladura y propiedades del macizo rocoso.

Para su medición se requiere de instrumentación y datos de vibraciones muy cerca a la carga explosiva.

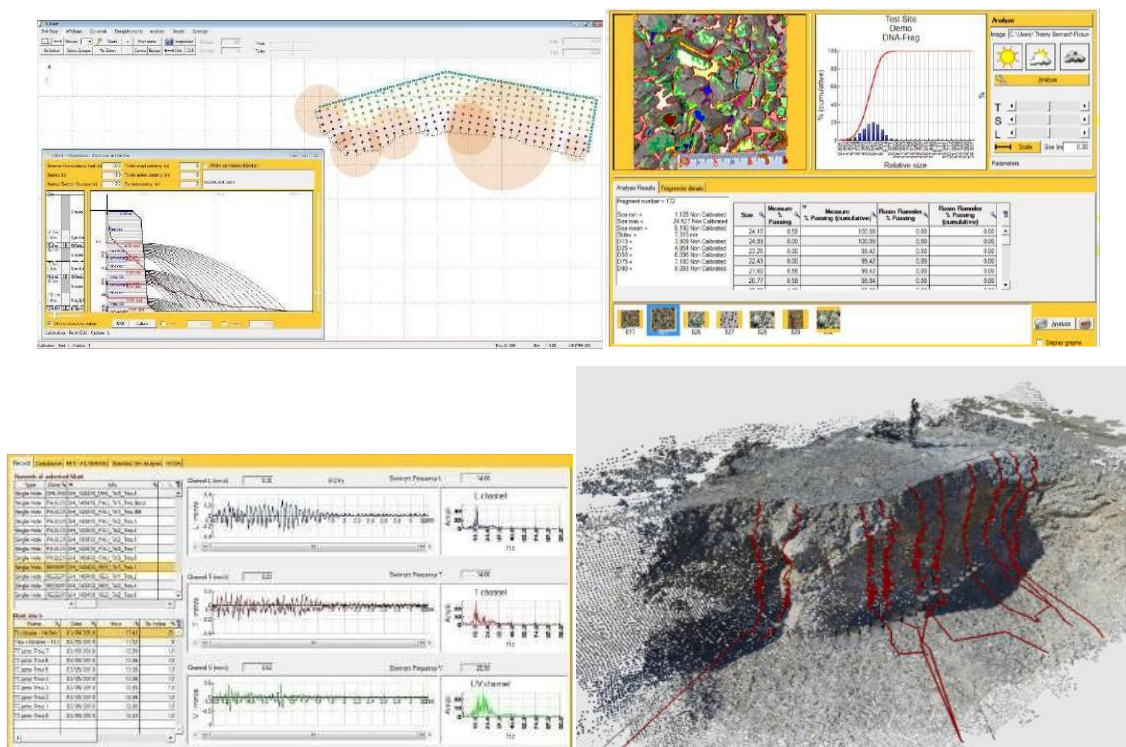
Se emplean modelos complejos para describir la propagación de las ondas, a menudo enfocándose en el comportamiento del explosivo y la respuesta inicial del macizo.

Crucial para el diseño de voladuras que minimicen el daño a estructuras y para el estudio de fragmentación de la roca.

4.3.5. Evaluación de los efectos de las vibraciones en la presa

Para el procesamiento de la información y evaluación se empleó el software I- Blast versión 8.0 el cual resulta completo para este análisis ya que permite un análisis 3D en la cual se hizo el diseño, evaluación y simulación de las voladuras en etapa de diseño previas a lanzarlas como diseños finales.

Figura 19. Imágenes referenciales de Software I-Blast 8.0



Fuente: Elaboración propia

4.3.6. Control de vibraciones

4.3.6.1. Normativas de control de vibraciones

Como se desarrolló en el marco teórico, existe una normativa Nacional Peruana de control de vibraciones (1995) en la cual no se diferencia las propiedades de las rocas, toma en cuenta las características de la estructura y la edad de la misma.

Además, se tiene varias normas internacionales que son las más aceptadas a nivel minero y en aplicaciones civiles:

- USBM RI 8507 (1980), propuesta por Estados Unidos: aplicado a casas con paredes de escayola, casas modernas con interiores de yeso prefabricado, sin restricciones.
- UNE 22.381.93 (1993), norma de España: aplicable para edificios fortificados, edificios comerciales y viviendas y construcciones arqueológicas.
- DIN 4150 (1999), Norma alemana: medición en cimientos de estructuras

4.3.6.2. Criterios de control de vibraciones en las voladuras en la presa de aguas de contacto

Durante la construcción de la presa, como parte de llegar a topografía de diseño se requiere realizar cortes y excavaciones en roca, para lo cual es necesaria la ejecución de perforación y voladura.

Las vibraciones inducidas por las voladuras no deberán afectar el macizo rocoso previamente inyectado, ni rellenos, concreto compactado con rodillo (CCR), concretos convencionales o lanzados (shotcrete) previamente aplicados en cualquier estructura permanente. Para garantizar que no ocurran tales efectos indeseados, se deberá controlar permanente mente que no se excedan los límites de vibración en términos de velocidad máxima de partícula en milímetros por segundo.

Para controlar posibles daños que puedan causarse a concretos con poco tiempo de madurez, se respetarán en general los siguientes topes para la

velocidad de vibración de las partículas propuestos por el equipo técnico de la empresa FLUOR a cargo del desarrollo del proyecto de construcción, bajo los cuales se rigió el control de vibraciones en este estudio. Para concretos previamente consolidados el límite de vibraciones será 150 mm/s.

Tabla 17. *Límite de VPP para diferente antigüedad de concreto*

VPP (mm/seg)	Antigüedad de concreto
5 mm/seg	6 a 24 horas
15 mm/seg	24 a 48 horas
25 mm/seg	48 a 72 horas
50 mm/seg	72 horas a más

Fuente: Especificaciones técnicas del proyecto de construcción de presa de agua de contacto CCR- Mina Quellaveco, Fluor (2019).

4.3.6.3. Medidas de control o mitigación de vibraciones

En el desarrollo de este trabajo para el control de las vibraciones y también control de diseño se realizaron taladros de precorte con lo que se genera una superficie de falla, que limita las vibraciones aislando el macizo rocoso a volar del resto.

Estos taladros se cargaron con una menor cantidad explosiva y un espaciamiento más próximo entre si a relación del espaciamiento del resto de la malla, con una salida de un tiempo, ósea todos los taladros de precorte son detonados en el mismo instante, esta técnica ayuda a minimizar la propagación de ondas de vibración.

CAPITULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Secuencia para control de vibraciones

La secuencia para controlar las vibraciones aplicada en este proyecto fue a partir de realizar el diseño de malla y cargas y tiempos de secuencia de salida cuya carga operante este por debajo de los límites de vibraciones permitida en las estructuras cercanas de acuerdo a la predicción sísmica de los registros de vibraciones de taladros de prueba y/o voladuras anteriores, luego de la voladura realizar el monitoreo de las vibraciones, seguidamente aplicar la ley de atenuación para actualizar los valores de K y Alpha y con esta información realizar un diseño de malla y cargas y así seguir con el ciclo.

Figura 20. *Ciclo de control de vibraciones*



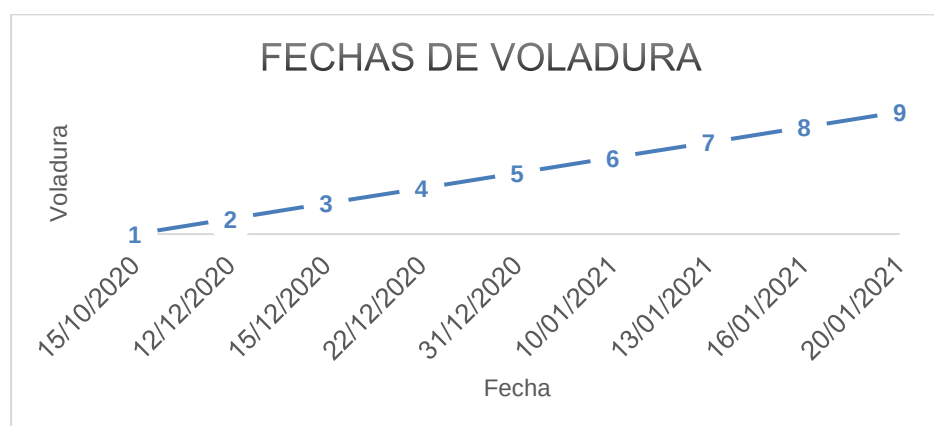
Fuente: Elaboración propia

5.2. Programación de voladuras

Las voladuras fueron programadas en coordinación con el área operativa y programación de las actividades de movimiento de tierras y obras civiles. Las 2 primeras voladuras fueron voladuras de prueba para tener un primer alcance de los valores de VPP y determinar las constantes de cálculo.

Seguidamente se muestran las fechas en las cuales se realizaron las voladuras.

Figura 21. *Fechas de voladura*



Fuente: Elaboración propia

5.3. Voladuras

5.3.1. Diseño de mallas y cargas

Para el diseño geométrico de las mallas de perforación se utilizó la fórmula de López Jimeno para taladros de mayores a 165mm, para diámetros menores el burden se debe multiplicar por el factor 0.9.

$$B = 0.76 * D * f \quad E = 1.15B$$

$$Fr = \left(\frac{2.7 * 3500}{\delta r * VC} \right)^{0.33} \quad Fe = \left(\frac{\delta e * VD^2}{1.3 * 3660^2} \right)^{0.33}$$

Donde:

B: Burden

E: Espaciamiento

D: Diámetro de taladro (pulg.)

f: Factor de corrección ($f = Fr \times Fe$)

Fr : Factor de corrección de roca

Fe : Factor de corrección de explosivo

δr : Densidad de roca (gr/cm³)

δe : Densidad de explosivo (gr/cm³)

VC: Velocidad sísmica de propagación del macizo rocoso (m/s)

VD: Velocidad de detonación del explosivo (m/s)

Es importante que el VC o velocidad sísmica de propagación del macizo rocoso, es la rapidez con la que viajan las ondas sísmicas generadas por voladuras, sismos o vibraciones a través de la masa rocosa.

Valores fijos considerados para estos cálculos se muestran a continuación

D = 2" (Equipo trackdrill) y 1.5" (martillo neumático)

δr : 2.6 gr/cm³ (Riolita)

δe : 1.22 gr/cm³ (Emulsión encartuchada)

VC: 2800 m/s (Riolita)

VD: 5000 m/s (Emulsión encartuchada)

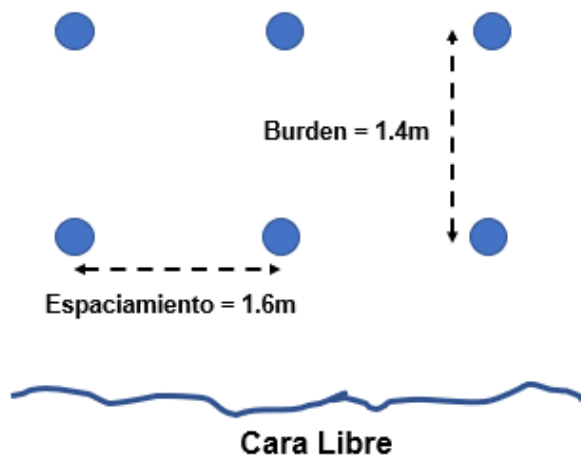
Con estos datos se tiene:

- Para un Diámetro 2": Burden = 1.4m y Espaciamiento = 1.6m
- Para un Diámetro 1.5": Burden = 1.0m y Espaciamiento = 1.2m

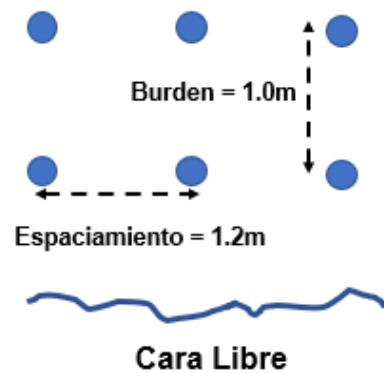
Estos valores de burden y espaciamiento son ajustables de acuerdo a los resultados de las voladuras.

Figura 22. Esquema de diseño de malla de perforación

Taladros 2"



Taladros 1.5"



Para el diseño de cargas se empleó la fórmula de Devine de carga escalada despejando la variable carga explosiva para determinar la carga operante máxima permitida.

$$PPV = K \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-\alpha}$$

$$\frac{PPV}{K} = \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-\alpha}$$

$$\frac{PPV}{K} = \left(\frac{Q^{1/2}}{D} \right)^{\alpha}$$

$$\left(\frac{PPV}{K}\right)^{1/\alpha} = \frac{Q^{1/2}}{D}$$

$$\left(\frac{PPV}{K}\right)^{1/\alpha} * D = Q^{1/2}$$

$$Q = \left(\left(\frac{PPV}{K}\right)^{1/\alpha} * D\right)^2$$

$$Q = D^2 * \left(\frac{PPV}{K}\right)^{2/\alpha}$$

Donde:

PPV: Velocidad pico partícula (mm/s)

D: Distancia sensor / voladura (m)

Q: Carga máxima por retardo (kg)

K: Coeficiente del sitio

α : Coeficiente de atenuación

Seguidamente se muestra un ejemplo de diseño de mallas y cargas correspondiente a la voladura 04.

Tabla 18. Cantidad de explosivos en voladura 04

TIPO	DENSIDAD	PESO (Kg)	CANTIDAD	TOTAL (Kg)
EMULTEX CN 1 ½*16	1.15 g/cm3	0.531	626 pzas.	332.406
EMULEX 80 1*8	1.11 g/cm3	0.378	77 pzas.	8.701
ENALINE D 1 ¼pulg*12m	1.11 g/cm3	0.378	95 pzas.	35.910
CORDÓN DETONANTE 5P	-	0.0053	451m.	2.390

Tabla 19. Cantidad de accesorios en voladura 04

TIPO	LONGITUD	TIEMPO DE RETARDO	CANTIDAD
FANEL DUAL	12 m	800/17ms	73 pzas
FANEL CTD	6.5 m	0ms	2 pzas
FANEL CTD	6.5 m	42ms	4 pzas
FANEL CTD	6.5 m	65ms	4 pzas

FANEL CTD	6.5 m	100ms	2 pzas
LSEF	750m		1 pza

Tabla 20. *Parámetros de diseño geométrico de voladura 04*

Parámetro	Producción	Pre-corte
Diámetro	2 pulg.	2 pulg.
Inclinación respecto a la vertical	0°	0°
Taladros	66	33
Profundidad promedio	5.21 m	4.71 m
Burden	1.70m	-
Espaciamiento	2.00m	0.90m
Volumen	1288.03m3	
Altura mínima de taco	1.30m	1.10m

Tabla 21. *Características de voladura 04*

Características	
Carga Operante (CO)	16.99kg
Factor de carga	0.28 kg/m3
Simultaneo (CO)	3

Figura 23. *Profundidad de taladros*

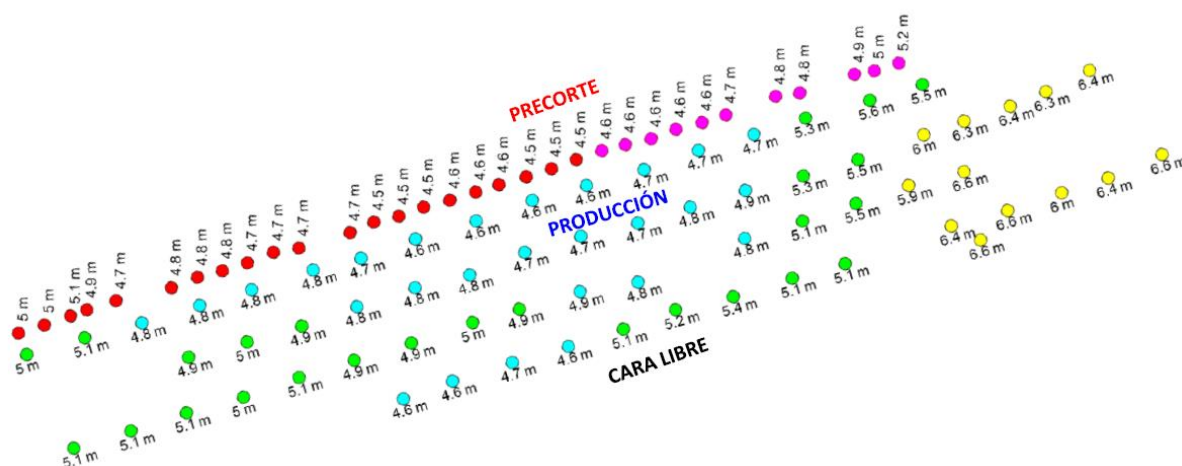
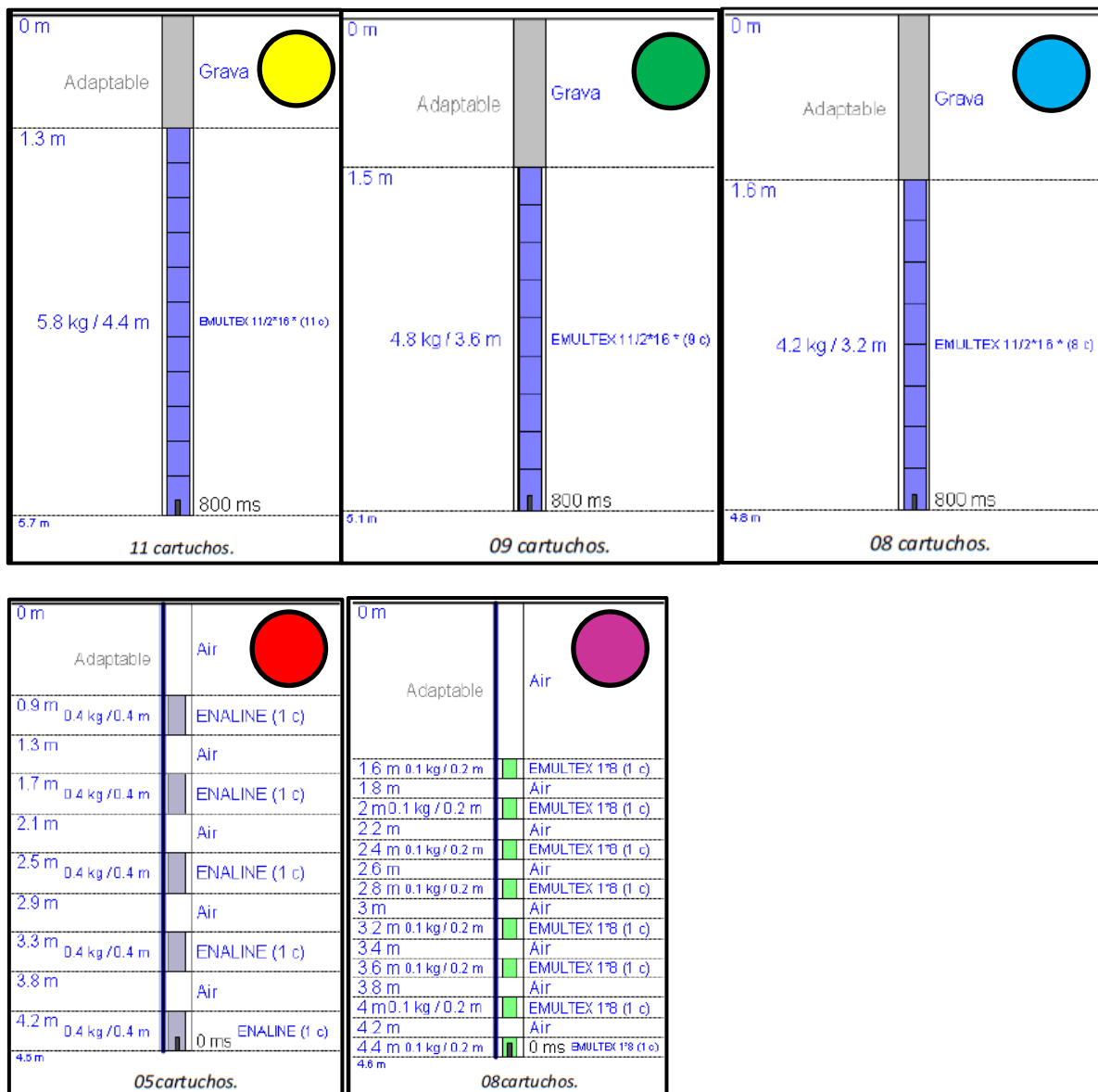


Figura 24. Diseño de cargas



5.3.2. Secuencia de tiempos de salida

Para reducir la superposición de ondas de vibraciones o en otras palabras no acoplar cargas o no aumentar la carga operante se empleó los retardos de 17ms entre taladros y 42ms entre filas.

Esta no superposición se corrobora simulando los disparos en el software I-Blast previo a emitirla como diseño final.

Figura 25. Ejemplo de amarre en software I-Blast

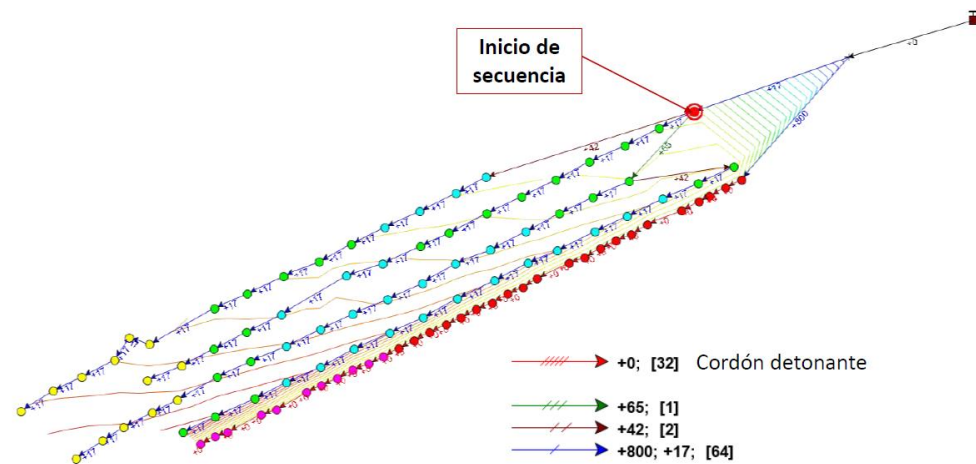
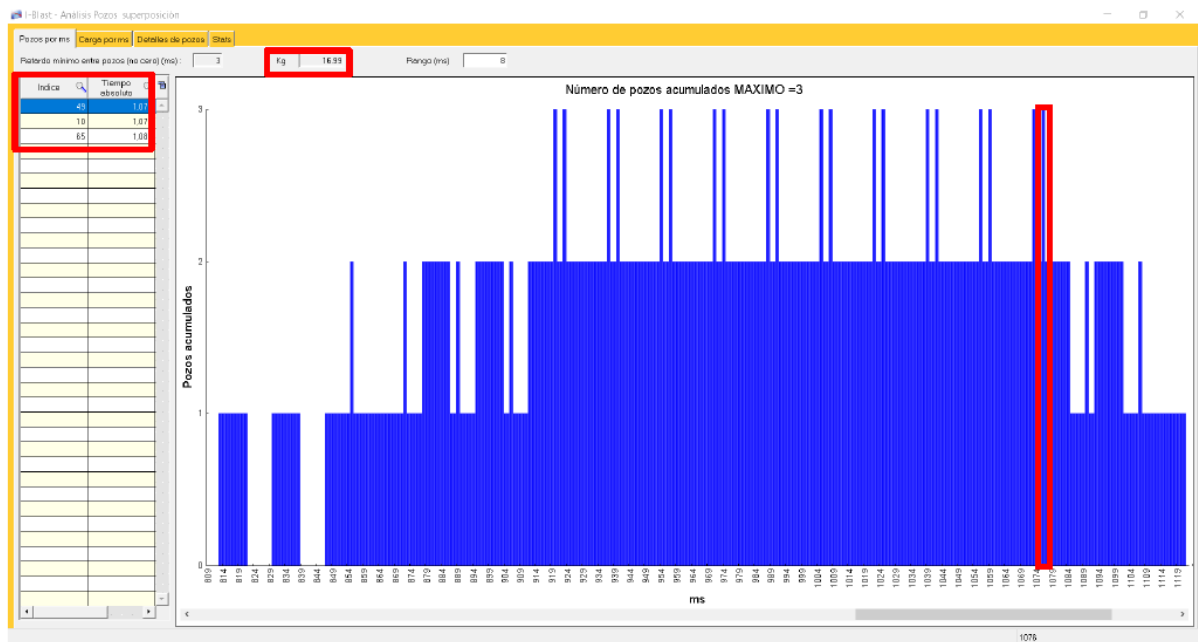


Figura 26. Carga operante máxima por retardo



En la figura se puede visualizar que el acople de cargas de acuerdo a los tiempos de salida propuestos es de máximo 3 taladros con lo que se tiene una carga operante de 16.99kg.

5.3.3. Monitoreo de vibraciones

En este punto se debía tener claro que el proyecto es un proyecto civil de construcción de una presa y la actividad de voladura y movimiento de tierras son actividades conexas por lo que hay paralelismo estas actividades.

Así también se tiene se conoce las zonas a proteger de las vibraciones producto de voladuras, los 3 lugares con estructuras de concreto a cuidar son:

- **Túnel:** Es un túnel antiguo por donde pasa el agua del Rio Asana, le corresponde un límite máximo permisible de vibraciones de 150mm/s.
- **Plinto en el estribo derecho:** Es una estructura de concreto consolidado en la que se están haciendo relleno de las fisuras internas, correspondiéndole un límite máximo permisible de vibraciones desde 5mm/s a 50mm/s, de acuerdo a su tiempo de aplicación.
- **Plataforma de bombas:** Son estructuras de concreto que se han estado construyendo paralelos a las voladuras por lo que también le corresponde un límite máximo permisible de vibraciones desde 5mm/s a 50mm/s, de acuerdo a su tiempo de aplicación.

Tabla 22. Límites máximos de vibraciones para concretos en consolidación (según madurez

Estructuras tipo	Límite máximo permisible vibración (mm/s)
Concretos entre 6 y 24 horas de vaciados	5 mm/s
Concretos entre 24 y 48 horas de vaciados	15 mm/s
Concretos entre 48 y 72 horas de vaciados	25 mm/s
Concretos mayores a 72 horas de vaciados	50 mm/s

Figura 27. *Ubicación de puntos de monitoreo de vibraciones*



5.3.4. Ley de atenuación

En el contexto de la voladura de rocas la ley de atenuación se refiere a la disminución de intensidad de las vibraciones generadas por la explosión a medida que la distancia a la fuente de la voladura aumenta. Esta ley establece una relación matemática entre la magnitud de vibración y la distancia, permitiendo predecir como las vibraciones se van atenuando a medida que se propagan por el terreno.

Esto es importante para:

- Evaluar el impacto de las voladuras en estructuras y personas
- Diseñar voladuras más seguras
- Establecer zonas de seguridad

Para el presente trabajo se aplica el modelo de distancia escala desarrollado por Devine para estimar las vibraciones.

$$PPV = K \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-\alpha}$$

Donde:

PPV: Velocidad pico partícula (mm/s)

D: Distancia sensor / voladura (m)

Q: Carga por retardo (kg)

K: Coeficiente del sitio

α : Coeficiente de atenuación

Figura 28. Ejemplo de estimación de *K* y Alfa en el software Microsoft Excel

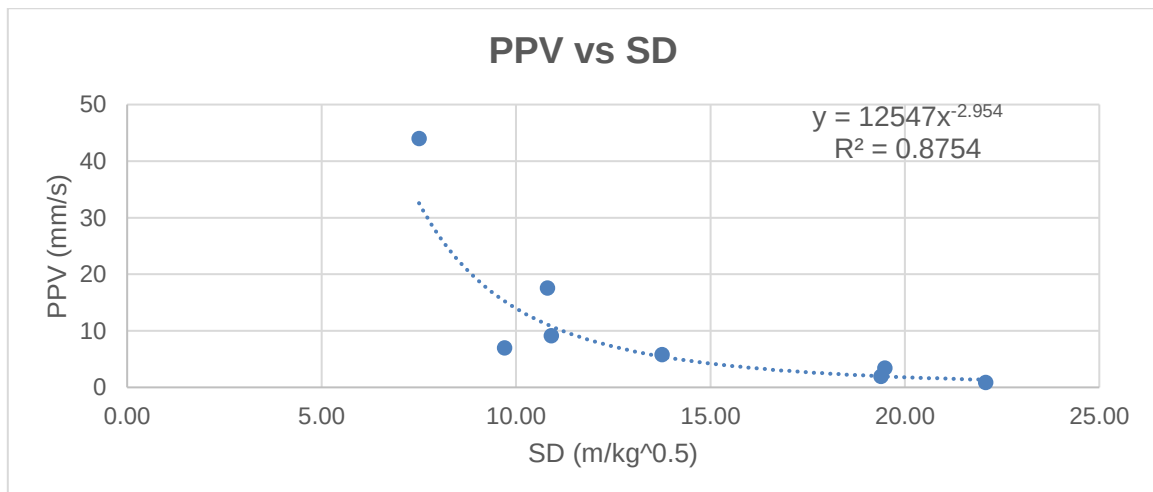


Tabla 23. Registro de monitoreos de vibraciones de voladuras en el estribo derecho

	Distancia	PPV	Q	SD
Voladura 1	51.2	0.86	5.38	22.07
Voladura 2	38.97		4.78	
Voladura 3	40.61	7.02	17.52	9.70
Voladura 4	43.52	9.16	15.93	10.90
Voladura 5	44.66	1.95	5.31	19.38
Voladura 6	38.98	5.82	8.03	13.76
Voladura 7	42.6	3.46	4.78	19.48
Voladura 8	20	44.03	7.1	7.51
Voladura 9	26	17.57	5.79	10.81

Estimación de K y Alfa en función del PPV y Distancia escalada, esta distancia se refiere matemáticamente a $(D/Q^{0.5})$.

$$SD = \frac{D}{\sqrt{Q}}$$

Remplazando este valor en la fórmula de cálculo del PPV se tiene.

$$PPV = K * SD^{-\alpha}$$

Esta ecuación toma la forma de una ecuación exponencial

$$Y = K * X^{-\alpha}$$

Ahora reemplazando los valores hallados en la figura N°28 en Excel con la opción de graficar línea de tendencia, la opción potencial, en la ecuación anterior se tiene la ecuación característica siguiente:

$$Y = 12547 * X^{-2.954}$$

Los valores de K y Alpha son respectivamente son 12547 y -2.954.

5.3.4.1. Ley de atenuación en voladuras de prueba

Como se mencionó anteriormente la primera voladura de prueba tuvo una estimación de cargas en base a una aproximación de K y Alpha basado en el tipo de roca y condiciones del terreno del proyecto.

La segunda voladura de prueba al igual que la primera fueron solamente disparos de un taladro cada uno con el objetivo netamente de obtener los registros de vibraciones.

Una vez realizados los registros vibraciones de la primera voladura de prueba se hizo la aproximación de K y Alpha en función a estos registros reales y así en lo sucesivo actualizando la información voladura a voladura.

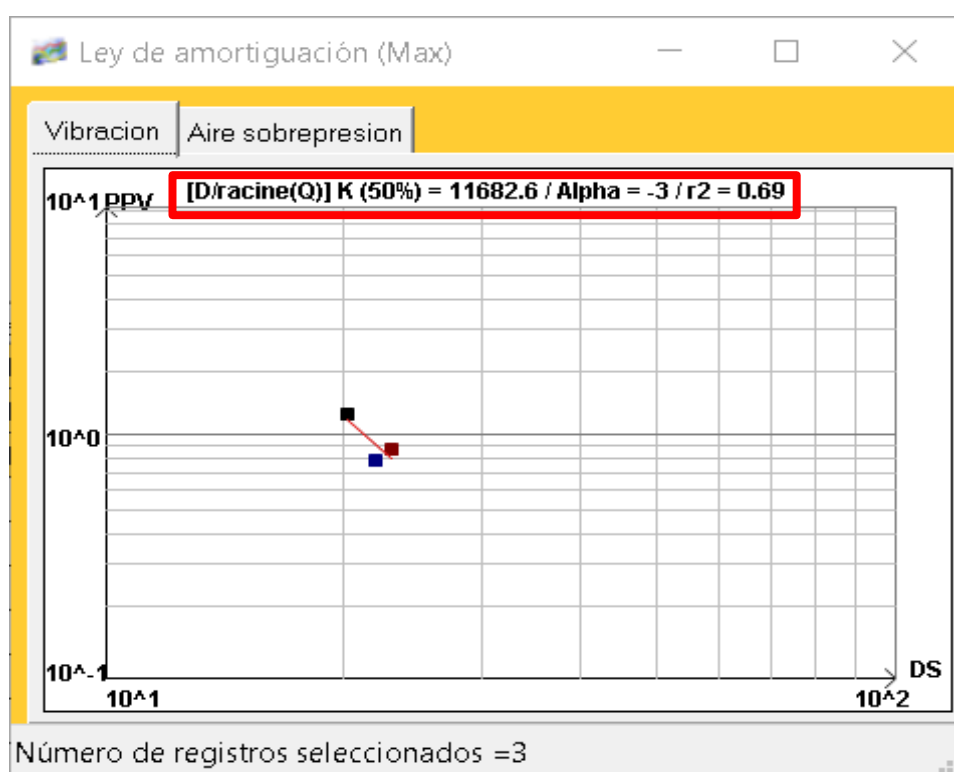
En la segunda voladura de prueba por las condiciones meteorológicas no se pudo instalar 2 sismógrafos.

Tabla 24. Registro de monitoreos de vibraciones de voladuras de prueba

Fecha	Voladura	Tipo	Zona	Carga (kg.)	Distancia 1 (m)	Distancia 2 (m)	Distancia 3 (m)	PPV Sis. 1 (mm/s)	PPV Sis. 2 (mm/s)	PPV Sis. 3 (mm/s)	K	ALPHA	R2
15/10/2020	Voladura 1	PRUEBA	Estribo Izquierdo	5.38	47.3	51.2	53.4	1.34	0.86	0.97	11682.59	-3.03	0.69
12/12/2020	Voladura 2	PRUEBA	Estribo Izquierdo	4.78	36.41	38.97	42.58	5.37	-	-	27277780.56	-5.54	0.96

En la tabla anterior el registro de monitoreos de vibraciones y los valores de K y Alpha estimados.

Figura 29. Estimación de k y Alpha en software I-Blast



Con los primeros 03 registros de la primera voladura de prueba se obtuvo:

$$K = 11682.6$$

$$\text{Alpha} = -3.03$$

$$r2 = 0.69$$

5.3.4.2. Ley de atenuación en voladuras masivas

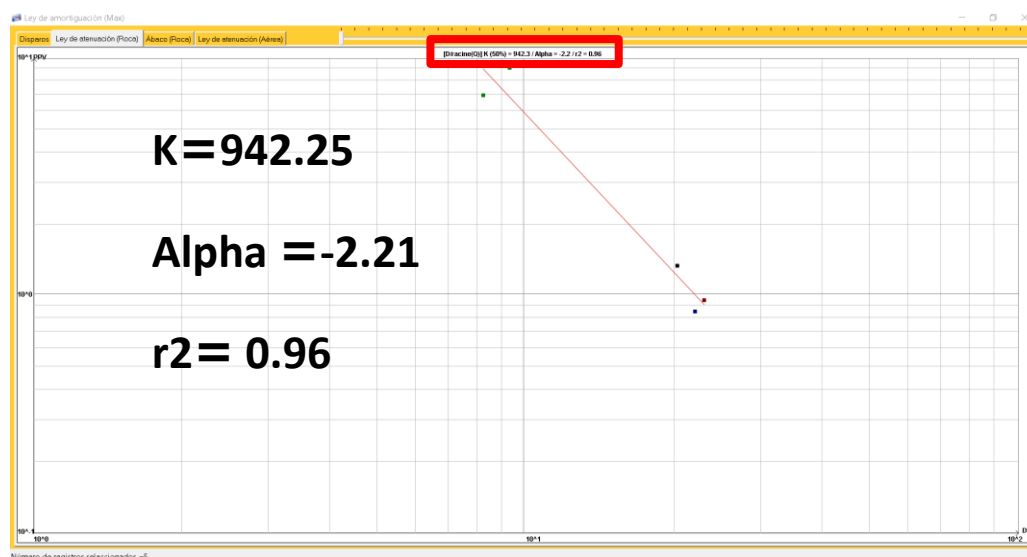
Una vez captados los registros de las vibraciones de las voladuras de prueba se tuvo mayor confianza para la realización de voladuras masivas ósea de varios taladros con el objetivo ahora si de fragmentar la roca en secuencia para así llegar a la topografía requerida en el proyecto de construcción de la presa de agua contactada.

Con estas voladuras se continuo con la metodología de actualizar las constantes K y Alpha con los registros de vibraciones de las voladuras, voladura a voladura.

Tabla 25. Registro de monitoreos de vibraciones de voladuras masivas

Fecha	Voladura	Tipo	Zona	Carga (kg.)	Distancia 1 (m)	Distancia 2 (m)	Distancia 3 (m)	PPV Sis. 1 (mm/s)	PPV Sis. 2 (mm/s)	PPV Sis. 3 (mm/s)	K	ALPHA	R2
15/12/2020	Voladura 3	MASIVA	Estribo Izquierdo	17.52	41.205	40.61	30.6	5.89	7.02	31.08	999.20	-2.24	0.86
22/12/2020	Voladura 4	MASIVA	Estribo Izquierdo	15.93	34.79	43.52	40.63	11.80	9.16	36.26	217.20	-1.70	0.92
31/12/2020	Voladura 5	MASIVA	Estribo Izquierdo	5.31	16.91	44.66	44.7	21.55	1.95	5.89	288.65	-1.75	0.82
10/1/2021	Voladura 6	MASIVA	Fondo de Dique E.I.	8.03	24.92	38.98	46.43	7.34	5.82	7.94	225.14	-1.71	0.86
13/1/2021	Voladura 7	MASIVA	Fondo de Dique E.I.	4.78	-	42.6	42.99	-	3.46	3.89	999.20	-2.24	0.86
16/1/2021	Voladura 8	MASIVA	Galería de Drenaje E.D.	7.1	13.1	20	53.8	44.44	44.03	4.67	942.25	-2.21	0.96
20/1/2021	Voladura 9	MASIVA	Fondo de Dique E.D.	5.79	23.2	26	58.3	23.26	17.57	3.46	942.25	-2.21	0.96

Figura 30. Estimación de k y Alpha en software I-Blast



$$K = 942.25$$

$$\text{Alpha} = -2.21$$

$$r^2 = 0.96$$

5.3.5. Predicción sísmica

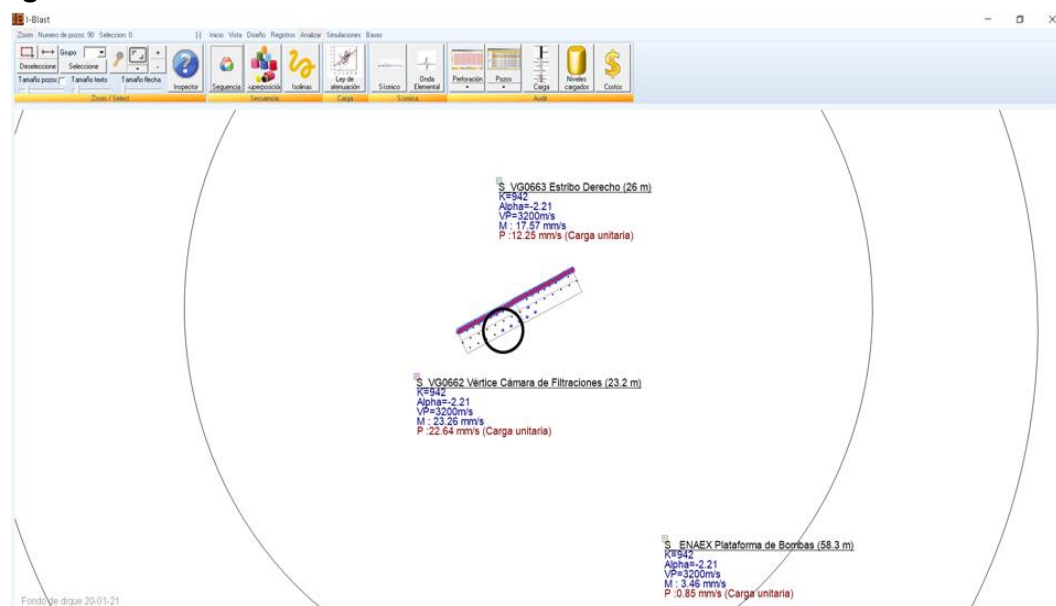
Se realizaron predicciones sísmicas de las voladuras en la zona obteniéndose simulaciones de vibración cercanos a valores obtenidos; siendo la variación por discontinuidades en el macizo rocoso de la zona, kilos de explosivo utilizada, distancias entre la zona de voladura y puntos de monitoreo y relieve del terreno.

M = Valor medido post voladura

P = Valor predicho de VPP.

Estas predicciones sísmicas se realizan a partir de los valores de K y Alpha estimados con los resultados de los registros de vibraciones de voladuras anteriores.

Figura 31. Predicción sísmica de voladura



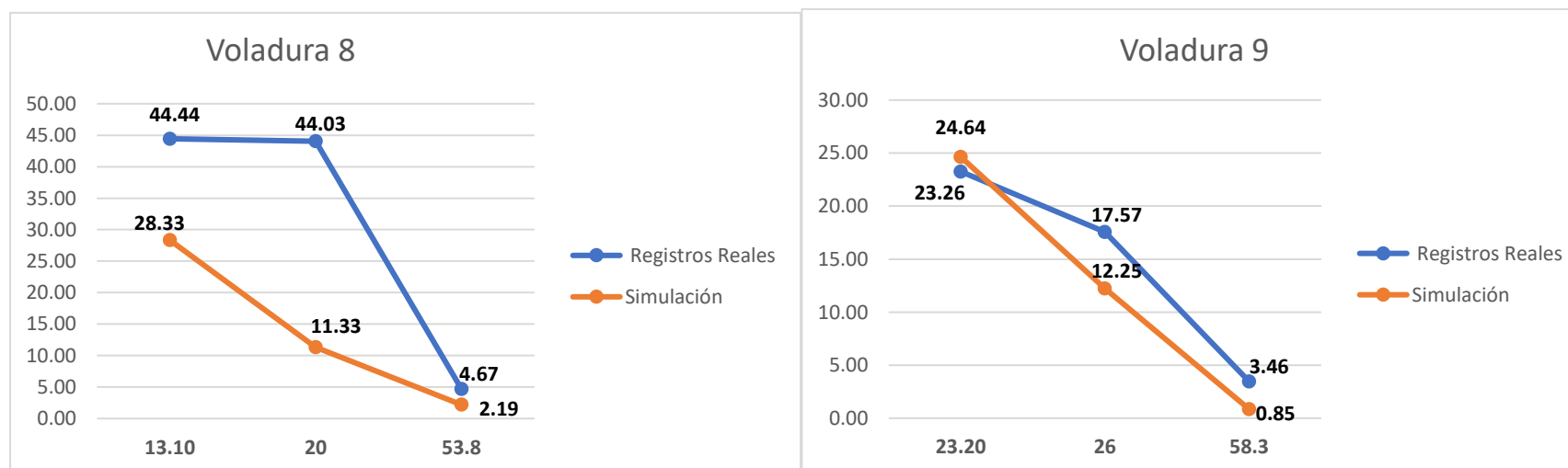
Predicción sísmica estimada en el software I-Blast.

Tabla 26. Predicción sísmica de las voladuras realizadas

Fecha	Voladura	Carga (kg.)	K	ALPHA	R2	Distancia 1 (m)	Distancia 2 (m)	Distancia 3 (m)	SIMULACIÓN			RESULTADOS		
									PPV Sis. 1 (mm/s)	PPV Sis. 2 (mm/s)	PPV Sis. 3 (mm/s)	PPV Sis. 1 (mm/s)	PPV Sis. 2 (mm/s)	PPV Sis. 3 (mm/s)
15/10/2020	Voladura 1	5.38	11682.59	-3.03	0.69	47.3	51.2	53.4	8.95	9.69	11.24	1.34	0.86	0.97
12/12/2020	Voladura 2	4.78	11682.59	-3.03	0.69	36.41	38.97	42.58	2.59	2.14	1.61	5.37	-	-
15/12/2020	Voladura 3	17.52	999.20	-2.24	0.86	41.205	40.61	30.6	11.82	7.01	11.72	5.89	7.02	31.08
22/12/2020	Voladura 4	15.93	217.20	-1.70	0.92	34.79	43.52	40.63	6.96	1.77	3.44	11.80	9.16	36.26
31/12/2020	Voladura 5	5.31	288.65	-1.75	0.82	16.91	44.66	44.7	9.59	1.53	1.33	21.55	1.95	5.89
10/1/2021	Voladura 6	8.03	225.14	-1.71	0.86	24.92	38.98	46.43	8.69	3.48	1.94	7.34	5.82	7.94
13/1/2021	Voladura 7	4.78	999.20	-2.24	0.86	-	42.6	42.99	-	2.15	1.14	-	3.46	3.89
16/1/2021	Voladura 8	7.1	942.25	-2.21	0.96	13.10	20	53.8	28.33	11.33	2.19	44.44	44.03	4.67
20/1/2021	Voladura 9	5.79	942.25	-2.21	0.96	23.20	26	58.3	24.64	12.25	0.85	23.26	17.57	3.46

Esta predicción se realizó progresivamente voladura tras voladura actualizando la información de entrada con los resultados de los monitoreos de vibraciones, es así que hay diferencias entre los valores de K y alfa para cada voladura.

Figura 32. Comparación de registros de vibraciones reales vs simulados



5.4. Discusión de resultados

El presente estudio sobre el control de vibraciones producto de voladuras cercanas a estructuras de concreto en la construcción de la presa de agua de contacto del Proyecto Minero Quellaveco – Moquegua, permitió evaluar la magnitud de las vibraciones generadas y su efecto potencial sobre las estructuras de concreto de la presa, así como validar modelos predictivos que faciliten la toma de decisiones en operaciones futuras.

En primer lugar, los resultados obtenidos en campo mostraron que la velocidad pico de partícula (VPP) registrada en los puntos de monitoreo no superó los límites de seguridad establecidos por normas internacionales (USBM, 1980; DIN 4150-3, 1999), confirmando que la estrategia de control aplicada fue adecuada. Estos hallazgos son consistentes con lo reportado por Cornejo & Huamán (2020) en la Pontificia Universidad Católica del Perú, quienes al aplicar el modelo de Devine en campo lejano lograron predecir y controlar las vibraciones para el cuidado de estructuras y taludes en una mina en proceso de cierre, una diferencia sustancial con esta investigación y la mostrada en el presente trabajo de investigación es que la segunda tiene parámetros específicos dados por la empresa constructora y no emplea criterios internacionales o nacionales de control de voladuras.

De manera similar, la investigación de Rozas (2020) en la Universidad de Chile concluyó que la minimización de la carga detonada y la distribución adecuada de los pozos permiten reducir significativamente la transmisión de vibraciones hacia infraestructuras sensibles. Este planteamiento coincide con las prácticas implementadas en Quellaveco, donde el control del largo de carga por taladro y el ajuste de retardos temporales resultaron determinantes para mitigar los efectos vibratorios en la presa.

Por otro lado, al comparar los valores experimentales con los modelos predictivos (Devine para campo lejano y Holmberg-Pearson para campo cercano), se observó que el modelo de Holmberg-Pearson mostró un mejor ajuste a los registros obtenidos en los sensores ubicados a menor distancia de la presa. Este resultado concuerda con los aportes de Díaz (2021), quien evidenció que la predicción de vibraciones en campo cercano requiere de

modelos más detallados que consideren las variables geométricas y geotécnicas locales, más allá del simple uso de la distancia escalada.

Asimismo, la influencia de las condiciones geológicas y geotécnicas fue notoria en el área de estudio. Los sectores con presencia de macizos más fracturados transmitieron vibraciones de mayor amplitud, confirmando lo señalado por Moraga (2018), quien destacó que la geología y la estructura del macizo controlan en gran medida los tipos de inestabilidad inducidos por las ondas sísmicas.

Finalmente, los resultados de la presente investigación permiten establecer que el control de vibraciones en voladuras cercanas a estructuras de concreto no depende únicamente del factor distancia, sino también de una adecuada planificación del diseño de voladura (longitud de carga, distribución de taladros, uso de retardos) y del entendimiento de las condiciones geomecánicas del macizo. En consecuencia, se reafirma la necesidad de aplicar un monitoreo sistemático y la calibración continua de modelos predictivos para garantizar la integridad de obras civiles críticas, como lo es la presa de agua de contacto en Quellaveco.

5.5. Posibles consecuencias en la presa de aguas de contacto por efecto de las vibraciones

En el caso de los concretos consolidados las vibraciones producto de las voladuras pudieron causar fisuras, grietas o debilitamiento de la estructura (reduciendo su capacidad de carga y resistencia) e incluso colapso en casos extremos.

En el caso de concretos sin consolidar pueden causar daños estructurales, como grietas y fracturas e incluso llegar a colapsos parciales o totales, especialmente si el concreto no ha alcanzado su resistencia final. El concreto sin consolidar es más susceptible a las vibraciones debido a su menor resistencia. Las vibraciones pueden romper las uniones entre los agregados y la pasta de cemento, debilitando la estructura de la presa de aguas de contacto.

5.6. Probabilidad de incumplimiento de las medidas de control de las vibraciones

En el desarrollo de este trabajo y con ayuda de la simulación en el software I-Blast y la comprobación con los monitoreos de vibraciones se evidencio que se pudo controlar las vibraciones usando los equipos y explosivos disponibles en el proyecto, en la mayoría de las vibraciones por tema de avance de perforación se empleó la perforadora track drill en este caso empleando las brocas de 2" disponibles (también se tenía brocas de 3") y en otros se empleó martillo neumático de avance más lento con brocas de 1.5".

El uso de las brocas de 2" atiende al criterio de reducir la cantidad de carga operante por retardo para reducir los efectos de las vibraciones, en caso de haber sido necesario, se pudo también optar por diseñar las voladuras con las brocas de 1.5". o usar explosivos de menor densidad.

También se realizó voladuras de un taladro para recabar información de vibraciones y poder hacer los primeros modelamientos de las vibraciones.

De todas formas, las predicciones de vibraciones de voladuras realizadas en el software I-Blast no fueron 100% exacta por los que previendo este aspecto se consideró el margen de error al momento de diseñar las mallas y amarres para reducir la carga operante por retardo.

Al ser el macizo rocoso un ente natural con diversidad de características tales como fracturas, fallas, cavidades, presencia de agua, etc, las cuales influyen en la transmisión de vibraciones a lo largo de macizo que en este estudio fueron desconocidas ya que no se hizo ningún sondaje o escaneo subterráneo, propiciando error por la heterogeneidad del macizo.

El alcance de este estudio y dentro del contrato celebrado para este se limitó al empleo de la distancia escalada como criterio de predicción que relaciona directamente la cantidad de explosivo y la distancia para determinar las vibraciones, sin considerar a detalle las propiedades o características del macizo rocoso, el cual se ve reflejado en la ecuación de cálculo como una constante.

En ese sentido había la probabilidad de no acertar con el control de las vibraciones, pero por razones que pudieran escapar del análisis de esta

investigación, sin embargo, se toma varias previsiones para que esto no ocurriera.

Conclusiones

1. Mediante la aplicación del método de distancia escalada se controló las vibraciones producto de voladuras para evitar que dañen las estructuras de concreto en la construcción de la presa de agua de contacto - Proyecto Minero Quellaveco – Moquegua, siguiendo en ciclo de control de vibraciones diseño de malla y cargas, secuencia de tiempos de salida, predicción sísmica, monitoreo de vibraciones y aplicación de ley de atenuación.
2. Debido a las nuevas estructuras de concreto realizadas a la par del avance con las voladuras y por ende también los cambios de proximidad entre estos, por lo que fue necesaria una constante actualización de los parámetros de diseño de malla y cargas para evitar daños a las estructuras de concreto.
3. Todas las voladuras fueron monitoreadas y se encontraron debajo de los límites máximos permisibles dentro del proyecto llegando a los picos de 44.44 mm/s en el punto de monitoreo 01 (Portal del túnel), 44.03 mm/s en el punto de monitoreo 02 (Plinton) y 36.26 mm/s en el punto de monitoreo 03 (Plataforma de bombas).

Recomendaciones

1. De realizar un estudio similar tener calibrados los equipos de monitoreo de vibraciones ya que de ellos depende en gran medida la veracidad de la información de entrada y por ende la información de salida.
2. Al tener actividades constructivas en simultaneo es muy importante definir prioridades, planificar las actividades y tener una buena coordinación en conjunto para alcanzar las metas trazadas.
3. Así como se hizo en algunas voladuras, se recomienda el uso de mallas galvanizadas y sacos de arena para el control de proyección de roca producto de voladuras.

Referencias bibliográficas

- Arribasplata Horna, E. R., & Alvarado Gálvez, G. C. (2020). Evaluación de las brocas tricónicas WLS 50-60-70 y MT 60-70 en relación a la productividad y costos de perforación de una empresa minera, Cajamarca 2020. (*Tesis de grado*). Universidad Privada del Norte, Cajamarca.
- Bernaola Alonso, J., Castilla Gómez, J., & Herrera Herbert, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. (D. d. subterráneas, Ed.) Madrid, Madrid, España: Laboratorio de tecnologías mineras.
- Campos Vásquez, M. Á., & Ricra Quispe, R. D. (2017). Impacto de la programación lineal con el uso de solver en la optimización de las operaciones de carguío - acarreo de mineral en la mina lagunas norte, La Libertad, 2017. (*Tesis de titulación*). Universidad Privada del Norte, Cajamarca.
- Chase, R. B., Jacobs, F. R., & Aquilano, N. J. (2009). *Administración de operaciones - producción y cadena de suministros*. Mexico D.F., Mexico: McGraw Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Cotos Ramirez, N. J. (2021). Evaluación de brocas triconicas para mejorar los KPI's de perforación en la Unidad minera toromocho año 2020. (*Tesis de grado*). Universidad Nacional Santiago Antúnez de mayolo, Huaraz.
- Exsa. (2015). *Manual de explosivos 5ta edición*. Lima: Exsa.
- EXSA. (2015). *Manual práctico de voladura de EXSA*. (EXSA, Ed.) Lima, Perú: EXSA.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. d. (2014). *Metodología de la investigación, sexta edición*. México: McGrawHill.
- Hooman, A., Hooman, N., & Clayton V., D. (2014). A linear programming model for long term mine planning in the presence of grade uncertainty and a stockpile. (*Paper*). University of Alberta, Edmonton, Canada.
- Ministerio de energía y Minas. (2016). *Reglamento de seguridad y salud ocupacional en Minería*. Lima. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/osinergmin/normas-legales/741887-024-2016-em>

Ministerio de Energía y Minas. (2017). *Modificatoria del reglamento de seguridad y salud ocupacional en Minería*. Lima, Perú. Obtenido de <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1555418-2?platform=hootsuite>

Ministerio de Energía y Minas. (2023). *Modificatoria del reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería*. Lima, Perú. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/minem/normas-legales/4990975-034-2023-em>

Rafezi, H., & Hassani, F. (2021). Análisis de señales de perforación para monitoreo del estado de brocas tricónicas. (*Paper*). McGill University, Montreal, Canada.

Wikipedia. (06 de 12 de 2024). *Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Marcona>.

Anexos

Anexo 01:

1. Ubicación y accesibilidad

1.1. Ubicación del proyecto

La mina Quellaveco, es propiedad de Anglo American Quellaveco S.A., es una mina de cobre y molibdeno ubicada en el sur del Perú, cerca de las operaciones mineras de Southern Copper Perú, Cuajone y Toquepala, a una distancia aproximada de 100 km al noreste de la ciudad de Tacna y a unos 38 km al noreste de la ciudad de Moquegua, la mina Quellaveco se ubica en el departamento de Moquegua, Provincia de Mariscal Nieto, distrito de Torata.

La mina a tajo abierto esta situada a una elevación entre 3,400 y 3,900 msnm en el valle del río Asana, en un área localizada aproximadamente entre las coordenadas 8 107 630 – 8 110 530 N y 326 280 – 328 690 E.

Figura 1.1. *Ubicación general del proyecto de Presa de agua de contacto*



1.2. Accesibilidad

El acceso a la Mina Quellaveco desde la ciudad de Moquegua se realiza por el camino de acceso de Moquegua a Papujune.

Otro acceso, que toma alrededor de una hora, empieza desde la ciudad de Moquegua por 42 km hasta el asiento minero de Cuajone, continuando por 33 km de carretera afirmada, llegando finalmente a la Mina Quellaveco.

Las principales vías de acceso son:

- Lima – Tacna – Moquegua – Quellaveco
- Lima – Arequipa – Moquegua – Quellaveco

2. Descripción general de la operación minera

La Mina Quellaveco es uno de los yacimientos de cobre más importantes del mundo. Está localizado en la región Moquegua, al sur del Perú, y como

proyecto viene siendo desarrollado por Anglo American, compañía minera global y diversificada, en sociedad con la Corporación Mitsubishi. Actualmente se encuentra en etapa de operación comercial y es la mayor inversión minera en el Perú.

Asimismo, es la primera mina 100% digital del país con procesos autónomos y un centro integrado de operaciones capaz de producir datos en tiempo real que sirven para mejorar la eficiencia de nuestros procesos y el uso de recursos.

2.1. Vida útil

Se estima que la mina Quellaveco tendrá una vida útil de 36 años manteniendo un ritmo de producción de 300 000 toneladas de cobre por año en los primeros 10 años.

2.2. Infraestructura

La construcción de Quellaveco, iniciada en el 2018, ha sido un reto para la ingeniería por su complejidad geográfica y se configura como una infraestructura minera única en el Perú. No obstante, no ha sido el único reto. En el 2020 se tuvo que adaptar los procesos y protocolos para hacer frente a la pandemia y mantener seguro al personal que participaba de la construcción de Quellaveco.

2.3. Etapa de operación comercial

En julio del 2022 se anunció la primera producción de concentrado de cobre proveniente de Quellaveco y el comienzo del periodo regular de pruebas de la planta de procesos con mineral. Unos meses más tarde, en septiembre, el Ministerio de Energía y Minas otorgó la autorización para el funcionamiento de sus instalaciones mineras y comercialización de su producción de cobre en el mundo.

2.4. Sectores del proyecto

2.4.1. Área 1000: Alta montaña

En la zona conocida como Alta Montaña, a 4,500 metros de altitud, se construyeron las obras más desafiantes de Quellaveco. Esta impresionante ingeniería tiene la finalidad de captar el agua que necesita el Proyecto: una bocatoma en el río Titere –que tiene aguas no aptas para el consumo humano por contener boro y arsénico–, una tubería de acero de carbón de 88 km para llevar el agua del río a la planta de procesamiento (Área 3000) y la presa Vizcachas de 60 millones de m³, que capta excedentes de lluvias y provee una pequeña fracción a la mina, y el resto para la comunidad de Moquegua.

2.4.2. Área 2000: Zona de mina

A 3,500 metros de altitud está la mina a tajo abierto de donde se extrae el cobre. Aquí se encuentran el chancador primario, el taller de mantenimiento de camiones y otros equipos, la primera de tres gigantes palas eléctricas, y la faja transportadora que lleva a través de un túnel el mineral en roca a la planta procesadora. Se ha construido también una barrera y un túnel para proteger el curso del río Asana y evitar que entre en contacto con la operación.

2.4.3. Área 3000: Planta de procesos

Aquí se ubica la Planta de Papujune, que tiene la capacidad de procesar más de 127,500 toneladas de mineral al día. Está compuesta de molinos y celdas de flotación para separar el cobre. También está en esta zona el Centro Integrado de Operaciones (IOC), el “cerebro” de la mina para

controlar todos los procesos, y la planta de partículas gruesas con un uso muy eficiente de agua y energía.

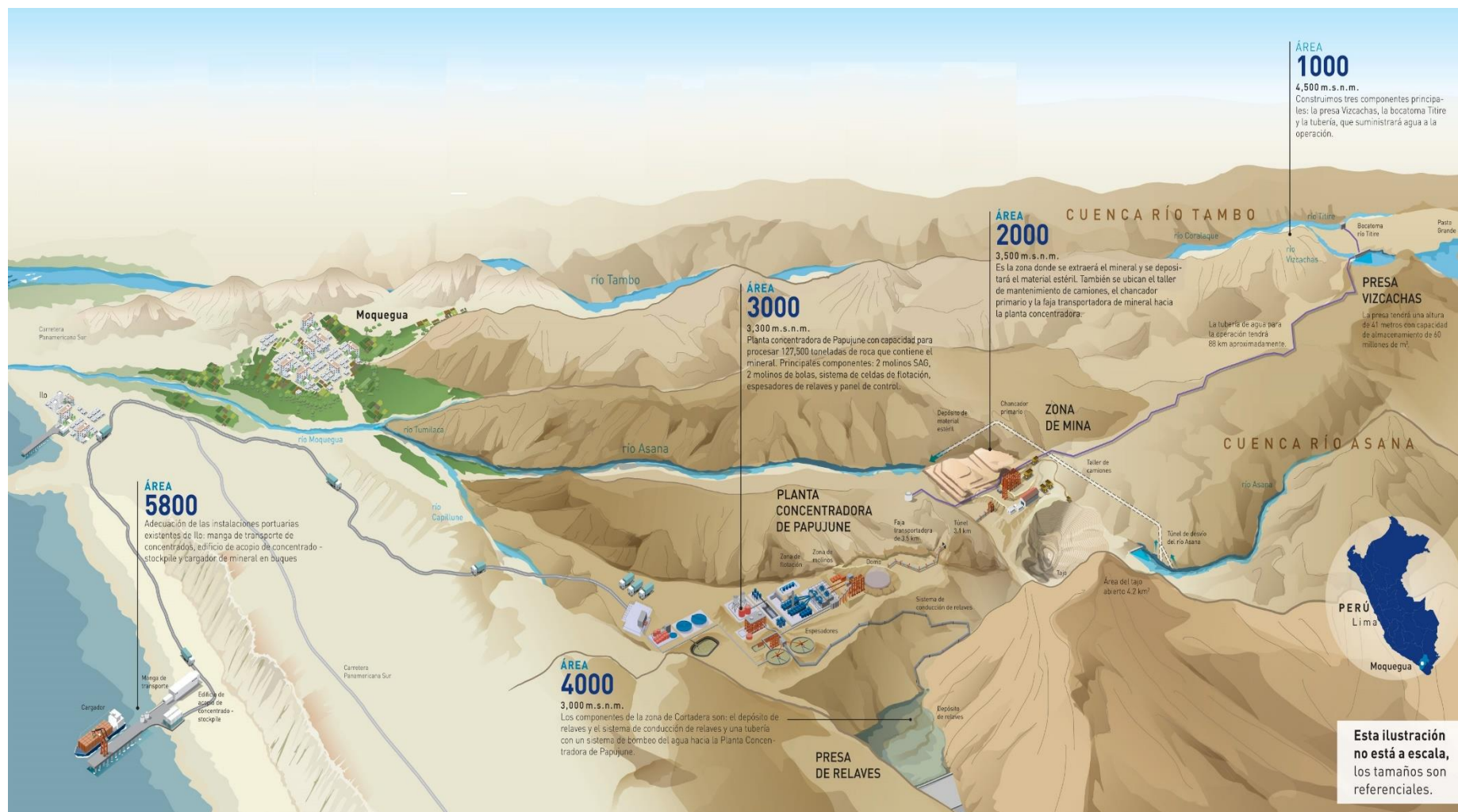
2.4.4. Área 4000: Presa de relaves

En la zona de Cortadera se encuentra el sistema de conducción de relaves que va de la planta de Papujune hacia una presa de arranques, construido con altos estándares en presas de relaves. El sistema, diseñado con un concepto de descarga cero, permite reutilizar el agua que se recibe en la presa y retornarla a la planta de procesamiento del mineral.

2.4.5. Área 5800: Puerto de embarque

El punto final de la operación es la costa. En las instalaciones del puerto de Ilo, un almacén de concentrados, una faja transportadora y un cargador llevan el mineral a los barcos.

Figura 1.2. Sectores de proyecto Quellaveco



Fuente: Sitio web oficial de Minera Quellaveco (2025).

2.5. Geología

2.5.1. Litología

En la zona de Quellaveco la geología está constituida por las siguientes unidades litológicas.

- **Riolita Quellaveco (Pórfido cuarcífero Quellaveco):** Pórfido riolítico, miembro basal de la antigua secuencia volcánica de la zona, aflora en la parte S y SO del área del yacimiento. Por correlación regional la edad asignada a esta roca es Cretácico superior – Terciario inferior.
- **Granodiorita – Tonalita:** Esta roca constituye la principal roca albergante de la mineralización de Quellaveco. Intruye al pórfido riolítico en el área del yacimiento y a la secuencia volcánica superior de Quellaveco al S y SO de área del depósito.
- **Pórfido Monzonítico Dacítico:** El pórfido monzonítico dacítico es el stock asociado a los procesos de alteración mineralización hipógena del depósito. Ocupa la parte central del yacimiento y tiene forma oval (con dimensiones de 250 metros por 1,4 Km, respectivamente), con su eje mayor orientado al NO.
- **Cuerpos Intrusivos – Interminerales:** Cuerpos intrusivos menores, principalmente diques, intruyen al stock pórfido monzonítico-dacítico y a la granodiorita-tonalita. Estos cuerpos están asociados a una menor actividad hidrotermal ocurrida después de su emplazamiento y que nos indica la amplitud del proceso hidrotermal de Quellaveco. También se observa una preferente ubicación espacial, de estos cuerpos interminerales, en el stock

pórfido dacítico. La composición similar a dichos stock nos sugiere relación con el stock pórfido dacítico.

- Brechas y Conglomerados Quellaveco: Las brechas y conglomerados Quellaveco se han depositado en una superficie discordante de erosión sobre riolita, granodiorita y pórfido dacítico. La litología está constituida por clastos de rocas volcánicas anteriores a los intrusivos: granodiorita y pórfido dacítico. Por su posición infrayacente con relación a la formación Huaylillas, se le ha asumido como posible edad Terciario superior.
- Formación Huaylillas: En la parte N y S de la quebrada del río Asana, afloran los tufos e ignimbritas riolíticas de la formación Huaylillas. Se han depositado en una superficie discordante de erosión sobre los conglomerados, rocas volcánicas e intrusivas, anteriores a la actividad hidrotermal hipógena. Su espesor aproximado es de 200 metros. Por su posición estratigráfica infrayacente a la formación Barroso, cuya edad signada es del Plioceno medio a superior, tentativamente se le considera como de edad Terciario superior, esta roca no posee gran fracturamiento como las rocas de premineralización y de mineralización.

2.5.2. Geología Regional

Entre los acontecimientos geológicos más antiguos, están registrados algunos procesos de la era del Paleozoico no datados debido a la ausencia de sedimentos que fueron sometidos a una fuerte erosión regional, dejando al descubierto algunas zonas de la era Precámbrica que no se exponen en el área de estudio, pero que influenciaron en la litoestratigrafía del área de operaciones del Proyecto Quellaveco.

Las rocas más antiguas que afloran en el área son las volcánicas del grupo Toquepala, de edades entre el Cretáceo Superior al Terciario Inferior, compuestas por derrames lávicos y piroclastos andesíticos y riolíticos que afloran a lo largo del Flanco Andino. Esta gruesa secuencia volcánica se ha depositado en condiciones sub-aéreas inferidas por las discordancias que existen entre las formaciones que la componen y que determinan varias fases de vulcanismo con algunos períodos de inactividad. El grupo Toquepala infrayace con fuerte discordancia a una serie sedimentaria continental volcano-clástica de areniscas conglomerádicas de la formación Moquegua, que se presenta al suroeste de la zona de operaciones. Esta formación está dividida en dos miembros, el miembro inferior de composición arcillo-arenosa y el miembro superior de composición arenconglomerádica. Luego de depositarse la formación Moquegua, siguió un depósito volcánico muy intenso, de carácter explosivo de origen fisural denominado formación Huaylillas, compuesta principalmente por tufos riolíticos que sobreyacen con discordancia al grupo Toquepala y a la formación Moquegua. Sus afloramientos más importantes se hallan en el Flanco Andino, donde ocurren a manera de remanentes de erosión.

La formación Millo, compuesta de conglomerados con intercalaciones de tobas lapilli, sobreyace con discordancia a la formación Moquegua en la parte suroeste de la zona de operaciones. Esta formación aflora en localidades muy restringidas dentro del área de estudio. Un nuevo ciclo volcánico, denominado Volcánico Barroso, de carácter efusivo-explosivo, compuesto principalmente de derrames andesíticos, aflora en el extremo noreste de la zona de estudio y constituye los actuales conos volcánicos

erosionados a manera de una cadena montañosa de rumbo noroeste - sureste del sur del Perú. Las rocas ígneas afloran en forma dispersa a lo largo del Flanco Andino. Los cuerpos mayores son de composición diorítico-monzonítico. Al lado de ellos existen stocks de granitos y dacitas. Estas intrusiones representan la continuación hacia el sur del batolito andino.

A inicios del Cuaternario, las partes altas de los Andes quedaron cubiertas por glaciares. La acción erosiva produjo depósitos en forma de morrenas y depósitos fluvio-glaciares que se encuentran en los flancos de los cerros de pendientes altas y escarpadas. También están rellenando superficies de erosión, quebradas y cárcavas. Estos eventos glaciares también acarrearón al pie de los andes una enorme cantidad de material detrítico, a manera de manto casi continuo sobrepuesto a la Formación Moquegua. Finalmente, el tectonismo y vulcanismo actual se manifiesta en forma de movimientos sísmicos que se presentan hasta nuestros días en la zona central y sur del Perú.

2.5.3. Geología local

La geología de la superficie del distrito consiste en una serie de rocas terciarias asignadas a las rocas volcánicas Quellaveco, la formación más reciente del grupo Toquepala. Estos flujos riolíticos y andesíticos están asociados al desarrollo de un arco volcánico – plutónico subaéreo. El grupo Toquepala fue posteriormente intruido por rocas de composición granodiorítica. Después de un período de erosión, las ignimbritas y tobas soldadas de la Formación Huaylillas se depositaron en forma discordante encima del Grupo Toquepala durante el Plioceno Intermedio al Mioceno.

En los valles se encuentran algunos depósitos aluviales y coluviales pleistocenos y recientes.

- **Grupo Toquepala – Rocas Volcánicas Quellaveco**

Las Rocas Volcánicas Quellaveco constituyen la formación más reciente del Grupo Toquepala. Consisten en una secuencia de gran espesor de flujos riolíticos y andesíticos, clasificados en los siguientes miembros:

Miembro Asana: Lavas coherentes de color gris claro, de composición riolítica.

Miembro Carpanito: Lavas coherentes de color gris oscuro con una textura porfídica, que contienen fenocristales de plagioclasa y ortopiroxeno.

Yarito: Secuencia de lavas porfiríticas color gris-rosado, de textura afanítica. Este miembro es particularmente resistente y bien estratificado. Su composición es riolítica, con alteración a arcilla sericítica.

Miembro Tinajones: Lavas coherentes de color blanco amarillento, con una textura porfídica con cuarzo en una matriz muy fina.

Miembro Samanape: La unidad Inferior está compuesta por lavas andesíticas bien estratificadas de textura porfídica. Su color es gris cuando está fresca, pero los afloramientos son blanquecinos. Contiene intercalaciones de tobas gris-violeta, con fragmentos de cuarzo y plagioclasa.

La unidad Superior está compuesta por una secuencia de toba de lapilli blanquecina, bien estratificada. Comprende fragmentos líticos y pumita en una matriz tobácea (ceniza) muy alterada. Presenta una textura eutaxítica¹

y reomórfica (con bandas de flujo) en algunas secciones, donde los granos de pumita se muestran aplanados. Existen intercalaciones de lahares, que consisten en gravas de origen variable en una matriz de arenas gruesas, con intercalaciones de arenas finas y limos. Esta unidad se encuentra en afloramiento con una forma redondeada.

Los miembros de este grupo que afloran en el área de estudio son los Miembros (Superiores e Inferiores) Carpanito, Yarito y Samanape. El Miembro Carpanito aflora cerca del sitio de la Pampa Tolar, como una banda directamente bajo la Formación Huaylillas. Existe una banda amplia de riolitas Yarito al suroeste de la Pampa Tolar. El Miembro Samanape Superior aflora cerca del sitio del Cerro Caracoles directamente bajo la Formación Huaylillas. El Miembro Samanape Inferior aflora en el valle del Río Asana al norte del Cerro Caracoles.

- **Formación Huaylillas**

Las Rocas Volcánicas Huaylillas, del Mioceno, se extienden sobre el Grupo Toquepala. Consisten en tobas soldadas e ignimbritas de composición riolítica. Estas son de color rosado, ricas en cuarzo y muy soldadas. En el área de estudio, la Formación Huaylillas conforma las cumbres tanto del Cerro Caracoles como de la Pampa Tolar, donde su espesor alcanza aproximadamente 110 metros.

- **Depósitos Aluviales y coluviales**

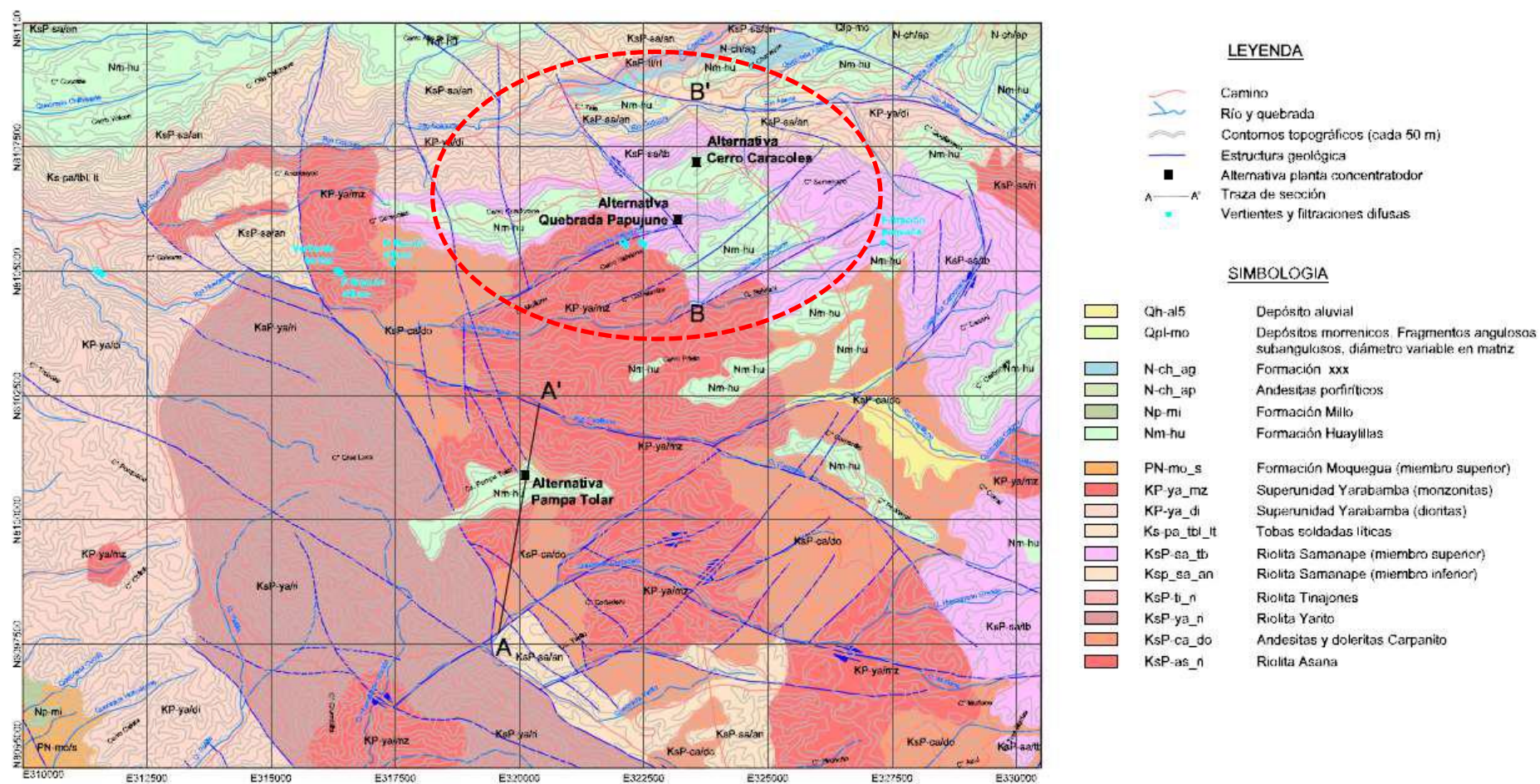
Existen depósitos aluviales y coluviales cuaternarios localizados en los valles que circundan tanto el Cerro Caracoles como la Pampa Tolar. Consisten en material angular mal seleccionado, de todas las granulometrías, desde bloques y gravas a arena y arcilla. La mayor

acumulación de los depósitos ocurre en la base de los valles, pero sólo alcanzan un espesor máximo de unos pocos metros.

- **Rocas intrusivas**

Las Rocas Volcánicas Quellaveco fueron intruidas por una granodiorita regional llamada Superunidad Yarabamba. Esta unidad data del Paleoceno Superior y consiste en gabros, dioritas, monzodioritas y cuarzo-monzonitas. La unidad rica en monzonita está presente en forma extensa a través del área entre el Cerro Caracoles y la Pampa Tolar y se extiende directamente bajo la Formación Huaylillas en la Pampa Tolar.

Figura 1.3. Geología local Mina Quellaveco



Fuente: Área de Geología de Mina Quellaveco

Anexo 02: Desarrollo de la fórmula de Devine de campo lejano

1) Planteamiento general

Se parte de una relación potencia entre la VPP v , la distancia fuente–receptor R y la carga explosiva efectiva por retardo Q :

$$v \propto R^{-n} * Q^m$$

Donde $n > 0$ captura la atenuación con la distancia y m la influencia de la carga.

2) Argumento geométrico (cargas cilíndricas) y análisis dimensional

Para cargas cilíndricas largas (situación típica en perforación y voladura), al variar la cantidad de explosivo manteniendo la longitud de columna aproximadamente constante, el volumen/carga crece con el cuadrado del radio. Eso lleva a que la escala lineal relevante (que debe compararse con la distancia de propagación) sea proporcional a $\sqrt{Q}$. Para que dos explosiones “geométricamente similares” produzcan VPP comparables al observarse “a la misma escala”, se requiere:

$$R \sim \sqrt{Q} \Rightarrow m = \frac{n}{2}$$

Sustituyendo en la relación potencia:

$$v \propto R^{-n} * Q^{\frac{n}{2}} = \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-n}$$

Esto motiva definir la distancia escalada:

$$Z = \frac{R}{\sqrt{Q}}$$

3) Ecuación de Devine (campo lejano)

Introduciendo una constante empírica K (depende de geología, desacople, acoplamiento, etc.), se obtiene la ley de atenuación:

$$v = RZ^{-n} = K \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-n}$$

O en forma linealizable:

$$\ln(v) = \ln(K) - n * \ln(Z)$$

En práctica, K y n se ajustan por regresión lineal de $\ln v$ contra $\ln Z$ usando datos de monitoreo (geófonos) en campo lejano. Valores típicos reportados para n suelen estar $\sim 1.1 - 1.8$ según sitio.

4) Ajuste de confiabilidad (desplazamiento paralelo)

El ajuste “medio” (50% no excedencia) puede desplazarse paralelamente (incrementando $\ln K$) para cubrir p.ej. 80-95% de los datos (curva envolvente de diseño para control de daño/quejas). Esto es práctica habitual descrita en notas de campo y manuales de vibraciones.

5) Notas útiles y equivalencias

- La elección de $\sqrt{Q}$ (y no $Q^{1/3}$) se fundamenta en la geometría cilíndrica y en evidencia empírica USBM para voladuras con columnas, que “quita” correctamente el efecto de la carga al comparar distintas voladuras en un mismo sitio.
- La definición operacional de “distancia escalada” más difundida (USBM) es:

$$Z = \frac{R}{\sqrt{Q}} \text{ (con } R \text{ en ft y } W = \text{carga máxima por retardo en lb)}$$

Anexo 03: Desarrollo de la fórmula de Holmberg y Persson de campo cercano

1) Formula general

$$PPV = Ky^a \left[\int_0^H \frac{dh}{[R_0^2 + (R_i \tan \phi - h)^2]^{\beta/2\alpha}} \right]^a$$

2) Significado de parámetros

PPV : Velocidad pico de partícula (mm/s).

K : Constante empírica de sitio (ajustada con registros).

y : Carga lineal (kg/m) o energía por metro de columna explosiva.

α : Exponente de carga (≈ 1 , ajustado).

H : Longitud de la columna explosiva (m).

R_0 : Distancia perpendicular mínima entre el eje de carga y el receptor (m).

R_i : Distancia horizontal del receptor respecto al pie de la carga (m).

ϕ : Ángulo de inclinación del taladro (0° si es vertical).

h : Variable de integración a lo largo de la columna de carga (m).

α, β : Parámetros empíricos de atenuación del macizo (relacionados con la disipación de onda).



3) Interpretación

- La integral suma el efecto incremental de cada diferencial de carga dh a lo largo de toda la columna de explosivo
- El denominador $[R_0^2 + (R_i \tan \phi - h)^2]^{\beta/2\alpha}$ representa la distancia efectiva entre cada segmento de carga y el receptor, elevada con los exponentes de atenuación.
- En campo lejano, esta integral se aproxima a una forma más simple $\rightarrow$ y de allí resulta la fórmula reducida (Devine).
- En campo cercano, el modelo permite evaluar con mayor realismo la influencia de la geometría de la carga y la posición del receptor.

4) Versión simplificada

Si el taladro es vertical ($\phi = 0$) y el receptor está más alejado ($R_i \gg h$), la integral se simplifica y se obtiene la versión práctica:

$$PPV = K \left(\frac{yH}{R^\beta} \right)^\alpha$$

Que es la forma operativa más usada en túneles y minas subterráneas

Anexo 04: Diseños de voladuras

1.1. Voladuras

1.1.1. Voladura 01

La voladura 01 se realizó el día 15/10/2020, que consistió en la voladura de 01 taladro de prueba para generar información base de vibraciones.

Figura N°1.1: Vista 3D Voladura 01

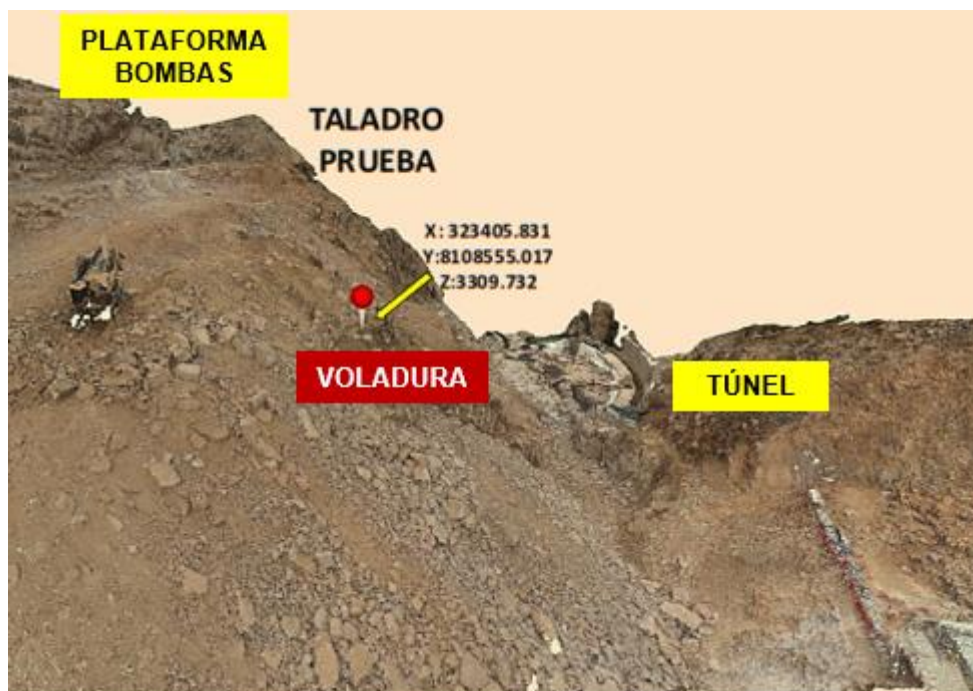


Tabla N°1.1: Explosivos voladura 01

<i>Tipo</i>	<i>Densidad</i>	<i>Peso (kg)</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Total (kg)</i>
EMULTEX CN 1 ½ *16	1.15 g/cm3	0.531	10 pzas.	5.31

Tabla N°1.2.: Accesorios voladura 01

<i>Tipo</i>	<i>LONGITUD</i>	<i>TIEMPO DE RETARDO</i>	<i>CANTIDAD</i>
FANEL DUAL	12m	800/17ms	01 pzas.

Tabla N°1.3: Diseño geométrico voladura 01

Parámetro	Tal. Prueba
Diámetro	2 pulg.
Inclinación	0°
Taladros	1
Profundidad prom.	5.0m
Burden teórico	1.70m
Espaciamiento	2.00m
Volumen	17.00m ³
Altura mínima de taco	1.30m

1.1.2. Voladura 02

La voladura 02 se realizó el día 12/12/2020, que consistió en la voladura de 02 taladro de prueba para generar información base de vibraciones esto debido a que la voladura 01 se realizó a una altura diferente donde mucho del material pudo ser minado con los equipos de movimiento de tierras de proyecto.

Figura N°1.2.: Vista 3D Voladura 02



Tabla N°1.4: Explosivos voladura 02

Tipo	Densidad	Peso (kg)	Cantidad	Total (kg)
EMULTEX CN 1 ½ *16	1.15 g/cm3	0.531	10 pzas.	5.31

Tabla N°1.5: Accesorios voladura 02

Tipo	LONGITUD	TIEMPO DE RETARDO	CANTIDAD
FANEL DUAL	12m	800/17 ms	02 pzas.
FANEL CTD	6m	100 ms	5 pzas.
LSEF	500m		1 pzas.

Tabla N°1.6: Diseño geométrico voladura 02

Parámetro	Tal. Prueba
Diámetro	2 pulg.
Inclinación	0°
Taladros	2
Profundidad prom.	5.3m
Burden teórico	1.70m
Espaciamiento	2.00m
Volumen	34.00m ³
Altura mínima de taco	1.70m

1.1.3. Voladura 03

La voladura 03 se realizó el día 15/12/2020, que consistió en la voladura de 94 taladros de los cuales 70 fueron de producción y 24 de precorte.

Figura N°1.3: Vista 3D Voladura 03



Tabla N°1.7: Explosivos voladura 02

<i>Tipo</i>	<i>Densidad</i>	<i>Peso (kg)</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Total (kg)</i>
EMULTEX CN 1 ½ *16	1.15 g/cm3	0.531	728 pzas.	386.568
ENALINE D 1 ¼"*12m	1.11	0.378	168 pzas.	61.240
Cordón detonante 5P	-	0.0053	185m	0.980

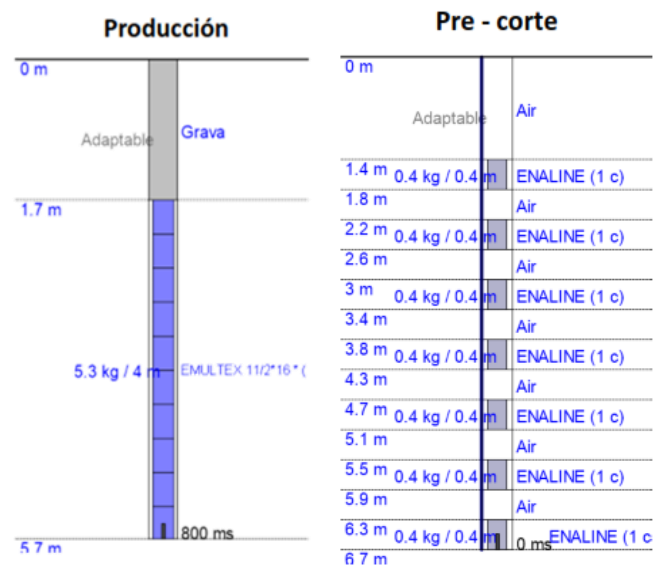
Tabla N°1.8: Accesorios voladura 02

<i>Tipo</i>	<i>LONGITUD</i>	<i>TIEMPO DE RETARDO</i>	<i>CANTIDAD</i>
FANEL DUAL	12m	800/17ms	71 pzas.
FANEL CTD	6.5m	17ms	1 pzas.
FANEL CTD	6.5m	42ms	2 pzas.
FANEL CTD	6.5m	65ms	1 pzas.
LSEF	500m		1 pza.

Tabla N°1.9: Diseño geométrico voladura 02

<i>Parámetro</i>	<i>Producción</i>	<i>Precorte</i>
Diámetro	2 pulg.	2 pulg.
Inclinación	0°	0°
Taladros	70	24
Profundidad prom.	6.60m	6.90m
Burden teórico	1.70m	-
Espaciamiento	2.00m	0.90m
Volumen	1317.10 m³	
Altura mínima de taco	1.30m	1.10m

Figura N°1.4: Diseño de cargas



1.1.4. Voladura 04

La voladura 04 se realizó el día 22/12/2020, que consistió en la voladura 113 taladros de los cuales 77 fueron de producción y 33 de precorte.

Figura N°1.5: Vista 3D Voladura 02



Tabla N°1.10: Explosivos voladura 02

Tipo	Densidad	Peso (kg)	Cantidad	Total (kg)
EMULTEX CN 1 ½ *16	1.15 g/cm3	0.531	702 pzas.	372.762
EMULEX 80 1*8	1.14 g/cm3	0.113	13 pzas.	1.469
ENALINE D 1 ¼" *12m	1.11 g/cm3	0.378	115 pzas.	43.470
Cordón detonante 5P	-	0.0053	200m	1.06

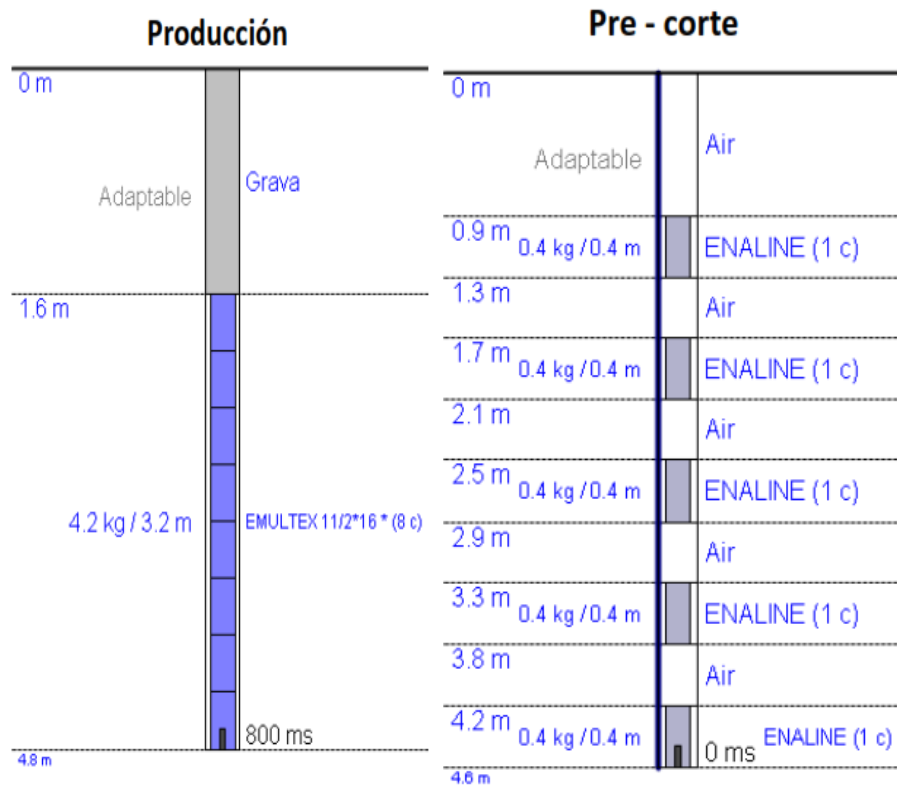
Tabla N°1.11: Accesorios voladura 02

Tipo	LONGITUD	TIEMPO DE RETARDO	CANTIDAD
FANEL DUAL	12m	800/17ms	77 pzas.
FANEL CTD	6.5m	17ms	1 pzas.
FANEL CTD	6.5m	42ms	2 pzas.
FANEL CTD	6.5m	65ms	1 pzas.
LSEF	500m		1 pzas.

Tabla N°1.12: Diseño geométrico voladura 02

<i>Parámetro</i>	<i>Producción</i>	<i>Precorte</i>
Diámetro	2 pulg.	2 pulg.
Inclinación	0°	0°
Taladros	77	36
Profundidad prom.	5.20m	4.71m
Burden teórico	1.70m	-
Espaciamiento	2.00m	0.90m
Volumen	1368.027 m³	
Altura mínima de taco	1.30m	1.10m

Figura N°1.6.: Diseño de cargas



1.1.5. Voladura 05

La voladura 05 se realizó el día 31/12/2020, que consistió en la voladura de 55 taladros de los cuales 36 fueron de producción y 19 de precorte.

Figura N°1.7: Vista 3D Voladura 02



Tabla N°1.13: Explosivos voladura 02

<i>Tipo</i>	<i>Densidad</i>	<i>Peso (kg)</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Total (kg)</i>
EMULTEX CN 1 ½ *16	1.15 g/cm3	0.531	123 pzas.	65.31
EMULEX CN 80 1*8	1.14 g/cm3	0.113	75 pzas.	8.47
Cordón detonante 5P	-	0.0053	80 m.	0.424

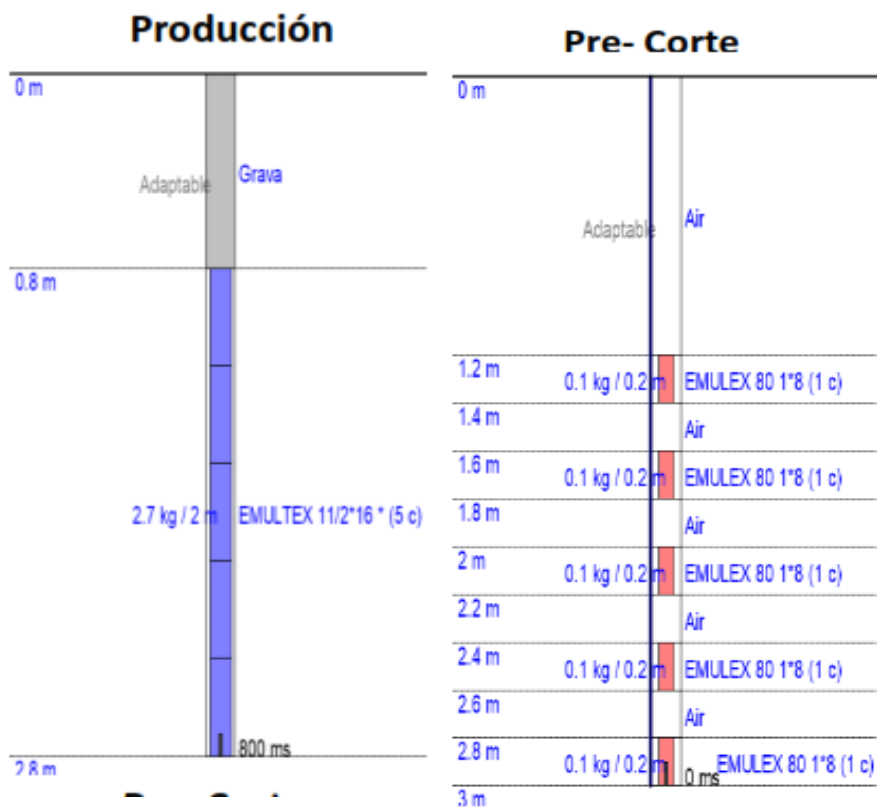
Tabla N°1.14: Accesorios voladura 02

<i>Tipo</i>	<i>LONGITUD</i>	<i>TIEMPO DE RETARDO</i>	<i>CANTIDAD</i>
FANEL DUAL	12m	800/17ms	36 pzas.
FANEL CTD	6.5m	17ms	1 pza.
FANEL CTD	6.5m	42ms	2 pzas.
FANEL CTD	6.5m	65ms	1 pza.
FANEL CTD	6.5m	100ms	1 pza.
LSEF	500m		1 pza.

Tabla N°1.15: Diseño geométrico voladura 02

<i>Parámetro</i>	<i>Producción</i>	<i>Precorte</i>
Diámetro	2 pulg.	2 pulg.
Inclinación	0°	0°
Taladros	36	19
Profundidad prom.	2.30 m	2.40 m
Burden teórico	1.50 m	-
Espaciamiento	1.80 m	0.70 m
Volumen	247.50 m³	
Altura mínima de taco	0.80 m	0.90 m

Figura N°1.8: Diseño de cargas



1.1.6. Voladura 06

La voladura 06 se realizó el día 10/01/2021, que consistió en la voladura de 154 taladros entre 80 taladros de producción y 74 perforaciones en línea (taladros sin carga).

Figura N°1.9: Vista 3D Voladura 02



Tabla N°1.16: Explosivos voladura 02

Tipo	Densidad	Peso (kg)	Cantidad	Total (kg)
EMULTEX CN 1 ½ *16	1.15 g/cm3	0.531	228 pzas.	121.10
EMULEX 80 1*8	1.14 g/cm3	0.113	383 pzas.	43.279
Cordón detonante 5P	-	0.0053	0 m.	0

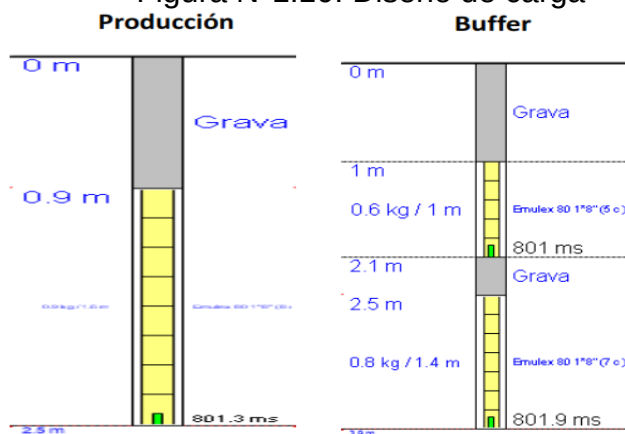
Tabla N°1.17: Accesorios voladura 02

<i>Tipo</i>	<i>LONGITUD</i>	<i>TIEMPO DE RETARDO</i>	<i>CANTIDAD</i>
FANEL DUAL	12m	800/17ms	80 pzas.
FANEL CTD	6.5m	25ms	2 pzas.
FANEL CTD	6.5m	42ms	2 pzas.
FANEL CTD	6.5m	100ms	8 pzas.
LSEF	500m		1 pza.

Tabla N°1.18: Diseño geométrico voladura 02

<i>Parámetro</i>	<i>Producción</i>		<i>Precorte</i>
Diámetro	1.5 pulg.	2 pulg.	2 pulg.
Inclinación	0°	0°	9.5°
Taladros	28	52	74
Profundidad prom.	2.39 m	3.95 m	3.40 m
Burden teórico	1.10 m	1.50 m	-
Espaciamiento	1.30 m	1.80 m	0.25 m
Volumen	571.12 m³		
Altura mínima de taco	0.60 m	0.60 m	0 m

Figura N°1.10: Diseño de carga



1.1.7. Voladura 07

La voladura 07 se realizó el día 13/01/2021, que consistió en la voladura de 66 taladros, 03 de producción, 05 de buffer y 58 de precorte.

Figura N°1.11: Vista 3D Voladura 02



Tabla N°1.19: Explosivos voladura 02

<i>Tipo</i>	<i>Densidad</i>	<i>Peso (kg)</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Total (kg)</i>
EMULTEX CN 1 ½ * 16	1.15 g/cm3	0.531	27 pzas.	14.337
EMULEX 80 1*8	1.14 g/cm3	0.113	305 pzas.	34.465
Cordón detonante 5P	-	0.0053	200 m.	1.06

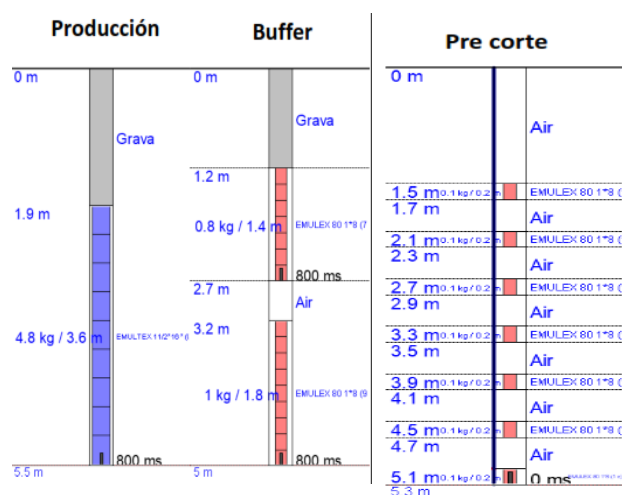
Tabla N°1.20: Accesorios voladura 02

<i>Tipo</i>	<i>LONGITUD</i>	<i>TIEMPO DE RETARDO</i>	<i>CANTIDAD</i>
FANEL DUAL	12m	800/17ms	15 pzas.
FANEL CTD	6.5m	65ms	2 pzas.
FANEL CTD	6.5m	17ms	2 pzas.
FANEL CTD	6.5m	0ms	2 pzas.
LSEF	500m		1 pza.

Tabla N°1.21: Diseño geométrico voladura 02

Parámetro	Producción / Buffer		Precorte
Diámetro	2 pulg.	2 pulg.	2.5 pulg.
Inclinación	0°	7°	9°
Taladros	3	5	39
Profundidad prom.	5.17 m	5.20 m	4.86 m
Burden teórico	1.50 m	1.20 m	-
Espaciamiento	1.80 m	1.30 m	0.50 m
Volumen	82.54 m³		
Altura mínima de taco	1.30 m	1.10 m	1.0 m

Figura N°1.12: Diseño de cargas



1.1.8. Voladura 08

La voladura 08 se realizó el día 16/01/2021, que consistió en la voladura de 204 taladros de los cuales 125 de producción, 14 de buffer y 65 de precorte.

Figura N°1.13: Vista 3D Voladura 02



Tabla N°1.22: Explosivos voladura 02

<i>Tipo</i>	<i>Densidad</i>	<i>Peso (kg)</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Total (kg)</i>
EMULTEX CN 1 ½ * 16	1.15 g/cm3	0.531	144 pzas.	76.464
EMULEX 80 1*8	1.14 g/cm3	0.113	749 pzas.	84.645
Cordón detonante 80P	-	0.080	162 m.	12.960
Cordón detonante 5P	-	0.0053	150 m.	0.795

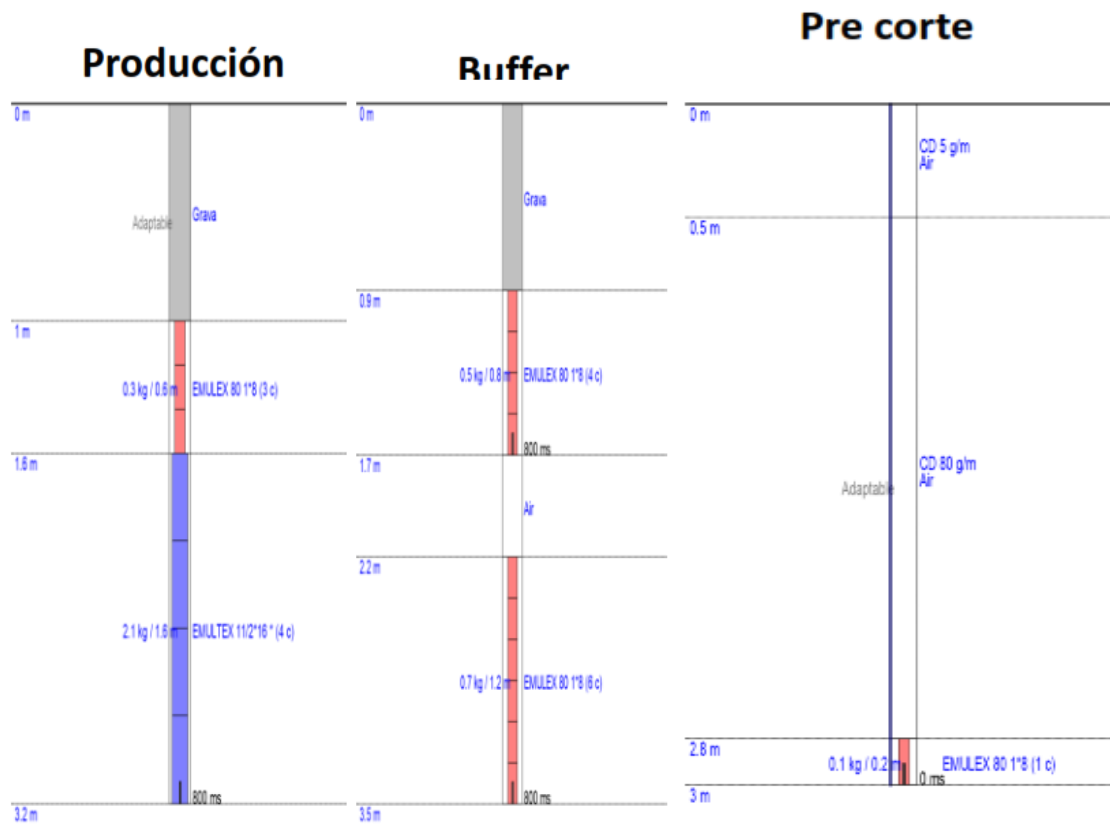
Tabla N°1.23: Accesorios voladura 02

<i>Tipo</i>	<i>Densidad</i>	<i>Peso (kg)</i>	<i>Cantidad</i>
EMULTEX CN 1 ½ * 16	1.15 g/cm3	0.531	144 pzas.
EMULEX 80 1*8	1.14 g/cm3	0.113	749 pzas.
Cordón detonante 80P	-	0.080	162 m.
Cordón detonante 5P	-	0.0053	150 m.
<i>Tipo</i>	<i>Densidad</i>	<i>Peso (kg)</i>	<i>Cantidad</i>

Tabla N°1.24: Diseño geométrico voladura 02

<i>Parámetro</i>	<i>Producción / Buffer</i>		<i>Precorte</i>
Diámetro	1.5/2 pulg.	2 pulg.	2.5 pulg.
Inclinación	0°	0°	0°
Taladros	125	14	65
Profundidad prom.	2.36 m	3.35 m	2.99 m
Burden teórico	1.1/1.5 m	1.20 m	-
Espaciamiento	1.3/1.8 m	1.30 m	0.50 m
Volumen	635 m³		
Altura mínima de taco	0.54 m	0.80 m	-

Figura N°1.14: diseño de cargas



1.1.9. Voladura 09

La voladura 09 se realizó el día 20/01/2021, que consistió en la voladura de 95 taladros de los cuales 24 fueron de producción, 20 de buffer y 51 de precorte.

Figura N°1.15: Vista 3D Voladura 02



Tabla N°1.25: Explosivos voladura 02

Tipo	Densidad	Peso (kg)	Cantidad	Total (kg)
EMULTEX CN 1 ½ * 16	1.15 g/cm3	0.531	72 pzas.	38.232
EMULEX 80 1*8	1.14 g/cm3	0.113	577 pzas.	65.201
Cordón detonante 80P	-	0.080	190 m.	15.200
Cordón detonante 5P	-	0.0053	200 m.	1.06

Tabla N°1.26: Accesorios voladura 02

Tipo	LONGITUD	TIEMPO DE RETARDO	CANTIDAD
FANEL DUAL	12m	800/17ms	02 pzas.
FANEL CTD	6.5m	100ms	02 pzas.
FANEL CTD	6.5m	65ms	04 pzas.
FANEL CTD	6.5m	42ms	04 pzas.
FANEL CTD	6.5m	25ms	39 pzas.

Tabla N°1.27: Diseño geométrico voladura 02

Parámetro	Producción / Buffer		Precorte
Diámetro	2 pulg.	2 pulg.	2.5 pulg.
Inclinación	0°	10°	11°
Taladros	24	20	51
Profundidad prom.	4.35 m	4.70 m	4.72 m
Burden teórico	1.5 m	1.20 m	-
Espaciamiento	1.8 m	1.30 m	0.50 m
Volumen	4228.36 m ³		
Altura mínima de taco	0.54 m	0.80 m	-