UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

Informe de Suficiencia Profesional

"APLICACIÓN DE MODELO DE PREDICCION DE VIBRACIONES DEVINE PARA REDUCIR EL IMPACTO POR VOLADURA DE ROCAS EN MINA TOQUEPALA"

PRESENTADO POR:

BACH. FELIX ALEXANDER PAQUERA QUISPE

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

MOQUEGUA – PERÚ
2021

INFORME DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

"APLICACIÓN DE MODELO DE PREDICCION DE VIBRACIONES DEVINE PARA REDUCIR EL IMPACTO POR VOLADURA DE ROCAS EN MINA TOQUEPALA"

NOMBRE DEL AUTOR

Bach. Felix Alexander Paquera Quispe

UNAM
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA DE MINAS

UNAM SECRETARIA GENERAL

Folio N° 004

ACTA DE SUSTENTACIÓN

I. Modalidad:

Tesis : ☐

Trabajo de Suficiencia Profesional : ☒

Otro: ..... : ☐

II. Documento de aprobación para la sustentación:

RESOLUCIÓN DE COMISIÓN ORGANIZADORA N° 424 - 2021 - UNAM

Fecha: 05 - 05 - 2021

III. El Jurado ha dictaminado la (el) ....., TITULADO:

"APLICACIÓN DE MODELO DE PREDICCIÓN DE VIBRACIONES DEVINE PARA REDUCIR EL IMPACTO POR VOLADURAS DE ROCAS EN MINA TOQUEPALA".

Bachiller: FÉLIX ALEXANDER PAQUERA QUISPE

Asesor Principal: DR. ARQUÍMEDES LEÓN VARGAS LUQUE

Co-Asesor : .....

IV. Se dictamina:

Como: APROBADO por UNANIMIDAD la sustentación de manera:

Presencial ☐ Virtual ☒

Con nota: QUINCE (15) por lo que; Sí ☒ No ☐

Opta el Título Profesional de INGENIERO DE MINAS.

Siendo las 9:30 horas, del 07 de MAYO del año 2021 se procede con la firma en conformidad de lo dictaminado por el Jurado.

Presidente
MGR. JORGE LUIS FLORES SOLAS
(Nombres y Apellidos)

Primer Miembro
MSc. ULICES DAMIAN CONDORI QUISPE
(Nombres y Apellidos)

Segundo Miembro
ELMER RAFAEL PEZO CARREON
(Nombres y Apellidos)

Bachiller
FELIX ALEXANDER PAQUERA QUISPE
(Nombres y Apellidos)

RESUMEN

La voladura es una operación elemental en la actividad minera y su diseño está basado en diversos modelos matemáticos planteados hasta hoy, de este modo el presente trabajo se concentra en hallar un modelo de predicción de vibraciones, producto de una voladura, para un terreno determinado en la unidad minera Toquepala, mediante datos reales obtenidos de los diferentes ensayos realizados. De la misma manera, se complementa con la comparación entre los cálculos efectuados con la data real y los resultados teóricos.

Utilizando como datos base la carga explosiva y la distancia a la cual se realizó el monitoreo de vibraciones se obtuvieron datos como frecuencias y velocidades que, con un mayor análisis y un estudio adecuado nos llevaron a los objetivos planteados, aplicando el modelo de predicción de vibración de Devine.

De este modo nos concentramos en el análisis y monitoreo de las vibraciones, resultado de la voladura en la mina Toquepala, donde dicha información es ordenada y clasificada por fases para luego mediante un ajuste cuadrático se logra hallar las incógnitas de una ecuación base (“k” y “alpha”) usadas para la predicción de las velocidades pico partícula (PPV). Asimismo, es importante dar mención al desarrollo y todos los procedimientos efectuados para llegar al modelo predictivo del comportamiento de las ondas vibratorias en el terreno.

En conclusión, al hallar las incógnitas “k” y “alpha” planteadas en modelo Devine, permite obtener datos más cercanos a la realidad en el momento de predecir las PPVs para una voladura en particular, asimismo, hace posible enfrentar futuros problemas con las normas reguladoras de vibraciones, tanto con el daño en estructuras cercanas, así como efectos negativos en las personas y el macizo rocoso circundante.

PALABRAS CLAVE: Vibraciones, velocidad pico partícula, Modelo de predicción, Voladura, Explosivos

ABSTRACT

Blasting is an elementary operation in mining activity and its design is based on various mathematical models proposed to date, in this way the present work concentrates on finding a model for predicting vibrations, the product of a blast, for a specific terrain in the Toquepala mining unit, using real data obtained from the different tests carried out. In the same way, it is complemented with the comparison between the calculations made with the real data and the theoretical results.

Using as base data the explosive charge and the distance at which the vibration monitoring was carried out, data such as frequencies and speeds were obtained which, with further analysis and an adequate study, led us to the proposed objectives, applying the vibration prediction model of Devine.

In this way we focus on the analysis and monitoring of vibrations, the result of the blasting at the Toquepala mine, where said information is ordered and classified by phases and then by means of a quadratic adjustment it is possible to find the unknowns of a base equation (“k "And" alpha ") used for the prediction of peak particle velocities (PPV). Likewise, it is important to mention the development and all the procedures carried out to arrive at the predictive model of the behavior of vibratory waves in the field.

In conclusion, by finding the unknowns "k" and "alpha" raised in the Devine model, it allows obtaining data closer to reality at the time of predicting the PPVs for a particular blast, also makes it possible to face future problems with the standards vibration regulators, both with damage to nearby structures, as well as negative effects on people and the surrounding rocky massif.

KEY WORDS: Vibrations, peak particle velocity, Prediction model, Blasting, Explosives

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN I
ABSTRACT II
ACRONIMOS Y ABREVIATURAS: VII
I. INTRODUCCIÓN 1
1.1. Trayectoria del Autor. 2
1.2. Descripción de la empresa. 2
1.2.1. Ubicación. 2
1.2.2. Valores. 3
1.2.3. Misión. 4
1.2.4. Visión. 4
1.2.5. Historia. 5
1.3. Organigrama de la empresa. 7
1.4. Áreas y funciones desempeñadas 8
1.4.1. Empresa ENAEX SAC 8
1.4.2. Empresa EXSA S.A. 9
II. DESCRIPCION DE UNA ACTIVIDAD ESPECIFICA 10
2.1. Antecedentes 10
2.2. Objetivos 13
2.2.1. Objetivo general. 13
2.2.2. Objetivos específicos. 13
2.3. Ubicación 13
2.3.1. Ubicación del proyecto 13
2.3.2. Accesibilidad. 14
2.3.3. Reservas. 16
2.3.4. Geología 17
2.3.5. Parámetros de diseño. 18
2.3.6. Plan de Vida de Mina. 18
2.4. Operaciones Unitarias 18
2.4.1. Perforación. 18
2.4.2. Voladura. 20
2.4.3. Carguío. 21
2.4.4. Acarreo. 21
2.5. Diseños preliminares 22
2.5.1. Diseño de Mallas. 22
2.5.2. Diseño de carga. 23

2.5.3. Secuencia de iniciación. 23
2.6. Monitoreo de vibración. 24
2.6.1. Ondas Sísmicas. 25
2.6.2. Unidad de medida de la vibración. 26
2.7. Trabajo de Campo 26
2.7.1. Instrumentación 27
2.7.2. Ubicación y posicionamiento de equipos de monitoreo 28
2.7.3. Trabajo en oficina 29
2.7.4. Registro de Monitoreo de vibración. 30
2.8. Modelo de campo lejano DEVINE 33
2.8.1. Distancia. 34
2.8.2. Carga operante. 34
2.8.3. Velocidad Pico de Partícula. 35
2.9. Análisis de Datos 35
2.9.1. Estimación de Vibración en Zona litológica Dolerita Toquepala ... 35
III. VIABILIDAD DEL PROYECTO 44
IV. PRODUCTO 44
4.1. Datos generales 44
4.2. Plano Geológico. 45
4.3. Calculo y verificación. 47
4.4. Fragmentación 50
4.5. Resultados: 53
V. RECOMENDACIONES 54
VI. REFERENCIAS 55
VII. ANEXOS 57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Organigrama de la empresa EXSA SA 8
Figura 2 Plano de ubicación de mina Toquepala 15
Figura 3 Geometría de cuerpo de mineral 17
Figura 4 Perforación 19
Figura 5 Voladura 20
Figura 6 Equipo de carguío y acarreo 21
Figura 7 Diseño de Malla 22

Figura 8 Diseño de Carga 23
Figura 9 Diseño de secuencia de Iniciación 24
Figura 10 Monitoreo de evento 25
Figura 11 Micromate Plus 28
Figura 12 Ubicación de equipo de monitoreo 29
Figura 13 Dispersión al 50% de confiabilidad. 37
Figura 14 Modelo de campo lejano con confiabilidad de 50% y 90% 40
Figura 15 PPV al 50 y 90% de confiabilidad vs PPV critico 42
Figura 16 Estimación de PPV vs Carga Operante 44
Figura 17 Plano geológico 46
Figura 18 Sección Geológica 46
Figura 19 Registro de PPV 49
Figura 20 Comparacion de registro de PPV 50
Figura 21 Frente de Minado - Dolerita Toquepala 51
Figura 22 Análisis de Fragmentación – Dolerita Toquepala 51
Figura 23 Historial de fragmentación en pala 08 52
Figura 24 Clasificación de Ondas 57
Figura 25 Instalación de geófono direccionado hacia voladura. 58
Figura 26 Test de sensores. 58
Figura 27 Software Blastware IV - Registros (software Version 4.3) 59
Figura 28 Software Blastware IV - Reporte (software Version 4.3) 60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cedes de abastecimiento EXSA SA 3
Tabla 2 Valores de EXSA SA 3
Tabla 3 Historia de EXSA SA 5
Tabla 4 Coordenadas UTM unidad minera Toquepala 14
Tabla 5 Accesibilidad a unidad minera Toquepala 14
Tabla 6 Reserva por tipo de mineral 16
Tabla 7 Velocidad pico partícula critica - Mina Toquepala 26
Tabla 8 Registro de monitoreo/ Zona Dolerita Toquepala 30
Tabla 9 Registro de Monitoreo / Zona Diorita con Yeso 32

Tabla 10 Logaritmo de Distancia Escalada y PPV / Zona Td..... 36
Tabla 11 Confirmación de valores de predicción al 50% y 90%..... 40
Tabla 12 Modelo de predicción de vibración al 90% de confiabilidad..... 43
Tabla 13 Datos de proyecto..... 45
Tabla 14 Registro de carguio 47
Tabla 15 Registro de vibración en proyecto de voladura..... 49

ACRONIMOS Y ABREVIATURAS:

PPV:	Velocidad Pico Partícula
K:	Constante de Propagación del Medio.
α:	Constante de Atenuación del Medio.
D:	Distancia a la cual se cuantifica la velocidad de partícula.
W:	Carga Detonada en forma simultánea.
De:	Distancia escalada
gr/cc:	Gramos por centímetro cúbico.
m/s:	Metros por segundo.
m:	Metros.
cm:	Centímetro.
mm:	Milímetros
ms:	Milisegundos.
N - S:	Norte - Sur.
E - W:	Este - Oeste.
UTM:	Universal Transverse Mercator (sistema de Coordenadas).
ME:	Mezcla Explosiva
Td:	Dolerita Toquepala
Qq:	Quarzo Quellaveco
Di ga:	Diorita Yeso-anhidrita
Di qs:	Diorita Quarzo-sericita
FC:	Factor de carga
FP:	Factor de potencia

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos 25 años, la minería ha estado en una fase expansiva sin precedentes a nivel global. Desde inicios de la década de los 90s se ha registrado un proceso de crecimiento significativo, y con ello, el desarrollo de los controles para mitigar los impactos ambientales generados por la voladura tales como: Gases, polvo, ruido, subsidencia, lanzamiento de fragmentos de rocas, vibraciones, etc. de este modo la aplicación de modelo de predicción de vibraciones Devine para reducir el impacto por voladura de rocas es el tema del presente trabajo de investigación.

La mayor importancia de tener un modelo que nos permita planear y controlar nuestras voladuras radica en tener el poder para “encontrarnos delante de los problemas” pudiendo identificar vibraciones superiores a los limites exigidos antes de realizar la voladura y no “reaccionar frente a los problemas”, lo cual debería ser el objetivo de todo profesional de la ingeniería a lo largo de su actividad laboral, utilizando ciencia e ingenio para llegar a los mejores resultados en calidad, costo y tiempo.

Se comenzará con un primer capítulo describiendo la trayectoria del autor, así como detalles de la compañía donde se realizó el presente trabajo de investigación. Además, se realizará una breve descripción sobre el área y las funciones desempeñadas.

En un segundo capítulo se centrará en el análisis empírico del proyecto, desde la toma de datos hasta la selección y organización adecuada de cada uno de los resultados obtenidos en las diferentes voladuras efectuadas. Asimismo, se realizarán los respectivos cálculos teóricos mediante el uso de fórmulas y ecuaciones diseñadas para aproximarse a la realidad.

El tercer capítulo se centrará en la viabilidad del trabajo presentado, mismo que cumple con las características teóricas y técnicas operativas.

El cuarto capítulo será sobre la regresión lineal correspondiente, se mostrarán las aplicaciones que se le pueden dar. Una vez que se obtuvieron todos los resultados y los cálculos necesarios, tanto los teóricos como los hallados en los ensayos, se podrán trabajar con los resultados.

Finalmente presentamos las recomendaciones de acuerdo a los resultados y cálculos realizados, tanto los teóricos como los hallados en la práctica. Completamos el estudio con algunos datos importantes que fueron anexados.

1.1. Trayectoria del Autor.

Durante la experiencia desde el año 2014-2020 en distintas empresas dedicadas a la fabricación y comercialización explosivos, asimismo en diferentes unidades mineras. Los mismos que se detallan a continuación.

2018 – 2020 (a la actualidad). Programador de disparos electrónicos en la empresa ENAEX (Chemtrade SAC), cumpliendo las funciones de asistencia técnica en manipulación de explosivos, diseño de secuencia de voladura, así como la iniciación electrónica en mallas electrónicas y pirotécnicas (Proyecto Quellaveco y UM Toromocho)

2014 – 2018. Asistente Técnico en la empresa EXSA S.A., cumpliendo funciones de asistencia técnica en manipulación de explosivos, diseños de configuración de carga explosiva y secuencia de voladura, con el objetivo de la mejora continua en cuanto a resultados en fragmentación de roca, control de estabilidad en taludes en la unidad minera Toquepala.

1.2. Descripción de la empresa.

EXSA SA con RUC 20100094135, una empresa peruana fundada en 1954 con el nombre de Explosivos S.A. e inicia sus operaciones en Lurín en el año 1956, misma que está dedicada a la fabricación y comercialización de explosivos, accesorio y agentes de voladura. Destinados a cubrir las necesidades de los sectores minería, construcción civil, prospección petrolera y gasífera.

1.2.1. Ubicación.

EXSA SA está ubicada como cede central en Lima y cuenta con una red de oficinas de ventas y polvorines, (Lurín, Las Yaras) estratégicamente ubicados, que le permitan brindar un abastecimiento seguro y oportuno a los usuarios.

Tabla 1

Cedes de abastecimiento EXSA SA

Sedes	**Oficina Administrativa**	**Fabrica principal**	**Fabrica Trujillo**	**Fabrica Tacna**
Dirección	Calle las Begonias 415 piso 12, San Isidro Lima	Antigua panamericana sur km 38.5 Pampas de Hurangal - Lurin – Lima 16 – Peru	Panamericana Norte Km 546.5 Pasaje Alto Salaberry -	Carretera las Yaras Costanera Km 6 Sama - Las Yaras - Tacna

Nota: https://www.exsa.net/es/contacto

1.2.2. Valores.

EXSA S.A. promueve los siguientes valores como ejes centrales para la buena actividad de la empresa y el desarrollo de su personal, generando calidad, valor agregado a los productos y servicios que reciben nuestros clientes:

Tabla 2

Valores de EXSA SA

Valor	**Descripción**
Seguridad	"Tu seguridad es mi seguridad" Cumplimos con las normas internacionales de seguridad y promovemos una cultura de respeto a la integridad física y mental de nuestros colaboradores. Para nosotros, la seguridad se basa en la anticipación y evaluación constante de los riesgos, así como en el análisis de las consecuencias de un evento más allá del cumplimiento de las normas.
Foco en el cliente	"Ponemos a nuestros clientes en el centro de todo lo que hacemos" Integramos esfuerzos y creamos la mejor solución a las necesidades de nuestros clientes. Nos hacemos responsables por asegurar su satisfacción y cumplimos con lo que prometemos.
Integridad	"Actuar de manera honesta, solidaria y transparente" Creemos en los valores éticos, el respeto hacia las personas e instituciones y la congruencia entre el decir y el hacer. Defendemos y protegemos los derechos de nuestros colaboradores, en este sentido, todos los colaboradores de EXSA S.A. se comprometen a actuar de manera justa y

	responsable, respetando el principio de verdad ante cada situación.
Excelencia	"Hacer las cosas siempre mejor y con innovación" La excelencia en EXSA S.A. es siempre superar las expectativas de nuestras audiencias, creando un valor sostenido para nuestros clientes, alcanzando resultados que satisfagan plenamente a todos nuestros grupos de interés y maximizando la contribución de los colaboradores a través de su desarrollo y compromiso. Por ello, nuestro compromiso es mejorar continuamente y esforzarnos por comprender, anticipar y dar respuesta rápida a las inquietudes de las empresas, organizaciones o todas las personas con las que nos relacionamos.
Compromiso	"Tomar los retos como propios" Consideramos que el compromiso es la clave de nuestros logros y por ello nos aseguramos que nuestros colaboradores actúen con pasión por lo que hacen. Por otro lado, el compromiso de EXSA S.A. con sus colaboradores es cumplir todas las obligaciones personales, profesionales y organizacionales, y promover su desarrollo en estos ámbitos. En EXSA S.A. nos preocupamos por el cuidado del medio ambiente y por las comunidades que nos rodean, es por eso que buscamos, día a día, mejorar el bienestar de nuestro entorno.
Confianza	"Confío en ti y puedes confiar en mí" Fomentamos un ambiente de confianza y comunicación abierta y transparente en todo nuestro entorno y con nuestros clientes.

Nota: https://www.exsa.net/es/nosotros

1.2.3. Misión.

Brindar soluciones en fragmentación de roca que contribuyan al desarrollo sostenible de nuestros clientes, colaboradores, accionistas y sociedad.

1.2.4. Visión.

Ser líderes globales en soluciones de fragmentación de roca.

1.2.5. Historia.

Tabla 3

Historia de EXSA SA

Año	Descripción	Foto
1954	EXSA S.A. se constituye con el nombre de Explosivos S.A. y en 1956 inicia sus operaciones en Lurín, utilizando los más exigentes niveles de seguridad y tecnología.	
1960	Se funda la Compañía Peruana de Electrodos Oerlikon S.A. para la producción de electrodos y otros consumibles para soldadura en general, se contó con la más moderna tecnología en maquinaria y equipos para la fabricación de electrodos para soldadura	
1964	EXSA implementa moderna tecnología en maquinaria y equipos para la fabricación de electrodos para soldaduras como la primera prensa de extrusión Oerlikon EP-10, fabricada por Oerlikon Welding Ltd. de Suiza.	
1971	La Compañía Peruana de Electrodos Oerlikon S.A. es absorbida por Explosivos S.A. mediante fusión y se crea la División Soldaduras de Explosivos S.A.	
1977	Se instala la planta de fundentes para soldadura por arco sumergido.	
1992	Se inicia operaciones en la planta de Emulsiones explosivas en Lurín	
1995	Se realiza la remodelación de la planta de soldaduras y Explosivos S.A. cambia de razón social a EXSA S.A.	
1996	Se realiza la fusión con Fontargen Latinoamericana S.A., principal fabricante de soldaduras especiales en el Perú, y sus otras filiales EXSA Comercial S.A. y Servicios Técnicos EXSA S.A.	

1997	Se consolida el autoabastecimiento de ácido nítrico con el inicio de operaciones de una planta en Lurín. Inicia operaciones la 2da. planta de Emulsiones explosivas ubicada en Sama - Las Yaras, Tacna, cerca de la frontera sur del Perú.	
2000	Se forma el Centro Tecnológico de Voladura EXSA (CTVE) para capacitar a los consumidores de sus explosivos y accesorios de voladura en el adecuado y seguro manejo de los mismos. Inicia la exportación de dinamitas al mercado norteamericano.	
2003	EXSA obtiene el certificado ISO 9001: versión 2000 a su Sistema de Gestión de Calidad para las divisiones de Explosivos y Soldaduras.	
2004	EXSA obtiene el certificado ISO 14001 para su Sistema de Gestión Ambiental.	
2006	EXSA gana Premio a la Innovación Tecnológica en el Sector Minero-Energético 2016	
2007	Escinde su División de Soldaduras y la fusiona con su subsidiaria Valores Lurín S.A.C. convirtiéndola en Soldexa. Se incorpora al grupo de empresas fundadoras de la Asociación de Buenos Empleadores (ABE). Obtiene la certificación OHSAS 18001 para su Sistema de Seguridad y Salud Ocupacional	
2010	EXSA está presente en Panamá.	

2013	Desde febrero del 2013, EXSA está presente en Colombia.	
2015	Se desarrolla la Tecnologia Quantex®, revolucionando el mercado de explosivos.	
2016	Se gana Creatividad Empresarial 2016 con "Quantex - Tecnología peruana para el mundo" Organizado por la UPC.	
2018	Inicia operaciones la planta de Sistemas de iniciación más moderna de la región.	
2019	Se presenta Quantex® 2.0 y Quantex® Sub.	

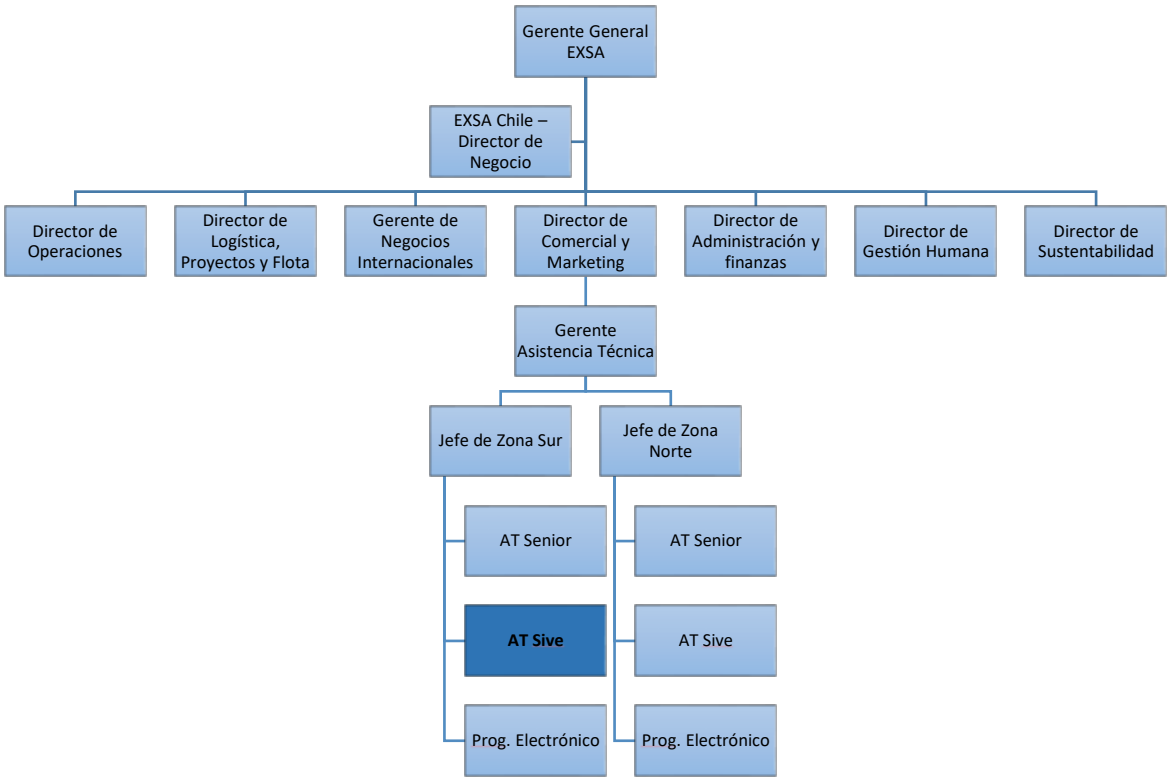
Nota: https://www.exsa.net/es/nosotros

1.3. Organigrama de la empresa.

En la empresa EXSA S.A. existen diversos departamentos encargados desde la fabricación de los productos hasta la comercialización y servicios de voladura para ello en el presente trabajo se muestra el área encargada de la asistencia técnica que a continuación se muestra:

Figura 1

Organigrama de la empresa EXSA SA



Nota: Elaboración propia con datos de la empresa.

1.4. Áreas y funciones desempeñadas

1.4.1. Empresa ENAEX SAC

Año 2018 desde octubre como Programador de Disparos electrónicos en la Empresa Enaex en el proyecto Quellaveco (Anglo American), cumpliendo las funciones dedicadas a la asistencia técnica.

- Programación, amarre y detonación del sistema de iniciación electrónica DAVEYTRONIC Evolution y SP.

- Cálculo de stock físico y en sistema; envío de reportes diarios de consumo de material explosivo.
- Cálculo de los diseños de carga y secuenciamiento de amarre para voladuras pirotécnicas y electrónicas.
- Monitoreo de VOD de los agentes explosivos.
- Monitoreo y análisis de vibraciones con Minimate Plus/ Micromate Plus haciendo uso de software Blastware.
- Filmación de voladuras.
- Evaluación y reporte diario de voladura.
- Seguimiento, control y reporte del cumplimiento del programa semanal de voladura.

1.4.2. Empresa EXSA S.A.

En el año 2015-2018 desde Mayo como Asistente Técnico en la empresa EXSA SA, cumpliendo funciones de asistencia técnica en la seguridad y manipuleo de explosivos, así mismo la mejora continua de los indicadores de perforación y voladura en la unidad minera de Toquepala.

- Seguimiento del control de calidad del producto de EXSA (Viscosidad Emulsión, densidad, mezcla de los agentes explosivos, velocidad de detonación).
- Verificación de la planificación, programación y ejecución de actividades de medición de taladros, primado, carguío, amarre y ejecución de disparos.
- Garantizar la seguridad, calidad y funcionamiento de los productos de voladura, buscando la satisfacción del cliente en el servicio brindado.
- Diseño de los parámetros de carguío y secuencia de salida.
- Monitoreo de VOD de los agentes explosivos y control de mezclas explosivas con variación de densidad final.
- Monitoreo y análisis de vibraciones con Minimate Plus/ Micromate Plus haciendo uso de software Blastware.
- Identificación oportunidades de mejora en los diferentes procesos de la voladura y elaborar reportes e informes técnicos al término de cada actividad de campo.

II. DESCRIPCION DE UNA ACTIVIDAD ESPECIFICA

2.1. Antecedentes

Para el desarrollo del presente informe se revisaron trabajos de investigación afines, los cuales fueron utilizados de guía al tener como objetivo establecer un modelo de vibraciones para reducir el impacto por voladura en el macizo rocoso.

El estudio de investigación denominado: “Reducción del daño inducido al macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones por voladuras en el Bypass 179 Compañía Minera Kolpa S.A.”, el objetivo general es experimentar el proceso de reducción del daño inducido al macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones por voladuras; objetivos específicos: Construir los modelos predictivos de vibraciones para reducir el daño en el macizo rocoso realizando monitoreo y análisis de vibraciones; verificar el nivel de daño de los diseños de voladura con los modelos predictivos mediante la ley de atenuación y la función de regresión; reducir el daño en el macizo rocoso aplicando el modelo predictivo de vibraciones y su interpretación de resultados. (Dueñas, 2018)

La problemática presentada son las condiciones sub-estándar post voladura en las excavaciones, aumentado el riesgo de accidentes por caída de rocas, retrasando los ciclos de operación, constitución deficiente estructural del diseño final de la mina y elevación de los costos de sostenimiento. Para ello se decidió realizar el estudio de vibraciones que genera una voladura por ser principal proceso que controla la excavación de manera proactiva, con ese objetivo se planteó generar un modelo matemático de vibración característica referencia usando el principio de la velocidad pico partícula en vibraciones producidas durante las voladuras; el cual nos ayudó a calcular la carga explosiva necesaria y no dañar en exceso al macizo rocoso, además de permitió analizar el grado de interacción entre las variables de la voladura así como ser parte inicial de los estudios y llegar a predecir las vibraciones en los siguientes tajeos. (Recalde y Noriega, 2017)

El objetivo principal del presente proyecto es hallar un modelo del alcance de las ondas vibratorias, producto de una voladura, para un terreno determinado, mediante datos reales obtenidos de los diferentes ensayos realizados. De la misma manera, se complementará realizando una comparación entre los cálculos efectuados con la data real y los resultados teóricos. (Origuela, 2011)

En el presente trabajo de investigación se describe y analiza las vibraciones inducidas por la voladura de rocas. Como se sabe, la causa principal de los impactos ambientales producidos por la voladura de rocas son las vibraciones que se propagan a través del macizo rocoso, como consecuencia de la detonación de las mezclas explosivas comerciales. Se debe mencionar que, en los primeros capítulos de la presente tesis, se describe y analiza todo lo relacionado a las vibraciones inducidas por la voladura de rocas, luego se seleccionó el modelo matemático de Devine para campo lejano, para monitorear las vibraciones inducidas por la voladura de todos los disparos primarios que se realizaron tanto en el caso estudio N° 01 y el caso estudio N° 02. Teniendo todos los resultados de monitoreo de vibraciones inducidas por los disparos primarios tanto del caso-estudio N° 01 y N° 02, fueron comparados con las normativas internacionales correspondientes, y se pudo comprobar que, en todos los casos, dichos resultados están por debajo de los límites establecidos por dichas normativas internacionales de vibraciones. Por otro lado, se debe enfatizar que el método usando la velocidad pico de partícula (PPV) es el más usado y que da resultados adecuados y sobre todo confiables. (Peña, 2014)

Con la finalidad de minimizar el nivel de vibraciones y evitar riegos a la población cercana, se realizó un diseño de modelo predictivo de vibración mediante ensayos reales (disparo de cargas y medición de vibraciones) que pueda ayudarnos a obtener la ley de la transmisitividad de un terreno específico, que viene a ser el nivel de vibración recibida en un punto y expresado como valor de velocidad de vibración, para así poder predecir los niveles de vibraciones con el fin de optimizar factores que incidan en el nivel de vibraciones, entre ellos los más importantes, carga por retardo, la distancia, etc. (Valdivia, 2017)

En general, las voladuras generan vibraciones en el macizo rocoso, las cuales pueden tener diferentes efectos negativos sobre las infraestructuras y, además, ocasionar daños a la integridad física del ser humado y las mismas estructuras de la masa rocosa, como fallas y diaclasas. El éxito eficiente de los trabajos de voladura depende no sólo de optimizar la fragmentación al menor costo, sino que lo más importante radica en lograr dicho objetivo preservando la estabilidad de los taludes, seguridad de los trabajadores, poblaciones aledañas y estructuras cercanas que constituyen el patrimonio de la empresa.

Dentro de las variables que influyen en el resultado de un proceso de voladura de rocas una de las más importantes es identificar el comportamiento litológico estructural del macizo rocosa, las cuales definen las demás variables a ser usadas dentro del proceso de voladura.

En ese entender, el Ingeniero a cargo de la voladura, quien tiene en definitiva la difícil misión de diseñar la voladura propiamente dicha, debe considerar un gran número de variables involucradas en cada uno de los diseños. Estas variables pueden ser agrupadas dentro de tres grandes categorías:

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

La interacción entre los parámetros antes indicados es extremadamente compleja, e imposible de cuantificar por un algoritmo analítico simple por la anisotropía y heterogeneidad de los Macizos Rocosos. La óptima combinación de estas variables será función tanto del tipo de roca como del explosivo utilizado. Esto determina un número infinito de posibilidades, con un óptimo que cambia en algunos casos entre voladura y voladura.

El conocimiento oportuno de las características geo estructurales y su posterior análisis juega un papel muy importante en el diseño de la voladura, puesto que esta permite simular el comportamiento del macizo a la liberación de energía redefiniendo para metros de que favorezcan al criterio de daño.

Por ello debe abordarse estratégicamente a fin de lograr el punto de equilibrio que permita realizar una buena fragmentación de roca, minimizando a la vez el daño a las paredes del banco ya que puede afectar a las voladuras siguientes generando inestabilidad. Para controlar el impacto es necesario determinar, un modelamiento de campo cercano y campo lejano para el control de daño.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo general.

- Determinar un modelo de vibraciones para prevenir y reducir el impacto hacia los taludes en Mina.

2.2.2. Objetivos específicos.

- Desarrollar modelos de vibraciones por cada sector de la unidad minera
- Evaluar modificaciones en la configuración de las cargas, incluyendo densidades finales de mezcla explosiva y diseños de carga.

2.3. Ubicación

2.3.1. Ubicación del proyecto

El yacimiento cuprífero de Toquepala, área de producción Toquepala, se encuentra ubicado en el flanco Sur Oeste de la Cordillera Occidental de los Andes Peruanos, en el departamento de Tacna entre las cotas 3100 a 3600 msnm. Toquepala. La ubicación geográfica está dada por las siguientes coordenadas UTM (WGS 84 Zona 19S).

Ubicación Política

Sector	: Toquepala
Distrito	: Ilabaya
Provincia	: Jorge Basadre
Departamento	: Tacna

Tabla 4

Coordenadas UTM unidad minera Toquepala

UP Toquepala	COTA	COORDENADAS ESTE	COORDENADAS NORTE
Tajo Toquepala	2700-3600 msnm	329,883	8,093,921
Concentradora Toquepala	3140-3258 msnm	328 600	8 092 500
Embalse de relaves Quebrada Honda	400-2300 msnm	309 587	8 069 683

Nota: EIA Ampliación de Concentradora Toquepala

2.3.2. Accesibilidad.

A la zona de actividades Toquepala se accede desde la capital del país por vía aérea hasta Tacna de ahí, por la carretera panamericana sur se llega a Camiara y posterior a ello a la unidad minera Toquepala.

Tabla 5

Accesibilidad a unidad minera Toquepala

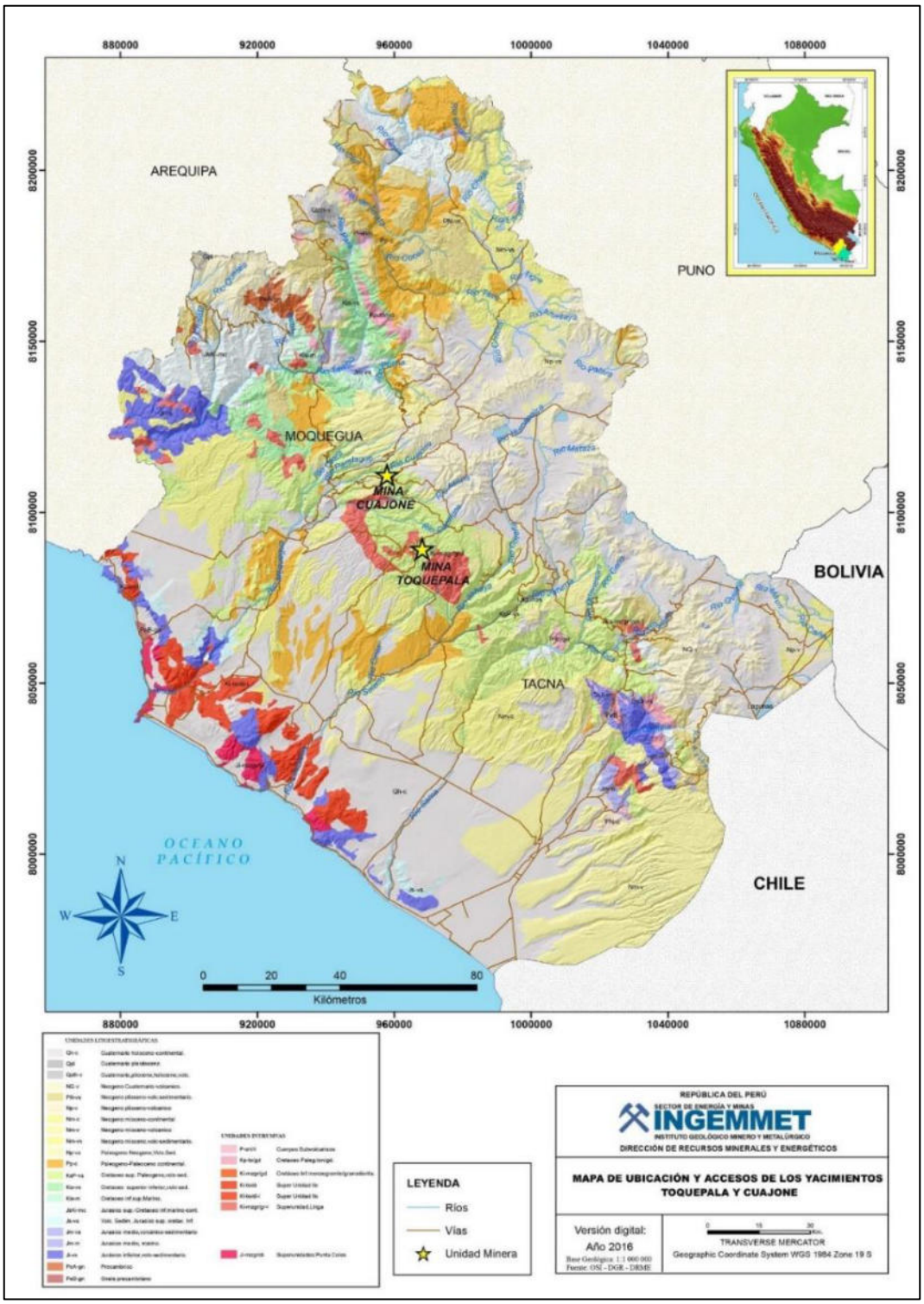
Origen	Destino	Tipo de vía	Tiempo (h)	Distancia (Km)
Lima	Camiara	Asfaltada	17:43	1171
Arequipa	Camiara	Asfaltada	4:18	318
Moquegua	Camiara	Asfaltada	1:29	108
Tacna	Camiara	Asfaltada	1:05	81
Camiara	Toquepala	Asfaltada	1:24	78

Nota: Elaboración propia

Asimismo, con el Puerto de Ilo, existe una línea férrea de 167 km de distancia, por donde se transporta sus concentrados a su fundición y refinería, cuenta además con un aeropuerto, para uso exclusivo de la empresa.

Figura 2

Plano de ubicación de mina Toquepala



Nota: Recopilado de INGEMMET

2.3.3. Reservas.

El estudio de las reservas minerales en la mina Toquepala, es un tema bastante reservado, se estima que, en los últimos años, se irá incrementando el tonelaje de mineral extraído y se reducirá el desmonte. Las reservas de mineral son muy sensibles a la variación del precio del cobre en el mercado internacional, ya que la ley de cobre está calculada en función al precio coyuntural de los mercados de metales.

- Geometría del cuerpo mineral ≥ 0.4% Cu.
- Comportamiento vertical de la Ley de Cu.
- Geometría del cuerpo mineral ≥ 0.4% Cu.
- Comportamiento vertical de la Ley de Cu.
- Espaciamiento de taladros diamantinos

Tabla 6

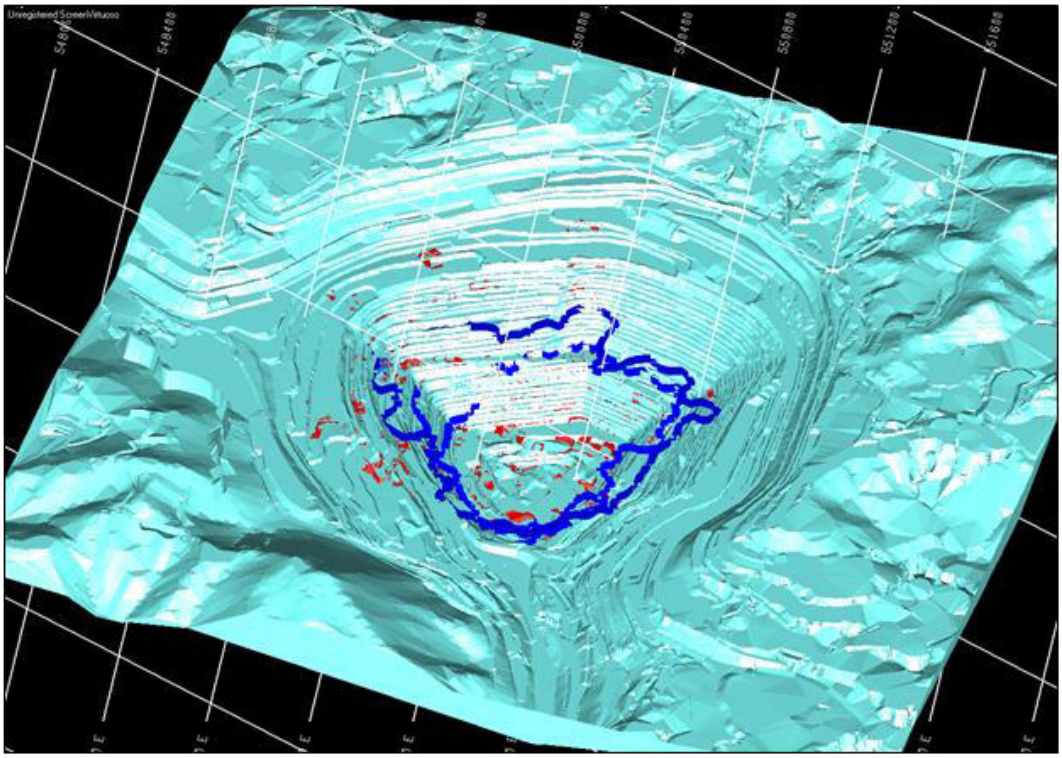
Reserva por tipo de mineral

Mineral	**Roca**	**Yeso**	**Distribución (%)**	**% Cu**	**% Mo**
	Primario	Sin Yeso	2.8	0.69	0.018
		Yeso	94.6	0.65	0.036
	Enriquecido	Sin Yeso	-	-	-
	Transicional	Sin Yeso	2.6	0.62	0.004
	Leach Capping	Sin Yeso	-	-	-
Leach	**Roca**	**Yeso**	**Distribución (%)**	**% Cu**	**% Mo**
	Primario	Sin Yeso	35.0	0.165	0.003
		Yeso	62.2	0.243	0.006
	Enriquecido	Sin Yeso	1.1	0.120	0.003
	Transicional	Sin Yeso	1.2	0.160	0.002
	Leach Capping	Sin Yeso	0.5	0.103	0.002

Nota: Departamento de Geología – SPCC Mina Toquepala

Figura 3

Geometría de cuerpo de mineral



Nota: Departamento de Geología – SPCC Mina Toquepala

2.3.4. Geología

La mina Toquepala, está situada en la región que pertenece a la faja sísmica de los Andes Sur Occidentales del Perú; que se caracteriza por haber soportado una intensa actividad eruptiva, cuyos remanentes son una serie de conos volcánicos, luego intrusivos posteriores del batolito andino, de composición ácida a intermedia que han afectado a las rocas encajonantes. Posteriormente una erosión, provocó la formación de una superficie irregular la que fue rellenada por flujos volcánicos recientes. Las edades varían desde el cretaceo superior al reciente.

En el área se establece la presencia de rocas volcánicas de edad Cretáceo Superior y Terciario Inferior, pertenecientes al grupo Toquepala, Formación Quellaveco, Series Toquepala y Alta respectivamente, las mismas que consisten en derrames alternados de riolitas, andesitas y aglomerados, diferenciándose entre sí, por sus características estratigráficas y petrográficas particulares.

Resumiendo, se puede indicar que las unidades litológicas presentes, incluyen rocas de orígenes volcánicos e intrusivos.

2.3.5. Parámetros de diseño.

Dadas la geometría y características del depósito, el pit se ha diseñado usando la técnica de “Cono Flotante” (Lerchs - Grossmann). Se ha modelizado el cuerpo mineral en el software Mine Sight, a través del cual se ha determinado los siguientes parámetros de diseño:

- Ángulo de cara de banco: 65°.
- Altura de banco de 15m.
- Talud final: 37°-42°
- Altura de banco: 15 m
- Ancho de bermas o banquetas de 8.5m
- Ancho de rampa: 36m, con pendiente de 8% a 10%.
- Banco más alto: 3640 m.s.n.m., Banco más bajo: 2700 m.s.n.m.

2.3.6. Plan de Vida de Mina.

La mina tendrá una vida aproximada de 78 años, desde su inicio de la operación que fue en el 1959.

2.4. Operaciones Unitarias

El desarrollo integral de las Operaciones Unitarias de Mina (perforación, voladura, carguío y acarreo) están a cargo de Southern Perú, todas ellas, se desarrollan, teniendo presente los procedimientos de trabajo, los cuales implican, efectuar un trabajo con todos los estándares de Seguridad y Productividad.

2.4.1. Perforación.

El primer paso del minado consiste en efectuar hoyos donde se aloja el explosivo, estos huecos se realizan a través de una flota de perforadoras de

diferentes marcas y modelos. Es importante efectuar esta operación con la mayor exactitud del caso, en lo que respecta a profundidad, coordenada exacta, paralelismo y perpendicularidad, todo esto repercutirá en la obtención de una fragmentación requerida y control en las paredes finales del tajo.

Figura 4

Perforación



Nota: Área perforación y Voladura – Toquepala

Parámetros para la perforación de producción son los siguientes:

- Diámetro de perforación: 11.0” y 12 ¼”
- Malla de perforación: Patrón triangular equilátero de 6.5m a 10.0m.
- Longitud de perforación: 15m

Parámetros para la perforación de pre corte son los siguientes:

- Diámetro de perforación: 5.0 Pulgadas
- Espaciamiento de taladros: de 1.5m a 2.0m.
- Longitud de perforación: 16m
- Inclinación: de 65° a 80°

2.4.2. Voladura.

Operación que se encarga del proceso de fragmentación del macizo rocoso, y obtención de taludes estables para un minado productivo. Consiste en el carguío mecanizado (camión fábrica) de taladros con explosivos. Todas las voladuras se realizan con un diseño previo en lo que se refiere a malla de perforación, columna explosiva, secuencia de detonación y otros tanto para el mineral como para el desmonte, siempre teniendo en cuenta el control del factor de carga, control de vibraciones, fly rock y el costo por tonelada removida. Todas las voladuras en la mina Toquepala son detonadas electrónicamente.

Figura 5

Voladura



Nota: Área perforación y Voladura – Toquepala

2.4.3. Carguío.

Operación Unitaria conformada por una flota de Palas y Cargadores frontales de diferentes marcas, modelos y capacidades, estos equipos han sido adquiridos y seleccionados en función a las dimensiones del tajo, considerando las alturas de banco y las necesidades de tonelaje producto de los planes de minado, tanto las Palas como los Cargadores Frontales, son encargados de abastecer material (mineral o desmonte) a los equipos de acarreo. Las Palas que conforman la flota de extracción son eléctricas que consumen 4200 voltios, y los cargadores son propulsados mediante el sistema diésel.

Figura 6

Equipo de Carguío y acarreo



Nota: Área de Operaciones mina - Toquepala

2.4.4. Acarreo.

Operación destinada al transporte de material (mineral y desmonte) a los diferentes destinos de la mina como tolvas de mineral, botaderos de material lixiviable y botaderos de desmonte. La flota de transporte, ha sido estimada y seleccionada, tomando como referencia los equipos de extracción (Palas y Cargadores Frontales). En la Mina Toquepala, los equipos de acarreo son de

diferentes marcas, modelos y capacidades, se cuentan con volquetes de última generación que transportan un tonelaje nominal de 400 Toneladas de material.

2.5. Diseños preliminares

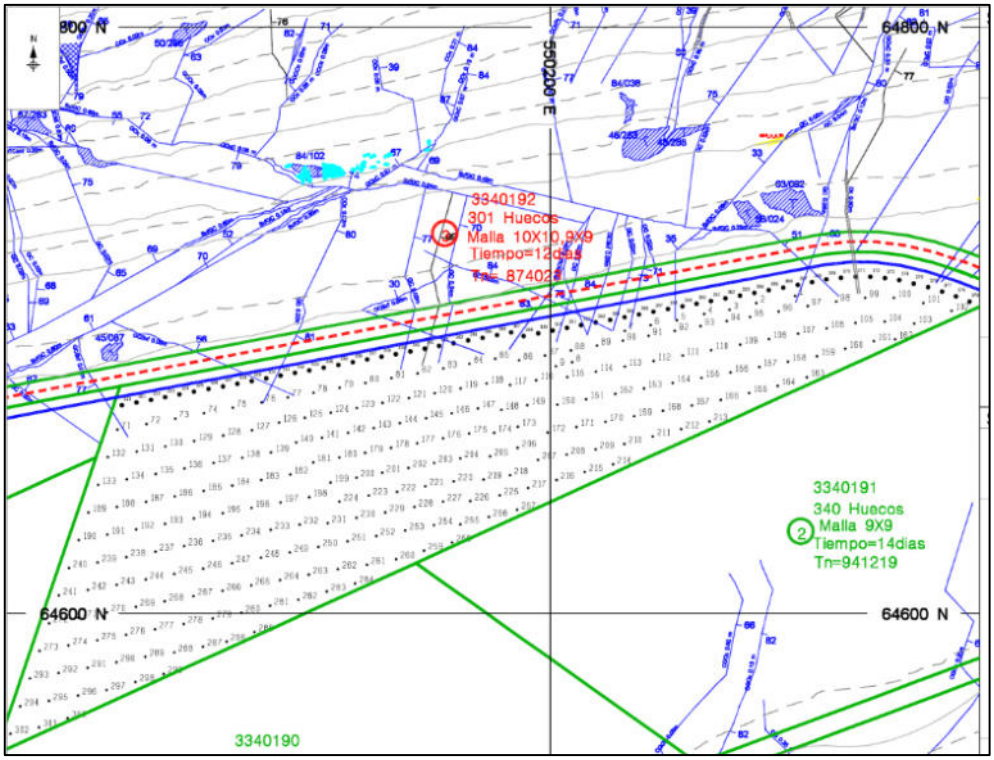
2.5.1. Diseño de Mallas

Se determinan diferentes parámetros, de acuerdo a las condiciones geologías y características geomecánicas del macizo rocoso. Los parámetros establecidos son:

- Diámetro de Taladro
- Burden
- Espaciamiento.
- Taco
- Pasadura.

Figura 7

Diseño de Malla



Nota: Área Ingeniería - Toquepala

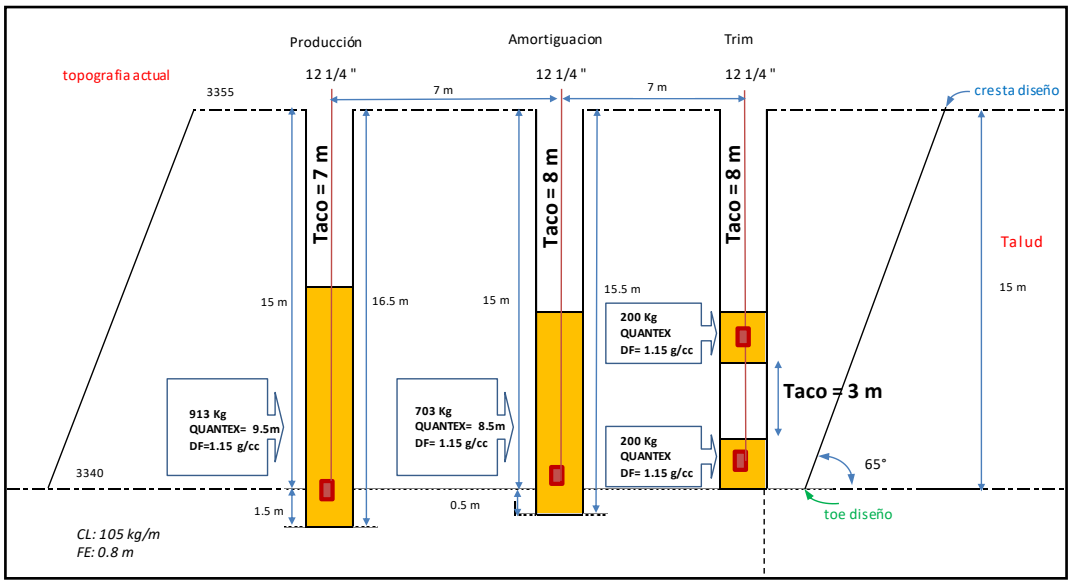
2.5.2. Diseño de carga.

En este diseño se logra determinar los parámetros desarrollados en el diseño de mallas, según, donde se encuentran los valores para:

- Longitud de Carga (LC)
- Carga Lineal (CL)
- Cantidad de Explosivo (We)
- Factor de carga (FC)
- Factor de potencia (FP)

Figura 8

Diseño de carga



Nota: Asistencia técnica EXSA – Toquepala

Asimismo es importante la selección del explosivo conociendo sus características y especificaciones técnicas.

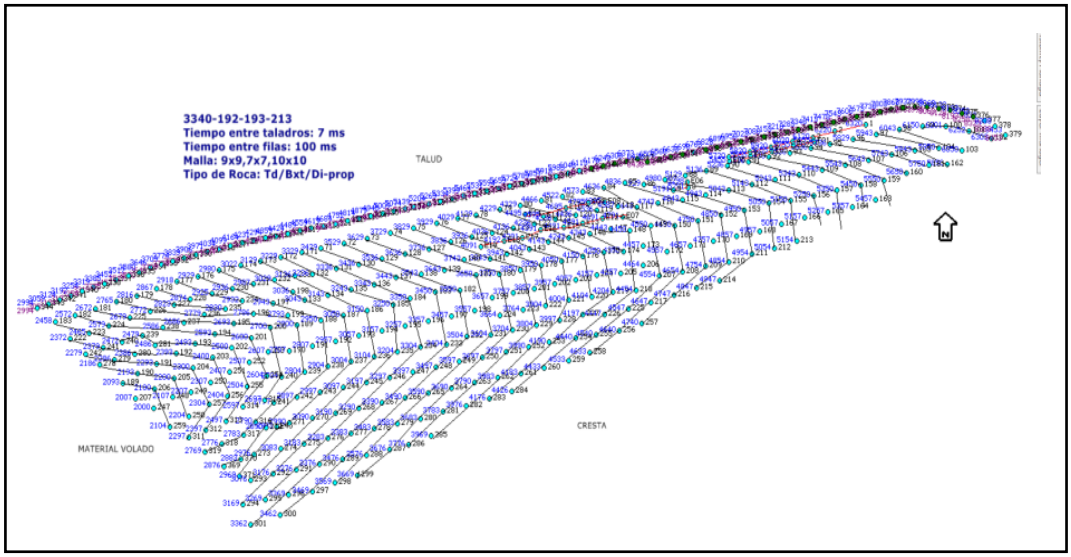
2.5.3. Secuencia de iniciación.

En este proceso se simula las posibles secuencias de detonación usando el software, que se basa en diseño de malla, diseño de carga; para determinar la

secuencia de detonación, movimiento del material y el número de taladros acoplados.

Figura 9

Diseño de secuencia de iniciación



Nota: Asistencia técnica EXSA – Toquepala

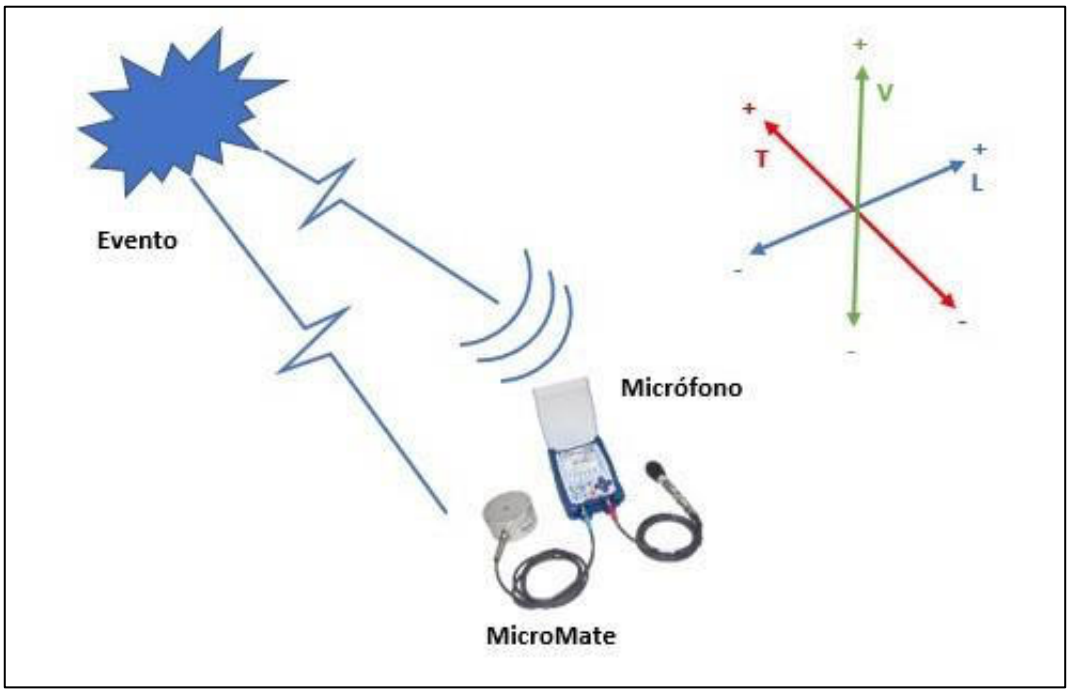
2.6. Monitoreo de vibración.

El equipo Micromate mide las vibraciones del suelo y la presión del aire. La Velocidad Pico de la Partícula indica la velocidad máxima a la cual viajan las partículas resultantes desde las vibraciones del suelo de un evento.

En el monitoreo de vibraciones obtenemos como resultado el nivel del PPV en tres direcciones: transversales, verticales, y longitudinales.

Figura 10

Monitoreo de Evento



Nota: Elaboración propia

Las flechas indican el sentido de la ubicación del transductor al evento, el signo positivo indica que apunta en dirección del evento y negativo en dirección opuesta al evento.

2.6.1. Ondas Sísmicas.

Una deformación que viaja a través de un medio elástico se llama onda elástica y cuando el medio a través del cual se desplaza es la tierra, se llama onda sísmica. El fenómeno 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. Podemos separar en dos grupos los tipos de ondas elásticas: Ondas profundas y Ondas Superficiales (Anexo1)

2.6.2. Unidad de medida de la vibración.

La Velocidad Pico de la Partícula indica la velocidad máxima a la cual viajan las partículas resultantes desde las vibraciones del suelo de un evento. El MiniMate Plus calcula la PPV para cada geófono en mm/s (Sistema Internacional).

2.7. Trabajo de Campo

Los límites permisibles para vibraciones son establecidos para que se puedan evitar los daños a las construcciones o efectos dañinos a la salud humana, producto de una operación minera. En busca del cumplimiento de las diferentes normativas existentes, la empresa minera tiene un programa de control y seguimiento de vibraciones.

Para ello, con miras a una situación futura, estos cálculos se efectúan en base a modelos que representen las condiciones de propagación de ondas sísmicas en un macizo rocoso.

Tabla 7

Velocidad pico partícula critica - Mina Toquepala

Litología Mina Toquepala	Tipo de Roca	PPVc máx. mm/s	PPV 50 máx. mm/s
Serie Alta	Aglomerado Volcánico Agl-volc	1028.40	257.10
	Alta Andesita Aa	935.45	233.86
Serie Toquepala	Riolita Toquepala Tr	903.51	225.88
		860.40	215.10
		937.30	234.32
	Andesita Toquepala Ta	827.02	206.75
	Pórfido Cuarcífero Toquepala Tq	840.58	210.14
	Dolerita Toquepala Td	956.03	239.01
Pórfido Cuarcífero Quellaveco	Pórfido Cuarcífero Quellaveco Qq	591.99	148.00
		825.14	206.28

Intrusivos sin Yeso	Diorita Di	1024.68	256.17
	Diorita Propi lítica Di-prop	670.70	167.67
	Diorita Cuarzo Sericita Di-Qs	682.93	170.73
	Brecha Angular Bx-Qs	735.79	183.95
	Aglomerado de Dacita Da	961.33	240.33
	Brecha Turmalina/Diorita	796.73	199.18
Intrusivos con Yeso	Dacita Porfiritica Dp G/A	992.87	248.22
	Brecha Angular Bx-G/A	1047.50	261.87
	Diorita Di-G/A	1027.13	256.78

Nota: Área Geotecnia - Toquepala

2.7.1. Instrumentación

Las mediciones de las diferentes variables fueron hechas utilizando un sismógrafo Micromate Plus de la compañía Instantel, proporcionados por EXSA SA.

Un sismógrafo es un instrumento que registra el movimiento del macizo rocoso causado por el paso de las ondas sísmicas. Los sismógrafos en minería están construidos especialmente para realizar los estudios de vibraciones, producto de una voladura y, sobre todo, para poder establecer el cumplimiento con las normas y evaluar el desempeño de los explosivos.

Sus partes esenciales son el geófono, un amplificador y un registrador. Un geófono es el encargado de captar las vibraciones mecánicas y las transforma en corriente eléctrica, transmitida por cable al amplificador que a su vez las registra en la memoria, para luego transmitir toda la data a un microcomputador. Los datos resultantes son suministrados en términos de velocidad y frecuencia.

Las velocidades de partícula son representadas por un vector de tres componentes el cual tiene la dirección vertical, la longitudinal y la transversal. La velocidad pico no se produce simultáneamente en las tres direcciones, de este modo, lo que debe ser medido, de acuerdo a las normas técnicas, es la velocidad

resultante a cada intervalo de tiempo de tal manera que se pueda obtener la velocidad máxima.

Figura 11

Micromate plus



Nota: www.Instantel.com

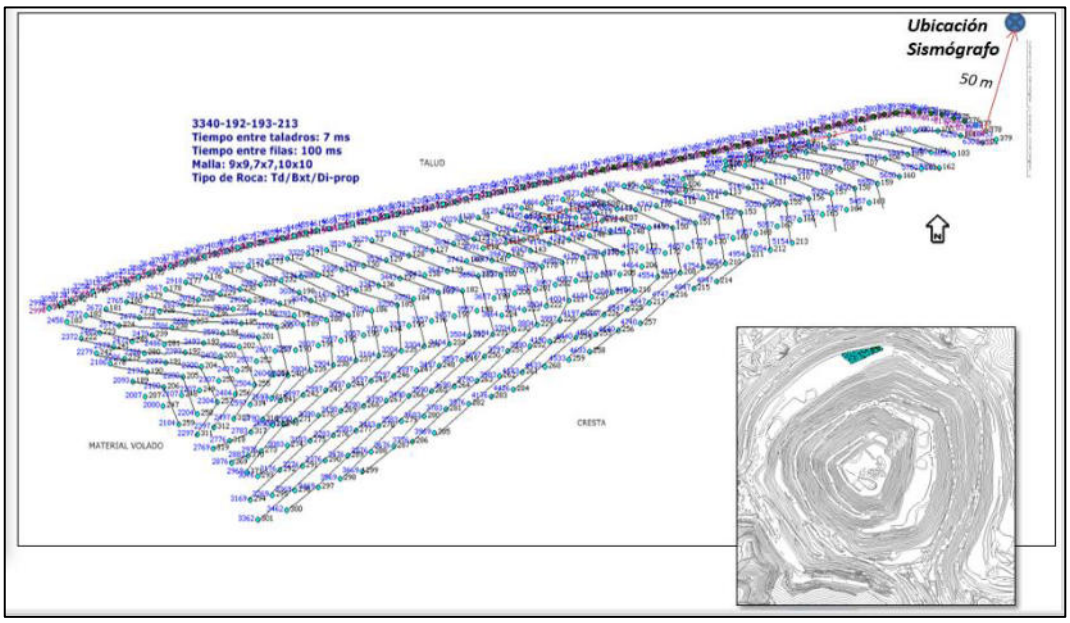
2.7.2. Ubicación y posicionamiento de equipos de monitoreo

Se efectuó la instalación del equipo de monitoreo de vibración (Micromate) a 50m de los proyectos de voladura, con el equipo direccionado hacia la voladura como se observa en el Anexo 2. Es preferible que el sensor sea enterrado y que este se encuentre lo más nivelado posible. En el caso de que el geófono sea instalado cerca a alguna estructura, se mantiene una distancia adecuada y ubicado en el suelo; ya que lo que se pretende es medir las vibraciones, producto de un disparo, en la roca y no la respuesta de la estructura.

Debido a que los niveles de aceleración podrían exceder lo previsto y causar el resbalamiento del sensor, ocasionando error en los datos registrados; es conveniente excavar un hoyo de aproximadamente 50cm la altura del sensor para luego clavar el geófono en el fondo, compactando firmemente el suelo alrededor, y por último, reforzarlo con detritus en la parte superior.

Figura 12

Ubicación de Equipo de monitoreo



Nota: Área perforación y Voladura - Toquepala

2.7.3. Trabajo en oficina.

Realizados los monitoreos de vibraciones correspondientes, se realizó un análisis de data para poder determinar cuáles de los datos habían sido correctamente medidos y podían ser utilizados para la elaboración del modelo predictivo, principal objetivo.

Para poder seleccionar la data nos basamos en la hora de la voladura, dato que se observa en el archivo de vibración ya que por motivos de fallas técnicas o una mala ubicación, podríamos confundir otros movimientos que no fueran generados por la detonación del explosivo.

Al momento de descargar la data acumulada en los sismógrafos a un computador, utilizamos el software BlastWare IV (Anexo 3). Una vez que se descargaron los datos tomados, se abren las ventanas de reporte de eventos

(Anexo 4), donde, según las gráficas de las vibraciones originadas en ese instante, se puede identificar y discernir entre aquellas vibraciones generadas por una voladura original o aquellas vibraciones esporádicas, generadas por cualquier otro tipo de movimiento.

2.7.4. Registro de Monitoreo de vibración.

Una vez seleccionados los datos necesarios, se realizó la agrupación en una tabla, detallando cada uno de los parámetros influyentes y útiles para la elaboración del modelo predictivo.

Se realizó el orden de la información en diferentes columnas, las cuales mostraban los datos indispensables. Dentro de estas columnas tenemos el proyecto de voladura donde se realizó el registro, la carga operante que es la sumatoria de los kg de explosivo detonado en un intervalo menor a 8 ms y el registro de Vibración en mm/s.

En la tabla 8 se identifican los registros de monitoreo de vibración realizados en la zona con litología Dolerita Toquepala (Td).

Tabla 8

Registro de monitoreo/ Zona Dolerita Toquepala

Proyecto	Carga operante (Kg)	PPV (mm/s)
3325 212	862	91.01
3235 208	1854	198.9
3250 227-229	789	129
3265 233-242	758	90.05
3280 236-237	884	97.64
3280 241	708	75.11
3280 241-242	897	112.7
3310 243-244	1874	210
3325 208	1678	224.8
3325 230	909	113.3
3340 190	1232	231.1
3340 193-194	1125	123.3
3235 157-193-194	994	110.2
3235 198-209-208	824	131.7
3235 209-207-201	829	132.4
3250 206	814	98.43
3250 217-218-219	1645	173
3250 220-221	1856	232.4

3250 225 226	845	97.81
3250 229	1125	177.3
3250 230	1356	140.5
3265 225	1754	203.9
3265 227	1254	214.6
3265 229	1845	207.6
3265 229-243	995	131.4
3265 230-231	1526	140
3265 231	724	79.51
3265 231-232	875	125.1
3265 232	815	147
3265 232-233	1058	166.4
3265 243	1012	200.3
3280 232-233	1548	168.2
3280 238-239	925	100.3
3280 240	725	56.52
3280-224	1925	212.1
3295 215	1875	221.5
3295 217-218	2013	221.5
3295 233-238-240	988	139.4
3295 237-238	1706	187.7
3295 238	807	170.3
3295 239-238-240	925	100.9
3310 244	1825	200.8
3310 247	1652	207.9
3310 257	1458	173.6
3310 269	1266	143.8
3310 271	988	134.2
3325 199	928	153.7
3325 201	1842	184.8
3325 202	1785	201.2
3325 213	1019	157
3325 228-229	1025	100.5
3340 191	1854	203.6

Nota: Asistencia técnica EXSA – Toquepala

En la tabla 9 se identifican los registros de monitoreo de vibración realizados en la zona con litología Diorita con Yeso (Di-ga).

Tabla 9

Registro de Monitoreo / Zona Diorita con Yeso

Proyecto	Carga operante (Kg)	PPV (mm/s)
2920 149	755	84.92
2935 167-177	1568	115.40
2935 177	778	90.85
2905 122	1544	164.90
2905 122-123	1674	190.30
2905 127 128	876	97.19
2920 143	758	110.60
2920 144-145-146	725	91.83
2920 146-147	1143	99.20
2920 148-154	1256	143.40
2920 151	874	79.86
2920 154-155	865	117.30
2935 166	1098	141.70
2935 167	795	113.90
2935 169-179-178	818	125.80
2935 172	867	86.80
2935 173	766	127.90
2935 175	870	90.01
2935 176	1674	156.60
2935 177	645	86.63
2935 177-178	1005	114.70
2935 178	915	102.40
2935 180-182-173	712	93.92
2935 181	759	101.30
2935 181-174	1255	155.60
2950 154	809	102.30
2950 154-155-156	1248	100.60
2950 155	829	106.00
2950 156-157-160	1274	135.30
2950 157-167	915	93.51
2950 160-161	876	93.50
2950 172	655	88.83
2965 167-180	1274	116.20
2965 167-180-174	1618	136.40
2965 177	1562	154.50
2965 177-178	995	120.50
2965 178	1544	134.10
2965 180-174	865	118.00
2980 169	1609	172.40
2980 172-173	978	99.90
2980 172-174-175	2195	178.60
2995 193	1917	180.60

2995 194	2143	242.90
2995 195	1345	140.20
3010 211-212-213	865	138.00
3025 228	1918	199.60

Nota: Asistencia técnica EXSA – Toquepala

2.8. Modelo de campo lejano DEVINE

Teóricamente, el criterio que mejor representa el comportamiento de la vibración generadas por el tipo de cargas explosivas usadas en voladuras de tajo abierto, es el modelo de campo lejano de DEVINE puesto que, al utilizar cargas explosivas con geometría cilíndricas, se tiene que las distancias deben ser corregidas por la raíz cuadrada de la carga.

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

Donde:

PPV = Velocidad de Propagación de Partícula

K = Constante de Propagación del Medio.

α = Constante de Atenuación del Medio.

D = Distancia a la cual se cuantifica(m.)

W = Carga Operante (Kg.)

Para determinar los valores de α y K, el modelo de campo lejano se ajusta a una ecuación lineal mediante logaritmos, estos valores se procesan en un gráfico de dispersión en EXCEL como se irá mostrando de manera detallada, clara y concisa.

Para definir el nivel de vibración se debe tener en cuenta que los sismógrafos contienen tres Geófonos, los cuales montados adecuadamente registran las tres ondas: vertical, radial y transversal. Cada una de estas tres componentes del movimiento de la tierra tendrá una velocidad pico partícula (PPV) o máxima amplitud de la onda. La velocidad pico de partícula que se considera es la de mayor valor, es decir, el pico puede ocurrir en cualesquiera de las tres ondas, por lo que es importante considerar también que el Vector Resultante no debe ser confundido con la velocidad pico de la partícula.

Remplazando la distancia escalada en la Ecuación anterior se obtiene lo siguiente:

$$PPV = K * (De)^{\alpha}$$

Luego se aplica logaritmo al modelo con el fin de ser ajustado a la forma de una ecuación lineal:

$$logPPV = Log(K * (De)^2)$$
$$logPPV = LogK + \alpha Log(De)$$

Estos valores se ajustan a una ecuación lineal, obteniendo:

$$y = A + Bx$$

Siendo:

y = $LogPPV$	Logaritmo de la PPV
A = $LogK$	Intercepción con el eje Y
B = a	Pendiente de la recta
x = De	Distancia Escalada

2.8.1. Distancia.

Se refiere a la distancia en metros desde el punto donde fue ubicado el explosivo, hasta punto en el cual se instaló el sensor de medición. Para nuestro modelo se realizó la instalación del equipo de vibraciones a 50m del ultimo taladro según secuencia de voladura.

2.8.2. Carga operante.

Es la cantidad de explosivo detonado pesada en kilogramos, teniendo en cuenta que, si la voladura fue ocasionada por más de un taladro la carga operante debe ser la suma de todos los taladros en un intervalo menor a 8 ms.

2.8.3. Velocidad Pico de Partícula.

La PPV debe tener gran cuidado al momento de ser seleccionada, debido a que los sensores registran tres velocidades de onda (vertical, radial y transversal) y cada una de estas tres componentes tendrá una PPV. La PPV que se considera es la PPVS que no es sino la sumatoria de las tres componentes del mayor valor, es decir, el pico puede ocurrir en cualesquiera de las tres direcciones.

Los límites permisibles para vibraciones son establecidos para que se puedan evitar los daños a las construcciones, taludes o efectos dañinos a la salud humana, producto de una operación minera.

2.9. Análisis de Datos

Es importante definir las variables que intervendrán en este modelo de predicción. Como se explicó anteriormente, la PPV depende de dos factores, la distancia en metros entre la carga explosiva y el punto de medición (D) y el peso de la carga explosiva en kilogramos (W). De este modo se realizó el cálculo de Distancia escalada para cada proyecto con registro de monitoreo de vibración con la siguiente formula.

$$De = \left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)$$

Donde:

De = Distancia escalada

D = Distancia a la cual se cuantifica(m.)

W = Carga operante, detonada en forma simultánea (Kg.)

2.9.1. Estimación de Vibración en Zona litológica

En la siguiente tabla se observa la aplicación de logaritmo a los datos obtenido en Campo en los registros de litología Dolerita Toquepala (Td)

Tabla 10

Logaritmo de Distancia Escalada y PPV / Zona Td

Proyecto	De	PPV (mm/s)	log [De] (x)	log [PPV] (y)
3325 212	1.70	91.01	0.23	1.96
3235 208	1.16	198.90	0.06	2.30
3250 227-229	1.78	129.00	0.25	2.11
3265 233-242	1.82	90.05	0.26	1.95
3280 236-237	1.68	97.64	0.23	1.99
3280 241	1.88	75.11	0.27	1.88
3280 241-242	1.67	112.70	0.22	2.05
3310 243-244	1.16	210.00	0.06	2.32
3325 208	1.22	224.80	0.09	2.35
3325 230	1.66	113.30	0.22	2.05
3340 190	1.42	231.10	0.15	2.36
3340 193-194	1.49	123.30	0.17	2.09
3235 157-193-194	1.59	110.20	0.20	2.04
3235 198-209-208	1.74	131.70	0.24	2.12
3235 209-207-201	1.74	132.40	0.24	2.12
3250 206	1.75	98.43	0.24	1.99
3250 217-218-219	1.23	173.00	0.09	2.24
3250 220-221	1.16	232.40	0.06	2.37
3250 225 226	1.72	97.81	0.24	1.99
3250 229	1.49	177.30	0.17	2.25
3250 230	1.36	140.50	0.13	2.15
3265 225	1.19	203.90	0.08	2.31
3265 227	1.41	214.60	0.15	2.33
3265 229	1.16	207.60	0.07	2.32
3265 229-243	1.59	131.40	0.20	2.12
3265 230-231	1.28	140.00	0.11	2.15
3265 231	1.86	79.51	0.27	1.90
3265 231-232	1.69	125.10	0.23	2.10
3265 232	1.75	147.00	0.24	2.17
3265 232-233	1.54	166.40	0.19	2.22
3265 243	1.57	200.30	0.20	2.30
3280 232-233	1.27	168.20	0.10	2.23
3280 238-239	1.64	100.30	0.22	2.00
3280 240	1.86	56.52	0.27	1.75
3280-224	1.14	212.10	0.06	2.33
3295 215	1.15	221.50	0.06	2.35
3295 217-218	1.11	221.50	0.05	2.35
3295 233-238-240	1.59	139.40	0.20	2.14
3295 237-238	1.21	187.70	0.08	2.27
3295 238	1.76	170.30	0.25	2.23
3295 239-238-240	1.64	100.90	0.22	2.00

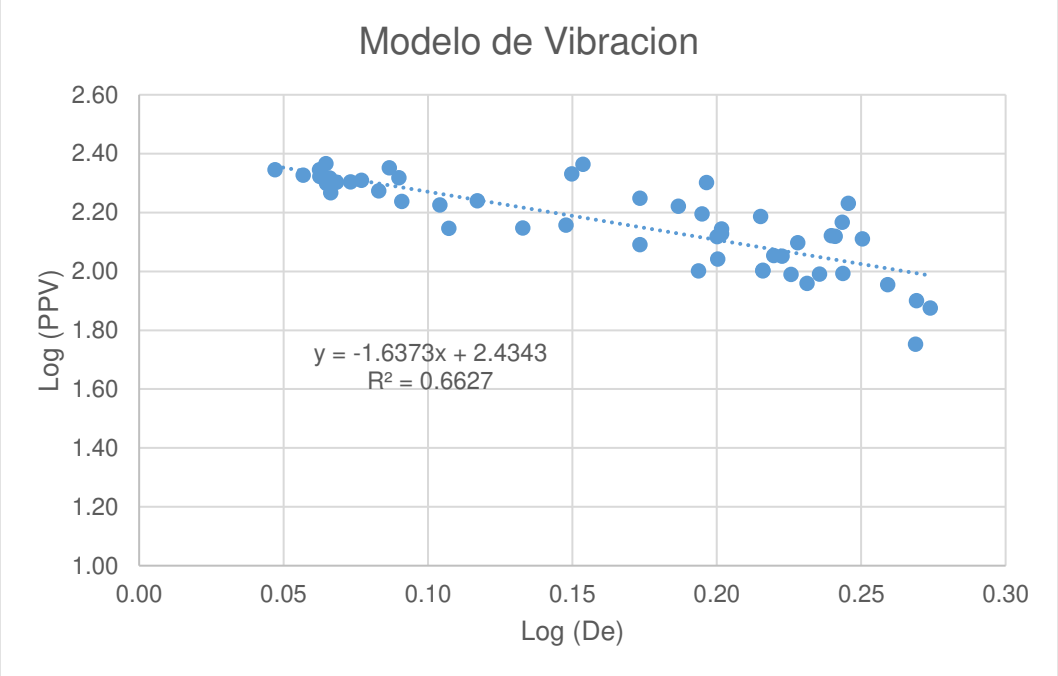
3310 244	1.17	200.80	0.07	2.30
3310 247	1.23	207.90	0.09	2.32
3310 257	1.31	173.60	0.12	2.24
3310 269	1.41	143.80	0.15	2.16
3310 271	1.59	134.20	0.20	2.13
3325 199	1.64	153.70	0.22	2.19
3325 201	1.16	184.80	0.07	2.27
3325 202	1.18	201.20	0.07	2.30
3325 213	1.57	157.00	0.19	2.20
3325 228-229	1.56	100.50	0.19	2.00
3340 191	1.16	203.60	0.06	2.31

Nota: Asistencia técnica EXSA – Toquepala

Seguido de aplicar logaritmo a los datos se deben ajustar los valores a una ecuación lineal como ya fue expresado de manera que se pueda generar una gráfica de dispersión con el fin de determinar los valores del factor controlado principalmente por el explosivo (K) y el factor de atenuación de la roca (α). La siguiente figura muestra el grafico de dispersión.

Figura 13

Dispersión al 50% de confiabilidad.



Nota: Asistencia técnica EXSA – Toquepala

Intuitivamente se puede explicar la relación que existe entre dichas variables. Si la distancia aumenta, la onda se atenúa y por ende PPV disminuye; si la distancia decrece ocurrirá lo contrario. Por otro lado, si la carga operante aumenta, la energía liberada será mayor y como consecuencia PPV también aumentará; si carga operante disminuye, lo opuesto se cumplirá. De acuerdo a la figura 9 se obtienen los valores de la siguiente ecuación lineal:

$$y = -1.6373x + 2.4343$$

Al ser remplazados en la ecuación se obtiene:

$$\text{Log (PPV)}=2{,}4343 - 1{,}6373 \text{ Log (De)}$$

Por lo tanto:

$$\text{Log K}= 2{,}4343$$

$$\text{K= Antilog (2,4343)} = 271.83$$

$$\alpha = -1{,}6373$$

$$PPV = 271.83 * \left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^{-1.6373}$$

Los valores hallados de K y α son promedios debido a que la ecuación de la línea corresponde a una línea de tendencia que determina una confiabilidad del 50%. En el modelo de campo lejano se obtienen diferentes valores para el coeficiente K, este depende de la confiabilidad del modelo la cual entre mayor sea el porcentaje de confiabilidad menor serán los datos que superen los límites de la predicción.

2.9.2. Ajuste en el modelo de Estimación de Vibración

El ajuste en el modelo es realizado principalmente cuando se desean hacer predicciones de los niveles máximos de vibración, debido a que si el modelo es correcto las mediciones que se registren deberán estar por debajo del valor predicho.

Debido a que se hace preferible un modelo con alta confiabilidad, pero teniendo en cuenta que no es adecuada una sobreestimación de la carga máxima que se puede utilizar se recomienda que sea del 80% al 95%. La manera de ajustar el modelo es utilizando la Ecuación siguiente solo para el valor del coeficiente K.

$$Ka = Antilog\ [Log\ K + Inv.Distr.Norm.Stand\ (X\%) * E(t)]$$

Donde:

Ka	= Valor ajustado
Inv.Distr.Norm.Stand(x%)	= Inverso de la Distribución Normal Estándar del porcentaje de medición.
E(t)	= Error típico de todas las mediciones que intervienen.

Al remplazar la ecuación por los valores calculados se obtiene lo siguiente:

$$Ka=Antilog\ (2{,}4343+(90\%)*0{,}08800)$$

$$Ka= 326.2118$$

Por lo tanto, manteniéndose el valor de α y asimismo el Modelo de Vibraciones a un 90% de confiabilidad de los datos, estará dado por la siguiente ecuación:

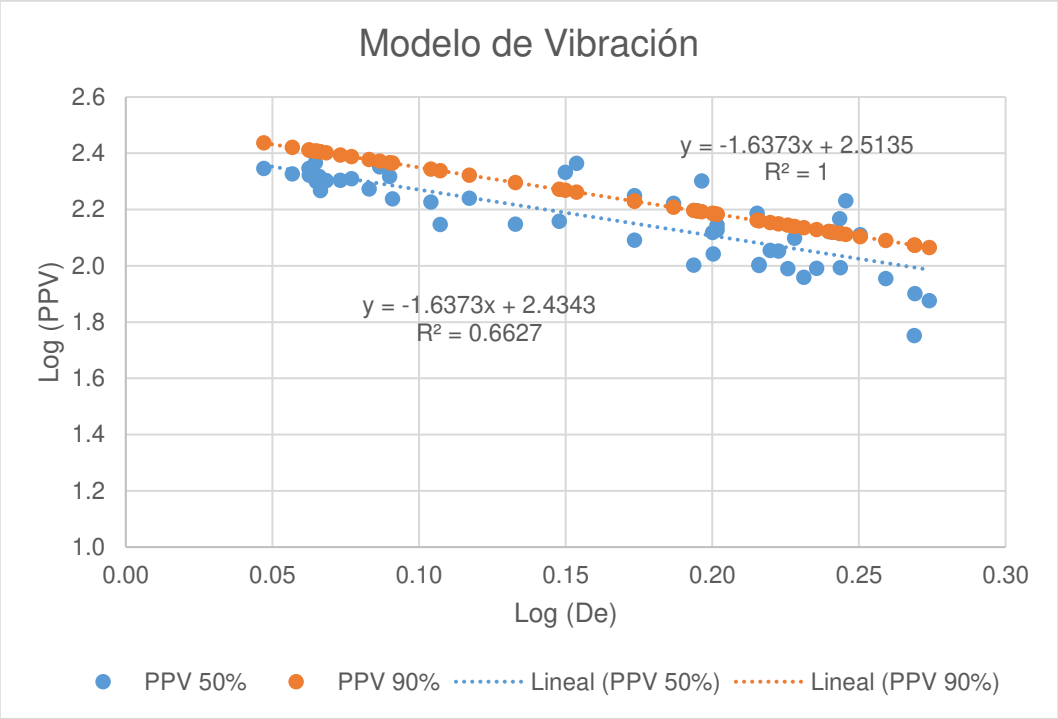
$$PPV = 326.2118 * \left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^{-1.6373}$$

Donde la ecuación de la línea remplazando el valor de K ajustado estará dada por:

$$y = -1{,}6373x + 2{,}5135$$

Figura 14

Modelo de campo lejano con confiabilidad de 50% y 90%



Nota: Asistencia técnica EXSA – Toquepala

Para confirmar la confiabilidad de los valores de predicción de los niveles de vibración al 50% y 90% de confiabilidad es necesario generar una nueva Tabla de datos (Tabla 11), la cual compara los valores de predicción junto con los valores monitoreados.

Tabla 11

Confirmación de valores de predicción al 50% y 90%

				50%	90%
			k	271.831637	326.211888
Proyecto	**De**	**PPV (mm/s)**	**α**	**-1.6373**	**-1.6373**
3325 212	1.70	91.01		113.69	136.44
3235 208	1.16	198.90		212.82	255.40
3250 227-229	1.78	129.00		105.75	126.90
3265 233-242	1.82	90.05		102.33	122.81
3280 236-237	1.68	97.64		116.06	139.28
3280 241	1.88	75.11		96.77	116.13
3280 241-242	1.67	112.70		117.46	140.95
3310 243-244	1.16	210.00		214.70	257.65

3325 208	1.22	224.80	196.13	235.37
3325 230	1.66	113.30	118.74	142.50
3340 190	1.42	231.10	152.30	182.77
3340 193-194	1.49	123.30	141.38	169.67
3235 157-193-194	1.59	110.20	127.76	153.32
3235 198-209-208	1.74	131.70	109.57	131.49
3235 209-207-201	1.74	132.40	110.12	132.15
3250 206	1.75	98.43	108.48	130.18
3250 217-218-219	1.23	173.00	192.97	231.57
3250 220-221	1.16	232.40	213.01	255.62
3250 225 226	1.72	97.81	111.85	134.23
3250 229	1.49	177.30	141.38	169.67
3250 230	1.36	140.50	164.74	197.70
3265 225	1.19	203.90	203.38	244.06
3265 227	1.41	214.60	154.52	185.44
3265 229	1.16	207.60	211.97	254.38
3265 229-243	1.59	131.40	127.86	153.44
3265 230-231	1.28	140.00	181.47	217.77
3265 231	1.86	79.51	98.56	118.28
3265 231-232	1.69	125.10	115.09	138.12
3265 232	1.75	147.00	108.59	130.32
3265 232-233	1.54	166.40	134.45	161.35
3265 243	1.57	200.30	129.65	155.58
3280 232-233	1.27	168.20	183.60	220.33
3280 238-239	1.64	100.30	120.45	144.55
3280 240	1.86	56.52	98.67	118.41
3280-224	1.14	212.10	219.47	263.38
3295 215	1.15	221.50	214.79	257.76
3295 217-218	1.11	221.50	227.65	273.19
3295 233-238-240	1.59	139.40	127.13	152.56
3295 237-238	1.21	187.70	198.81	238.58
3295 238	1.76	170.30	107.72	129.27
3295 239-238-240	1.64	100.90	120.45	144.55
3310 244	1.17	200.80	210.09	252.12
3310 247	1.23	207.90	193.64	232.38
3310 257	1.31	173.60	174.82	209.79
3310 269	1.41	143.80	155.73	186.89
3310 271	1.59	134.20	127.13	152.56
3325 199	1.64	153.70	120.77	144.93
3325 201	1.16	184.80	211.69	254.04
3325 202	1.18	201.20	206.31	247.59
3325 213	1.57	157.00	130.38	156.47
3325 228-229	1.56	100.50	131.01	157.22
3340 191	1.16	203.60	212.82	255.40

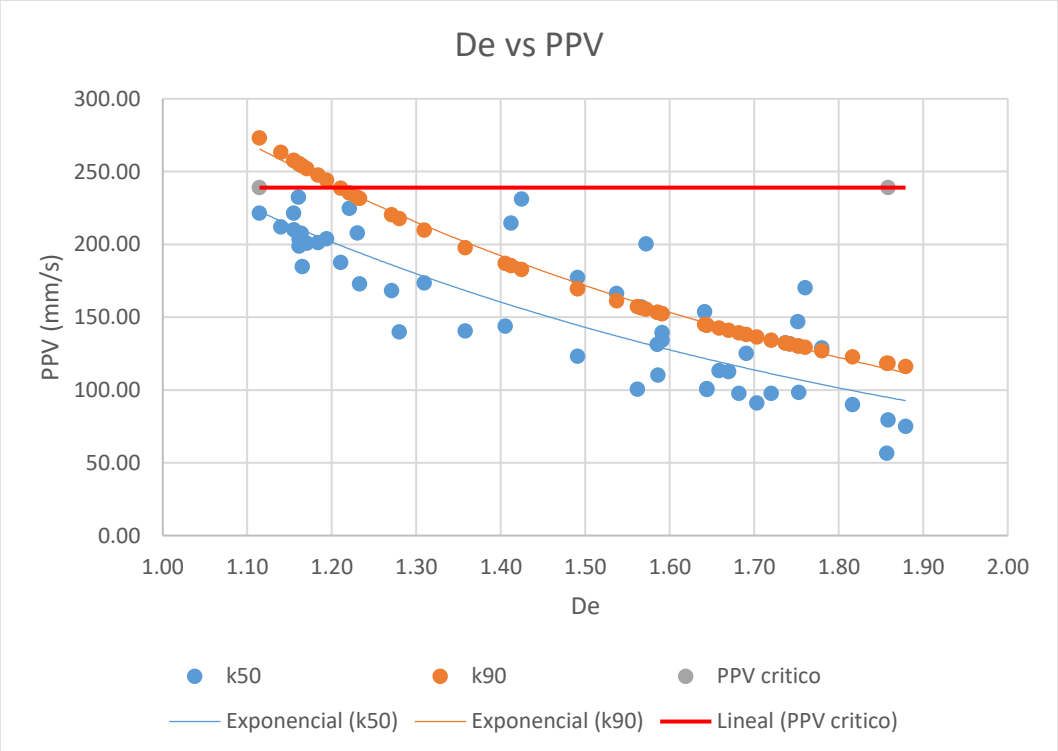
Nota: Asistencia técnica EXSA – Toquepala

Claramente se aprecia que los datos remarcados de color azul en la tabla anterior son los datos de predicción que estuvieron por debajo de los datos medidos en campo, indicando que se pudo presentar un error en la medición o simplemente que se encuentran en el primer caso dentro del 50% no tomado en cuenta o para el segundo caso dentro del 10% restante.

Teniendo en cuenta los datos anteriores se desarrolla la figura 11 la cual replantea las líneas de tendencia por unas líneas de tendencia exponenciales respecto al PPV critico 239.10 mm/s de la litología Dolerita Toquepala (Td)

Figura 15

PPV al 50 y 90% de confiabilidad vs PPV critico



Nota: Asistencia técnica EXSA – Toquepala

En la Tabla 12, se observa los valores de carga operante más comunes, de los cuales al seleccionar un valor de carga operante que se considera detonar, se obtiene una predicción de la velocidad pico de la partícula.

Tabla 12

Modelo de predicción de vibración al 90% de confiabilidad

Carga Operante (Kg)	Distancia de Monitoreo (m)	Estimación de PPV (mm/s)
400	50	72.77
450	50	80.14
500	50	87.36
550	50	94.44
525	50	90.91
630	50	105.55
735	50	119.75
840	50	133.58
945	50	147.10
1050	50	160.35
1155	50	173.36
1260	50	186.16
1365	50	198.77
1470	50	211.20
1575	50	223.48
1680	50	235.60
1785	50	247.59

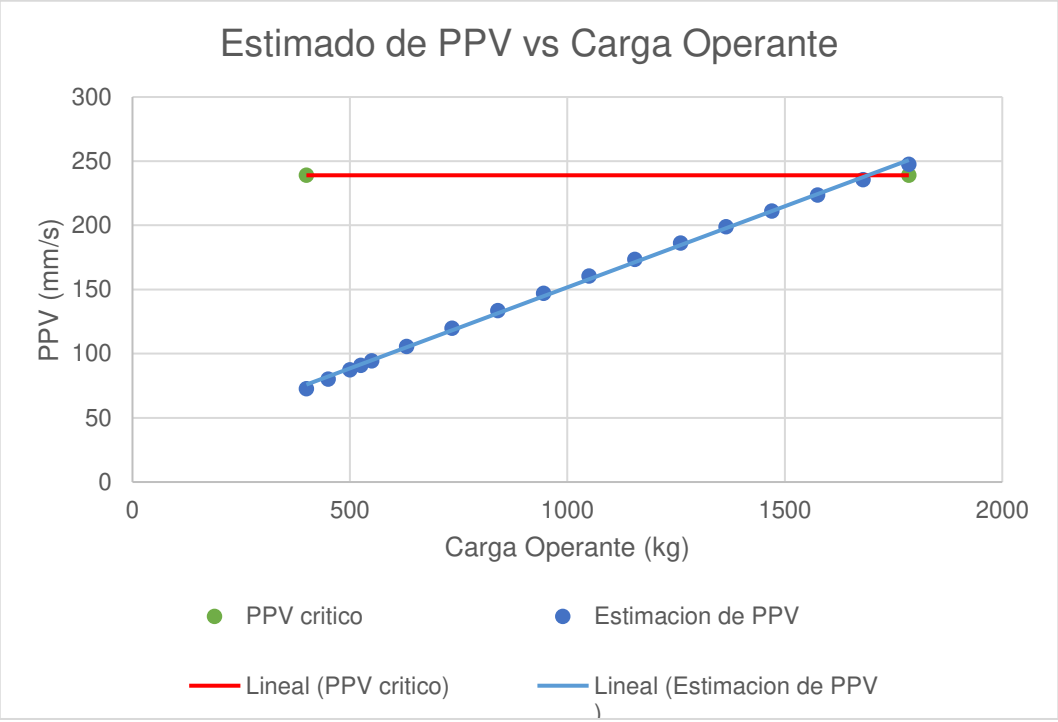
Nota: Asistencia técnica EXSA – Toquepala

Se realiza la figura 16, la cual fue elaborada con la finalidad de poder apreciar la carga que se puede utilizar teniendo el PPV crítico para la litología Dolerita Toquepala que evita la presencia de daños hacia el talud.

La franja roja plasma la limitación por PPVs Critico de la litología Td con un valor de 239.01mm/s.

Figura 16

Estimación de PPV vs Carga Operante



Nota: Asistencia técnica EXSA – Toquepala

III. VIABILIDAD DEL PROYECTO

El desarrollo del trabajo presentado cumple con las características y condiciones teóricas y técnicas operativas, recopilando información de varios autores y experiencias de profesionales, técnicos que trabajaron en su ejecución, logrando utilizar un modelo predictivo para monitoreo de vibraciones producido por voladura, que contribuya a la toma de decisiones para el diseño de carga explosiva en voladura.

IV. PRODUCTO

4.1. Datos generales

Como parte del modelo de predicción de vibraciones, se realizó el siguiente ensayo en el proyecto a mención, cuyos parámetros se encuentran descritos a continuación.

Tabla 13

Datos de Proyecto

Valor	Descripción
Nivel	3340
Proyecto	192-193-213
Pala	8
Perforadora	07,12 y 13
Taladros disparados	405
Presencia de Agua	0%
Back Up	0
Malla	7 x 7; 9 x 9; 10 x 10
Densidad de Roca	2.6 g/cc
Factor de Potencia	0.33 Kg/TN
Explosivo	ME73
Densidad Expl. Inic.	1.38 g/cc
Densidad Expl. Final	1.15 g/cc

Nota: Asistencia técnica EXSA – Toquepala

Con la finalidad de obtener mejores resultados en la voladura se realizó el diseño de carga en la litología Td, como se muestra en la figura 8, donde se contemplaría 913 Kg de ME73 para los taladros de producción. Asimismo, se verifico según la tabla 12, que con este diseño de carga no se supere el valor PPV critico de 239.01 mm/s.

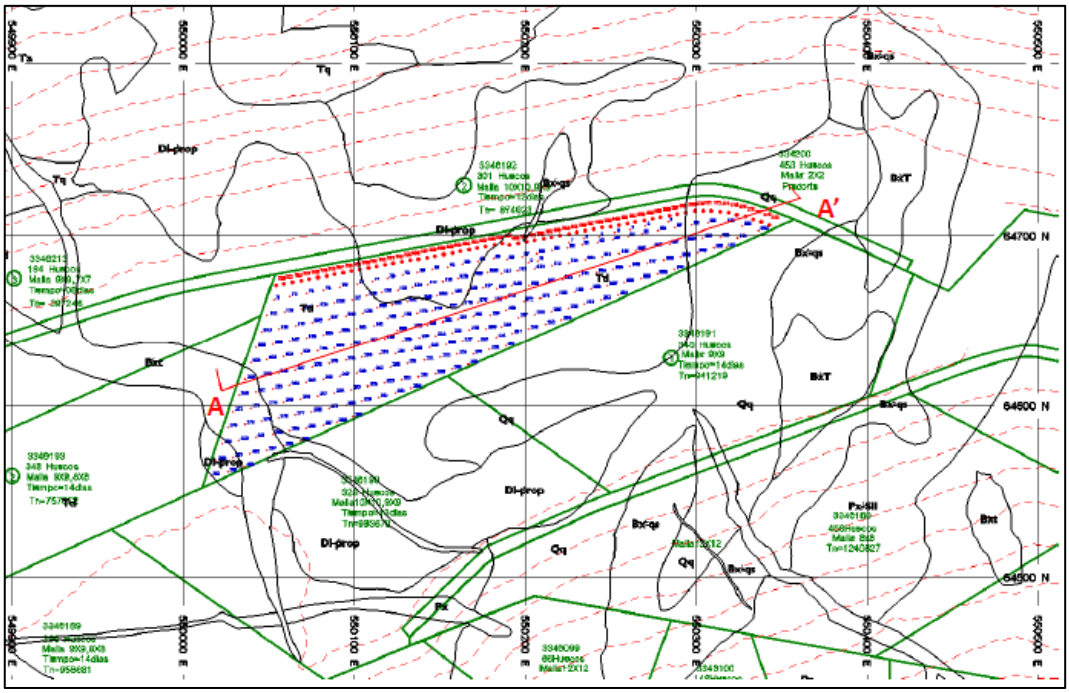
4.2. Plano Geológico.

Para los fines de predicción de vibración se tomó como referencia los sectores litológicos con mayor porcentaje de influencia en el proyecto a disparar.

De este modo en el plano geológico (Figura 17) y sección geológica (Figura 18) se observa una mayor presencia litológica de Dolerita Toquepala (Td), seguida por Diorita propílica (Di prop), Quarzo quellaveco (Qq) y Brecha Turmalina (Bxt).

Figura 17

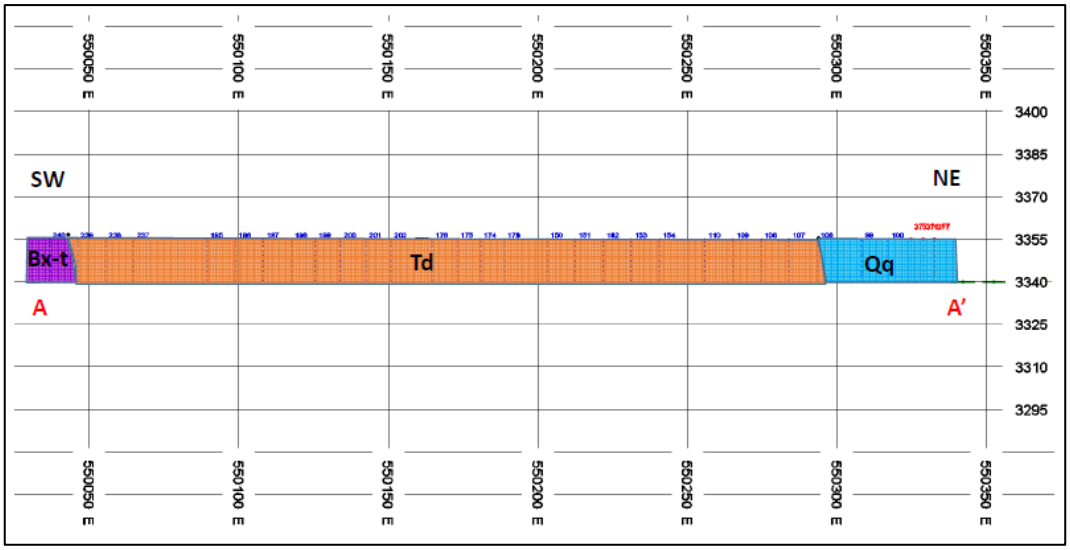
Plano geológico



Nota: Área Geología SPCC – Toquepala

Figura 18

Sección Geológica



Nota: Área Geología SPCC – Toquepala

4.3. Calculo y verificación.

Partiendo del diseño preliminar expuesto, donde los valores de K y alpha se reemplazaron por 326.21 y -1.6373 respectivamente, se realizó la aplicación de los mismos en el modelo predictivo de vibraciones.

$$PPV = 326.21 * \left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^{-1.6373}$$

Donde:

PPV = Velocidad pico partícula (mm/s)

D = Distancia a la cual se cuantifica(m.)

W = Carga operante, detonada en forma simultánea (Kg.)

Para obtener la carga operante, es necesario conocer la carga real utilizada en campo de acuerdo a los registros de carguío proporcionados por operadores de campo.

En la siguiente tabla se muestra los registros con mayor carga operante del proyecto de voladura.

Tabla 14

Registro de carguío

BH-ID	Longitud Taladro (m)	Tipo de Taladro	Alt. Taco Promedio (m)	Mezcla Explosiva (kg)
96	**16.5**	C	7.9	903
97	**16.5**	C	8.2	872
98	**16.5**	C	8.2	872
99	**17**	C	8	945
100	**17**	C	8.3	914
101	**17**	C	8.1	935
102	**16.5**	C	8.1	882
103	**16**	P	7.1	935
104	**16.8**	P	7.3	998
105	**16.5**	P	7.1	987
106	**16.8**	P	7.3	998
107	**15**	P	6.8	861
108	**16.5**	P	7.2	977
109	**16.5**	P	7	998
110	**16.8**	P	7.3	998

111	**16**	P	7.2	924
112	**16.5**	P	7	998
113	**16.3**	P	7	977
114	**16.5**	P	7.3	966
115	**16**	P	6.9	956
116	**16.5**	P	7.1	987
117	**16**	P	7	945
118	**16.2**	P	7.4	924
155	**16.5**	P	7.3	966
156	**16**	P	6.9	956
157	**16.5**	P	7.1	987
158	**16**	P	7	945
159	**16.5**	P	7	998
160	**16.5**	P	7.2	977
161	**16**	P	6.9	956
162	**16.5**	P	7.1	987
163	**16**	P	7	945
164	**16.3**	P	7.2	956
165	**16.5**	P	7.3	966
166	**16**	P	6.9	956
167	**16.5**	P	7.1	987
168	**16**	P	7	945
169	**16.5**	P	7.2	977
170	**17**	P	7.5	998
171	**16.2**	P	7	966
172	**16.4**	P	7	987

Nota: Asistencia técnica EXSA – Toquepala

Con el registro de carguío detallado en la tabla 14, se utilizó la carga máxima de mezcla explosiva, como carga operante utilizada por taladro para obtener los kilogramos de explosivo, como resultado se identifica 998 Kg como carga operante.

Realizado el control de carguío de camiones por taladro en campo y habiendo obtenido 998 kg como carga operante, se realiza el cálculo de PPV reemplazando los datos en la fórmula:

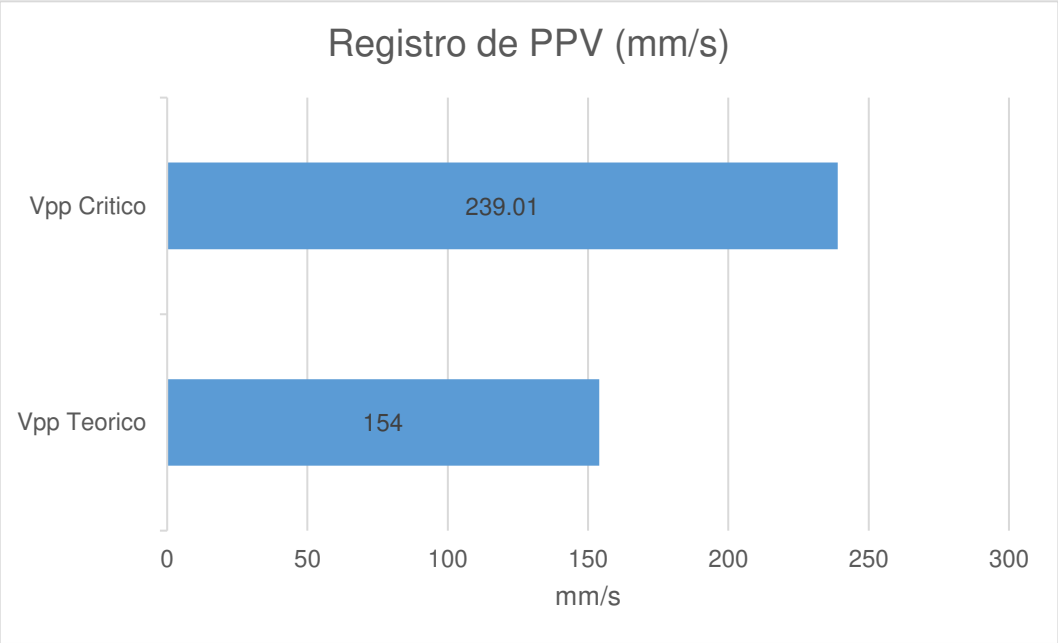
$$PPV = 326.21 * \left(\frac{50}{998^{1/2}}\right)^{-1.6373}$$

$$\boldsymbol{PPV = 154\ mm/s}$$

El valor de PPV teórico de 154 mm/s se encuentra por debajo del Límite permisible en la litología Dolerita Toquepala (239.01 mm/s), dato identificado por el área de Geotecnia expuesto en la tabla 7.

Figura 19

Registro de PPV



Nota: Asistencia técnica EXSA – Toquepala

Culminado el proceso de voladura, se realizó la verificación del PPV teórico junto al Registro de Monitoreo de vibración, donde el PPV suma registrado asciende a 147.7 mm/s. En la tabla 15 se identifican los resultados obtenidos por el equipo de monitoreo de vibraciones. Para mayor detalle se precisa el registro de monitoreo de vibración en Anexo 4.

Tabla 15

Registro de Vibración en proyecto de voladura.

	Trans.	Vert.	Long.	Unid.
PPV	92.73	143.1	65.36	mm/s
Frecuencia ZC	28	20	22	Hz
Tiempo	4.196	4.212	4.200	s
Aceleración máxima	3.344	7.521	2.282	g
Desplazamiento pico	0.837	1.628	0.577	mm
Comprobación del sensor	Aprobado	Aprobado	Aprobado	

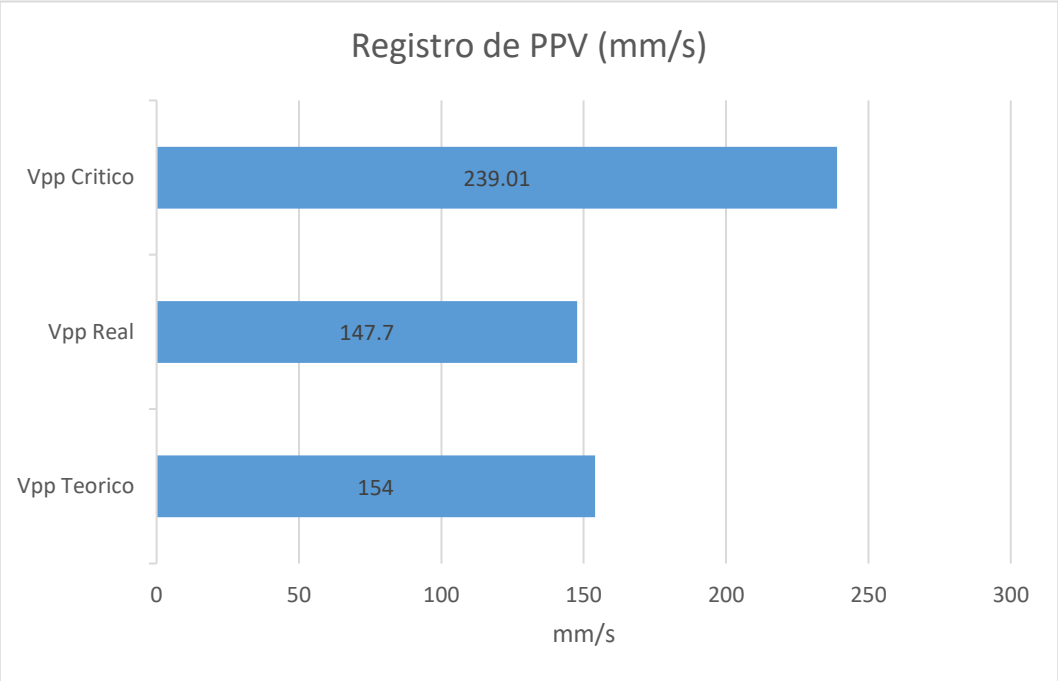
Frecuencia	6.9	7.5	7.1	Hz
Relación de sobregiro	4.4	3.9	4.4	
PPV Suma	147.7 mm/s en 4.212 s			

Nota: Asistencia técnica EXSA – Toquepala

Con el fin de verificar la eficacia de la aplicación del modelo predictivo de vibración se realiza el siguiente comparativo:

Figura 20

Comparación de Registros de PPV.



Nota: Asistencia técnica EXSA – Toquepala

Como resultado de la identificación del registro se tiene una diferencia de 6.3 mm/s entre el PPV real y el PPV Teórico, diferencia que es mínima ya que representa un 4% con respecto al Registro teórico de vibración.

4.4. Fragmentación

En cuanto al frente de minado de Pala 08 (Figura 21), se tomaron las fotografías para realizar el análisis de fragmentación y su posterior análisis en software Wip frag, obteniéndose un P80 de 17 cm. En la figura 22 se observa la curva resultado de Software para mayor detalle.

Figura 21

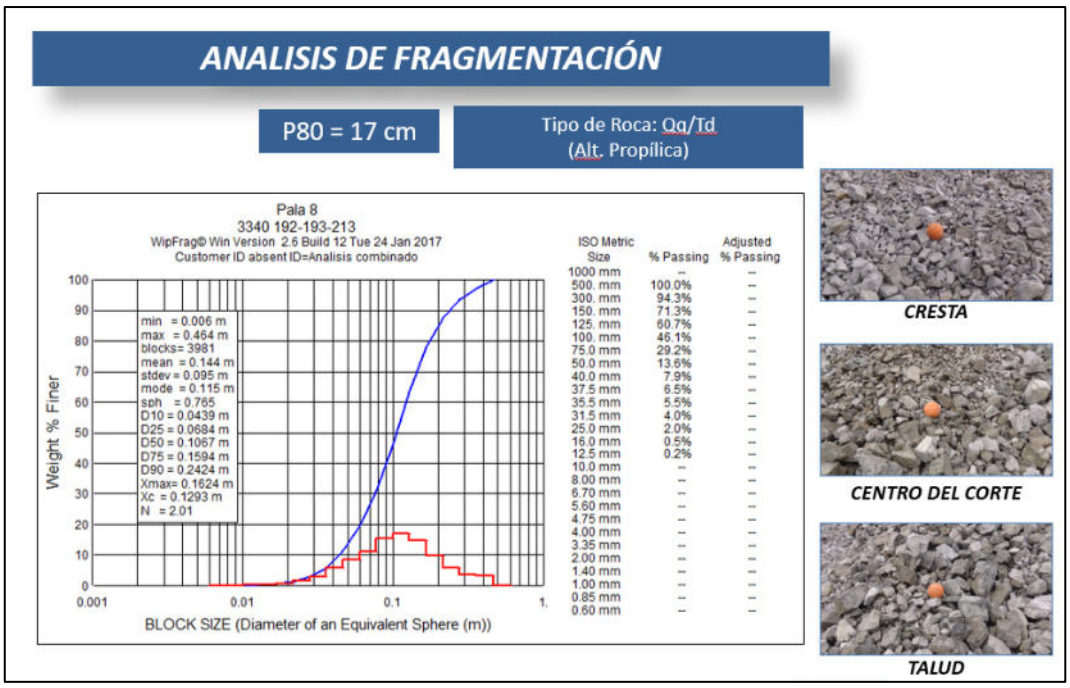
Frente de Minado - Dolerita Toquepala



Nota: Asistencia Técnica EXSA – Toquepala

Figura 22

Análisis de Fragmentación – Dolerita Toquepala



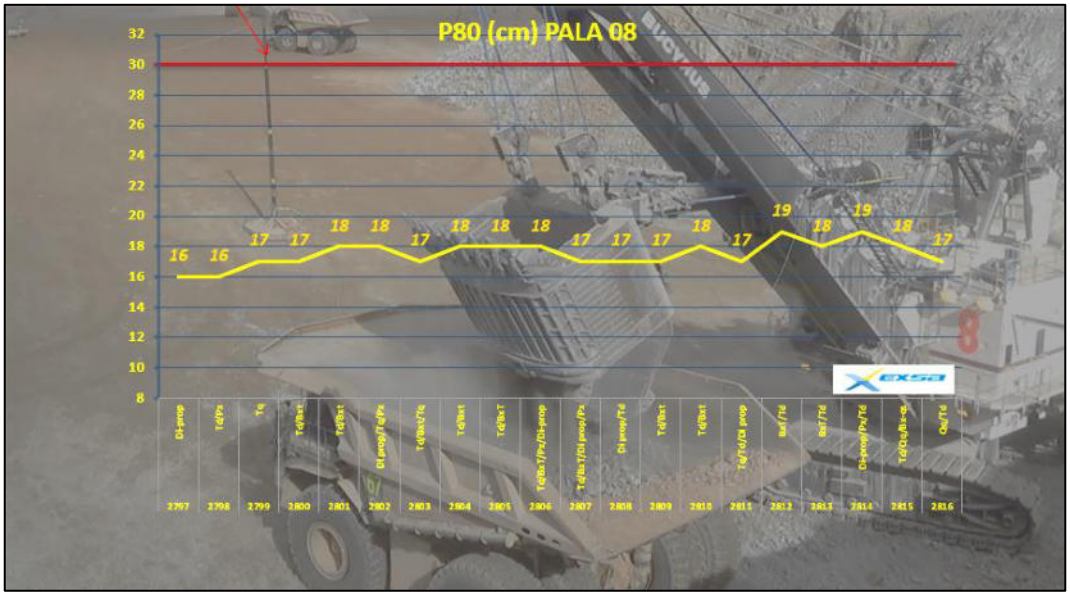
Nota: Asistencia Técnica EXSA – Toquepala

Según el análisis de fragmentación realizado con software Wip frag, se identificó 3981 blocks en las fotografías, un P80 de 17 cm de fragmentación, que se encuentra por debajo del límite permitido en la zona. Asimismo, la Media de 14.4 cm y la moda de 11.5 cm.

Se verifico también el historial de fragmentación realizado en la zona, comparándolo con la fragmentación actual e identificándose un descenso en P80 de 18 a 17cm (Figura 23).

Figura 23

Historial de fragmentación en pala 08



Nota: Asistencia Técnica EXSA – Toquepala

4.5. Resultados:

- Al identificar un coeficiente de correlación (R^2) superior a 0.6, nos indica que el terreno donde se está llevando a cabo las mediciones es constante sin gran consideración a irregularidades.
- De acuerdo al análisis de los registros, se concluye los constantes de atenuación para la zona Dolerita Toquepala (Td) son α: -1.6373, k: 326.2118, con una calidad de ajuste de 0.90
- Teóricamente podemos mencionar, la ecuación de la pendiente de vibración varía entre 50mm/s y 250 mm/s. Valores fuera de este rango deberían ser considerados no válidos. Por tanto, los valores resultantes del análisis se encuentran en el límite del rango valido.
- En el sector de Dolerita Toquepala (Td) De acuerdo al resultado de línea de tendencia de la evaluación, podemos mencionar que hay una relación, por cada 100Kg de ME Quantex se tiene un incremento promedio de velocidad pico partícula de 12 mm/s, el cual indica a más carga el resultado de vibraciones superaría el valor límite de vibraciones (PPV de Control y/o PPC critico).
- Se identificó como carga operante critica 1700kg de Mezcla explosiva, para no superar el límite de PPV critico de 239.01mm/s en la zona litológica Dolerita Toquepala.
- En el sector de litología Td se mantendrá la mezcla explosiva ME73 con densidad final de explosivo de 1.15 g/cc.
- Realizando el cambio de configuración de 808 kg a 913 kg de carga por taladro, la fragmentación (P80) en el frente de minado con litología Dolerita Toquepala se redujo de 18 cm a 17 cm.

V. RECOMENDACIONES

- La instalación de equipo para el monitoreo de vibraciones debe ser realizado por personal entrenado y experimentado para recabar información confiable y tomar decisiones correctamente.
- Se recomienda realizar un seguimiento al diseño y estándar propuesto, monitoreando la condición e ir actualizando los parámetros en función de los resultados que se van obteniendo y los avances de la mina. En el caso que el diseño propuesto se adecúe a lo estudiado, podría indicar que algunos tipos de roca similares presentan comportamientos muy distintos según la profundidad, por lo que requerirían una evaluación similar.
- El modelo predictivo se desarrolló en base a unas características específicas, por lo cual, si se realizan voladuras con un explosivo diferente, el factor de k no sería el mismo, al igual que si las voladuras se realizan en una zona diferente para lo cual fue desarrollada el factor de atenuación de la roca (α) cambiaría su valor. Por lo cual se recomienda que si se va a realizar algún cambio ya expresado se debe realizar un monitoreo previo con las nuevas especificaciones y validar nuevamente el modelo.
- Para la instalación del equipo de monitoreo se debe identificar previamente la zona, ya que en los resultados medidos de PPV es de influencia el comportamiento del macizo rocoso a lo largo del recorrido de la onda desde el punto de detonación hasta la zona del geófono, esto debido a la atenuación de su velocidad ya sea el medio de transporte; roca, arena, grava, etc.
- Se debe usar el método de la velocidad pico partícula (PPV), para evaluar y cuantificar las vibraciones inducidas por la voladura de rocas, porque este método ha demostrado dar resultados confiables, para evaluar los diferentes criterios de daños postulados por varios investigadores.

VI. REFERENCIAS

Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de Enaex (2005). *Manual de Monitoreo de Vibraciones generadas por Voladuras, Análisis y Modelamiento*. Chile.

Enaex, S. A. (2010). *Manual de tronadura*. Santiago de Chile, Chile. https://www.academia.edu/7267880/Manual_de_Tronadura_ENAEX

International Society of Explosives Engineers. 17va edición (2008). *Manual del especialista en voladura*; Cleveland, Ohio USA. https://www.academia.edu/5904908/Manual_del_Especialista_en_Voladura

Thompson, W. (1965). *Vibration theory and applications*. California USA. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=zciPgBeYafsC&oi=fnd&pg=PP1&dq=related:9ytrIGQEslcJ:scholar.google.com/&ots=1ZYUvhhAss&sig=bJpE3mAtzsZEcK5KLLFLjqIkwM0#v=onepage&q&f=false

Devine, J. F. (1966). Avoiding damage to residences from blasting vibrations. Highway Research Record. https://trid.trb.org/view/120976

Instantel. (2015). *Manual de Operador Blastware*. Ottawa, Ontario, Canadá. https://www.geo-instruments.com/wp-content/uploads/blastware-manual.pdf

Instantel. (2013). *Manual de Operador Minimate Plus*. Ottawa, Ontario, Cánada.. https://www.instantel.com/file/125/download?token=8FFROQPG

Southern Perú Copper Corporation: *Informes Geológicos de La Mina Toquepala – SPCC.* Toquepala, Peru

Southern Perú Copper Corporation: *Informes Geotécnicos de La Mina Toquepala – SPCC.* Toquepala, Peru

Wikipedia. (24 de Setiembre 2020) *Onda sísmica*, https://es.wikipedia.org/wiki/Onda_s%C3%ADsmica

Wikipedia. (31 de Agosto 2019) *Mina de Toquepala*, https://es.wikipedia.org/wiki/Mina_de_Toquepala

Cienciasfera. (20 de Setiembre 2020) *Ondas Sismicas* http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/21_ondas_ssmicas.html

Gagliuffi, P., Vera, M. (2018) *Caracterización petromineralógica de los yacimientos Toquepala y Cuajone*. Lima Peru

Acosta, J., Rodriguez, I., Huanacuni, D., Valencia, M., Flores, A., *Memoria Sobre la Geología Económica de La Región Tacna.* Lima Peru https://www.ingemmet.gob.pe/documents/73138/468768/2011_GE33_Memoria_Geologia_Economica_Tacna.pdf/58195ee2-d043-448d-b00a-e4013acb2ed9#:~:text=La%20publicaci%C3%B3n%20se%20ha%20denominado,cient%C3%ADfica%20e%20interesados%2C%20la%20informaci%C3%B3n

Gutierrez, D., & Wilfredo, J. (2018). *Reducción del daño inducido al macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones por voladuras en el Bypass 179. Compañía Minera Kolpa SA.* http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/8287

Ancca Quispe, W. (2017). *Modelamiento del parámetro velocidad Pico Partícula, a partir del monitoreo de vibraciones por voladura para la reducción del daño al macizo rocoso, usando Registros Sísmicos-Mina Untuca.* http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2810

Reátegui Ordoñez, F. C. P. (2017). *Diseño de los parámetros de voladura aplicando el modelo de Kuz Ram y la teoría de daño por vibraciones en roca, Inti Raymi-Bolivia.* http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5706

Orihuela Castillo, S. M., & Dapello Vizcarra, J. R. (2011) *Diseño de un modelo predictivo a partir de un estudio de vibraciones en una voladura en una mina modelo.* http://hdl.handle.net/20.500.12404/215

Cano Mucha, J. C. (2019) *Estudio de vibraciones para la selección de explosivo Óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. Filial de Hochschild.* http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/1003

Peña Vizarreta, Y. J. (2014). *Modelamiento, monitoreo y control de las vibraciones para evitar daños inducidos por la voladura de rocas de una operación minera superficial.* http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1125

Valdivia Cuevas, A. L. (2017). *Diseño De Modelo Predictivo De Vibración Ppv En La Voladura Del Tajo Isabelita–Mina El Toro Para Evitar Riesgos En La Población Cercana.* http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/9576

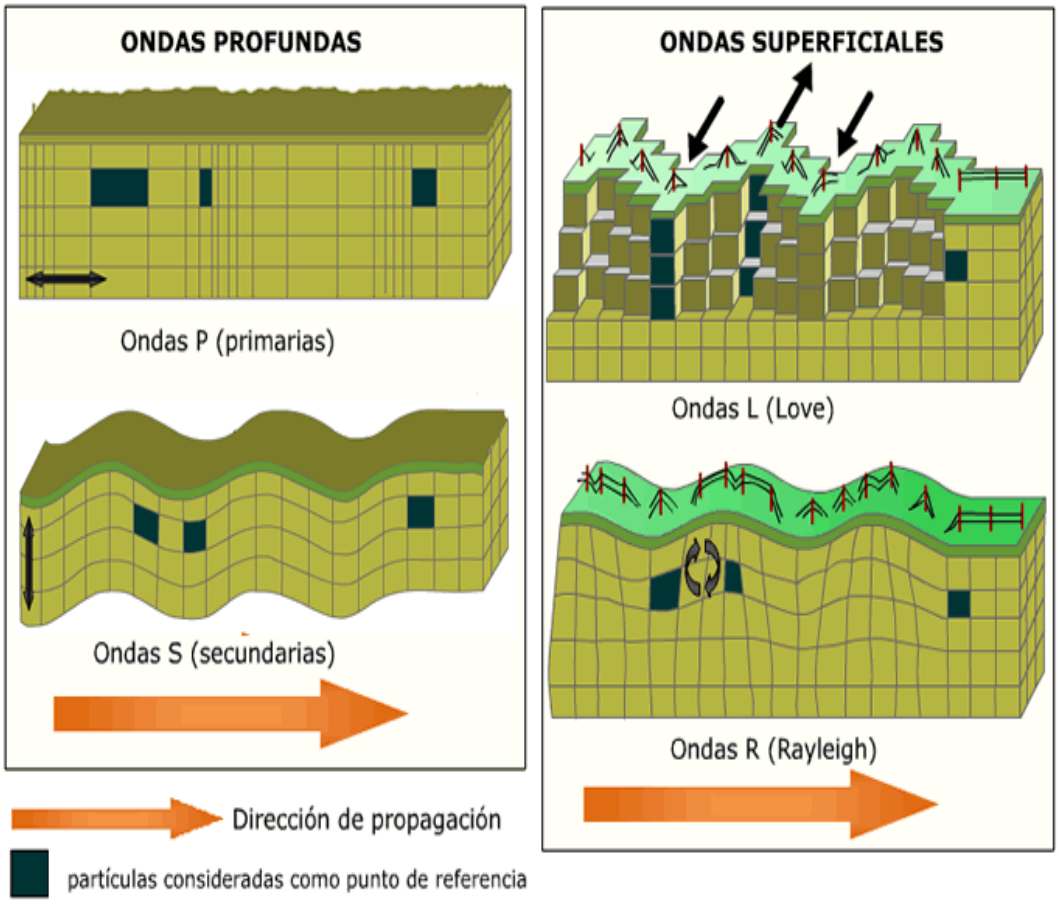
López Jimeno, C. (2003). *Manual de perforación y voladura de rocas. España: Instituto Tecnológico Geo Minero de España*. https://es.scribd.com/document/209393479/ ManuaL-de-Perforacion-y-Voladura-de-Rocas-LOPEZJIMENO

VII. ANEXOS

ANEXO 1

Figura 24

Clasificación de Ondas



Nota: https://www.Cienciasfera.com

ANEXO 2

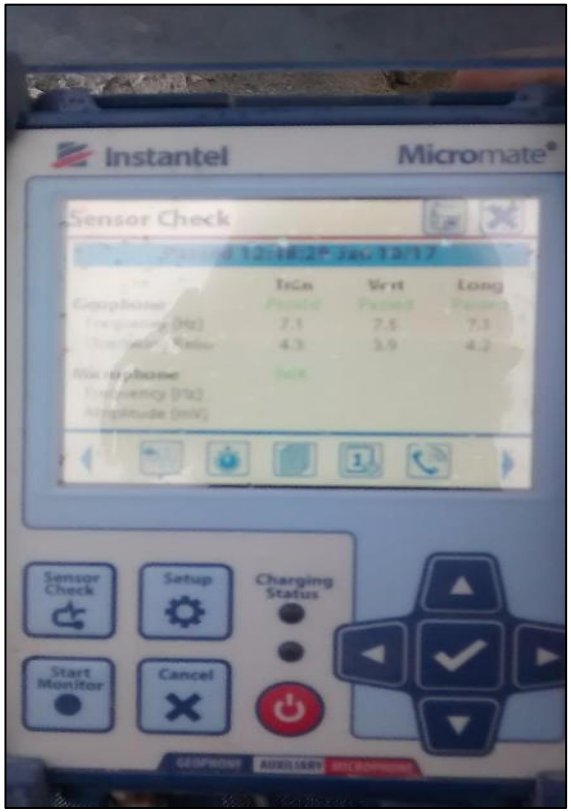
Figura 25

Instalación de geófono direccionado hacia voladura.



Figura 26

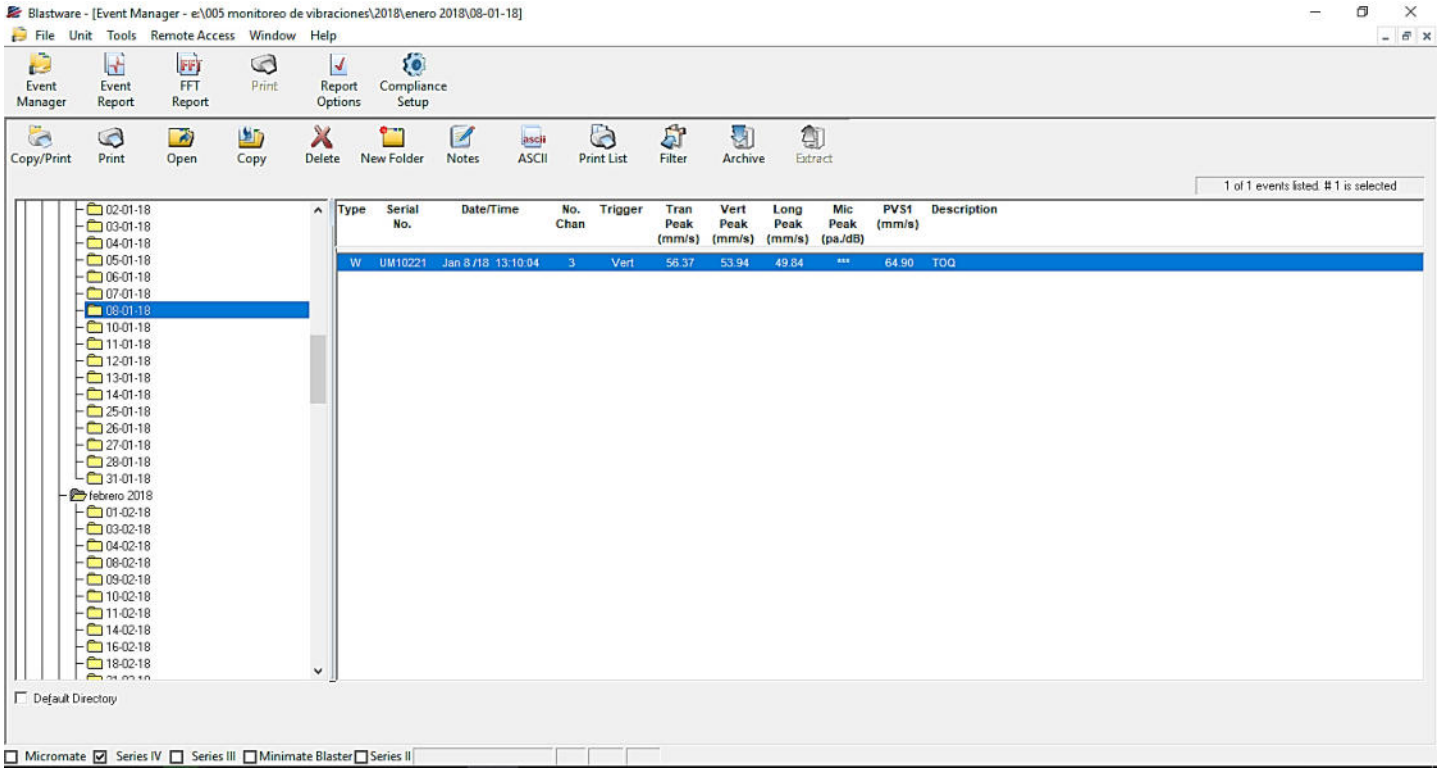
Test de sensores.



ANEXO 3

Figura 27

Software Blastware IV - Registros (software Version 4.3)

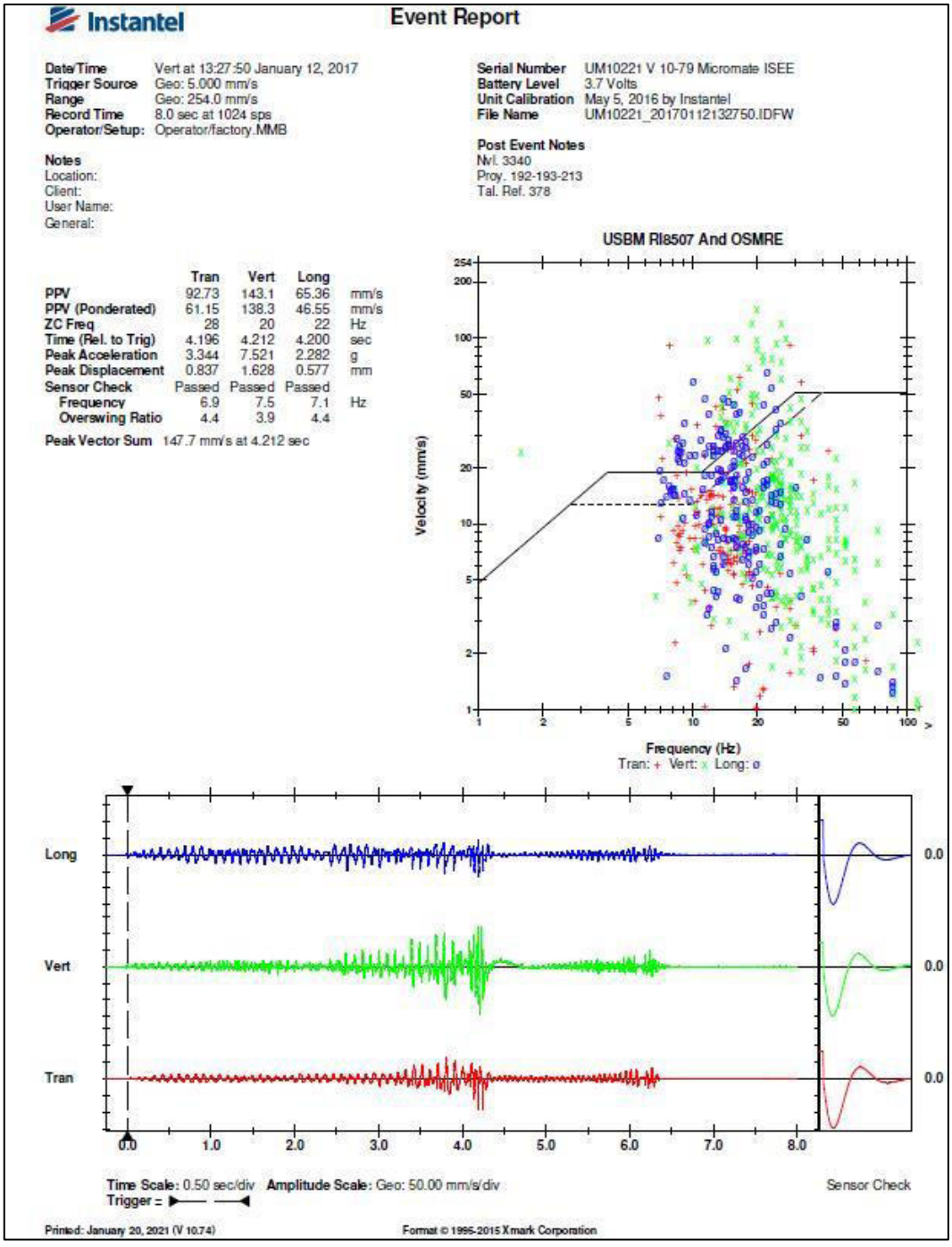


Nota: Enumeración de todos los eventos registrados en software Blastware identificados por fecha.

ANEXO 4

Figura 28

Software Blastware IV - Reporte (software Version 4.3)



Nota: Reporte de Eventos, Proyecto 3340 192-193, PPV registrado= 147.7 mm/s