

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**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**

Tesis para optar por el Título de Ingeniero de Minas, que presentan los bachilleres:

PAUL ANDRÉ CORNEJO CHACÓN

PAUL ANDRÉ HUAMÁN RIVAS

ASESOR: Mendieta Britto, Luis Alberto

Lima, Diciembre de 2020

Resumen de Tesis

El uso de explosivos en procesos de voladura en minas libera energía en forma de vibraciones, que no necesariamente ayudan en la fragmentación de la roca, sino que originan una perturbación de estructuras cercanas a la fuente de la explosión, principalmente a través de ondas sísmicas en todas las direcciones. Durante la vida de una operación minera a tajo abierto, la mayoría de sus componentes como el tajo principal, las plataformas de descarga y de lixiviación deben alcanzar una estabilidad física, especialmente cuando inicia su proceso de cierre. La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un modelo de predicción de las vibraciones inducidas utilizando datos históricos de monitoreo en una mina a cielo abierto ubicada en la sierra peruana, esto con el fin de proteger los taludes de diseño final (Campo Medio) y las edificaciones sensibles de los poblados más cercanos (Campo Lejano).

Ambos modelos están basados en la teoría de Devine de la distancia escalada de raíz cuadrada (SRSD) para predecir la velocidad máxima de partículas (VPP). Las distancias de monitoreo en campo medio oscilan entre 30 y 150 metros, las estructuras en este intervalo deben ser atendidas por los criterios de falla de Cameron McKenzie, que se basan en las propiedades geomecánicas del macizo rocoso y la velocidad de propagación de la onda P (V_p) combinadas a través de la Ley de Hooke. Para el campo lejano se tienen distancias desde los 150 hasta los 1000 metros, por lo que se ha optado por utilizar la norma alemana DIN 4150. El valor límite utilizado fue de 3 mm/s para frecuencias bajas en estructuras muy sensibles.

La metodología consistió en la reducción de registros en base a estándares operativos, seguido de una discriminación por métodos de estadística robusta y regresión lineal. De esta manera se obtuvieron, en ambos escenarios, ábacos de distribución de cargas para predecir la VPP a una determinada distancia, que permite junto a los criterios establecidos previamente, limitar los explosivos para un mejor cuidado de estructuras.

Abstract

The use of explosives on mining blasting processes release energy in form of vibrations, that are not useful for the rock fragmentation but to disturb the near structures near the blasting source, those are released on every direction through seismic waves. During the operational life of an open pit mine, most of its components such as the dumping platforms, leaching PADs and the pit itself have to reach a physic stability and with special care during the closure process. The main objective of the following thesis is to develop a vibrations prediction model using historical monitoring data of an open pit mining operation located on the Peruvian highlands, in order to protect the final design slopes (Medium Field) and the sensible constructions of the closest villages (Far Field).

Both models are based on the Square Root Scaled Distance (SRSD) of Devine's theory to predict the Peak Particle Velocity (PPV). Medium Field monitoring distances oscillates between 30 and 150 meters, and the structures from this range must be analyzed through the Failure Criteria of Cameron McKenzie, which is based on the rock mass geo mechanical properties and the P wave propagation speed combined with the Hooke's Law. For the Far Field, the distances ranges from 150 to 1000 meters, therefore it was chosen to use the German rule DIN 4150. The limit value was of 3 mm/s for low frequencies over highly sensible structures.

The methodology consisted on the reduction of measurement records according to operational standards, followed by the statistical discrimination and the lineal regression model. In this way, over the two scenarios it was obtained charge distribution abacus to predict the PPV for any distance, which allows together with the previous described criteria, limit the explosives to protect the structures.

A mi madre Susana Chacón, y a mi hermano Albert por su apoyo y esfuerzo durante toda mi vida universitaria; a San Francisco de Asís y todos mis amigos.

A Noé, mi padre por enseñarme la belleza de la Ingeniería.

A mi padre Celso Huamán y hermanos Marcia y Francisco, por su motivación para siempre ir por más; a todos mis amigos por su apoyo y soporte incondicional durante años.

En memoria de mi amada madre, Nelida Rivas Peña, quien me acompaña desde el cielo siempre en cada paso que doy.

Índice General

Capítulo 1: Introducción	01
1.1 Justificación del Tema	01
1.2 Antecedentes	02
1.3 Objetivos	05
1.3.1 Objetivos generales	05
1.3.2 Objetivos específicos	05
1.4 Hipótesis	06
1.5 Plan de Trabajo	06
1.5.1 Alcance de la investigación	06
1.5.2 Metodología propuesta	06
Capítulo 2: Marco Teórico	08
2.1 Minería Superficial en el Perú	08
2.2 Perforación y Voladura	09
2.2.1 Métodos de voladura controlada	09
2.2.2 Tipos de taladros	10
2.2.2.1 Producción	11
2.2.2.2 Buffer (Amortiguamiento)	12
2.2.2.3 Pre Corte	13
2.3 Vibraciones por Voladura	13
2.3.1 Tipos de ondas	14
2.3.2 Velocidad de partícula	16
2.3.3 Sismógrafos	16

2.3.4 Monitoreo de vibraciones	17
2.4 Predicción de Vibraciones – Ley de Transmisividad	18
2.4.1 Campo lejano	19
2.4.2 Campo medio	20
2.4.3 Campo cercano	20
2.5 Normativa de Control de Vibraciones	21
2.5.1 Norma peruana	21
2.5.2 Normas internacionales	23
Capítulo 3: Descripción del Lugar del Estudio	29
3.1 Características generales	29
3.2 Características geológicas	30
3.2.1 Tipo de Yacimiento	31
3.2.2 Delimitación Geotécnica	33
3.3 Características Operacionales	35
3.3.1 Equipos de Producción	36
3.3.2 Perforación y Voladura	38
3.3.2.1 Mallas de perforación	39
3.3.2.2 Mallas de voladura	41
Capítulo 4: Metodología para el Estudio de Vibraciones	45
4.1 Recopilación de los Reportes de Vibraciones	46
4.2 Discriminación de Datos	49
4.2.1 Triggers básicos y lectura del sismógrafo	49
4.2.2 Calibraciones del geófono triaxial y del micrófono	50

4.3	Determinación del Universo de Datos	51
4.3.1	Modelo de Devine y regresión lineal	51
4.3.2	Desviación estándar	52
4.3.3	Índice de confiabilidad (R ²)	53
4.3.4	Universo de datos validados	54
4.3.4.1	Campo Medio	55
4.3.4.2	Campo lejano	55
4.4	Generación de ábacos de límites de carga	56
4.4.1	Cuidado de estructuras sensibles	56
4.4.2	Cuidado de paredes finales	57
Capítulo 5: Presentación y Discusión de Resultados		61
5.1	Modelo Predictivo de Vibraciones en Campo Lejano	61
5.1.1	Corrección por desviación estándar	62
5.1.2	Iteración de distribuciones lineales	62
5.1.2.1	Primera iteración	62
5.1.2.2	Segunda iteración	63
5.1.2.3	Tercera iteración	64
5.1.3	Modelo predictivo para campo lejano	64
5.2	Modelo Predictivo de Vibraciones en Campo Medio	67
5.2.1	Límites para la VPP	68
5.2.1.1	Propagación teórica por Barton	68
5.2.1.2	Propagación teórica por Hoek & Mavko	69
5.2.1.3	Propagación experimental por Cross Hole	70
5.2.2	Modelo predictivo para campo medio	70

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones	73
6.1 Conclusiones	73
6.2 Recomendaciones	74
Referencias	76



Índice de Figuras

<i>Figura 1.</i> Tipos de taladros utilizados en voladura a cielo abierto	11
<i>Figura 2.</i> Propagación mecánica de las ondas de cuerpo y superficiales	15
<i>Figura 3.</i> Representación gráfica de los diferentes efectos mecánicos de un disparo.	19
<i>Figura 4.</i> Curvas para los valores especificados en Tabla 6	28
<i>Figura 5.</i> Alteraciones causadas por Fluidos hidrotermales y pH en Yacimientos Epitermales	33
<i>Figura 6.</i> Típicas mallas de voladura utilizadas en producción.	43
<i>Figura 7.</i> Diagrama de flujo de la recopilación y discriminación de datos	45
<i>Figura 8.</i> Sismógrafo Instanetl Minimate Plus 4CH	47
<i>Figura 9.</i> Plano de Disparo y Puntos de monitoreo	48
<i>Figura 10.</i> Gráfico de un registro adecuado y calibrado correctamente	50
<i>Figura 11.</i> Gráfico de un registro inadecuado por mala calibración	51
<i>Figura 12.</i> Distribución Lineal Inicial	61
<i>Figura 13.</i> Distribución lineal luego de corrección por desviación estándar	62
<i>Figura 14.</i> Distribución lineal luego de primera iteración	63
<i>Figura 15.</i> Distribución lineal luego de segunda iteración	64
<i>Figura 16.</i> Modelo predictivo de vibraciones para campo lejano	66
<i>Figura 17.</i> Distribución lineal final para campo lejano	68
<i>Figura 18.</i> Modelo predictivo de vibraciones para Campo Medio	72

Índice de Tablas

Tabla 1. <i>Factores Influyentes en la Generación de Vibraciones</i>	14
Tabla 2. <i>Velocidad Pico Partícula Máxima</i>	22
Tabla 3. <i>Efectos de la VPP sobre el Macizo Rocosó</i>	23
Tabla 4. <i>Valores de Prevención propuestos por la USBM (1980)</i>	25
Tabla 5. <i>Valores límites del Criterio de Prevención de Daños UNE 22.381-93</i>	25
Tabla 6. <i>Valores de referencia para la velocidad de vibración que se utilizarán al evaluar los efectos de la vibración a corto plazo en las estructuras.</i>	27
Tabla 7. <i>Características generales de los Depósitos Epitermales de Oro</i>	32
Tabla 8. <i>Propiedades Geomecánicas de los Dominios Geológicos</i>	35
Tabla 9. <i>Parámetros de perforación de acuerdo a la dureza de la roca</i>	39
Tabla 10. <i>Indicadores clave de rendimiento (KPI) de la perforación</i>	41
Tabla 11. <i>Burden y Espaciamiento en taladros</i>	41
Tabla 12. <i>Densidades ORICA</i>	44
Tabla 13. <i>Rangos de distancia entre el punto de monitoreo y la malla de voladura</i>	47
Tabla 14. <i>Valores de la configuración de triggers en cada tipo de geófono triaxial</i>	49
Tabla 15. <i>Cantidad de datos y exclusión por filtros</i>	56
Tabla 16. <i>Velocidad de propagación de onda P experimental según dominio geotécnico</i>	59
Tabla 17. <i>Criterio de daños por vibraciones</i>	60
Tabla 18. <i>Modelamiento de VPP para Campo Lejano</i>	65
Tabla 19. <i>Límites VPP por Barton</i>	69
Tabla 20. <i>Límites VPP por Hoek & Mavko</i>	69
Tabla 21. <i>Límites VPP por Cross Hole</i>	70
Tabla 22. <i>Modelamiento de VPP para Campo Medio</i>	71

Capítulo 1: Introducción

1.1 Justificación del Tema

La minería en el Perú es una industria que ha cobrado protagonismo en las últimas décadas. Con el correr del tiempo las operaciones se han diversificado tanto en tipo de mineral explotado como en métodos de explotación a lo largo del territorio nacional. Se pueden encontrar entre ellas, algunas empresas icónicas pertenecientes a la gran minería no solo a nivel local sino también a nivel internacional, este tipo de minería es principalmente superficial debido al gran movimiento de material que realizan.

La gran minería está clasificada por el Ministerio de Energía y Minas como aquellas operaciones cuya producción sobrepasa las 5000 TM/día (MINEM, 2014), las cuales tienen un impacto social y ambiental significativo debido a las operaciones unitarias que se debe realizar en el proceso de explotación de minerales.

Una de estas operaciones unitarias es la voladura de roca que, al realizarse, libera energía debido a la detonación de explosivos. Esencialmente se espera que toda la energía de la detonación sea productiva, es decir, que actúe directamente en la fragmentación del macizo rocoso, esta energía es denominada: Energía de Trabajo. Sin embargo, solo un porcentaje de la misma se libera de esta forma, el resto es liberada en forma de gases, presión de aire y vibraciones, a la que se denomina: Energía de Desperdicio. (Saavedra, 1994)

De acuerdo a la nueva ISO 14001 se identifican diferentes Aspectos Ambientales Significativos (AAS), los cuales pueden ser positivos o negativos (International Society of Standardization, 2015). Debido a los daños que pueden causar sobre las viviendas de las

comunidades aledañas, en una operación minera se identifica como AAS a las vibraciones generadas por las voladuras. Por lo tanto, se debe plantear una forma de diagnosticar y mitigar dicho aspecto, es por ello se realizan monitoreos durante cada disparo.

Asimismo, estas vibraciones tienen distintas implicancias sobre las diferentes estructuras, por lo que deben ser controladas para evitar sobrepasar los límites y normas asumidas por la compañía minera. Limitar las vibraciones ayuda a que las estructuras que se encuentran cerca al área de influencia de la voladura no sufran daños significativos. Por ello, en base a la recolección de los reportes de vibraciones por disparo, se puede estimar un modelo matemático, que relaciona la carga máxima de explosivo por taladro y las características geomecánicas del macizo rocoso, para predecir la velocidad pico partícula (VPP) en un determinado punto de superficie basado en la regresión lineal del modelo de Devine de propagación de ondas.

Con esta predicción de vibraciones se quiere proponer un cambio en la distribución de cargas máximas por taladro, la cual sea operacionalmente viable y que limite las vibraciones destructivas sobre los taludes finales del tajo, sobre las instalaciones de la mina y sobre las viviendas de las comunidades más cercanas.

1.2 Antecedentes

La propuesta del monitoreo de vibraciones en campo lejano surgió con Devine (1965) para evitar los daños sobre estructuras de concreto cuando se realizaban excavaciones cercanas con explosivos. Luego el modelo fue adaptado para su uso en la predicción de vibraciones en minas que buscaban minimizar el daño sobre las estructuras propias de la operación como taludes e

instalaciones de producción, y también no disturbar las viviendas de los pobladores de zonas aledañas.

Se realizaron múltiples estudios a nivel nacional e internacional sobre las vibraciones en campo cercano y lejano, de acuerdo al tipo de cuidado de estructuras. La mayoría de los estudios apuntaban al control de cargas explosivas a un límite operacional que adicionalmente se utilizaban para reducir los costos operativos.

Por un lado, en el Perú, se realizaron estudios para limitar las cargas operantes en minas superficiales emblemáticas como Yanacocha (Cruzado & Díaz, 2017), mina que se rige bajo la Normativa Alemana DIN 4150 en lugar de la desfasada Norma Peruana (MINEM, 1995). Asimismo, Giraldo (2010) planteó un estudio del daño causado por vibraciones sobre estructuras sensibles de poblaciones aledañas a una mina superficial, basándose en la Norma RI 8507 de la United States Bureau of Mines (USBM), organización que lidera el campo investigación de vibraciones inducidas por voladuras. Y más recientemente se realiza una investigación práctica de la influencia que tienen los disparos llevados en una cantera sobre estructuras urbanas dentro de Lima, planteando frecuencias de monitoreo y lugares estratégicos para las mediciones (Pampacata, 2015).

Por otro lado, en Latinoamérica, los estudios sobre vibraciones son abordados ampliamente por países como Chile y Colombia, donde utilizan principalmente el modelo de Devine para la predicción de vibraciones y el cuidado de estructuras debido al ajuste y a la confiabilidad del mismo. Como es el caso del cuidado de edificaciones de mampostería cercanas a una operación minera, en la cual se utiliza la DIN4150 como referencia, pero se concluye con un

replanteo de los valores de la norma para ser aplicada en edificaciones rurales colombianas (Ruiz et al., 2007).

En 2018, se realiza el estudio sobre vibraciones en la mina a tajo abierto Spence en Chile, que incorpora la predicción de las mismas en las decisiones de minado a mediano plazo, para esto, se relacionan variables de fragmentación de roca y seguridad en las voladuras que influyen en el costo final unitario, así como en los costos de la paralización por la activación de fallas geotécnicas a causa de vibraciones (Bravo, 2018).

En el resto del mundo el espectro de investigación es mucho mayor ya que se realizaron estudios teóricos y prácticos muy variados en los campos de la ingeniería de minas y la ingeniería civil. Tal es el caso de la determinación de distancias seguras mediante el estudio de la propagación de ondas al realizar disparos en una mina modelo en Colorado (Orihuela & Dapello, 2009). Así como el cuidado de las estructuras aledañas durante la Expansión del Canal de Panamá, donde Vásquez (2017) construyó un modelo de la Ley de atenuación de Devine para determinar la frecuencia dominante en las voladuras y así evitar que causen resonancia con diferentes edificaciones y predecir la respuesta para el monitoreo de las vibraciones.

Finalmente, un estudio realizado por el gobierno coreano llegó a la conclusión de que el modelo de Devine o de la Ecuación de Raíz Cuadrada (*Square Root Equation*, SRE) es el más adecuado para la predicción de vibraciones inducidas por voladura gracias al avance teórico de investigaciones pasadas y al grado de confiabilidad que ofrece; adicionalmente plantea que el diseño de la malla de voladura es decidido por tres tipos de estudio, uno teórico y basado en experiencias en operaciones similares, otro basado en datos empíricos de un disparo de taladro

geotécnico realizado sobre el macizo rocoso en estudio y el último utilizando métodos de voladuras de bancos y el récord histórico para la construcción de la fórmula predictiva de vibraciones, siendo este el más adecuado cuando las mediciones se realizan representativamente (Chung-Won et al, 2018).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos generales

- Generar un modelo matemático de predicción de vibraciones inducidas por las voladuras en el tajo.
- Proponer 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.

1.3.2 Objetivos específicos

- Recopilar información histórica sobre el monitoreo de vibraciones.
- Realizar la discriminación de datos mediante un análisis de estadística robusta.
- Diferenciar de acuerdo a rangos de distancias para una distribución tanto en campo medio como lejano.
- Crear ábacos de relación de cargas máximas, distancia del taladro al punto de medición y velocidad de partícula máxima.

1.4 Hipótesis

Los modelos de predicciones de vibraciones se ajustan a la realidad de los disparos tanto para el cuidado de los taludes finales de la mina en campo medio, como para evitar el daño a estructuras sensibles en campo lejano.

1.5 Plan de Trabajo

1.5.1 Alcance de la investigación

Esta investigación será aplicada en una mina en proceso de cierre, desde el inicio de los monitoreos hasta la estabilización de los taludes finales del tajo y podrá ser aplicada solo con las características geotécnicas y operacionales propias de la mina.

1.5.2 Metodología propuesta

Debido a la coyuntura por la cual se encuentra la operación minera, se optó por trabajar con los recursos y materiales que ya se tenían para evitar incurrir en gastos adicionales, más específicamente, se trabajó utilizando los sismógrafos y geófonos que la empresa ya tiene, los cuales permitieron monitorear solo las vibraciones de campo medio y lejano, por ello, la metodología se basó en la recolección de datos en distancias que corresponden a estos dos campos.

En primera instancia se realizó una recolección de información histórica de los monitoreos de vibraciones de los últimos dos años para tener una población más amplia, simultáneamente se recurrió a los estudios geotécnicos pasados para

conocer los dominios de la zonificación de los taludes del tajo y las zonas aledañas para conocer sus características geomecánicas.

Para actualizar los monitoreos, se colocaron sismógrafos cercanos a los disparos, entre 30 y 150 metros que ayudaron en el modelo de campo medio, asimismo, los monitoreos de campo lejano continuaron durante 4 meses más. A la par se discriminaron los datos de acuerdo a la relación que tienen con la distribución lineal y a la desviación estándar de la distancia vertical del valor real al valor modelado.

La distribución de regresión lineal se basó en el modelo de Devine de transmisividad de ondas en campo lejano a la cual se adecuaron los monitoreos y las características geomecánicas del macizo rocoso. Una vez obtenida esta distribución y alcanzado un índice de confiabilidad adecuado, se proponen ábacos que predigan la VPP en diferentes distancias para cargas operantes máximas y mínimas.

Capítulo 2: Marco Teórico

En este capítulo se tratará el marco teórico base a considerar para la comprensión y desarrollo del proyecto de tesis. Se comenzará con un contexto sobre las operaciones mineras a cielo abierto en el Perú, desde aspectos generales hasta tratar las operaciones unitarias de perforación y voladura. Luego se desarrollará el tema de las vibraciones causadas por detonación de explosivos en el que se considerarán tanto los tipos de ondas como los monitoreos mediante sismógrafos. Finalmente se hará mención sobre las normativas de vibraciones utilizadas en la industria minera peruana para el posterior análisis de datos obtenidos mediante distribuciones lineales de campo medio y lejano.

2.1 Minería Superficial en el Perú

También denominada como minería a tajo abierto o a cielo abierto, representa en el Perú a la actividad minera que explota yacimientos de clase mundial, posee mayor movimiento de material, principalmente en el estrato de Gran Minería y en menor proporción en el de Mediana Minería. En el 2018 se registraron 12,224 titulares mineros, de los cuales 10,517 representan al estrato del Régimen General (MINEM, 2018).

Este tipo de explotación minera es realizado cuando el yacimiento se encuentra relativamente cercano a la superficie y la disposición del mineral está diseminada o abarca grandes extensiones. Se caracteriza por las bajas leyes de metales y el alto volumen de mineral explotado; asimismo, el riesgo ocupacional es menor respecto a su contraparte subterránea (Angloamerican, 2019).

La actividad minera a tajo abierto basa sus actividades en operaciones unitarias las cuales determinan los costos principales de minado, estas actividades son cíclicas y están relacionadas unas entre otras. Principalmente son cuatro: la perforación, la voladura, el carguío y el acarreo, además, estas son diferenciadas si el minado se realiza sobre estéril o mineral y determinan sus costos (National Research Council, 2002).

2.2 Perforación y Voladura

Las operaciones unitarias más básicas consisten en la perforación de taladros para hospedar explosivos que al detonar liberan la energía necesaria para fragmentar el macizo rocoso. Estas son las que inician el proceso productivo de minado ya que ayudan liberar zonas con desmante o aportan mineral fresco. Estas dos operaciones tienen vital implicancia debido a que inician el proceso de conminución de las rocas, el cual tiene el mayor costo operativo y se acrecienta en procesos posteriores como el chancado y la molienda llegando a elevarse hasta por cien veces. (Hukki, 1961).

En la perforación de bancos a cielo abierto, se utilizan tres de los cuatro principios básicos: rotación, empuje y barrido, la percusión no es utilizada ya que se perforan taladros profundos de grandes diámetros, pero ello se confía solo en el empuje hidráulico sobre la columna de perforación. Los taladros están dispuestos en patrones o mallas que ayudan en la interacción de cada uno en la detonación.

2.2.1 Métodos de voladura controlada

Existen diversos métodos de voladura controlada, estos dependen de los agentes de voladura y del sistema de iniciación que se utiliza. En lo que respecta a lo segundo,

se tienen, por un lado, los disparos con detonadores eléctricos, por otro lado, más comúnmente se utilizan detonadores no eléctricos (Bernaola, 2013).

En lo que respecta al sistema de iniciación no eléctrico, se encuentran tres tipos de accesorios de voladura: pirotécnicos, tubos de choque y electrónicos. Con estos últimos se puede configurar retardos de órdenes preestablecidos y de órdenes personalizados.

Actualmente, la tendencia de las operaciones mineras es optar por la utilización de sistemas no eléctricos, priorizando los detonadores electrónicos, ya que poseen la versatilidad de programar sus retardos para el mejor control del resultado. De esta manera se ayuda en la fragmentación de roca, optimización de la malla de perforación y control tanto de las vibraciones destructivas como del *air blast*; aunque representan un costo mucho más elevado que los tradicionales accesorios pirotécnicos y tubos de choque. (Cueva, 2015)

2.2.2 Tipos de taladros

En el diseño de las mallas de perforación y voladura se toman en cuenta parámetros geotécnicos del macizo rocoso como la dureza y las estructuras geológicas que existen, esto con el objetivo de minimizar el daño sobre los taludes. Asimismo, se consideran las características del explosivo a utilizar, el método de iniciación y la interacción que pueda tener la carga con el macizo.

Otro aspecto de suma importancia es la interacción que existe entre los taladros al ser detonados, es así como se tiene que tomar en cuenta: los intervalos de tiempo,

el tipo de arranque y el resultado final esperado. A raíz de esto es que existen tres tipos de perforaciones para maximizar la eficiencia del disparo tanto en mineral como en desmonte: Producción, Buffer y Pre-corte. En la Figura 1 mostrada a continuación se puede ver en corte transversal un diseño de carguío para cada tipo de taladro, así como un diámetro referencial de perforación para cada tipo de taladro.

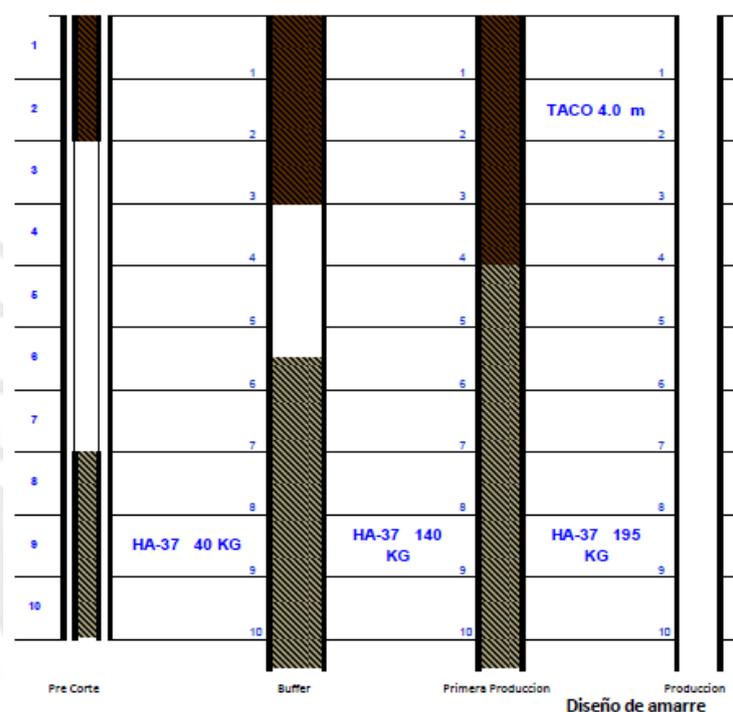


Figura 1. Tipos de taladros utilizados en voladura a cielo abierto. Se muestra en gris la carga de Heavy Anfo (HA-37) en los taladros de acuerdo a la profundidad en metros (1-10), asimismo, la altura del taco en color marrón. Tomado de reporte diario de “Diseño de Carguío y Amarre para Voladura” de Orica Mining Services en operación minera, 2019.

2.2.2.1 Producción

Son los taladros principales en la voladura de bancos, los que poseen mayor carga y por lo tanto tienen un burden y espaciamiento mayor al de los otros taladros. Se encargan de la fragmentación principal para obtener una

granulometría adecuada y eficiente para el proceso que continúa en la cadena de producción: el chancado primario.

Las perforaciones de estos taladros normalmente están enfocadas a grandes movimientos de material y son realizadas a distancias razonablemente alejadas de las paredes finales del tajo. Tienen la secuencia de voladura posterior a los taladros de precorte debido a que tienen un factor de carga mayor, así se puede evitar el daño a los taludes de diseño.

2.2.2.2 *Buffer (Amortiguamiento)*

Taladros que se encuentran perforados inmediatamente después de la última fila de taladros de producción (realizando un conteo desde cresta hasta talud final) y antes de la fila de pre-corte, poseen una menor carga operante, lo cual hace que el tipo de malla reduzca el burden y espaciamiento, pero utiliza el mismo diámetro para mejorar la interacción.

Estos taladros son perforados en dos filas paralelas, una para la interacción con la línea de producción y la otra para la disipación de vibraciones al acercarse a la zona de pre-corte. Su función es la reducción de energía conforme se acerca a la zona de diseño del talud final, por ello su secuencia de voladura se da al final del disparo, asimismo, aportan a la fragmentación del material.

2.2.2.3 *Pre-corte*

Los taladros de precorte tienen la primera secuencia en el disparo, ubicados en la última fila de la malla de voladura (pegados al talud final), su factor de carga es mucho menor e incrementan el costo de perforación ya que no se utilizan para la fragmentación de roca. Al estar dispuestos en una sola línea, su Espaciamiento es mucho menor que los Buffer y son perforados con un diámetro menor. Pueden ser cargados o no ya que se encuentran más alejados de la cara libre, llevando solamente un iniciador y un taco, dependiendo de la dureza de la roca. En caso de ser cargados, su disposición es intercalada en secuencia.

Su función es la de generar un plano de fractura, aislando el banco a volar del resto del macizo rocoso y reflejando las ondas para evitar el agrietamiento de fracturas pre existentes. Asimismo, sirve como medio de evacuación de gases; su aporte operativo es evitar trabajos extra de perfilado de taludes.

2.3 **Vibraciones por Voladura**

Las vibraciones que son generadas por la detonación de una mezcla explosiva son un fenómeno no deseado de liberación de energía caracterizado por su movimiento ondulatorio (Bernaola, 2013). La generación de estas ondas es influida por una determinada cantidad de factores geotécnicos y operacionales que son presentados en la Tabla 1.

Tabla 1

Factores Influyentes en la Generación de Vibraciones

Geotécnicos	Operacionales: Perforación	Operacionales: Voladura
Tipo de Roca	Angulo del taladro	Burden
Presencia de discontinuidades	Altura de la columna	Espaciamiento
Presencia de Fallas	Diámetro del taladro	Confinamiento del explosivo
Resistencia de la Roca	Tipo de malla	Densidad del explosivo
Porosidad del Macizo rocoso	Tipos de taladros	Retardos y secuencia
Densidad del Macizo rocoso	Cantidad de taladros por fila	Tipo de iniciación
Angulo de la cara libre		Energía real aportada

Adaptado de “Diseño de voladuras. Selección múltiple. Vibraciones y ondas sísmicas; Normas de vibración para tronaduras” de KONYA, 1990, pp. 231-274.

2.3.1 Tipos de onda en una voladura

Las vibraciones son ondas con movimiento armónico que cuentan con un determinado desplazamiento, velocidad y aceleración. Adicionalmente, al ser propagadas a través de un medio inelástico como el macizo rocoso, se atenúan de acuerdo al medio de disipación. Al detonar un explosivo confinado, las vibraciones se propagan a través del medio de forma esférica y se van atenuando inversamente proporcional a la distancia recorrida.

Los tipos de onda que componen una vibración son dos: internas y superficiales (Bernaola, 2013). Las ondas principales son las internas, ya que son las que disturbán más el macizo rocoso. Por un lado, se encuentran las Ondas P, que son propagadas longitudinalmente provocando la oscilación de las partículas en la misma dirección de la onda, su característica principal es su propiedad compresional

sobre la masa al poseer mayor amplitud y velocidad. Este tipo de onda es la que causa mayor movimiento y es la que se registra en los monitoreos con geófonos.

Por otro lado, se tienen las Ondas S, que se propagan transversalmente al movimiento de las partículas. Estas son también llamadas ondas de cizalladura o de corte debido a su potencial de alterar la forma del macizo rocoso, aunque son de menor amplitud y velocidad que las principales.

Las ondas superficiales, al tener menor velocidad y potencial de daño, son complementarias a las internas. Existen dos tipos: Ondas Rayleigh R y Ondas Love L. Estas ondas generan un movimiento elíptico sobre las partículas en la misma dirección de su propagación, tanto en un plano vertical como horizontal. Ambas se atenúan rápidamente en la superficie de acuerdo a las capas de terreno y a la resistencia de las rocas. En la Figura 2 se presentan estas 4 ondas mencionadas anteriormente.

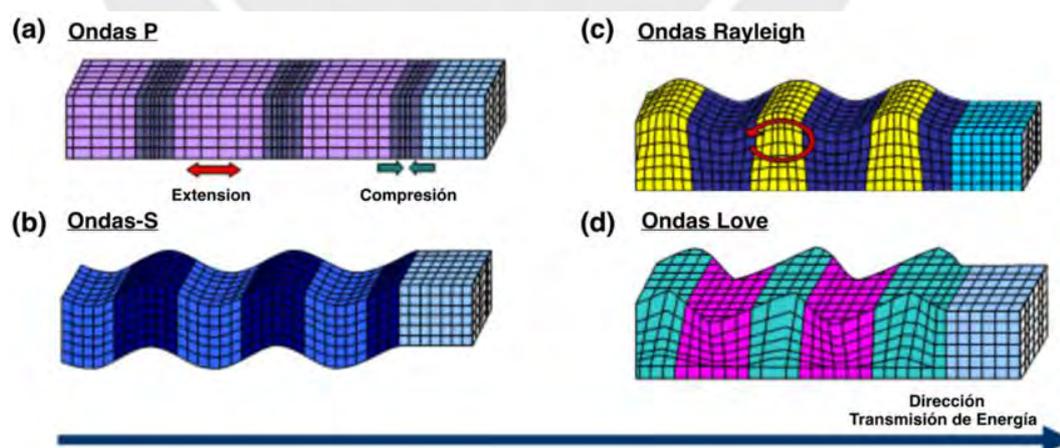


Figura 2. Propagación mecánica de las ondas de cuerpo y superficiales. Representación gráfica de la propagación de las ondas de acuerdo a la dirección de transmisión de energía. Tomado de “Correlación cruzada de ruido sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la cuenca de Santiago”, por Miguel Saez, 2016.

2.3.2 Velocidad de partícula

Se consideran 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.

2.3.3 Sismógrafos

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.

2.3.4 Monitoreo de vibraciones

Se tienen dos métodos para el monitoreo de vibraciones: mediante la medición de la velocidad de propagación de las ondas, principalmente las de tipo compresional; y a través de la medición de la velocidad de las partículas en un punto deseado (Bernaola, 2013). Entonces, para efectos prácticos de la investigación se realizó el monitoreo de vibraciones mediante la medición de la Velocidad Pico Partícula.

Para realizar un correcto monitoreo se deben fijar los lugares donde se colocarán los sismógrafos y geófonos. Cuando el monitoreo se realiza en superficie, deben ser colocados sobre una superficie nivelada para evitar errores por inclinación. Asimismo, de acuerdo al tipo de compactación del suelo, los geófonos deberán ser empotrados o confinados por una bolsa de arena de tal forma que no se muevan por efectos de la vibración y solo se realice la medición por acción de las bovinas internas.

Una adecuada configuración deberá tener en cuenta un registro previo de vibraciones monitoreadas, ya que con estos datos se podrán calibrar los límites de iniciación (*triggers*) tanto de registro de frecuencia como de velocidad de partícula en las tres direcciones. Los lugares de monitoreo son determinados por el cuidado de estructuras y son colocados en posiciones adecuadas para la medición. Luego se

procede a realizar las mediciones periódicamente y comparar los valores obtenidos con los límites de la norma a utilizar y no sobrepasarlos.

Posteriormente, se deben relacionar los datos obtenidos con el rango de frecuencias con las cuales se desplazan las ondas producto de una voladura. Finalmente, con ayuda de los datos históricos de vibraciones se puede llegar a plantear un modelo predictivo confiable para poder reducir los factores de carga y optimizar los disparos.

2.4 Predicción de Vibraciones – Ley de Transmisividad

Existe una variedad de modelos de predicción de vibraciones, los mencionados a continuación parten de una fórmula o modelo general: La Ley de Transmisividad. Esta indica que la vibración que ocurre en un determinado punto está determinada por la carga del explosivo (Q) y la distancia (D) entre el punto de detonación y el punto donde se realiza la medición.

La fórmula se representa de la siguiente manera:

$$V = K \times Q^a \times D^b \quad (2.4)$$

Las constantes K, a y b son modificadores correspondientes a las características del entorno donde se realiza la medición, así como también referentes al explosivo utilizado (Orihuela & Dapello, 2009). De esta manera se delimitan las tres zonas consideradas en el estudio de vibraciones inducidas, como se observa a detalle en la Figura 3.

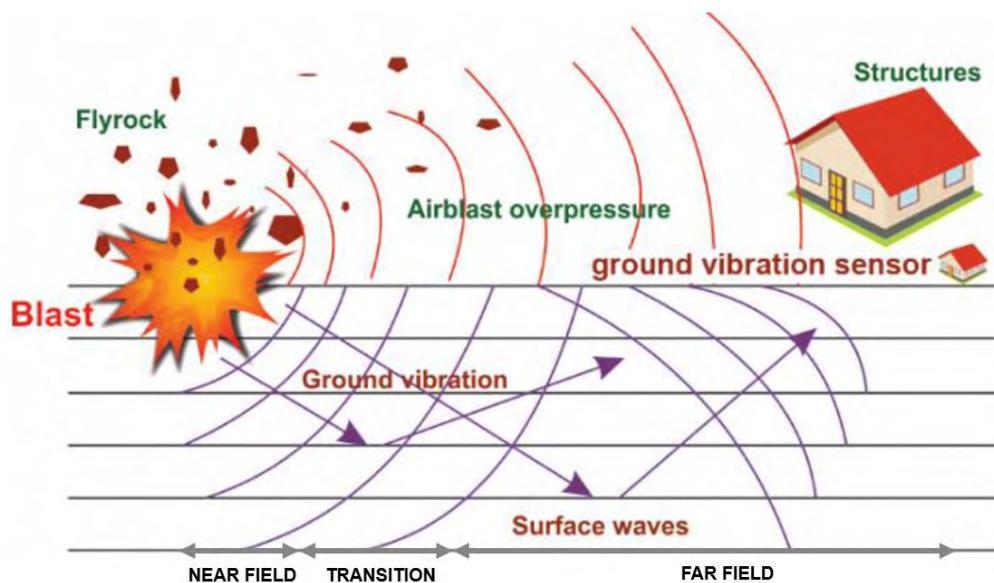


Figura 3. “Representación gráfica de los diferentes efectos mecánicos de un disparo”. Adaptación del ISEE Blaster’s Handbook (1998). En esta se observan las tres zonas de campo de las vibraciones inducidas por voladura. Tomado de “A new design of evolutionary hybrid optimization of SVR model in predicting the blast-induced ground vibration”, por Chen et al., 2019.

2.4.1 Campo lejano

El modelo para la predicción de vibraciones en campo lejano más utilizado es el de Devine. Se suele asumir como campo lejano a una distancia $d > 3 - 5$ veces la longitud de la carga. Para efectos de la presente investigación, el modelamiento para campo lejano considerará distancias desde 350 metros del punto de disparo en adelante.

Se tiene:

$$V = K x \left[\frac{d}{w^{1/2}} \right]^{-a} \quad (2.4.1)$$

Donde:

V = 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 (Tovar, 2015).

2.4.2 Campo medio

En lo que respecta a la medición de vibraciones no se considera un campo medio. Sin embargo, por motivos de la presente investigación se considera como mediciones en campo medio a aquellas que se encuentren entre 30-150 m desde el punto de detonación. Asimismo, se emplea el modelo de Devine para las mediciones en este campo, debido a métodos prácticos y a que es el modelo más utilizado.

2.4.3 Campo cercano

En lo que respecta a las mediciones en campo cercano, el modelo más aceptado es el de Holmberg & Pearson.

Se tiene:

$$PPV = Ky^a \left[\int_0^H \frac{dh}{[R_0^2 + (R_i \tan \phi - h)^2]^{\beta/2a}} \right]^a \quad (2.4.3)$$

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 Devine, 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” (Gutiérrez, 2018).

2.5 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 resonancia 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 tablas que proponen los máximos niveles de vibración de acuerdo al tipo de construcción o instalación que se encuentre cerca de la voladura.

2.5.1 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 2.

Tabla 2

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

Tomado de “Guía Ambiental para la Perforación y Voladura en Operaciones Mineras” por Ministerio de Energía y 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 3.

Tabla 3

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

Tomado de “Guía Ambiental para la Perforación y Voladura en Operaciones Mineras” por Ministerio de Energía y 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 superficial en el Perú.

2.5.2 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 en la Tabla 4.

Tabla 4

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

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 la Tabla 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 5

Valores límites 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*. Esta norma será utilizada para los casos prácticos de la investigación debido a que los monitoreos de vibraciones de la operación minera se basan en la misma al ser considerada una norma con uno de los criterios de prevención más exigente que existe.

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 Tabla 6 y Figura 4 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 6

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 V_i en mm/s			
		Vibración en la cimentación a la frecuencia de			Vibración horizontal en la planta más alta (todas las frecuencias)
		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 sensibilidad a la vibración no pueden ser clasificados en las líneas 1 y 2 (Ej. Edificios Históricos)	3	3 a 8	8 a 10	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. 4. Nota (*). Para frecuencias superiores a 100 Hz, los valores dados en esta columna pueden utilizarse como valores mínimos.

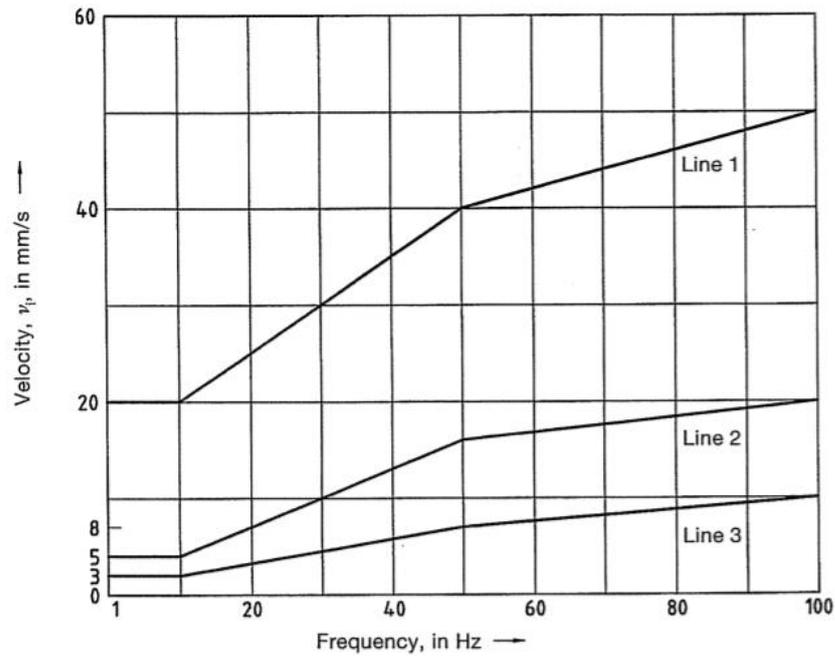


Figura 4. Curvas para los valores especificados en Tabla 6. Tomado de Norma DIN 4150-3 *Structural Vibration in Buildings. Effects of Vibration on Structures, German Standard*, de Deutsches Institut Fur Normung E.V, 1999-02. pp. 5

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.

Capítulo 3: Descripción del Lugar de Estudio

En el siguiente capítulo se realizará una descripción del lugar de estudio y sus principales características geográficas, geológicas y operacionales relacionadas con el motivo de la investigación. Se resaltarán parámetros geotécnicos y técnicos de perforación y voladura que ayudan a entender el contexto en el cual se encuentra la operación minera. Asimismo, el capítulo 3 sirve como una introducción al desarrollo del Capítulo 4 donde se explica la metodología empleada.

3.1 Características Generales

La zona de estudio se encuentra en la cordillera central del Perú, a una hora y media de la ciudad de Huaraz. Posee un clima propio de la zona dividido en dos periodos: una temporada de lluvias entre octubre y abril y una temporada seca el resto del año. La parte experimental de la investigación se realizó entre abril y agosto, por ello, para la misma se considera un temporal seco sin los problemas adicionales que podrían generar las lluvias.

Alrededor de toda la operación existen comunidades campesinas, centros poblados y caseríos, a distancias relativamente cercanas. Estos pertenecen a la zona de influencia directa por el impacto socio ambiental que produce la mina. Para efectos prácticos de esta tesis, se resalta la ubicación del caserío más próximo al tajo, aproximadamente a un kilómetro del lugar donde se realizan las voladuras de mayor consideración.

La cadena de producción de la mina es más reducida que en otras minas ya que se encuentra en proceso de cierre progresivo, muy cercano al cierre final de algunos componentes, es por ello que ya no se realizan exploraciones geológicas para descubrimiento de mineral

económico. El propósito principal de la operación minera al momento en el que se realizó el estudio es la estabilización del tajo y cierre de *stocks* de mineral y desmonte.

La cadena de valor inicia en la explotación del único tajo de la operación minera, cuyos niveles se encuentran entre 3800 y 4000 msnm. Se cuenta con botaderos al interior del tajo que son utilizados para la estabilización de los taludes finales. Al encontrarse en proceso de cierre, el mineral encontrado es incidental, es por esto que se evalúa mediante una ley de corte mucho más alta comparada con una operación plena.

El movimiento de material diario varía entre las 40000 y 50000 toneladas húmedas, considerando el mineral y el desmonte. El mineral extraído es enviado a chancado primario y secundario hasta obtener la granulometría deseada para que posteriormente sea enviado por fajas hasta una tolva de finos. El material fino es lixiviado con cianuro de sodio en un pad de lixiviación con diferentes fases. El flujo es colectado luego de la percolación para ser bombeado hacia la planta de procesamiento.

A continuación, toma lugar el proceso de Merrill Crowe con polvo de zinc para precipitar el oro, plata y otros metales no económicos, este producto sólido es filtrado y luego enviado a la refinería donde, con ayuda de reactivos, se funde en hornos y se obtienen barras de doré como producto final. Adicionalmente, en cumplimiento con la normativa ambiental peruana, el agua que discurre por el tajo y la utilizada en la planta de procesos son tratadas por dos plantas de tratamiento para posteriormente ser descargadas al medio receptor.

3.2 Características Geológicas

Para entender el contexto de la investigación se deben describir los diferentes factores geológicos que dieron origen al yacimiento y las diferentes características que adquirieron las rocas que contienen los minerales económicos y donde se realizarán las voladuras posteriormente analizadas.

3.2.1 Tipo de yacimiento

El yacimiento de estudio se encuentra dentro de la cordillera occidental de la zona de Ancash; dentro de esta se encuentran siete franjas metalogénicas. Se encuentra emplazado en la correspondiente a los depósitos epitermales de Au-Ag y polimetálicos con superposición epitermal del mioceno. (Rivera et al., 2010)

Específicamente corresponde a un yacimiento epitermal de alta sulfuración de geometría diseminada dentro de la Cordillera Negra. Se emplaza principalmente sobre lavas andesíticas con ocurrencia de piedra pómez y tobas riódacíticas pertenecientes al Grupo Calipuy (Tumialán, 2003). Asimismo, cuando el metal principal encontrado en este tipo de yacimiento es el oro, presenta las características presentadas en la Tabla 7.

Tabla 7

Características generales de los Depósitos Epitermales de Oro

Tipo de Epitermal	Alta sulfuración
Forma del deposito	Predominante diseminado, mineral de reemplazamiento común, menor cantidad de stockworks y venas subordinadas
Textura	Reemplazamiento de paredes, brechas y venas
Minerales de mena	Pirita, enargita, calcopirita, tenantita, covelita, oro y telururos
Minerales de ganga	Cuarzo, alunita, barita, caolinita, pirofilita
Metales asociados	Cu, Au, Ag, As (Pb, Hg, Sb, Te, Sn, Mo, Bi)

Adaptado de “Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration” de Hedenquist et al., 1996

Los yacimientos epitermales de alta sulfuración de oro están típicamente hospedados en rocas silíceas lixiviadas por efectos hidrotermales ácidos. De esta resalta principalmente el último grado de alteración silícea, formando cuarzo vuggy o residual que es potencialmente el emplazamiento con mejores leyes de metales económicos. Normalmente este ambiente ácido genera un ambiente de oxidación al retirar los sulfuros de los minerales, (Hedenquist et al., 1996).

De acuerdo a la alteración silícea y al grado de alteración argílica, se pueden observar hasta tres zonas definidas: la primera, con presencia de vuggy sílica, producto de silicificación; rodeada de la segunda zona, alunita, representando el mayor grado de argilismo y finalmente, la tercera zona, conformada por caolinita y pirofilita de menor grado argílico. Asimismo, la alteración propilítica se encuentra casi ausente, (Tumialán, 2003).

Los minerales que se encuentran comúnmente en este yacimiento son producto de alteraciones ácidas a altas temperaturas. Además, como indicadores principales de la mena se tienen minerales de oro y cobre en sulfuros secundarios o sulfosales como: covelita, calcopirita, enargita, luzonita y tenanntita. La ganga también es producto de las alteraciones y presenta ubicuamente cuarzo en forma residual, alunita y caolinita (Hedenquist et al., 1996). Se presenta la Figura 5 para una ejemplificación gráfica de lo descrito anteriormente.

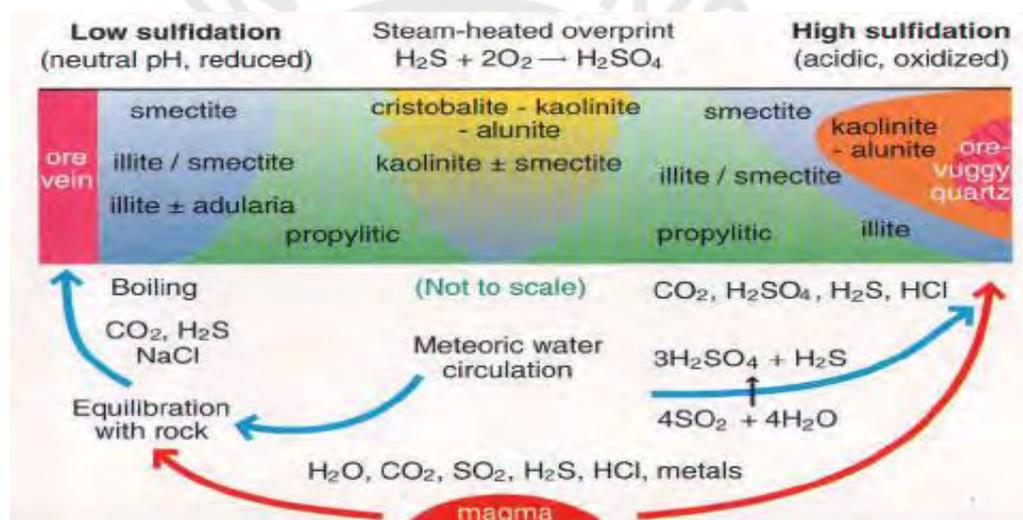


Figura 5. Alteraciones causadas por Fluidos hidrotermales y pH en Yacimientos Epitermales. Tomado de “Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration” de Hedenquist et al., 1996

3.2.2 Delimitación geotécnica

En la operación minera se realizaron diversos estudios geotécnicos desde el inicio de operaciones, hace más de 20 años, hasta los últimos diseños de estabilidad orientados a los taludes finales del tajo. Los ángulos de diseño finales se delimitaron de acuerdo a las características geomecánicas del macizo rocoso, por ello se

delimitaron seis zonas principales: pared NO, pared E, pared SE, tajo S, pared SO y pared O, que engloban la totalidad de la operación.

Cada una de estas zonas contiene uno o más dominios geológicos con los que se determina el ángulo de seguridad de taludes, inter rampa y total. De los tres dominios principales, se generan hasta siete tipos de combinaciones de tipo de roca con propiedades diferentes:

- Vuggy Sílica (VS)
- Cuarzo Alunita (QA)
- Argílico (A)
- VS-QA
- VS-A
- QA-A
- VS-QA-A

El emplazamiento de mineral económico del yacimiento se alberga principalmente en los dominios de alteraciones QA y VS. Por otro lado, los emplazamientos no económicos o de desmonte se ubican en el dominio de alteración Argílico.

La última zona a explotar fue el tajo sur, donde en la delimitación resaltan la QA y el A; el dominio de VS se encuentra muy escaso a la fecha de realización de los monitoreos ya que este se encontraba principalmente en bancos más superficiales. Los dos dominios restantes se diferencian por sus características geomecánicas y por las propiedades de transmisividad que tienen las ondas sobre estructuras de estos tipos de roca, como se puede ver en la Tabla 8.

Tabla 8

Propiedades Geomecánicas de los Dominios Geológicos

Propiedad	Cuarzo-Alunita	Argílico	Unidades
Densidad (g/cm ³)	2.17	1.92	TM/m ³
RMR	48.4	36.5	
Resistencia a la compresión simple	113.83	68.61	MPa
Resistencia a la tracción o tensional	9.51	1.37	MPa
Módulo de Young	20.21	3.19	GPa
Relación de Poisson	0.25	0.32	

Nota. Elaborado con información obtenida de estudios geotécnicos históricos de la mina resaltando dos dominios de macizo rocoso.

3.3 Características Operacionales

A lo largo de la vida de la mina y gracias a los procesos de optimización de la producción por los que ha pasado, los parámetros de la operación cambiaron hasta estandarizarse. De esta manera se consigue obtener mejores resultados de productividad y seguridad en estabilidad de taludes.

La unidad mínima de minado (SMU por sus siglas en inglés) de acuerdo al modelo de bloques del yacimiento es de 3 metros, considerando el ancho de la cubeta del equipo de carguío de mayor selectividad. Los bancos son de 10 metros con ángulos de diseño de talud entre 38 y 50 grados, además, las rampas tienen una gradiente máxima de 10%.

Inicialmente, la operación contaba con dos guardias al día, que en su momento llegó a explotar hasta 90000 toneladas de mineral y desmonte por día. Pero, al continuar con el programa de cierre, se produjo una reducción a una guardia por día, explotando hasta 45000 tpd. Asimismo, al inicio de la operación el *stripping ratio* de extracción fue de 1.25 aproximadamente, luego, aumenta hasta 3.5, de esta manera se prioriza la explotación de desmonte que se usa en trabajos de estabilización del tajo y remediación.

Para optimizar la operación se tiene dos stocks de material principales: Desmonte y mineral; siendo el último el más utilizado ya que la programación de chancado dejó de ser diaria al encontrarse en proceso de cierre. Este stock tiene una capacidad de hasta 100 000 toneladas y se encuentra a 100 metros de la zaranda de alimentación de la chancadora primaria.

La remediación del tajo incluye trabajos de perfilado de taludes, excavación y construcción de canales, despresurización de zonas con fallas y acarreo de lodos de pozas de sedimentación. Esto hace que la flota de equipos auxiliares sea determinante en el proceso de cierre progresivo.

3.3.1 Equipos de producción

Los equipos utilizados se dividen en tres grupos por las funciones que realizan y por el requerimiento de mantenimiento: carguío, acarreo y auxiliares. Inicialmente, la flota de perforadoras era considerada como flota de producción y tenía prioridad sobre los demás equipos, pero al encontrarse en un contexto de cierre se consideran como equipos auxiliares para la operación.

En lo que respecta a los equipos de carguío, se utilizan dos modelos de cargadores frontales: Caterpillar 992G y Komatsu WA1200. Se tiene dos equipos Caterpillar con capacidad nominal de 16 m³ que en condiciones normales de carguío ofrecen una productividad de 3000 toneladas por hora en conjunto. El cargador Komatsu tiene una capacidad nominal de 21 m³, llegando a alcanzar hasta 2200 toneladas por hora de productividad. Debido a su tamaño ofrece una mejor capacidad de carguío, pero una menor versatilidad cuando se obtienen polígonos de mineral con mezclas de desmonte.

La flota de camiones de acarreo combina las versiones C y D de Caterpillar 785, los cuales se distribuyen para trabajos en el Pad y tajo respectivamente. La distancia de acarreo varía entre 800 y 2000 metros en rutas que van de acuerdo a los niveles de los bancos en el tajo y a las celdas de apilamiento en el pad de lixiviación. Se cuenta con siete camiones CAT 785C de capacidad nominal de 140 toneladas. Esta versión es la más antigua y por ello es menos productiva, alcanzando las 400 toneladas por hora; además, estos equipos tienen un alto consumo de combustible ya que cuentan con motores V16. La flota se completa con cinco camiones CAT 785D con capacidad nominal de 150 toneladas. Poseen una mejor productividad alcanzando hasta las 470 toneladas por hora y un menor consumo de combustible al contar con motores V12. Al ser más recientes, no requieren de muchos mantenimientos correctivos mejorando su disponibilidad hasta 85% y la utilización es mayor al 80%.

Los equipos auxiliares son utilizados para trabajos de soporte para la producción y remediación. Los principales trabajos relacionados al proceso de minado que se realizan son los de empuje de material en botaderos, *stocks* y celdas, el corte de

material mixto luego de los disparos y la conformación de plataformas de carguío y de perforación. Los equipos utilizados para este tipo de trabajo son los tractores de orugas y son dimensionados de acuerdo a las condiciones de los lugares de trabajo.

La flota de tractores consta de dos CAT D8T, dos CAT D9R, tres CAT D10T y un Komatsu D375A con capacidades de hoja entre 10 y 18 metros cúbicos de empuje. Otros equipos que participan en el soporte de la producción son las excavadoras, la flota está conformada por: una CAT 329D, una CAT 330DL y una CAT 336DL de capacidades de cubeta entre 1 m³ y 2 m³.

Para el mantenimiento de vías y para la nivelación y compactación de botaderos se cuenta con una flota de tres motoniveladoras, dos CAT 16H y una Komatsu GD825A. También se incluyen dos cisternas CAT 777B para el regado de vías del tajo y del pad, y dos cisternas Mercedes Benz ACTROS 4144 para el regado de vías de acceso desde la carretera principal a la operación minera, utilizadas con el propósito de reducir el levantamiento de polvo.

Los equipos de soporte con propósitos múltiples son los de menor dimensión, entre ellos se cuenta con un tractor sobre ruedas CAT 834B, una retroexcavadora CAT 416E y un camión IVECO Trakker 380. Las perforadoras también son equipos auxiliares y serán descritas a continuación.

3.3.2 Perforación y Voladura

Como parte de la flota de perforación se cuenta con dos perforadoras electro hidráulicas del modelo Ingersoll Rand DMM2 con las siguientes características principales:

- Motor Diésel: 600 HP y 350 Gl.
- Pulldown: 0 a 60000 lb
- Motor rotación: 160 Hp
- Rotación: 0 a 150 rpm
- Compresor de aire: 110 psi y 1400 cfm
- Barras (x3): 35 pies
- Ángulo máximo de perforación: 20° o 35%

Estos equipos tienen un carrusel de cambio de hasta tres barras de 10.7 m cada una. Adicionalmente, la columna de perforación está compuesta por adaptadores de barras en la parte superior (*pin pin* o *pin box*) y por un *bit sub* o adaptador de broca en la parte inferior. Las barras utilizadas tienen un diámetro de 6.6/8” y utiliza brocas tricónicas de botones de 7.7/8” de la marca SHAREATE serie SA742G.

Los trabajos de voladura son realizados por la empresa ORICA, desde el transporte y abastecimiento de agentes y accesorios del polvorín al frente hasta el primado, carguío y tendido de línea de iniciación. Para la descarga de mezcla explosiva se cuenta con dos camiones fábrica de descenso por gravedad con una eficiencia de hasta aproximadamente 60 taladros cargados por viaje.

3.3.3 Mallas de perforación

Para iniciar una malla de perforación se requiere primero la preparación de la plataforma. Con ayuda de un tractor se nivela la zona deseada y se diferencia el material suelto, previamente disparado, del macizo rocoso fresco. Luego se procede a marcar los puntos del collar de perforación con ayuda de topógrafos y un GPS diferencial.

La malla ya marcada sigue el patrón de burden y espaciamiento adecuado que favorezcan en la fragmentación de la voladura. Adicionalmente se perforan taladros entre puntos muy alejados para crear ayudas en el disparo. La perforación depende directamente de las características del macizo rocoso: dureza, presencia de fallas y presencia de agua. Los parámetros de perforación se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9

Parámetros de perforación de acuerdo a la dureza de la roca

	Dureza de la roca			
	I	II	III	IV
<i>Pulldown</i> (lb)	1-10000	10001-20000	20001-25000	25000-50000
Rotación (RPM)	90-85	85-80	80-75	75-70
Altura de taladro (m)	10.5	10.5	10.5	10.5
Minutos/taladro	4.5-5	5-6	6-8	8-10

Datos obtenidos mediante recopilación diaria de parámetros de operación normal de perforadoras Ingersoll Rand DM-M2 de la Unidad Minera.

Adicionalmente, los aceros de perforación y el tipo de broca utilizada son determinantes en la velocidad de penetración efectiva, por ello se controlan los indicadores presentados en la tabla 10.

Tabla 10

Indicadores clave de rendimiento (KPI) de la perforación

	Diámetro de taladro
	7 7/8 ”
Vida útil promedio de broca	3000 – 4000 metros
N° de brocas utilizadas al mes	4 – 5 en promedio
Velocidad de Penetración	40-45 m/h

Nota. Información obtenida de los Key Performance Indicators (KPI's) de perforadoras Ingersoll Rand DM-M2 en la Unidad Minera.

3.3.4 Mallas de voladura

La disposición espacial de los taladros dependerá de su proximidad a los taludes de diseño, considerando si son de producción, buffer o de pre corte. Los dos primeros están dispuestos en mallas triangulares y el último dispuesto en una sola fila intercalada; el burden y espaciamiento dependerán del tipo de taladro, ver Tabla 11.

Tabla 11

Burden y Espaciamiento en taladros

Tipo de Taladro	Burden	Espaciamiento
Producción	6.1 m	7.0 m
Buffer	4.5 m	5.0 m
Pre Corte	-	2.0 m

Nota. Mallas típicas propuestas por el departamento de Servicios Técnicos y utilizadas en campo por el departamento de Perforación y Voladura de la Unidad Minera.

La columna explosiva está conformada de acuerdo a: el tipo de taladro, la dureza del macizo rocoso, la densidad, el tipo de mezcla de emulsión matriz, Nitrato de amonio y Diésel D2. Para el cálculo de la mezcla explosiva se utiliza la fórmula de carga lineal de acuerdo a la densidad del explosivo a utilizar y al diámetro de la perforación.

$$DCL \left(\frac{Kg}{m} \right) = 0.507 * Dm \left(\frac{g}{cm^3} \right) * (D(pulg))^2 \quad (3.3.4)$$

Donde:

DCL = Distribución de carga lineal

Dm = Densidad del explosivo In situ

D = Diámetro del taladro

Normalmente, los taladros de producción tienen una carga lineal que varía entre 30 y 40 kg por metro de *Heavy Anfo (HA)*, dispuestos en alrededor de 6.5 metros desde el fondo del taladro y un taco de tierra que confina totalmente al taladro. Los taladros buffer también tienen una variación de carga, entre 25 y 30 kg por metro de HA, dispuestos en 4 metros, formando una columna de aire entre la carga y el taco de tierra con ayuda de un retenedor de taco. Los taladros de pre corte son cargados de acuerdo al siguiente criterio: si la dureza de la roca es alta, llevan una carga de hasta 3 metros; si la dureza es baja, solo se colocan los booster de iniciación y un taco de confinamiento en la superficie del taladro.

Los accesorios utilizados dependen del tipo de voladura a realizar, debido a los iniciadores: no eléctricos y electrónicos. Para el primer tipo, se utilizan fulminantes Exel Handinet con diferentes retardos en superficie: 42 ms, 65 ms y 100 ms. Estos fulminantes son conectados a un booster de iniciación BM 450-3H que asegure la iniciación de la mezcla explosiva, estos son iniciados a una distancia segura de al menos 500 metros. Como se observa en la Figura 6(a).

El segundo tipo de iniciación, utiliza detonadores I-Kon III de Orica con retardos en superficie programables de acuerdo a la disposición final del material roto. Estos dan inicio a la detonación de los Booster y son acompañados por iniciadores Exel no eléctricos por seguridad, evitando tiros cortados. Como se observa en la Figura 6(b).

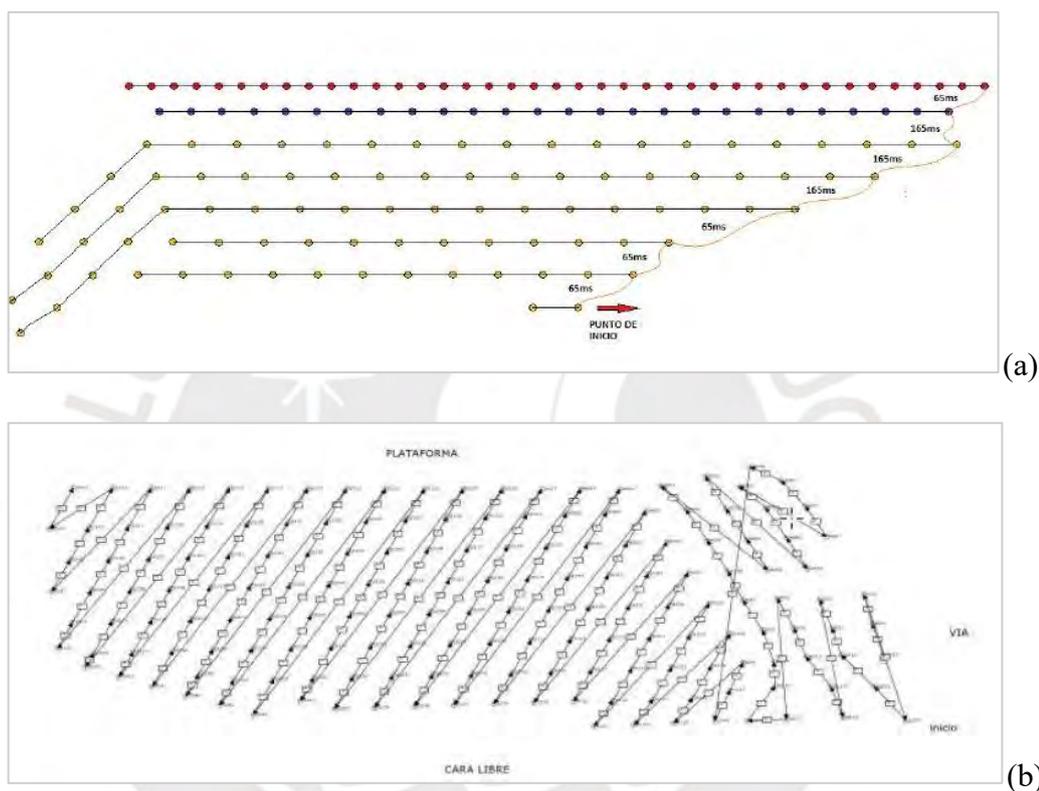


Figura 6. Típicas mallas de voladura utilizadas en producción.

(a) Malla de 153 taladros de iniciación pirotécnica. (b) Malla de 179 taladros de iniciación electrónica. Tomado de reporte diario de “Diseño de Carguío y Amarre para Voladura” de Orica Mining Services en operación minera, 2019

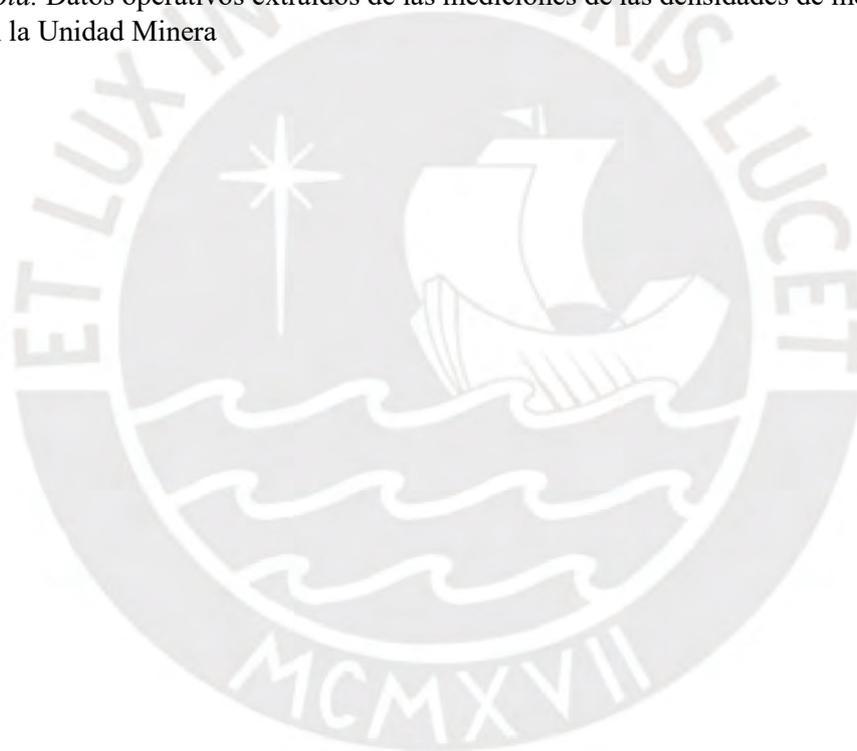
La medición de densidad del explosivo se realiza durante cada carga de taladros en cada disparo a realizar, estos valores deberán fluctuar de acuerdo a la proporción de emulsión matriz y nitrato de amonio según el tipo de HA a cargar. Ver tabla 12.

Tabla 12

Densidades ORICA

Producto	Densidad (g/cm ³)	Diámetro de los taladros (pulg)				
		2.5	4.5	5	6	7 7/8
NITRATO AMONIO	0.76	2.4	7.8	9.6	13.9	23.9
ANFO	0.78	2.5	8.0	9.9	14.2	24.5
HA - 19	0.86	2.7	8.8	10.9	15.7	27.0
HA - 28	0.91	2.9	9.3	11.5	16.6	28.6
HA - 37	1.01	3.2	10.4	12.8	18.4	31.8
HA - 46	1.21	3.8	12.4	15.3	22.1	38.0
HA - 55	1.3	4.1	13.3	16.5	23.7	40.9
HA - 64	1.32	4.2	13.6	16.7	24.1	41.5
HA - 73	1.32	4.2	13.6	16.7	24.1	41.5
EMULSION	1.32	4.2	13.6	16.7	24.1	41.5

Nota. Datos operativos extraídos de las mediciones de las densidades de mezcla ORICA en la Unidad Minera



Capítulo 4: Metodología para el Estudio de Vibraciones

En este capítulo se desarrolla la metodología que se utilizó en la investigación, desde la recopilación de reportes hasta la delimitación y selección de datos relevantes para la generación del modelo predictivo. A continuación, se presenta la Figura 7 en la que se esquematiza el proceso de recolección de datos y todos los filtros aplicados hasta la obtención de data final con la cual se obtuvo cada modelo.

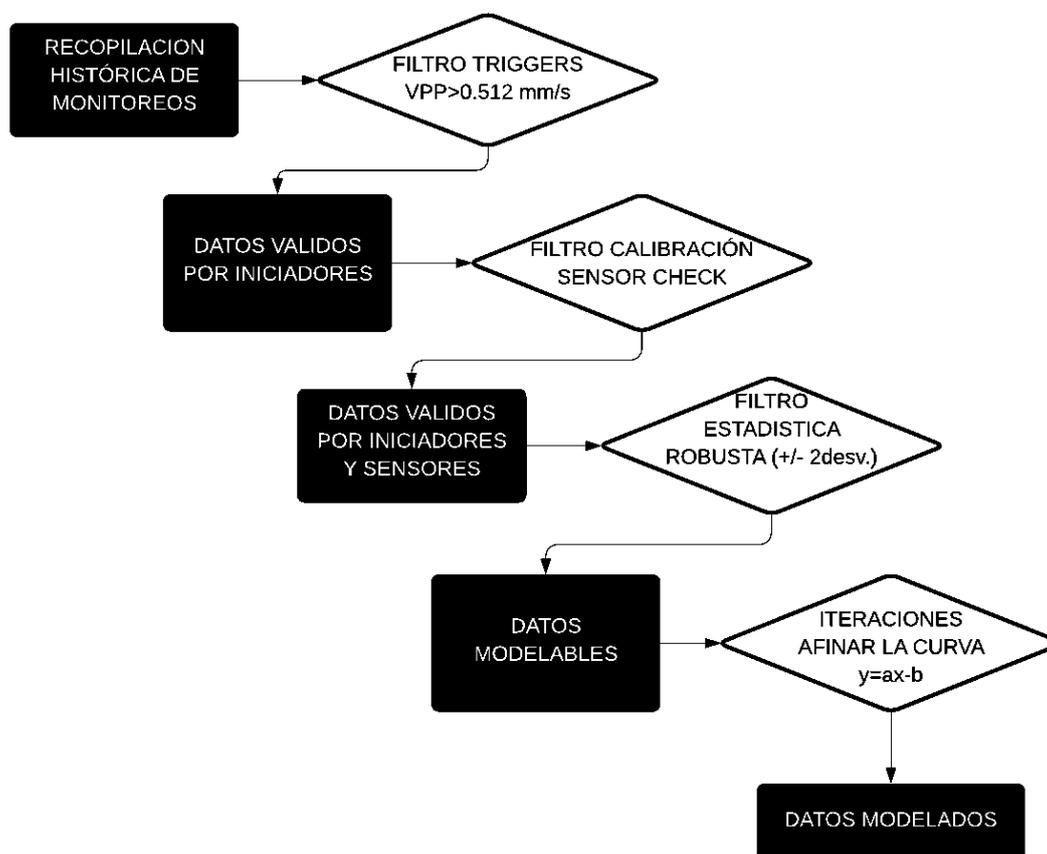


Figura 7. “Diagrama de flujo de la recopilación y discriminación de datos”. Nota. Estructura elaborada en base a los pasos de recopilación y discriminación gradual de datos de monitoreo empleados para la presente investigación.

Inicialmente se tiene un número de datos proveniente del histórico de monitoreos y sistemáticamente se remueven los valores que no corresponden de acuerdo a los filtros fijados hasta obtener una población significativa con la cual obtener el modelo según Devine. Adicionalmente se iteran los valores de acuerdo a las ecuaciones obtenidas para mejorar la confiabilidad de la curva.

4.1 Recopilación de los Reportes de Vibraciones

El monitoreo de vibraciones se realiza desde el año 2015 en cumplimiento con el plan de gestión ambiental de la operación minera, que define las vibraciones producto de disparos como un Aspecto Ambiental Significativo (AAS). Gracias a estos datos históricos se obtiene una base amplia para delimitar el modelo que más se asemeje a la realidad actual.

Por ello, se toman datos de monitoreos a partir de enero del año 2016, ya que es partir de ese año en que la topografía del tajo y los taludes se encuentran en una disposición muy cercana a la topografía del diseño final de la mina. Además, porque las unidades litológicas contenidas desde esta fecha coinciden en gran parte con el último monitoreo registrado en el 2019.

Los diferentes puntos de monitoreo fueron propuestos y construidos adecuadamente para la medición de vibraciones. Estos ya se encontraban definidos antes de iniciar el estudio. Adicionalmente se proponen nuevos puntos de monitoreo, sobre todo para el campo cercano y campo medio. Todas las mediciones, a excepción de las realizadas en campo medio, se encontraban a distancias seguras del radio de exposición de la voladura y fueron constatadas en campo inmediatamente después del disparo. El en caso de campo medio, las mediciones fueron verificadas inicialmente en campo luego de despejar el área de disparo para luego hacerlo de nuevo en oficina al procesar los datos mediante el software correspondiente.

Los diferentes disparos varían entre los niveles 4020 y 3800, el punto de monitoreo de campo lejano se encuentra en el nivel 3900, es por ello que cada disparo tuvo una distancia diferente desde el primer taladro hasta el punto de monitoreo. Estos rangos de distancias se pueden observar en la Tabla 13.

Tabla 13

Rangos de distancia entre el punto de monitoreo y la malla de voladura.

Nivel del Disparo	Rango de Distancias (m)	
3800 - 3850	450	700
3850 – 3900	400	650
3900 – 3950	400	600
3950 – 4000	350	500
4000 - 4020	350	500

Nota. Información de distancias obtenidas del histórico de monitoreos de la Unidad Minera.

En la Figura 8 se presenta a uno de los dos sismógrafos InstanTel Minimate Plus 4CH utilizados en la presente investigación, que además cuentan con dos tipos de geófono: ISEE y DIN. Estos poseen el límite de 254 mm/s para el registro de VPP, por ello solo pueden ser utilizados para mediciones en campo medio y lejano.



Figura 8. “Sismógrafo InstanTel Minimate Plus 4CH”. Fotografía tomada durante una voladura en el lugar de monitoreo preestablecido.

Asimismo, con el objetivo de obtener una medición inalterada, durante los monitoreos de campo cercano y medio, se escogieron lugares planos y compactos; además de ser resguardados por una caja de acero. Los puntos escogidos se encontraban en el mismo nivel de los proyectos de voladura a distancias entre 30 y 150 m. Las distancias medidas desde la malla de voladura hasta el punto de medición, así como la fecha y el nivel del proyecto se encuentran en el Apéndice 1 y se pueden visualizar con claridad en la Figura 9.

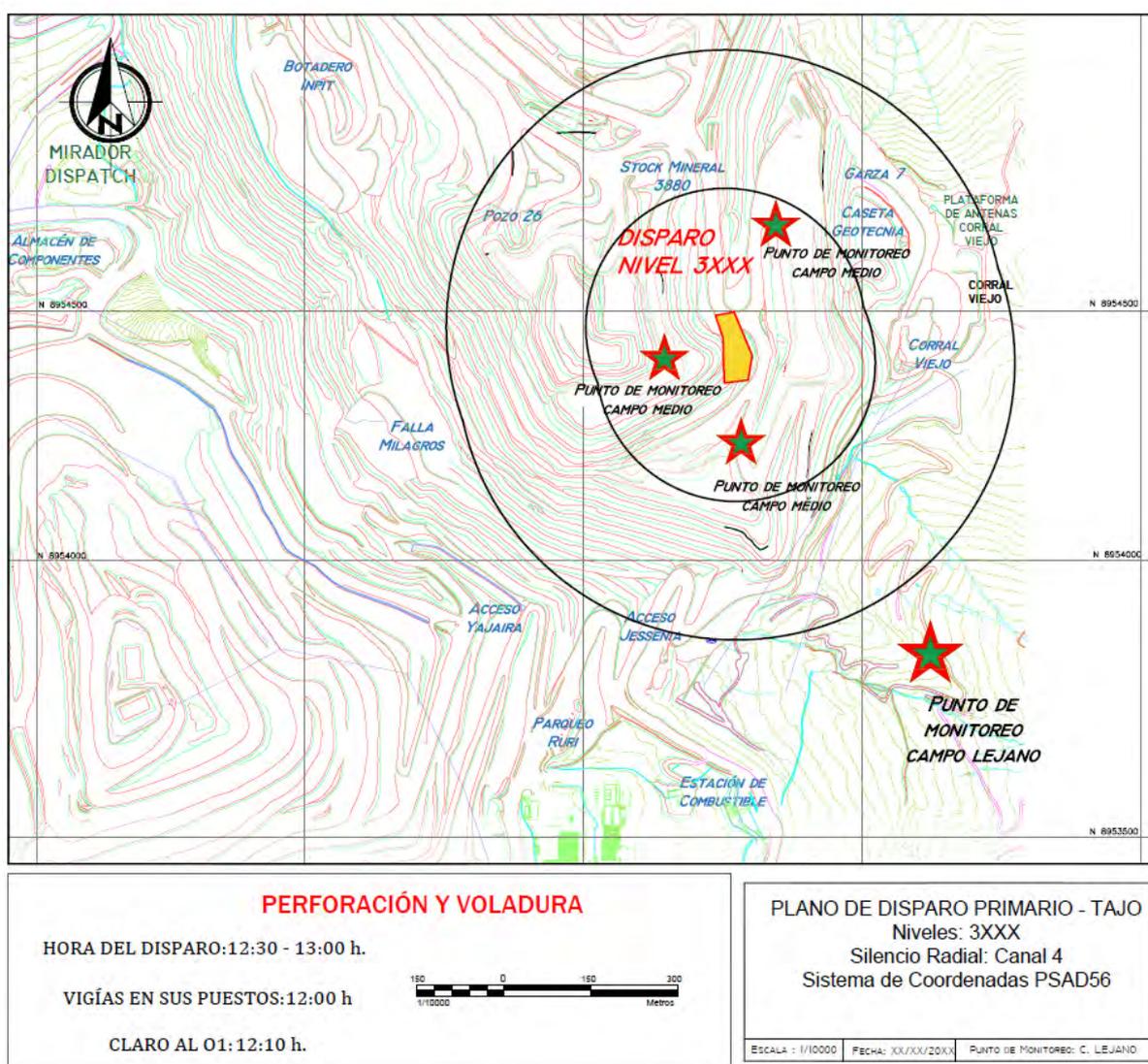


Figura 9. “Plano de Disparo y Puntos de monitoreo”. Se ve el punto de monitoreo estático de campo lejano y los puntos de monitoreos móviles de campo medio de acuerdo al nivel de voladura. Tomada del reporte diario de voladura de la Unidad Minera

4.2 Discriminación de Datos

Al momento de realizar los monitoreos se siguió el procedimiento correcto para el uso del sismógrafo, asimismo, las condiciones del terreno fueron escogidas y acondicionadas de forma de que no se alteren los datos por movimientos que no fueran propios de las voladuras. A pesar de ello, debido a diferentes factores, algunos datos obtenidos no correspondían a la naturaleza de las vibraciones registradas, por ello se debieron discriminar dichos elementos para no alterar el resultado del modelo.

4.2.1 Triggers básicos y lectura del sismógrafo

Se verificó la configuración básica del sismógrafo y de los disparadores (*triggers*) de señal de los geófonos triaxiales de acuerdo a los límites operacionales que ofrecieron los modelos ISEE y DIN. La configuración de los disparadores se realizó de forma digital en oficina, para ello se utilizó el software Blastware de InstanTel como se observa en la Tabla 14.

Tabla 14

Valores de la configuración de triggers en cada tipo de geófono triaxial

Geófono Triaxial	Trigger de Frecuencia	Trigger de Vibración
ISEE	2 Hz	0.512 mm/s
DIN	1 Hz	0.512 mm/s

Nota. Datos predeterminados de los dos geófonos obtenidos de manuales operativos de la Unidad minera.

Los disparadores de vibración tuvieron el mismo valor inicial para cada eje del geófono: transversal, vertical y longitudinal. Asimismo, la configuración del micrófono fue la de defecto registrando valores desde los 88 dB en frecuencias desde los 2 Hz. Estos valores iniciales nos ayudaron para discriminar la data

histórica de los monitoreos desde el año 2016, pudiendo descartar así valores de VPP menores a los 0.512 mm/s.

4.2.2 Calibraciones del geófono triaxial y del micrófono

Para poder revisar correctamente los datos del registro del sismógrafo, se utilizaron las calibraciones que el propio equipo realiza en los geófonos y en el micrófono antes o después de un registro, de esta manera se pueden separar datos que no fueron calibrados en campo correctamente, como se ve en las Figuras 10 y 11.

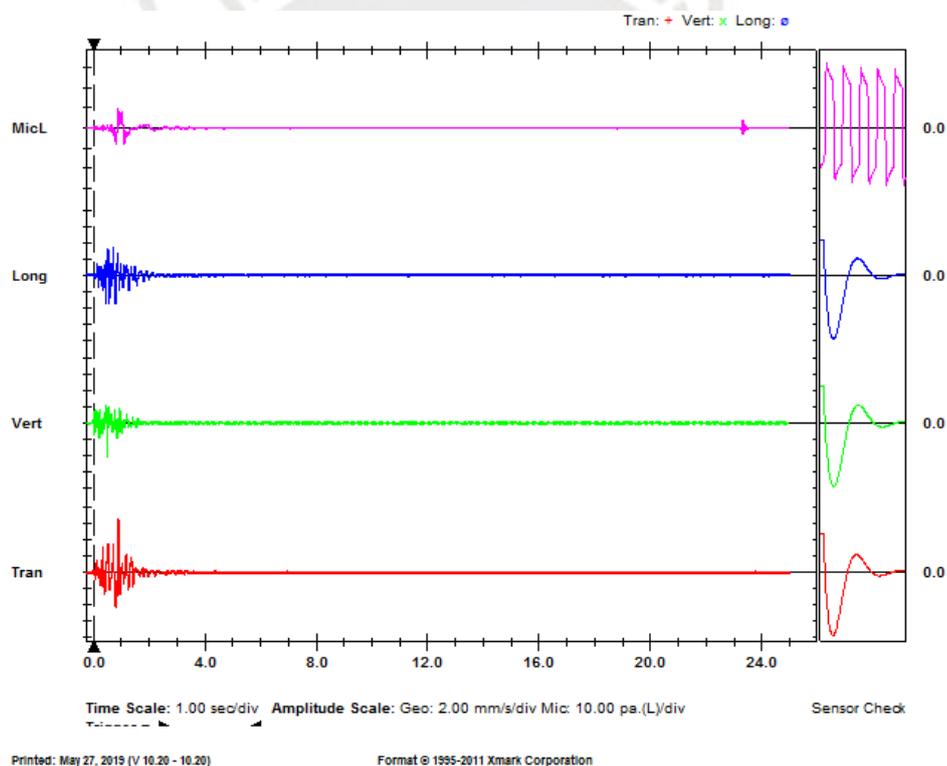


Figura 10. “Gráfico de un registro adecuado y calibrado correctamente”. Extraído de los monitoreos mediante el software Blastware de Instantel. *Nota.* Las ondas que aparecen en la zona de Sensor Check evidencian un movimiento armónico, indicando de esta manera una correcta calibración.

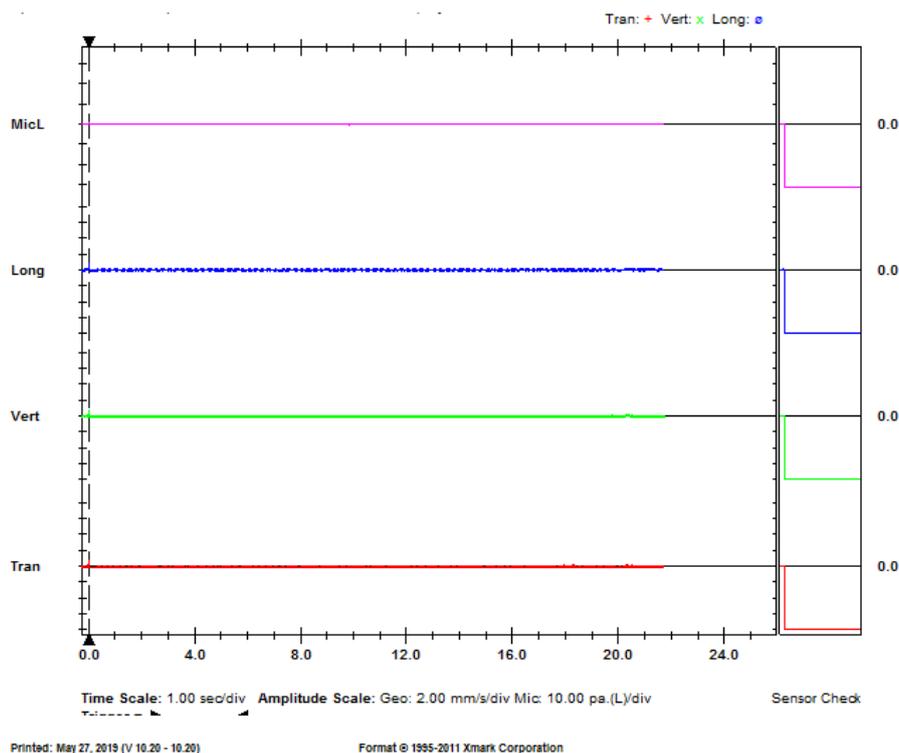


Figura 11. “Gráfico de un registro inadecuado por mala calibración”. Extraído de los monitoreos mediante el software Blastware de InstanTel. *Nota.* No se observa una medición de vibraciones en la zona de escala de tiempo (1-24 segundos), asimismo, la zona de Sensor Check no presenta un movimiento armónico.

En ambas figuras, se tiene el registro de mediciones en un rango de tiempo determinado, pero al realizar la verificación de sensores (*Sensor Check*), se puede observar que, en la primera figura, tanto el micrófono como todos los componentes dimensionales del triaxial pudieron ser verificados y pasaron la prueba de operatividad correcta; a diferencia de la segunda figura, en la que claramente se observan errores en la verificación en cada canal.

4.3 Determinación del Universo de Datos

4.3.1 Modelo de Devine y regresión lineal

Como se mencionó anteriormente, en el capítulo 2, se busca que el universo de datos válidos pueda ser modelado de acuerdo al modelo propuesto por Devine (Ec.2.4.1):

$$V = K x \left[\frac{d}{w^{1/2}} \right]^{-a}$$

Una vez validados los datos obtenidos en campo, se modelan de tal forma que se pueda obtener la constante K y el factor de atenuación "a", para ello se aplica el modelamiento de regresión lineal de tal forma de que la variable dependiente "Y" equivalente a la VPP se relacione directamente mediante una ecuación de primer grado a la variable X, la cual relaciona la carga de explosivo operante y la distancia de la medición. Esto se puede observar en el siguiente desarrollo de ecuaciones.

$$\ln(V) = \ln\left(K x \left[\frac{d}{w^{1/2}} \right]^{-a}\right)$$

$$\ln(V) = \ln(K) + \ln\left(\left[\frac{d}{w^{1/2}} \right]^{-a}\right)$$

$$\ln(V) = \ln(K) - a \ln\left(\frac{d}{w^{1/2}}\right)$$

De donde se tiene la equivalencia:

$$\ln(V) = \ln(K) - a \ln\left(\frac{d}{w^{1/2}}\right) \equiv Y = B - a X \quad (4.3.1)$$

4.3.2 Desviación estándar

Una de las herramientas a utilizar para la discriminación de datos es la desviación estándar para poder medir la dispersión de los datos y limitarlos al porcentaje deseado, es así que, luego de obtener la primera modelación de la ecuación de Devine utilizando todos los datos que superaron los dos primeros filtros: de *triggers* y de calibración de sensores, se realiza la primera gran discriminación de datos.

Esto se realiza comparando el valor real del logaritmo natural de la VPP, medida por el sismógrafo, y el valor Y obtenido mediante la ecuación 4.3.1. Esta comparación se realiza restando ambos valores mencionados, obteniendo así un

valor al que se le llama error de distancia vertical, ya que representa cuán alejado de la gráfica lineal se encuentra el valor en el eje coordenado.

$$error = Ln(VPP_{Real}) - Y$$

$$error = Ln(VPP_{Real}) - (B - a X)$$

Estos errores nos servirán para crear rangos de discriminación de los datos erráticos que disturban la tendencia de la gráfica. Estos rangos se obtienen con la media de la muestra de errores y la desviación estándar de la misma, limitándola al 95%, lo cual ayuda a eliminar datos que se alejan de la tendencia principal.

Luego de esta discriminación de datos y aplicando el procedimiento en 4.3.1 se obtiene:

$$Y_s = B_s - a_s X \quad (4.3.2)$$

4.3.3 Índice de confiabilidad (R^2)

La aplicación de la discriminación de datos por estadística robusta dispone que el modelo mejore su índice de confiabilidad, esperando así que el modelo represente la realidad. Por ello se espera que este índice alcance el valor de 0.8 o de 80% de confiabilidad, representando así una adecuada modelación de datos.

Entonces, a partir del modelo corregido luego de la discriminación por media y desviación estándar, se obtiene un índice R^2 moderadamente alto, sin embargo, este aún requiere ser afinado para representar la realidad de forma más certera. Es por eso que se opta por realizar iteraciones a la muestra corregida hasta estabilizar los valores de la ecuación y obtener el mayor índice de confiabilidad.

Las iteraciones se basaron en la selección más específica de los datos de la muestra, por ello se realizó el mismo procedimiento realizado en la discriminación robusta (desviación estándar), con la diferencia de que la modelación de la gráfica y la obtención del error parte de la ecuación lineal ya corregida previamente por desviación estándar (4.3.2). Este proceso de afinamiento de datos se realiza hasta que la variación entre las constantes y las tendencias de las ecuaciones lineales sean mínimas, obteniendo así hasta tres iteraciones.

$$error_1 = Ln(VPPreal) - Y_s$$

$$error_1 = Ln(VPPreal) - B_s - a_s X$$

Obteniendo: $Y_1 = B_1 - a_1 X$

$$error_2 = Ln(VPPreal) - Y_1$$

$$error_2 = Ln(VPPreal) - B_1 - a_1 X$$

Obteniendo: $Y_2 = B_2 - a_2 X$

$$error_3 = Ln(VPPreal) - Y_2$$

$$error_3 = Ln(VPPreal) - B_2 - a_2 X$$

Obteniendo: $Y_3 = B_3 - a_3 X$

4.3.4 Universo de datos validados

Como se pudo observar previamente en el modelo de Devine, la herramienta de la regresión lineal sirve para obtener los valores de la constante K y el exponente a , mediante la aplicación de logaritmos que ayuden a generar una ecuación de forma lineal. Esta aplicación matemática ayuda a crear una dependencia directa entre la

variable Y: Velocidad Pico Partícula y la variable X: *Square Root Scaled Distance (SRSD)*.

4.3.4.1 Campo Medio

La modelación de regresión lineal en campo medio fue bastante sencilla ya que los monitoreos fueron realizados adecuadamente, verificando los disparadores y validando los sensores en campo. Asimismo, para esta modelación, la muestra total de monitoreos fue de 9 datos, considerados representativos para las distancias medidas, los cuales al modelarse con la ecuación de Devine mostraban una confiabilidad alta, por lo tanto, no fue necesaria tanto la exclusión de algún dato como el tratamiento mediante estadística robusta.

4.3.4.2 Campo lejano

El caso de la modelación para distancias grandes, propuesta previamente en el capítulo 3, el procedimiento fue más complejo, ya que inicialmente se contaba con una muestra de 164 datos los cuales fueron siendo excluidos de acuerdo al cumplimiento de las condiciones propuestas: rango de disparador, validación de sensores en campo, rango de error en la distancia vertical y afinación del índice de confiabilidad, obteniendo el siguiente universo de datos presentados en la Tabla 15.

Tabla 15

Cantidad de datos y exclusión por filtros

Estado	Excluidos	Cantidad final
Inicial	-	164
Filtro de Triggers	3	161
Filtro de Sensores	11	150
Filtro de Error Vertical	35	115
Primera Iteración	-3*	118
Segunda Iteración	-1*	119
Tercera Iteración	0	119

Datos obtenidos con información tratada antes de la obtención de resultados.

Nota ()* En estos casos se excluyeron valores, pero también se añadieron otros que mejoraban el índice R.

4.4 Generación de ábacos de límites de carga

Como parte final del procesamiento de datos se generan dos tipos de ábacos de límites de carga, de acuerdo al campo al cual pertenecen. Priorizando el cuidado de edificaciones aledañas a la mina en el caso del campo lejano y el cuidado de los taludes finales de diseño para el caso del campo medio. Adicionalmente se agrega un factor de seguridad en el último ábaco debido a la sensibilidad de las estructuras del macizo rocoso.

Luego de obtener los valores de K y a en cada modelo, se simulan para las diferentes cargas por taladro utilizadas en la operación, estas fueron consideradas de acuerdo a la propuesta de diseño del operador de voladura, además de incurrir en un potencial daño a las estructuras mencionadas: 240, 220, 195, 180 y 140 kg/taladro.

4.4.1 Cuidado de estructuras sensibles

Las estructuras aledañas más cercanas a la operación minera se encuentran entre 600 y 1500 metros de los principales niveles donde se realizan las voladuras primarias. Estas construcciones son primariamente de adobes comunes, sin pilares y techos de cerámico o calaminas metálicas; adicionalmente, ninguna supera la primera planta construida.

Debido a la sensibilidad que presentan como hogares de pobladores comunales es que la norma utilizada es la alemana: DIN 4190, la cual dispone el límite de vibraciones para estructuras especialmente débiles entre 3 y 8 mm/s de acuerdo a la frecuencia predominante entre 10 y 50 Hz. Por lo tanto, la modelación del ábaco de cargas en campo lejano tiene como límite el valor mínimo propuesto por la norma.

4.4.2 Cuidado de paredes finales

En el caso del campo medio, los límites se establecen basados en la VPP del macizo rocoso, de acuerdo al dominio geotécnico asignado. Se realiza la comparación entre la VPP real (experimental Cross Hole), VPP por Hoek & Mavko y VPP por Barton. Esta limitación se hace de acuerdo a la relación de las vibraciones por efecto de las ondas compresionales, tensionales y el fracturamiento potencial del cuerpo receptor de acuerdo a la Ley de Hooke (McKenzie, 1993).

$$VPP_{crítico} = \sigma_T \times V_p / E_i \quad (4.4.2)$$

Dónde:

σ_T = Resistencia a la tracción

V_p = Velocidad de la onda P

E_i = Módulo de Young

Al propagarse las ondas compresionales por un medio sólido, de acuerdo al tipo de roca y diferentes factores geomecánicos, su velocidad puede ser calculada teóricamente mediante la ecuación 4.2.2a (Barton, 2002) con los valores de la Tabla 8.

$$V_p = 3500 + 1000 \text{Log}(Q) \quad (4.4.2a)$$

Debido a que se tiene el RMR del macizo rocoso y no el Q de Barton (1974), se recurre a la formula teórica de Bieniawski (1989) (4.4.2b), que relaciona estos dos tipos de registros de calidad de macizo rocoso, obteniéndose la relación que se utiliza para obtener la velocidad de propagación de la onda P según el RMR (4.4.2c).

$$RMR = 9 \text{Ln}(Q) + 44 \quad (4.4.2b)$$

$$V_p = 3500 + 48.25 (RMR - 44) \quad (4.4.2c)$$

Adicionalmente, la velocidad de propagación de la onda P también puede ser calculada teóricamente mediante la ecuación derivada del *P-Wave Modulus* (4.4.2d) (Mavko, 2009), utilizando las propiedades elásticas y sus constantes en diferentes sólidos. Esta relaciona directamente la calidad del macizo rocoso propuesta por Hoek (2006) en función al Módulo de Young, densidad y al coeficiente de Poisson presentados también en la Tabla 8.

$$V_p = \sqrt{\frac{E_i(1-\nu)}{\rho[(1-\nu)(1-2\nu)]}} \quad (4.4.2d)$$

Dónde:

ν = Coeficiente de Poisson

ρ = Densidad de roca

E_i = Módulo de Young

Como paso final, se comparan los valores obtenidos de V_p mediante relaciones teóricas con los obtenidos en experimentos de campo mediante el método de *Cross Hole*, los cuales se encontraron en estudios históricos de la mina. Para efectos prácticos de la investigación solo se modelaron dos tipos de unidades litológicas: Cuarzo Alunita y Argílico, ya que son los que predominan en las paredes finales de diseño del tajo como se ve en la Tabla 16.

Tabla 16

Velocidad de propagación de onda P experimental según dominio geotécnico

Unidad Litológica	Velocidad de la Onda P (V_p)
Cuarzo Alunita	1600 m/s
Argílico	1030 m/s

Nota. Datos obtenidos de estudios experimentales de ondas en la Unidad Minera.

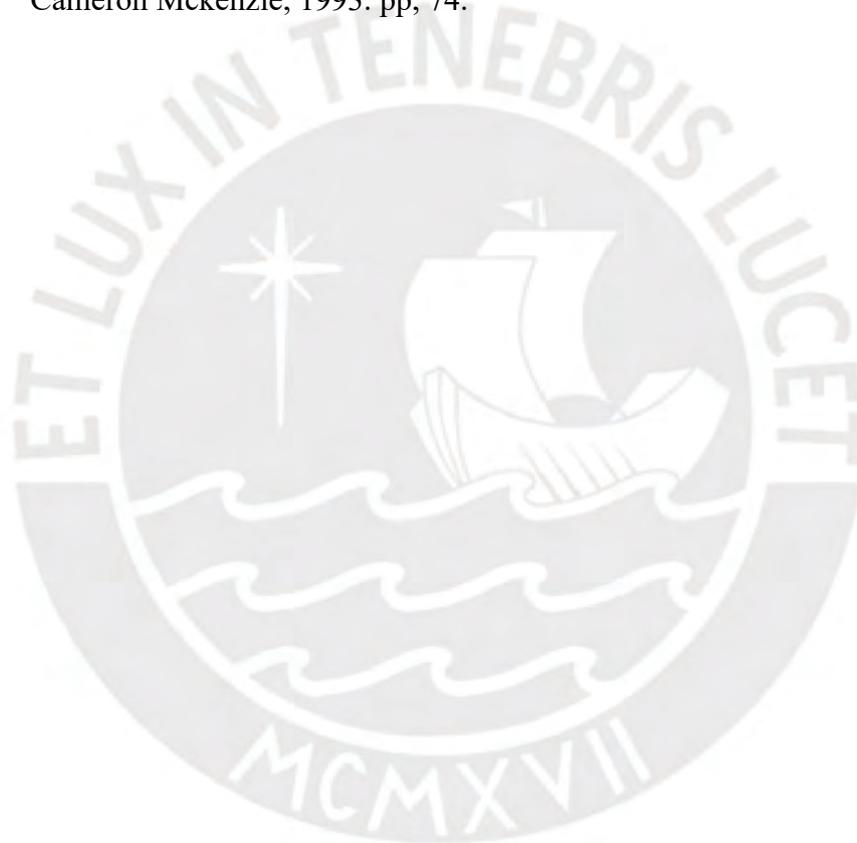
Finalmente, los valores de las VPP críticas calculadas con las diferentes V_p se someten a la comparación que realiza McKenzie (1993) según el criterio de daño potencial de las vibraciones. Se toma como límite máximo para culminar la generación del ábaco, el mínimo umbral de daño (extensión de fracturas preexistentes) de acuerdo a la Tabla 17.

Tabla 17

Criterio de daños por vibraciones

Tipo de Daño	Rango de VPP
Intenso fracturamiento	$VPP > 4VPPc$
Creación de nuevas fracturas	$VPP > 1VPPc$
Extensión de fracturas preexistentes	$VPP > 1/4VPPc$

Adaptado de la descripción de la influencia de las vibraciones en los daños por voladuras en “*Methods of improving blasting operations*” de Cameron Mckenzie, 1993. pp, 74.



Capítulo 5: Presentación y Discusión de Resultados

Los datos finales obtenidos luego de los filtros de operación y el análisis estadístico contaron con una muestra de 119 monitoreos para el modelo de campo lejano y 9 monitoreos para el modelo de campo medio (Ver apéndice 2). Con ayuda de estos datos se pudieron obtener las distribuciones lineales, las constantes de atenuación y de carga para generar los ábacos de predicción de vibraciones generadas por voladuras. Finalmente, se establecieron los límites de Velocidad Pico Partícula de acuerdo a la metodología propuesta en el capítulo anterior.

5.1 Modelo Predictivo de Vibraciones en Campo Lejano

La distribución inicial considerando todas las muestras es presentada en la Figura 12. Como se observa en la figura, se tiene una dispersión notoria de los valores y esto resulta en que la distribución cuente con un índice de confiabilidad de 0.4819, razón por la cual se procede a realizar la corrección por desviación estándar.

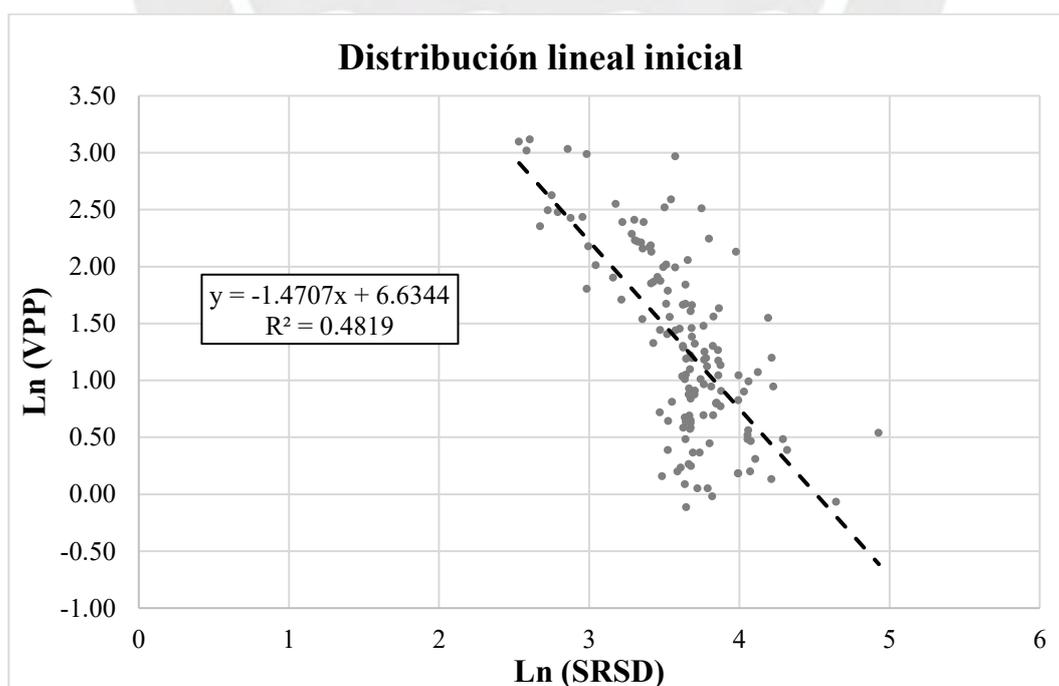


Figura 12. “Distribución Lineal Inicial”. Nota. Elaboración propia.

5.1.1 Corrección por desviación estándar

Luego de aplicar la corrección por desviación estándar se presenta la nueva distribución en la Figura 13, se puede observar el corte realizado a 95%, lo que implica una reducción de 35 datos y que cuente con un índice de confiabilidad de 0.7629, razón por la que se procede a realizar las iteraciones para acercarnos al valor de 0.80.

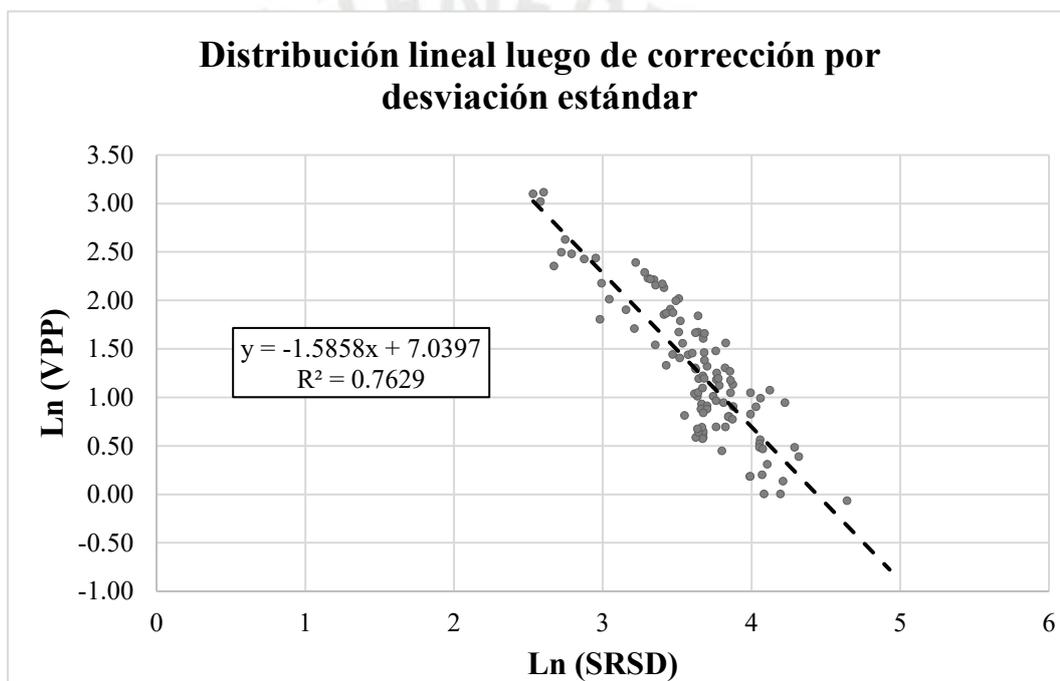


Figura 13. "Distribución lineal luego de corrección por desviación estándar".
Nota. Elaboración propia.

5.1.2 Iteración de distribuciones lineales

Como se observa en la Tabla 15, durante este proceso se añaden y excluyen datos durante 3 iteraciones con el objetivo de aumentar el índice de confiabilidad y encontrar una estabilidad en la distribución lineal.

5.1.2.1 Primera iteración

Luego de la primera iteración, en la Figura 14, se obtiene una distribución con un índice de confiabilidad de 0.7742.

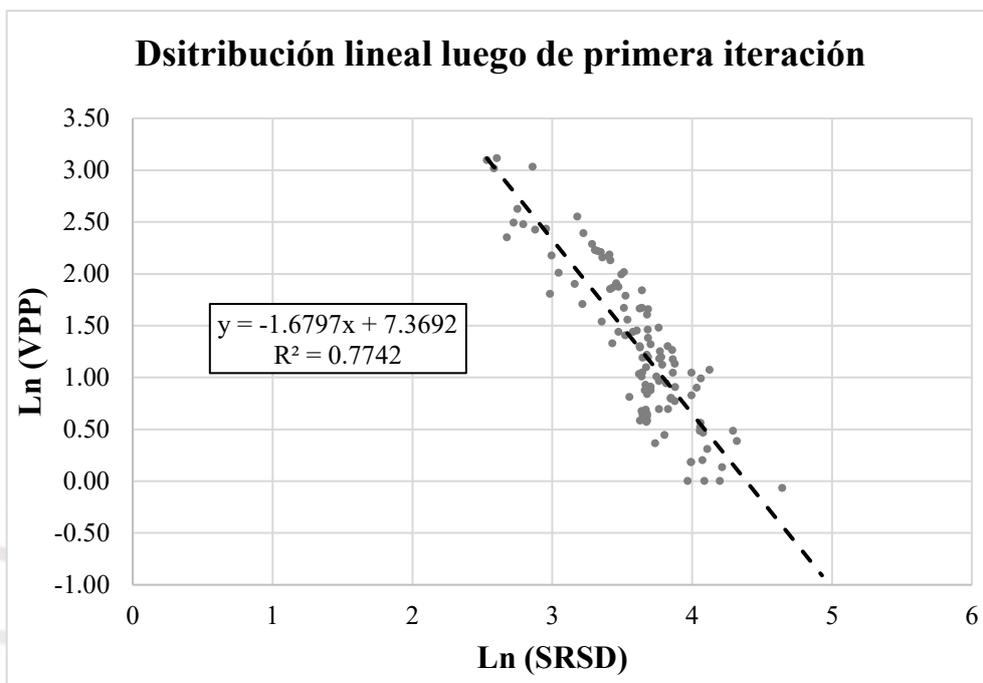


Figura 14. "Distribución lineal luego de primera iteración". Nota. Elaboración propia.

5.1.2.2 Segunda iteración

Al término de la segunda iteración se obtiene una distribución lineal con un índice de confiabilidad de 0.7794 presentada en la Figura 15.

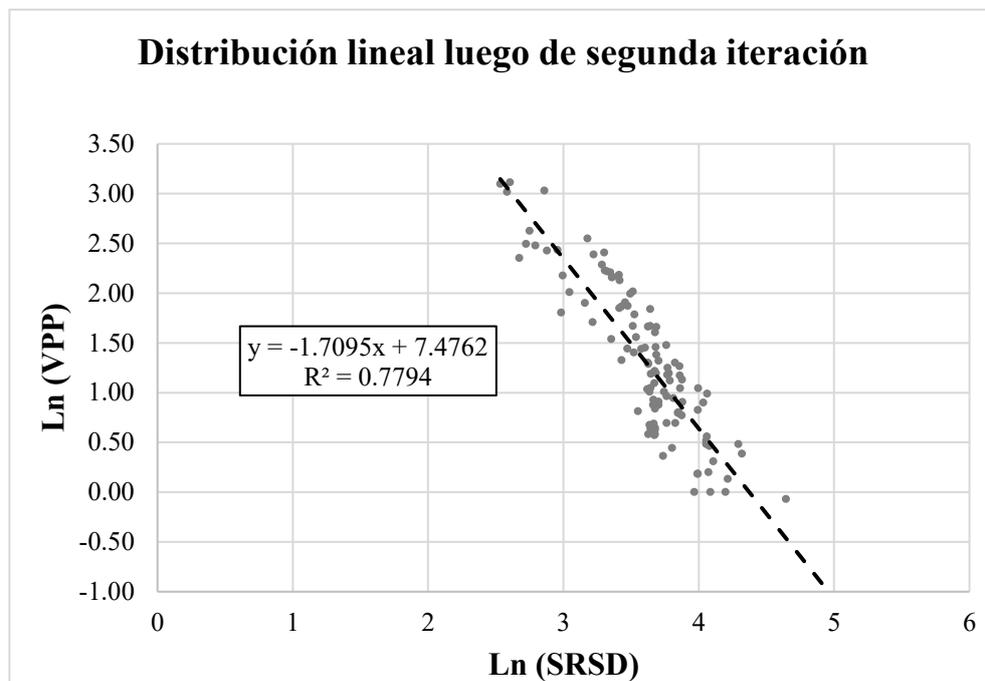


Figura 15. “Distribución lineal luego de segunda iteración”. Nota. Elaboración propia.

5.1.2.3 Tercera iteración

Finalmente, luego de la tercera iteración, se encuentra una estabilidad tanto en el índice de confiabilidad, con un valor de 0.7794, como en la distribución lineal. Esta distribución lineal es la misma que la presentada en la figura 12.

$$y = -1.7095x + 7.4762 \quad (5.1.2.2)$$

Se tiene entonces un aumento desde un 48% inicial hasta el 78% final en cuanto a índice de confiabilidad. Esto demuestra un crecimiento del mismo en cada paso de discriminación de datos, así como la disminución de la dispersión. Se considera al índice obtenido como adecuado para poder tratar los datos y poder generar un modelo de predicción confiable.

5.1.3 Modelo predictivo para campo lejano

De la ecuación (5.1.2.2) se obtienen las constantes finales $K = 1765.5$ y $a = 1.7095$. Estas constantes se asocian a la ecuación de Devine, con lo que se obtiene la ecuación (5.1.3) para la VPP con la que se procede al modelamiento de acuerdo a cargas (w) y distancias (d) determinadas en intervalos de 50 m. Cabe resaltar que el poblado más cercano se encuentra a una distancia de 600 m. Estas cargas, distancias y VPP se presentan en la Tabla 18.

$$VPP = 1765.5 \left[\frac{d}{w^2} \right]^{-1.7095} \quad (5.1.3)$$

Tabla 18

Modelamiento de VPP para Campo Lejano

Distancia (m)	Carga (kg/tal)				
	240	220	195	180	140
350	8.56	7.94	7.16	6.69	5.40
400	6.81	6.32	5.70	5.33	4.30
450	5.57	5.17	4.66	4.35	3.51
500	4.65	4.32	3.89	3.64	2.93
550	3.95	3.67	3.31	3.09	2.49
600	3.40	3.16	2.85	2.66	2.15
650	2.97	2.76	2.49	2.32	1.87
700	2.62	2.43	2.19	2.05	1.65
750	2.33	2.16	1.95	1.82	1.47
800	2.08	1.93	1.74	1.63	1.31
850	1.88	1.74	1.57	1.47	1.18
900	1.70	1.58	1.43	1.33	1.07
950	1.55	1.44	1.30	1.21	0.98
1000	1.42	1.32	1.19	1.11	0.90
1050	1.31	1.21	1.10	1.02	0.83
1100	1.21	1.12	1.01	0.94	0.76
1150	1.12	1.04	0.94	0.88	0.71

Nota. Elaboración propia.

En la Figura 16 se tiene al ábaco que representa el modelo predictivo para campo lejano, asimismo, se le añade un límite en el eje de VPP de acuerdo a la norma DIN y un límite en el eje de distancia de acuerdo a la ubicación del poblado más cercano con estructuras sensibles, que permite interpretarlo de manera más completa dentro de 4 cuadrantes.

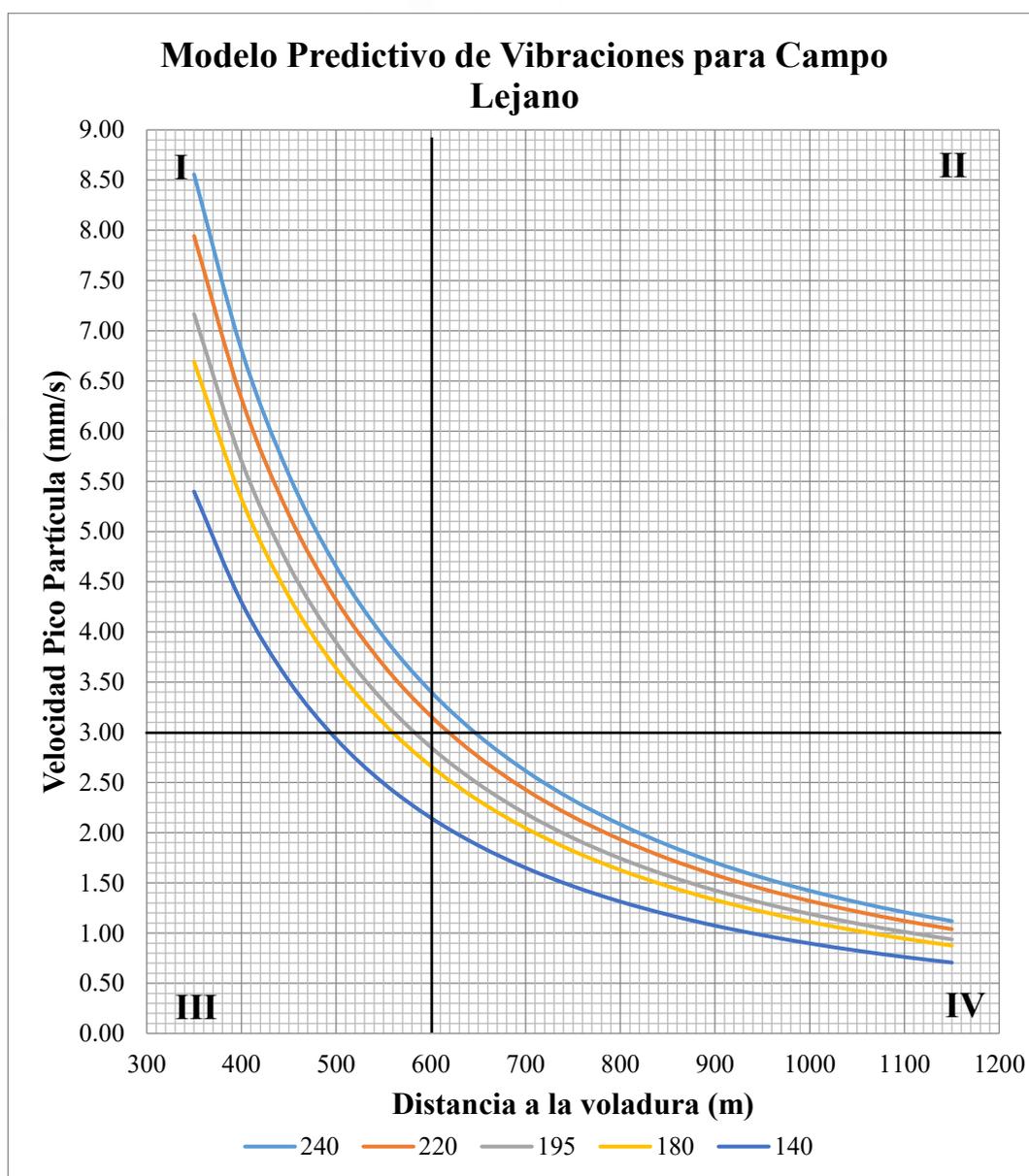


Figura 16. “Modelo predictivo de vibraciones para campo lejano”. Nota. Elaboración propia.

El modelo predictivo de vibraciones para campo lejano presentado indica la VPP que se obtendrá en un punto a determinada distancia de la voladura para una determinada carga de explosivo en los taladros. Se observa que conforme la distancia aumenta, la VPP disminuye. Todo lo contrario, ocurre a distancias más cortas, donde se puede observar que a mayor carga de explosivo la VPP es más alta.

El cuadrante I nos indica que todas las cargas modeladas generan vibraciones que superan el límite de 3 mm/s a distancias menores a 600 m. El segundo cuadrante muestra que al menos dos cargas recurrentes, 240 y 220 kg/tal, sobrepasan el umbral de vibraciones a distancias donde se encuentran estructuras sensibles. El cuadrante III sirve para análisis en caso se encuentren estructuras sensibles a menos de 600 m del punto de voladura. Finalmente, en el cuadrante IV encontramos la zona con las características que los disparos deberían tener para no originar daños en estructuras a partir de los 600 m de distancia.

5.2 Modelo Predictivo de Vibraciones en Campo Medio

Como se mencionó en el Capítulo 4, la metodología es similar a la generación del modelo para campo lejano, sin embargo, debido a que se tiene un universo de 9 monitoreos, al realizar la distribución lineal, se obtuvo un índice de confiabilidad de 0.9242 que permite continuar con el modelamiento sin mayor necesidad de discriminar datos. Esta distribución lineal es presentada en la Figura 17.

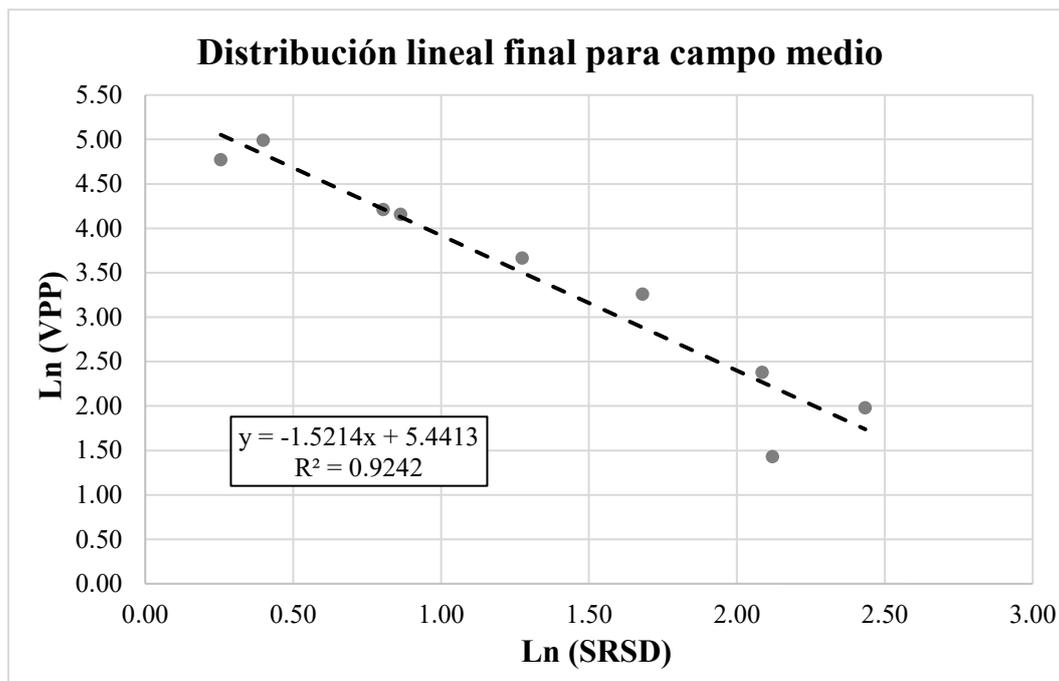


Figura 17. “Distribución lineal final para campo lejano”. Nota. Elaboración propia.

$$y = -1.5214x + 5.4413 \quad (5.2)$$

5.2.1 Límites para la VPP

De acuerdo a la metodología descrita anteriormente, se hallan 2 límites teóricos (Barton y Hoek & Mavko) y 1 límite real (Cross Hole) para la VPP. Se encuentran notables diferencias entre los límites teóricos y reales hallados, siendo los primeros mayores en ambos casos.

5.2.1.1 Propagación teórica por Barton

De acuerdo a la ecuación (4.4.2c) y utilizando los valores de la Tabla 8, se obtiene una V_p para el cuarzo alunita de 3712 m/s y para el argílico de 3138 m/s, debido a la diferencia de RMR entre ambas zonas. Estos valores, mediante la ecuación (4.4.2) dan los límites presentados en la Tabla 19 de

acuerdo al VPP crítico. La zona QA presenta un límite ligeramente mayor en comparación a la zona A.

Tabla 19

Límites VPP por Barton

Criterio de Daño	Cuarzo Alunita	Argílico
4 VPPc (mm/s)	6987	5391
VPPc (mm/s)	1747	1348
¼ VPPc (mm/s)	437	337

Nota. Elaboración propia.

5.2.1.2 Propagación teórica por Hoek & Mavko

Con la ecuación (4.4.2d) se obtiene una V_p de 3343 m/s y 1542 m/s para el cuarzo alunita y argílico respectivamente. Se tiene una diferencia notoria entre ambas zonas debido al módulo de Young de las mismas. Los límites obtenidos para un criterio de daño basado en la VPP crítica, de acuerdo a la ecuación (4.4.2), se presentan en la Tabla 20. El límite para la zona de QA es notoriamente mayor que el límite para la zona A.

Tabla 20

Límites VPP por Hoek & Mavko

Criterio de Daño	Cuarzo Alunita	Argílico
4 VPPc (mm/s)	6292	2649
VPPc (mm/s)	1573	662
¼ VPPc (mm/s)	393	166

Nota. Elaboración propia.

5.2.1.3 Propagación experimental por Cross Hole

Los valores obtenidos experimentalmente para la V_p fueron de 1600 m/s para cuarzo alunita y 1030 m/s para argílico. Los límites de acuerdo al VPP crítico, ecuación (4.4.2), se presentan en la Tabla 21. Al igual que en los dos límites teóricos, se tiene un límite más holgado en el caso del QA. Sin embargo, los límites experimentales por Cross Hole son también significativamente más conservadores a diferencia de los hallados teóricamente.

Tabla 21

Límites VPP por Cross Hole

Criterio de Daño	Cuarzo Alunita	Argílico
4 VPPc (mm/s)	3012	1769
VPPc (mm/s)	753	442
¼ VPPc (mm/s)	188	111

Nota. Elaboración propia.

5.2.2 Modelo predictivo para campo medio

De la ecuación (5.2) se obtienen los valores $K = 230.74$ y $a = 1.5214$, estos valores son asociados a la ecuación de Devine y se obtiene la ecuación (5.2.2) que será utilizada para realizar el modelamiento de VPP, presentado en la Tabla 22, entre distancias de 30 a 150 m y cargas de 140 a 240 kg/tal.

$$VPP = 230.74 \left[\frac{d}{w^2} \right]^{-1.5214} \quad (5.2.2)$$

Tabla 22

Modelamiento de VPP para Campo Medio

Distancia (m)	Carga (kg/tal)				
	240	220	195	180	140
30	84.42	79.02	72.09	67.83	56.03
34	69.78	65.31	59.59	56.07	46.31
38	58.92	55.15	50.31	47.34	39.10
42	50.60	47.36	43.21	40.65	33.58
46	44.06	41.24	37.62	35.40	29.24
50	38.81	36.32	33.14	31.18	25.76
55	33.57	31.42	28.67	26.97	22.28
60	29.41	27.52	25.11	23.63	19.52
65	26.04	24.37	22.23	20.92	17.28
70	23.26	21.77	19.86	18.69	15.44
80	18.98	17.77	16.21	15.25	12.60
90	15.87	14.85	13.55	12.75	10.53
100	13.52	12.65	11.54	10.86	8.97
115	10.93	10.23	9.33	8.78	7.25
130	9.07	8.49	7.74	7.29	6.02
150	7.30	6.83	6.23	5.86	4.84

Nota. Elaboración propia.

A continuación, en la Figuras 18 se presenta el ábaco para las zonas cuarzo alunita y argílica. Cabe resaltar que, al presentarse un escenario de cierre de mina, donde se espera un mayor cuidado de los taludes finales, se utilizaron los valores más conservadores (límites experimentales por Cross Hole) como limitantes de cargas.

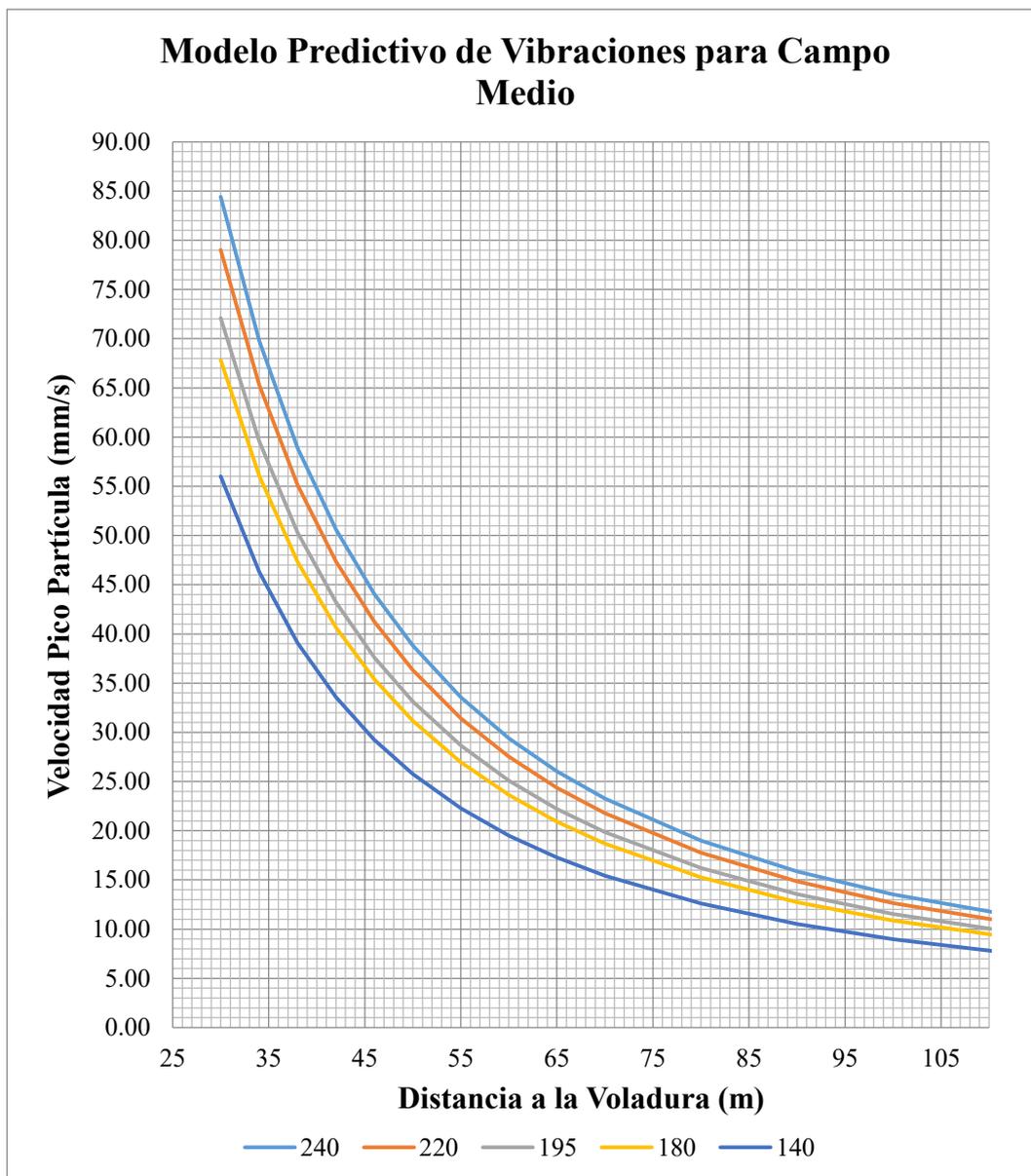


Figura 18. “Modelo predictivo de vibraciones para Campo Medio – Cuarzo Alunita & Argílico”. Nota. Elaboración propia.

En los ábacos de campo medio, se puede observar que, a una mayor distancia de la voladura, la VPP disminuye. Asimismo, el comportamiento de la VPP en la gráfica, debido a la fórmula utilizada, aumenta considerablemente a una distancia más corta alcanzando valores de 84 mm/s en el caso de una carga de 240 kg/tal. Sin embargo, este valor máximo no llega a superar ninguno de los dos límites propuestos por el criterio de rotura antes mencionado en la Tabla 21.

Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

Luego del análisis de los resultados presentados en el capítulo 5 se llega a la conclusión de que construir un modelo predictivo de vibraciones que refleje la realidad de los disparos de determinada operación minera resulta posible mediante la recopilación de data de monitoreo de vibraciones y de una correcta discriminación de la misma. Pudiéndose obtener un índice de confiabilidad R^2 aceptable (78%) luego de tres iteraciones, debido a la gran cantidad de datos, para el modelo de campo lejano y un R alto en modelo de campo medio (92%). Así, se puede comprobar estadísticamente que ambos modelos de regresión lineal permiten elaborar los ábacos correspondientes.

El ábaco obtenido como modelo predictivo para campo medio indica que ninguna de las cargas empleadas y/o consideradas en la operación minera origina algún tipo de daño sobre los taludes en ese rango de distancias ya que no llegan a superar el umbral de daño por fracturamiento ($1/4$ VPPc) de 111 mm/s en el dominio geomecánico menos resistente (Argílico). De igual manera ninguna vibración sobrepasa los límites experimentales de 1030 m/s establecidos por las pruebas de Cross Hole para la velocidad de propagación de la Onda P. Asimismo se resalta la variación sensible que puede llegar a tener la V_p a causa de los parámetros geotécnicos y las características físicas del macizo rocoso, esto se observa contrastando la gran diferencia que existe entre los valores de la V_p experimental con los obtenidos teóricamente: 3138 m/s y 1542 m/s.

El modelo predictivo para vibraciones en campo lejano permite realizar un análisis de las características de las voladuras (distancia desde el punto de disparo, VPP y carga de

explosivo) mediante el uso de cuadrantes delimitados por la norma DIN 4150 (3 mm/s) y la distancia de las estructuras sensibles del poblado más cercano (600 m). En este sentido, al tomar la mayor carga recurrente (240 kg/tal), se propone un especial control para estructuras a menos de 600 metros de distancia, esperando reducirla por lo menos 40 kg/tal para no sobrepasar el umbral del límite operacional evitándose el potencial daño.

Finalmente, se logró observar la variabilidad que existe durante los monitoreos de vibraciones inducidas por voladura, ya que aun existiendo una correlación de carga W de los taladros y distancia D al punto de monitoreo, estas dependen además de otros factores de importancia como las características geomecánicas: densidad, UCS, Q de Barton, los cuales alteran la propagación de las ondas vibratorias, por ello es necesario realizar una revisión meticulosa de los datos históricos y de los dominios geomecánicos.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda que para investigaciones similares en el futuro se continúe y amplíe la toma de datos de monitoreo en el campo medio, para poder acercar el ábaco aún más a la realidad debido a que es una buena práctica para poder llevar un correcto control de cuidado de taludes. Para el ajuste de los límites teóricos, se recomienda realizar pruebas de Cross Hole en las zonas de influencia que permitan actualizar el valor de la velocidad de propagación la onda P tanto en las zonas de cuarzo alunita como argílica.

Finalmente se recomienda el uso del ábaco del modelo predictivo de vibraciones para campo lejano mediante la interpretación de los cuadrantes para poder llevar un control adecuado de vibraciones y cuidado de estructuras sensibles, asimismo, se deja abierta la posibilidad de definir otros cuadrantes de acuerdo a los límites que requieran otros tipos

de estructuras y las distancias a las que se encuentran las mismas desde el punto de voladura.



Referencias

- Angloamerican (2019), *Mining Explained: OPEN-PIT MINING DEFINITION*. Recuperado de <https://www.angloamerican.com/futuresmart/our-industry/mining-explained/mining-terms-explained-a-to-z/open-pit-mining-definition>
- Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. (1993). Control de vibraciones producidas por voladuras (UNE 22381:1993). Recuperado de <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/une/?c=N0002301>
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock mechanics*, 6(4), 189-236.
- Barton, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* Vol. 39/2:185-216.
- Barton, N., & Grimstad, E. (2004). The Q system following thirty years of development and application in tunnelling projects. In *Proc. ISRM Symp. Eurock* (pp. 15-18).
- Bernaola Alonso, José and Castilla Gómez, Jorge and Herrera Herbert, Juan (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas., Madrid, España. Recuperado de oai:oa.upm.es:21848

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.

Bravo Sánchez, I. (2018). *Estudio de vibraciones inducidas por tronadura en Minera Spence*. (Tesis Profesional. Universidad de Chile, Santiago, Chile). Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168704>

Chen, W., Hasanipanah, M., Nikafshan Rad, H. *et al.* A new design of evolutionary hybrid optimization of SVR model in predicting the blast-induced ground vibration. *Engineering with Computers* (2019). <https://doi.org/10.1007/s00366-019-00895-x>

Chung-Won Lee, Jiseong Kim, and Gi-Chun Kang, Full-Scale Tests for Assessing Blasting-Induced Vibration and Noise. *Shock and Vibration*, vol. 2018, Article ID 9354349, 14 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9354349>.

Cruzado, F. B., & Diaz, K. A. (2017). *Análisis de la máxima carga operante en las vibraciones a campo lejano generadas por voladura, en Minera Cerro Negro S.A., Cajamarca – 2017* (Tesis de licenciatura). Repositorio de la Universidad Privada del Norte. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11537/10905>

Cueva, Omar (2015, setiembre). TECNICAS MODERNAS DE VOLADURAS CONTROLADAS EN MINERIA A CIELO ABIERTO, C. M. A. En Benavides, R.

(Presidente), *PERUMIN 32 Convención Minera – Encuentro de tecnología e Investigación*. Simposio internacional desarrollado en Arequipa, Perú.

Del Castillo Martínez, I. (2012). Control de las vibraciones generadas por el paso de dos tuneladoras bajo las edificaciones del casco urbano de Vigo. *Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente*, (214), 22-25. Recuperado de http://www.vibraquipo.com/papers/Ingeopress_Tuneladoras.pdf

Deutsches Institut Fur Normung (1999) DIN 4150 Part 3: *Structural Vibration in Buildings. Effects of Vibration on Structures, German Standard (DIN 4150)*. Recuperado de <https://www.din.de/en/getting-involved/standards-committees/nabau/standards/wdc-beuth:din21:262430160>

Galoso, A., Loayza, E. & Zarate, H. (2008). Mineralización y explotación minera artesanal en la costa sur media del Perú. *INGEMMET. Boletín, Serie E: Minería*, 4, 79.

Giraldo, F. (2010). *Control de Vibraciones para casas de tierra en Perú*. (Tesis de Título Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú). Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/670>

Hukki, R. T. (1961). Proposal for a solomonic settlement between the theories of von Rittinger, Kick and Bond. *Trans. AIME*, 220(5), 4.

Gutierrez, W. (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. (Tesis de Título Profesional, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/8287>)

Hedenquist, J. W. (1996). Epithermal gold deposits: styles, characteristics, and exploration. *Soc. Resource Geol, Spec Pub 1, Tokyo, 1.*

Hoek, E., & Diederichs, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 43(2), 203-215.

Hopler, R. B. (1998). *ISEE Blaster's Handbook*. Cleveland, Ohio: International Society of Explosives Engineers.

International Society Of Standarization. (2015). *Sistemas de gestión ambiental — Requisitos con orientación para su uso (ISO 14001:2015(es))*. Recuperado de <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14001:ed-3:v1:es>

Konya, C. J., & Albarrán, E. (1998). *Diseño de voladuras* (pp. 231-274). México: Ediciones Cuicatl.

Lee, C.-W., Kim, J., & Kang, G.-C. (2018). Full-Scale Tests for Assessing Blasting-Induced Vibration and Noise. *Shock & Vibration*, 1–14. Recuperado de <https://doi.org/10.1155/2018/9354349> \

Mavko, G., Mukerji, T., & Dvorkin, J. (2009). Seismic wave propagation. In *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media* (pp. 81-168). Cambridge: Cambridge University Press.

McKenzie, Cameron. (1993). Methods of Improving Blasting Operations. En J. Hudson (Ed). *Comprehensive rock engineering*. Vol. 4. (pp. 71-94). Oxford, England: Pergamon Press Ltd.

Ministerio de Energía y Minas. (1995) *Guía Ambiental para la Perforación y Voladura en Operaciones Mineras, Sub Sector Minería*. (Publicación Dirección General de Asuntos ambientales). Recuperado de

<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/perforacion.pdf>

MINEM, (2014). Actividad Minera en el Perú, Definiciones. Perú: Pequeña minería y Minería artesanal. *Foro Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*.

MINEM. (2018). *Anuario Minero 2018, Ministerio de Energía y Minas*. Recuperado de <http://www.minem.gob.pe/publicacion.php?idSector=1&idPublicacion=586>

National Research Council. (2002). *Evolutionary and revolutionary technologies for mining*. Washington: National Academy Press.

Orica Mining Services (2019). *Diseño de Carguío y Amarre para Voladura en operación minera*. Reporte de control pp. 1. [Archivo de datos]

- Orihuela, S & Dapello, J. (2014). *Diseño de un Modelo Predictivo a partir de un estudio de vibraciones en una voladura en una Mina modelo* (Tesis Profesional. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú). Recuperado de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/215>
- Pampacata, L. (2015). *Análisis de vibraciones inducidos por la voladura de rocas en cantera Atocongo en zonas cercanas a poblaciones*. (Tesis Profesional. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú). Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/2096>
- Saavedra, S. (1994). *Diseño y control de voladuras en la unidad Real de Ángeles, Cia Minera PROMET del grupo Frisco, S. A. de C.V.* (Tesis profesional. Universidad de Sonora, Sonora, México). Recuperado de <http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=6351>
- Sáez Árias, M. (2016). *Correlación cruzada de ruido sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la cuenca de Santiago*. (Tesis Postgrado. Universidad de Chile, Santiago, Chile) Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/138954>
- Schillinger, R. R., & Stadlober, K. (2014). Prognose von Sprengerschütterungen. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 159(10), 418-424. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s00501-014-0315-4>

- Sołtys, A., Pyra, J., & Twardosz, M. (2018). Control of the vibration structure induced during works with the use of explosives. *Technical Transactions*, 11(7), 87-99. Recuperado de <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.18.104.8799>
- Tovar, F. (2015). *Aplicación del principio de la velocidad pico partícula (VPP), para minimizar el daño macizo rocoso-utilizando retardos-veta Lourdes consorcio Minero Horizonte-La Libertad*. (Tesis profesional. Universidad Nacional del Centro del Perú, Junín, Perú) Recuperado de <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/1351>
- Tumialán, P. (2003). *Compendio de Yacimientos Minerales del Perú. Boletín 10-B* (Publicado en Geología Económica, INGEMET). Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12544/202>
- United States. Bureau of Mines, & Siskind, D. E. (1980). *Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting* (p. 74). New York, NY, USA: US Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Valencia, D. R., Sánchez, C. O., & Ordóñez, J. A. R. (2007). Efecto de las vibraciones generadas por voladuras en minas sobre edificaciones residenciales de mampostería simple en Colombia. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 7.
- Vásquez, Y. (2017). *Predicción de la Ley de Atenuación, Frecuencia Dominante y espectro de respuesta en vibraciones producidas por voladuras a Cielo Abierto* (Tesis

Profesional. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú). Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/10182>

Villarreal, E.; Rivera, R.; Santisteban A.; (octubre, 2010). Características Metalogénicas de la Cordillera Occidental en la Región Ancash. INGEMET. En *XV Congreso Peruano de Geología*. Congreso internacional desarrollado en Cusco, Perú.



Apéndices

Apéndice A: Datos de mediciones de distancias, niveles y fechas

NUM	NIVEL	DIA	SISMOG.	DISTANCIA	CARGA	PPV
1	4000	5/01/2016	1	500.0	140	2.74
2	4020	18/01/2016	1	620.0	170	2.84
3	4080	2/02/2016	1	500.0	170	0.89
4	4060	11/03/2016	1	500.0	160	1.79
5	4060	21/03/2016	1	500.0	120	0.98
6	4050	1/04/2016	1	500.0	160	1.87
7	4000	8/04/2016	1	500.0	160	1.91
8	4040	22/04/2016	1	500.0	170	3.28
9	4020	18/05/2016	1	620.0	130	2.84
10	4010	24/05/2016	1	510.0	170	2.53
11	3800	1/06/2016	1	367.0	130	2.05
12	4000	8/06/2016	1	510.0	180	2.74
13	4000	9/06/2016	1	510.0	160	0
14	3990	7/07/2016	1	647.0	180	3.1
15	3980	26/07/2016	1	577.0	180	4.38
16	3970	17/08/2016	1	503.0	180	3.67
17	3960	12/09/2016	1	668.0	200	0
18	3960	20/09/2016	1	779.0	180	2.69
19	3920	19/10/2016	1	528.0	180	1.77
20	3900	27/10/2016	1	523.0	200	1.26
21	3940	4/11/2016	1	523.0	180	1.3
22	3890	7/11/2016	1	545.0	180	2.48
23	3870	12/12/2016	1	616.0	180	2
24	3920	15/12/2016	1	480.0	200	1.47
25	3950	10/01/2017	3	360.9	210	5.51
26	3900	23/01/2017	3	681.2	210	2.21
27	3890	14/02/2017	3	633.9	215	3.25
28	3880	27/02/2017	3	513.8	220	0
29	3880	8/03/2017	3	621.9	220	1.44
30	3870	28/03/2017	3	616.8	129	2.28
31	3860	17/04/2017	3	648.3	190	2.23
32	3860	27/04/2017	3	634.1	190	4.75
33	3850	15/05/2017	3	523.8	215	4.21
34	4000	29/05/2017	3	425.6	170	1.17
35	3950	5/06/2017	3	602.3	185	1.05
36	3840	9/06/2017	3	617.8	190	1.56
37	3890	11/07/2017	3	545.5	210	3.62
38	3880	27/07/2017	3	553.3	210	5.31
39	3880	3/08/2017	3	545.5	210	1.79
40	4000	8/08/2017	3	432.1	180	4.22
41	3990	4/09/2017	3	541.1	210	2.81
42	3980	18/09/2017	3	495.7	215	4.07
43	3810	12/10/2017	3	561.3	215	1.89

44	3800	26/10/2017	3	531.0	215	1.22
45	3970	1/11/2017	3	630.8	170	2.47
46	3790	7/11/2017	3	557.8	215	1.09
47	3820	7/12/2017	3	571.5	215	2.4
48	3970	14/12/2017	3	631.9	215	2.62
49	4020	11/01/2018	3	526.0	180	1.99
50	3950	15/01/2018	3	639.0	210	3.07
51	4020	16/01/2018	3	526.0	190	1.62
52	4010	22/01/2018	3	544.0	180	2.4
53	4010	29/01/2018	3	479.8	215	2.69
54	3940	5/02/2018	3	544.9	180	3.74
55	3940	7/02/2018	3	544.9	190	2.31
56	3950	15/02/2018	3	544.9	160	2
57	4010	19/02/2018	3	544.9	190	4.98
58	4010	8/03/2018	3	456.0	180	1.9
59	3930	14/03/2018	3	662.0	200	2.22
60	3920	21/03/2018	3	468.0	180	2.25
61	3990	26/03/2018	3	615.0	180	3.67
62	3910	3/04/2018	3	576.0	200	2.53
63	3910	5/04/2018	3	877.0	201	2.92
64	3990	9/04/2018	3	510.0	180	1.96
65	4000	12/04/2018	3	250.0	160	6.07
66	3990	23/04/2018	3	1741.2	280	0.933
67	3980	25/04/2018	3	538.6	180	1.44
68	3990	8/05/2018	2	528.0	120	2.16
69	3920	16/05/2018	1	531.3	200	5.27
70	3970	17/05/2018	1	613.0	200	3.49
71	3900	5/06/2018	1	619.0	200	2.77
72	4010	14/06/2018	1	453.0	120	1.05
73	4010	26/06/2018	1	769.4	160	1.36
74	3890	3/07/2018	1	413.8	180	3.77
75	3980	14/07/2018	1	1059.3	210	1.62
76	3815	18/07/2018	1	1635.0	140	1.71
77	3990	24/07/2018	1	252.6	210	20.71
78	3970	27/07/2018	1	1008.3	180	1.47
79	3970	30/07/2018	1	982.3	210	3.31
80	3880	31/07/2018	1	562.4	200	4.3
81	3790	2/08/2018	1	389.0	210	0.696
82	4000	7/08/2018	1	257.2	60	12.4
83	3980	8/08/2018	1	205.1	200	10.5
84	3960	10/08/2018	1	968.7	200	2.57
85	3960	14/08/2018	2	276.3	60	19.4
86	4000	20/08/2018	2	297.2	200	7.46
87	3990	23/08/2018	2	268.1	180	8.8
88	3950	27/08/2018	1	897.5	240	1.75
89	3950	29/08/2018	1	363.7	210	10.9
90	3990	3/09/2018	1	242.2	150	19.8
91	3910	4/09/2018	1	599.2	160	3.54

92	3940	7/09/2018	2	1026.1	240	4.7
93	3940	10/09/2018	1	909.8	240	1.22
94	3980	12/09/2018	1	205.3	240	20.4
95	3980	14/09/2018	1	159.3	160	22.1
96	3930	18/09/2018	1	895.0	240	1.68
97	3900	19/09/2018	1	601.1	160	3.23
98	3930	20/09/2018	1	893.7	240	1.62
99	3980	24/09/2018	1	204.5	180	12.1
100	3980	25/09/2018	1	238.4	180	11.3
101	3920	27/09/2018	1	944.3	280	2.46
102	3890	2/10/2018	1	529.2	180	3.38
103	3970	4/10/2018	1	252.9	240	11.9
104	3970	9/10/2018	1	242.4	240	13.8
105	3970	11/10/2018	1	209.5	240	22.5
106	3910	16/10/2018	1	855.3	210	1.59
107	3990	18/10/2018	1	266.3	125	8.46
108	3910	23/10/2018	1	922.5	240	1.2
109	3980	24/10/2018	1	381.1	180	9.11
110	3880	29/10/2018	1	666.2	195	5.11
111	3880	30/10/2018	1	512.2	180	6.29
112	3980	31/10/2018	1	442.8	195	6.73
113	3900	6/11/2018	2	957.1	200	1.14
114	3980	2/01/2019	1	450.5	220	6.36
115	3950	3/01/2019	1	355.9	220	12.8
116	3950	7/01/2019	1	285.1	220	11.4
117	3970	9/01/2019	1	510.3	220	4.74
118	3870	10/01/2019	1	802.4	220	1.2
119	3870	15/01/2019	1	503.3	220	5.96
120	3870	16/01/2019	1	818.7	240	1.94
121	3870	18/01/2019	1	556.2	195	3.3
122	3960	22/01/2019	1	639.9	195	1.86
123	3960	23/01/2019	1	567.1	220	2.85
124	3960	24/01/2019	1	513.7	220	13.3
125	3860	5/02/2019	1	619.0	240	3.6
126	3950	8/02/2019	1	632.1	140	8.39
127	3950	12/02/2019	1	553.5	170	12.3
128	3940	13/02/2019	1	527.8	140	9.43
129	3950	18/02/2019	1	607.8	180	2.57
130	3850	25/02/2019	1	551.0	225	4.27
131	3850	27/02/2019	1	552.7	195	1.28
132	3940	4/03/2019	1	535.0	185	2.99
133	3990	15/03/2019	3	384.0	180	4.65
134	3950	22/04/2019	3	364.9	240	6.69
135	3960	24/04/2019	3	262.9	190	1.005
136	3940	29/04/2019	3	381.0	195	9.28
137	3950	2/05/2019	3	388.0	180	10.9
138	3860	6/05/2019	3	929.0	195	7.97
139	3940	7/05/2019	3	445.0	240	8.63

140	3940	10/05/2019	3	396.0	220	9.83
141	3930	13/05/2019	3	478.0	240	6.45
142	3930	17/05/2019	3	451.0	220	8.39
143	3930	20/05/2019	3	421.0	240	11.1
144	3900	22/05/2019	3	804.0	220	1.2
145	3920	27/05/2019	3	535.0	225	7.31
146	3920	3/06/2019	3	535.0	180	5.25
147	3920	4/06/2019	3	535.0	180	3.98
148	3920	10/06/2019	3	406.0	180	8.88
149	3910	12/06/2019	3	650.0	220	3.3
150	3910	24/06/2019	3	600.0	240	7.8
151	3900	2/07/2019	3	500.0	240	6.5
152	3860	4/07/2019	3	520.0	240	7.5
153	3890	11/07/2019	3	465.0	240	8.74
154	3910	12/07/2019	3	520.0	240	5.31
155	3910	16/07/2019	3	430.0	240	9.18
156	3900	19/07/2019	3	510.0	240	7.33
157	3900	23/07/2019	3	520.0	240	10.2
158	3900	27/07/2019	3	480.0	240	3.86
159	3900	30/07/2019	3	490.0	240	2.9
160	3890	31/07/2019	3	620.0	240	5.85
161	3890	5/08/2019	3	600.0	240	7.73
162	3890	14/08/2019	3	535.0	240	4.85
163	3900	15/08/2019	3	465.0	240	4.39
164	3880	19/08/2019	3	440.0	240	10.2
1	4000	27/02/2018	3	30	160	63.8
2	3840	30/05/2019	3	123.6	220	4.18
3	3920	3/06/2019	2	20	180	147
4	3920	4/06/2019	2	30	180	67.4
5	3920	6/06/2019	2	48	180	39
6	3840	6/06/2019	3	153	180	7.24
7	3920	29/05/2019	2	75	195	26.02
8	3910	26/06/2019	1	20	240	118
9	3750	22/08/2016	1	108.0	180	10.8

Apéndice B: Datos de mediciones validadas para la modelación

NUM	PPV	NUM	PPV	NUM	PPV
1	2.74	57	4.98	113	1.14
2	2.84	59	2.22	114	6.36
4	1.79	60	2.25	115	12.8
6	1.87	61	3.67	116	11.4
7	1.91	64	1.96	117	4.74
8	3.28	65	6.07	118	1.2
9	2.84	66	0.933	119	5.96
10	2.53	68	2.16	120	1.94
12	2.74	69	5.27	121	3.3
14	3.1	70	3.49	123	2.85
15	4.38	73	1.36	129	2.57
16	3.67	74	3.77	130	4.27
18	2.69	75	1.62	132	2.99
19	1.77	77	20.71	133	4.65
22	2.48	78	1.47	134	6.69
23	2	80	4.3	136	9.28
25	5.51	83	10.5	138	7.97
26	2.21	86	7.46	139	8.63
27	3.25	87	8.8	140	9.83
29	1.44	88	1.75	141	6.45
30	2.28	89	10.9	142	8.39
31	2.23	91	3.54	143	11.1
33	4.21	93	1.22	144	1.2
36	1.56	94	20.4	146	5.25
37	3.62	95	22.1	147	3.98
38	5.31	96	1.68	148	8.88
39	1.79	97	3.23	149	3.3
40	4.22	98	1.62	151	6.5
41	2.81	99	12.1	152	7.5
42	4.07	100	11.3	153	8.74
43	1.89	101	2.46	154	5.31
45	2.47	102	3.38	155	9.18
47	2.4	103	11.9	156	7.33
48	2.62	104	13.8	158	3.86
49	1.99	105	22.5	159	2.9
50	3.07	106	1.59	160	5.85
52	2.4	108	1.2	162	4.85
54	3.74	109	9.11	163	4.39
55	2.31	111	6.29	164	10.2
56	2	112	6.73		