



## **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

### **Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

**“APLICACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA PREDICCIÓN DE VIBRACIONES INDUCIDAS POR VOLADURAS EN UNA EXPLOTACIÓN DE CALIZAS EN PROXIMIDAD A ZONAS URBANAS”**

#### **PROYECTO DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

#### **INGENIERO DE MINAS**

Presentado por:

**ROBERTO ANDRÉS NORIEGA MOSCOSO**

GUAYAQUIL – ECUADOR  
2017

## **DEDICATORIA**

Primeramente a Dios y a mi familia.

A Virginia.

Roberto Andrés Noriega Moscoso

## **AGRADECIMIENTO**

Le agradezco a Dios por haberme dado las fuerzas para cumplir esta etapa de mi vida. A mi familia por todo el apoyo durante mi vida y especialmente durante estos últimos años. A Virginia por su apoyo incondicional. A todos mis maestros, y a la MSc. Glenda Loayza y al Ing. Juan Carlos Pindo por la amistad brindada durante mis años universitarios.

Roberto Andrés Noriega Moscoso

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

**Comentario [W1]:** El orden de los contenidos debe ser:

Dedicatoria  
Agradecimiento  
Tribunal  
Declaración expresa  
Resumen

---

Eduardo Luis Recalde Chiluiza, PhD.  
DIRECTOR DE MATERIA INTEGRADORA

---

Juan Carlos Pindo Macas, Ing.  
MIEMBRO EVALUADOR

---

Paúl César Carrión Mero, PhD.  
MIEMBRO EVALUADOR

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral"

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)

---

Roberto Andrés Noriega Moscoso

## RESUMEN

El objetivo del trabajo es definir un modelo matemático empírico para la predicción de los niveles de vibraciones inducidos en el terreno por la detonación de explosivos en voladuras de producción. Se procesaron registros de vibraciones en conjunto con la ficha técnica de 163 voladuras de los últimos dos años, donde se identificó dos tendencias distintas dentro del área de estudio en relación al comportamiento de atenuación de las ondas vibratorias. Los parámetros analizados son: la carga explosiva por retardo, la distancia desde el frente de disparo hacia el punto de interés y la velocidad pico de partícula (PPV) inducida en el terreno. Se ajustaron dos modelos para el sector de explotación Huayco y el sector general de la cantera con una correlación de 0.70 y 0.74 respectivamente, se explica el 70% de la variabilidad de los datos. A partir de los modelos se desarrollaron herramientas prácticas de control a manera de ábacos y mapas temáticos para la estimación de la carga máxima explosiva que permita mitigar la afectación de vibraciones en la zona de estudio.

**Comentario [W2]:** El texto del resumen, al igual que de todo el cuerpo del trabajo final debe tener interlineado doble y espaciado posterior 24

**PALABRAS CLAVE:** Vibraciones - Carga Explosiva – Velocidad Pico de Partícula – Herramientas de control

## TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Antecedentes</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2. Planteamiento del problema</b> .....	<b>4</b>
1.2.1. Definición del problema.....	4
1.2.2. Justificación.....	6
1.2.3. Hipótesis.....	7
<b>1.3. Objetivos</b> .....	<b>8</b>
1.3.1. Objetivo general.....	8
1.3.2. Objetivos específicos.....	8
<b>1.4. Alcance</b> .....	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>11</b>
<b>METODOLOGÍA Y MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1. Metodología</b> .....	<b>12</b>
<b>2.2. Recopilación de datos</b> .....	<b>15</b>
2.2.1. Análisis de registros históricos.....	16
2.2.2. Registros in situ.....	18
2.2.3. Registro de vibraciones.....	21
<b>2.3. Marco Teórico</b> .....	<b>22</b>
2.3.1. Fundamentos de ondas sísmicas y vibraciones.....	22
2.3.2. Vibraciones inducidas por voladuras.....	28
2.3.3. Atenuación de ondas sísmicas y vibraciones.....	32
2.3.4. Daño producido por vibraciones de voladuras.....	35
2.3.5. Monitoreo de vibraciones de voladuras.....	39
2.3.6. Predicción de vibraciones de voladuras.....	41
2.3.7. Otros factores que afectan los niveles de vibraciones.....	47
2.3.8. Estándares nacionales e internacionales.....	49
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>56</b>
<b>DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	<b>56</b>
<b>3.1. Ubicación</b> .....	<b>57</b>
<b>3.2. Geología</b> .....	<b>59</b>

3.3. Características de la explotación .....	63
<b>4. CAPÍTULO 4.....</b>	<b>68</b>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>68</b>
4.1. Registro histórico de vibraciones .....	69
4.2. Registros in situ .....	82
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>83</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>83</b>
5.1. Selección del modelo .....	84
5.2. Validación del modelo.....	93
5.3. Influencia del grado de fracturamiento.....	95
5.4. Herramientas prácticas para el control de voladuras.....	97
5.4.1. Definición del límite de vibraciones .....	98
5.4.2. Ábaco empírico para determinación de carga máxima.....	100
5.4.3. Mapas temáticos de control .....	101
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>113</b>
6.1. Conclusiones.....	114
6.2. Recomendaciones .....	115
<b>7. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>116</b>
<b>8. ANEXOS.....</b>	<b>122</b>
ANEXO I. Base de datos de registro histórico .....	123
ANEXO II. Fichas de registro in-situ.....	130



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b> Esquema metodológico del estudio. ....	14
<b>Figura 2.2:</b> Esquema para la estimación del GSI.....	20
<b>Figura 2.3:</b> Sismógrafo Minimate Plus.....	21
<b>Figura 2.4:</b> Aproximación sinusoidal de una onda. Desplazamiento sinusoidal, (a) en una posición fija ( $x = \text{constante}$ ); (b) en un instante ( $t = \text{constante}$ ). ....	23
<b>Figura 2.5:</b> Movimiento de partícula según el tipo de onda; (a) Onda P (b) Onda S (c) Onda Rayleigh. ....	28
<b>Figura 2.6:</b> Idealización del comportamiento de las ondas generadas en una operación de voladura. ....	29
<b>Figura 2.7:</b> Trayectoria de la onda vibratoria a partir de la detonación de un taladro de voladura. ....	31
<b>Figura 2.8:</b> Movimiento de partículas inducido por las ondas generadas de la detonación explosiva. ....	31
<b>Figura 2.9:</b> Componentes para el registro de información de un sismógrafo; (a) Sensor de movimiento con tres unidades perpendiculares; (b) Componentes: bobina suspendida en un campo magnético que convierte movimiento relativo en voltaje eléctrico. ....	41
<b>Figura 2.10:</b> Límites de niveles seguros de vibraciones por parte de la USBM RI 8507.....	51

<b>Figura 2.11:</b> Criterio UNE 22.381 para el límite de vibraciones segura.	
<b>Fuente:</b> (AITEMIN, 1993).....	53
<b>Figura 2.12:</b> Límites seguros de vibraciones según la normativa DIN 4150.	54
<b>Figura 2.13:</b> Límites seguros de vibraciones en Ecuador según el TULSMA libro VI Anexo V. ....	55
<b>Figura 4.1:</b> Ubicación de voladuras y puntos de monitoreo de los registros históricos de vibraciones	72
<b>Figura 4.2:</b> Histograma de frecuencia de los parámetros relevantes a la generación de vibraciones de voladura en los datos para la construcción del modelo. <b>(a)</b> No. De perforaciones; <b>(b)</b> Longitud de perforación; <b>(c)</b> Burden; <b>(d)</b> Diámetro de Perforación; <b>(e)</b> Espaciamiento; <b>(f)</b> Carga máxima por retardo.....	73
<b>Figura 4.3:</b> Gráfico de Distancia Escalada vs PPV <b>(a)</b> Modelo USBM; <b>(b)</b> Modelo Ambraseys – Hendron; <b>(c)</b> Estándar Indio; <b>(d)</b> Langefors – Khilstrom. ....	74
<b>Figura 4.4:</b> Modelo ajustado a los datos <b>(a)</b> USBM; <b>(b)</b> Ambraseys – Hendron; <b>(c)</b> Estándar Indio; <b>(d)</b> Langefors – Khilstrom. ....	78
<b>Figura 4.5:</b> Distribución de las frecuencias de las vibraciones inducidas por voladuras.....	79
<b>Figura 4.6:</b> Niveles de vibraciones de registros históricos según límites establecidos en normativas.....	81

**Comentario [W3]:** Elimina los espacios adicionales que fueron usados para separar capítulos en el índice de figuras

<b>Figura 5.1:</b> Gráfico de modelo predictivo con intervalo de predicción del 95% y gráfico de dispersión para <b>(a)</b> Modelo USBM; <b>(b)</b> Modelo Ambraseys – Hendron; <b>(c)</b> Estándar Indio; <b>(d)</b> Modelo Langefors – Khilstrom	90
<b>Figura 5.2:</b> Ábaco empírico para la selección de la carga máxima por retardo para evitar sobrepasar los límites definidos de vibraciones según la distancia desde el frente de voladura hacia el punto de interés. ....	102
<b>Figura 5.3:</b> Distancia desde los frentes de explotación hasta las zonas urbanizadas. ....	82
<b>Figura 5.4:</b> Zonificación de carga máxima por retardo para evitar niveles de vibraciones por encima de 5 mm/s. ....	105
<b>Figura 5.5:</b> Zonificación de los sectores de explotación en base al diámetro de perforación. ....	108
<b>Figura 5.6:</b> Zona de influencia por afectación de vibraciones (5 mm/s) para el sector general de la cantera. ....	110
<b>Figura 5.7:</b> Zona de influencia por afectación de vibraciones (5 mm/s) para el sector huayco de explotación. ....	110
<b>Figura 5.8:</b> Delimitación de límite seguro para la construcción de urbanizaciones en base a la afectación por vibraciones. ....	112

## ÍNDICE DE TABLAS

**Comentario [W4]:** Coloca primero el índice de figuras, luego el de tablas

<b>Tabla I.</b> Definición de las variables de investigación .....	8
<b>Tabla II.</b> Equivalencias en peso de ANFO de los productos explosivos empleados.....	18
<b>Tabla III.</b> Especificaciones del sismógrafo Minimate Plus empleado. ....	22
<b>Tabla IV.</b> Escala de interpretación del coeficiente de determinación $r^2$ .....	47
<b>Tabla V.</b> Regulaciones internacionales para el control de vibraciones .....	49
<b>Tabla VI.</b> Área superficial reportada por cada concesión de estudio.....	57
<b>Tabla VII.</b> Explosivos utilizados para el arranque por voladuras en la cantera Calizas Huayco S.A. ....	66
<b>Tabla VIII.</b> Rango de parámetros de voladura del registro histórico .....	69
<b>Tabla IX.</b> Modelos de distancia escalada evaluados en este estudio.....	70
<b>Tabla X.</b> Modelos predictivos de vibraciones ajustados a los datos .....	77
<b>Tabla XI.</b> Datos correspondientes al registro de voladuras in situ. ....	82
<b>Tabla XII.</b> Coeficientes de correlación para el ajuste de los modelos predictivos .....	86
<b>Tabla XIII.</b> Intervalos de predicción del 95% y parámetros estadísticos representativos del gráfico de dispersión valores predichos vs valores reales: b – intercepto; m – pendiente.....	88
<b>Tabla XIV.</b> Comparación de valores medidos y predichos de niveles de vibraciones .....	94

**Tabla XV.** Comparación del desempeño de predicción de modelos predictivos con el factor del grado de fracturamiento..... 97

**Tabla XVI.** Carga de ANFO asociada a los diferentes diámetros operativos en base a las condiciones de explotación de la cantera ..... 106

**Comentario [W5]:** El espaciado e interlineado del índice de tablas y el de figuras debe ser igual

## ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA

### ABREVIATURAS

PPV	Velocidad Pico de Partícula
USBM	Departamento de Minería de Estados Unidos
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
PVS	Suma Vectorial Pico
RQD	Rock Quality Designation
GSI	Geological Strength Index
UNE	Una Norma Española
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
DIN	Instituto Alemán de Certificación
TULSMA	Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria
SD	Distancia Escalada
RMSE	Error Cuadrático Medio

## SIMBOLOGÍA

m	Metros
s	Segundos
Hz	Hertz
$Q_{Max}$	Carga explosiva máxima por retardo
$Eq_{ANFO}$	Equivalencia en peso a ANFO
$q_{exp}$	Calor de explosión
$\lambda$	Frecuencia de Discontinuidades
R	Distancia
K, B	Coefficientes in situ
$r^2$	Coefficiente de correlación
$\bar{e}$	Error Promedio

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**



## **1.1. Antecedentes**

Los recursos minerales son la piedra angular para el desarrollo industrial al proveer de la materia prima, metálica o no metálica, y su extracción es una actividad necesaria que genera impactos y afectaciones que deben ser controlados. El arranque y la extracción de estos recursos muy comúnmente se llevan a cabo mediante la operación de voladura, en la cual se detonan cargas explosivas cuidadosamente planificadas para fragmentar y desplazar la masa rocosa. La detonación de estos explosivos genera una gran cantidad de energía, de la cual se ha estimado que apenas alrededor de un 20% es utilizada en la fragmentación de la roca mientras el resto se pierde como vibraciones, ruido, proyecciones de roca y generación de polvo, entre otras afectaciones (Chen & Huang, 2001; Hustrulid, 2005). Históricamente la actividad minera se desarrollaba en zonas alejadas y aisladas de las urbes, sin embargo el incremento de la demanda de minerales, el agotamiento de reservas, el desarrollo tecnológico en la industria y el acelerado crecimiento urbano han llevado a una convergencia en ubicación de las zonas mineras y las zonas urbanas (CCSG Associates, 2016; Korose, Louchios, & Elrick, 2009). Un caso muy particular y conflictivo en Ecuador es la proximidad entre explotaciones de canteras y zonas urbanas en el sector de Vía a la Costa en la ciudad de Guayaquil.

De las afectaciones, el daño estructural que pueden ocasionar las vibraciones producto de voladuras en infraestructura cercana es una posibilidad, además de la molestia que generan en residentes y personas que se encuentran en la proximidad de los sectores de voladuras son considerables (Singh & Roy, 2010). Las vibraciones generadas por las voladuras dependen de variables controlables relacionadas principalmente con el explosivo y el diseño del disparo, como también de variables incontrolables o naturales como el tipo de roca y la geología del sector (Richards & Moore, 2003). Actualmente el parámetro indicador de niveles de vibración de voladuras más utilizado es la Velocidad Pico de Partícula o PPV (Peak Particle Velocity), que es la velocidad a la que las partículas de la tierra se mueven debido al paso de la onda vibratoria. Globalmente se ha dedicado mucho esfuerzo en el modelamiento de vibraciones y desarrollo de técnicas predictivas que sirvan como herramientas para un diseño y planificación de voladuras que minimice la potencial afectación de este tipo (Sambuelli, 2009; Singh & Roy, 2010). Sin embargo, información o estudios de este tipo son prácticamente inexistentes en Ecuador. Esta escasez de información y la proyección del desarrollo de la industria minera tanto metálica como no metálica en el país, hace el llamado de iniciar estudios en el tema bajo las características propias del entorno geológico – minero ecuatoriano.

## **1.2. Planteamiento del problema**

### **1.2.1. Definición del problema**

La ciudad de Guayaquil ha experimentado un crecimiento poblacional acelerado, con la directa consecuencia de un incremento en la urbanización de sectores, principalmente a lo largo de las vías primarias en la periferia de la ciudad. Específicamente el sector de la Vía a la Costa, ha tenido un auge como zona de desarrollo urbanístico, comercial e industrial y la presencia de un gran número de empresas inmobiliarias en este sector enfatiza esta tendencia en su futura evolución urbanística. Este desarrollo entra en conflicto directo con las actividades de explotación de calizas y materiales de construcción que se llevan a cabo a lo largo de la Formación San Eduardo, que corre paralela a la Vía a la Costa (Ortiz, 2014; Velasco, 2016).

La actividad minera genera dentro de sus procesos una serie de impactos, de los cuales para la explotación de materiales no metálicos la operación de arranque constituye la principal fuente de afectaciones. El arranque mediante el uso de explosivos en voladuras genera vibraciones, ruido, liberación de material particulado, "golpe de aire", entre otras afectaciones que impactan directamente a los residentes y las estructuras del sector

circundante (Holcim & Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, 2009). Estos impactos en la zona de Vía a la Costa se ven acentuados debido a la proximidad entre los sectores de explotación y las urbanizaciones (NN.AA., 2012). La afectación por las vibraciones inducidas por voladuras es especialmente importante debido a que además de ser un constante factor de molestias en los residentes tiene el potencial de generar daños en las estructuras que se encuentran en exposición continua (Nicholls, Johnson, & Duvall, 1971).

La explotación minera llevada a cabo por Mamut Andino en la cantera de Calizas Huayco S.A., ubicada en el kilómetro 12.5 Vía a la Costa, se encuentra actualmente en gran cercanía con zonas urbanas debido al crecimiento y desarrollo de la ciudad a lo largo de este sector. Algunas de las urbanizaciones más próximas a los sectores de explotación, como Portal al Sol, así como el centro comercial “Mi Comisariato” y una fábrica de cal se encuentran a menos de 400 metros de distancia. Esto genera una afectación directa que Mamut Andino debe asumir en sus operaciones de explotación para minimizarla.

### **1.2.2. Justificación**

El potencial daño de las estructuras cercanas a las zonas de explotación por el efecto de las vibraciones inducidas por voladuras ha sido documentado e investigado extensamente debido a la potencial magnitud de estos. Sin embargo los límites de tolerancia humana hacia los niveles de vibraciones son mucho menores que los requeridos para provocar potenciales daños estructurales, y es esta reacción humana la que representa el factor de protesta más común. La respuesta de las personas a las vibraciones representa un componente importante de análisis durante la planificación de voladuras en zonas urbanas. En relación a esto se ha hecho mucho énfasis, globalmente, en la aplicación de modelos predictivos durante el diseño y planificación de las voladuras para controlar las vibraciones inducidas (Dowding, 1985).

Diferentes autores e instituciones han propuesto modelos experimentales de predicción de niveles de vibración a partir de parámetros operativos de voladuras, que son utilizados ampliamente como herramientas de control para mitigar la afectación. Entre estos se incluyen algunos modelos predictivos ampliamente reconocidos propuestos por el Departamento de Minería de Estados Unidos, U.S. Bureau of Mines (Duvall & Fogelson, 1962), y el Departamento de Estándares Indios (Bureau of Indian Standards, 1973) a partir del análisis de extensas bases de datos de

mediciones experimentales relacionando principalmente la carga explosiva detonada por retardo y la distancia de separación al frente de disparo.

La tendencia del crecimiento de las zonas urbanas en Guayaquil, que cada vez más se aproxima a las zonas de explotaciones mineras, requiere de una metodología y herramientas de control que permitan asegurar que la cantidad de explosivo detonado no genera mayor afectación en el entorno residencial circundante considerando normativa de referencia.

### **1.2.3. Hipótesis**

La máxima carga explosiva detonada por retardo y la distancia hacia el frente del disparo tienen una influencia directa en la velocidad pico de partícula inducida en el terreno.

#### *Variables Independientes*

$X_1$ : Máxima carga explosiva por retardo (kg)

$X_2$ : Distancia hacia el frente de disparo (m)

#### *Variables Dependientes*

$Y$ : Velocidad Pico de Partícula (m/s)

En la **Tabla I** se presenta la definición conceptual y operacional de las variables de investigación.

**Tabla I.** Definición de las variables de investigación

	$X_1$	$X_2$	$Y$
Definición Conceptual	La cantidad máxima de masa explosiva en kg detonada en un instante no mayor a 8 ms.	La distancia, en m, como diferencia cuadrática entre las coordenadas del frente de disparo y el punto de monitoreo.	La máxima velocidad de partícula inducida por la voladura en el punto de monitoreo, en m/s.
Definición Operacional	Registro en campo de carga explosiva de perforaciones.	Coordenadas de GPS de frente de disparo y punto de monitoreo.	Registro de sismógrafo.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. Objetivo general

Desarrollar, un modelo predictivo de niveles de vibraciones asociados a parámetros de voladuras en base a mediciones experimentales que sirva como herramienta de control para mitigar la potencial afectación a las zonas circundantes.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

1. Identificar las variables que inciden en la generación de vibraciones por efectos de las voladuras mediante el uso de datos históricos y mediciones en sitio.
2. Determinar el modelo predictivo que mejor se ajuste a los resultados experimentales mediante relaciones empíricas calibradas al sitio y análisis estadístico de los datos.
3. Integrar el resultado a un análisis de la relación espacial de proximidad entre los sectores de explotación y zonas urbanizadas para generar una herramienta de control de parámetros operativos de voladura.

#### **1.4. Alcance**

Se establece el alcance del proyecto en la correlación de parámetros operativos de voladura con niveles de vibraciones asociados para contrastar modelos experimentales predictivos y seleccionar uno que sirva como herramienta de control de la cantidad de explosivo detonado en áreas críticas donde existe proximidad entre explotaciones de cantera y zonas urbanizadas.

La construcción del modelo se basa en el análisis y ajuste de diferentes modelos empíricos establecidos en investigaciones previas a mediciones experimentales, en base a los registros históricos de vibraciones de los años 2016 y 2016. El modelo será corroborado a partir de nuevas mediciones



experimentales para evaluar su grado de confiabilidad y realizar ajustes pertinentes.

Además se contempla un análisis espacial que tome como base el modelo experimental y considere la proximidad de los sectores de explotación y los diferentes tipos de infraestructura cercana, para generar una herramienta de control de la carga explosiva en forma de un mapa de zonificación. La definición de niveles límite de vibraciones se realiza considerando las diferentes normativas internacionales y nacionales vigentes enfocándose en la respuesta de las personas más no en la respuesta estructural de las construcciones, lo que conllevaría estudios de otra índole.

Este proyecto no contempla el análisis de los otros factores de afectación de las voladuras como ruido o polvo, tampoco se analiza la respuesta de las estructuras a la carga dinámica ejercida por las vibraciones.

## **CAPÍTULO 2**

### **METODOLOGÍA Y MARCO TEÓRICO**

## 2.1. Metodología

La realización de este proyecto abarca 5 fases, las cuales se detallan a continuación y se muestran de manera resumida y gráfica en la **Figura 2.1**.

Fase I.- Comprende la identificación y delimitación del proyecto. Se busca definir la situación actual en el contexto del problema para plantear objetivos claros y llevar a cabo los estudios en busca de cumplirlos.

Fase II.- En esta fase se busca recopilar y analizar información base disponible y facilitada para realizar un diagnóstico inicial de las condiciones del sitio. Las fuentes consultadas serán bibliografía, como libros y artículos científicos, relacionados al tema de vibraciones inducidas por voladuras y modelos predictivos de este fenómeno. Se consultará también registros históricos de niveles de vibraciones en el área de estudio para identificar alguna tendencia y construir una base para el análisis posterior. Así mismo también se llevará a cabo un reconocimiento del área de estudio para identificar y describir las características de la operación.

Fase III.- En esta fase, se llevará a cabo la campaña de mediciones experimentales de niveles de vibraciones por voladuras mediante el uso de sismógrafos colocados a distancias variables del frente del disparo y en las zonas urbanas de interés. Se lleva un registro también de los parámetros

operativos de la carga explosiva de cada disparo. Además, se tomarán datos estructurales de los bancos para analizar una posible correlación.

Fase IV.- Comprende el análisis de los datos experimentales. Durante esta fase, se realizará el tratamiento estadístico de los datos para el ajuste de diferentes modelos empíricos predictivos, así como también un análisis de regresión. Mediante el coeficiente de correlación de cada modelo se determinará el modelo de mayor confianza.

Fase V.- La fase final del proyecto comprende la integración del modelo predictivo a un análisis espacial que relacione la proximidad entre los sectores de explotación y las zonas urbanizadas. Mediante una revisión de diferentes estándares nacionales e internacionales se definirá un límite de niveles de vibraciones según los tipos de estructuras cercanas para, mediante el modelo predictivo, zonificar espacialmente la carga máxima explosiva que evite la potencial afectación.

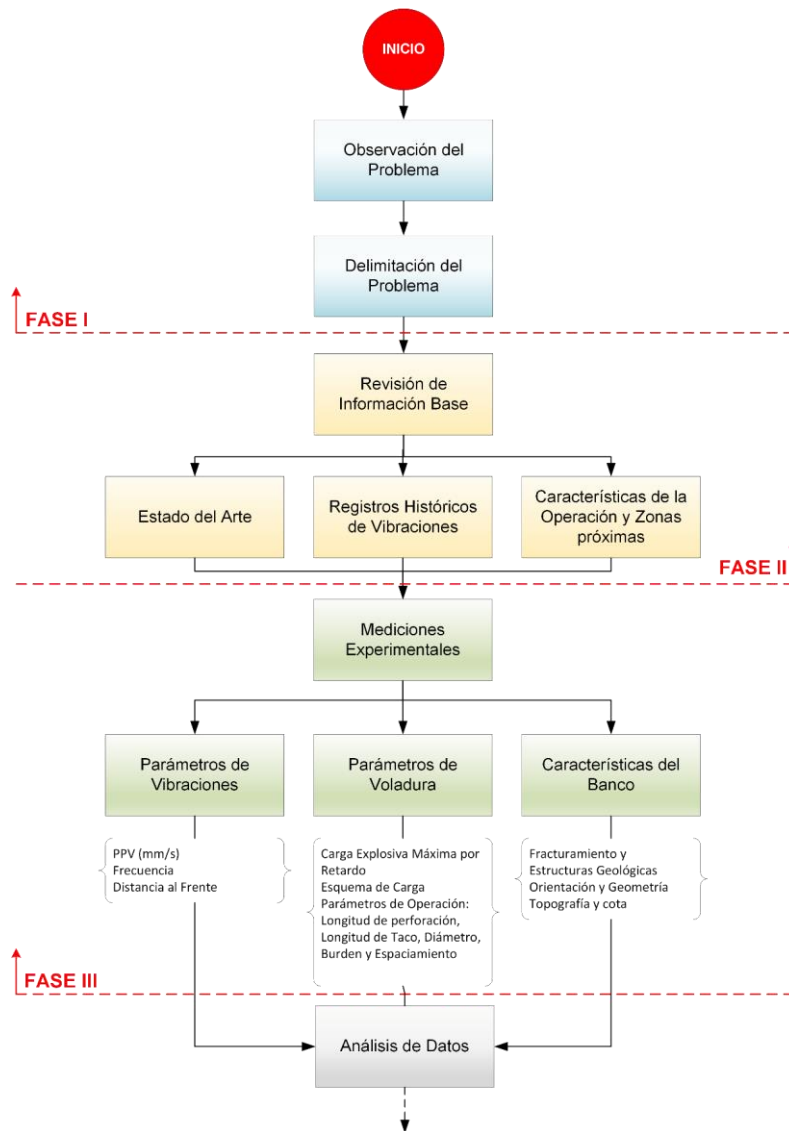
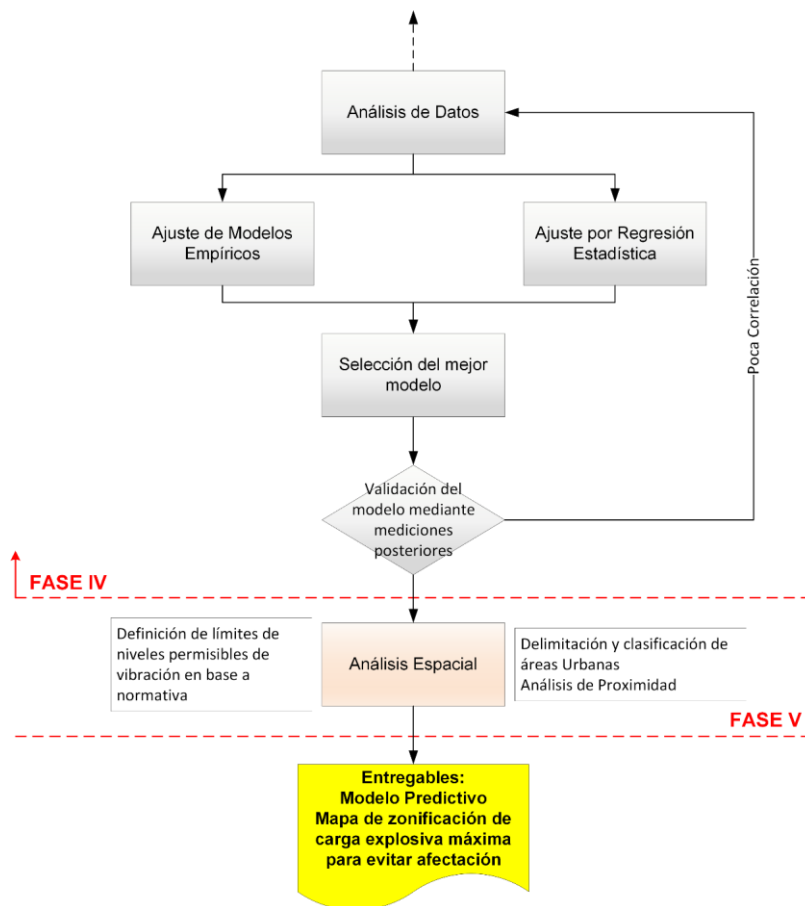


Figura 2. 1: Esquema metodológico del estudio.



Cont. Figura 2.1: Esquema metodológico del estudio

## 2.2. Recopilación de datos

Los datos requeridos para la elaboración de este proyecto comprenden mediciones de niveles de vibraciones producidas por voladuras y sus parámetros de carga explosiva. Estos datos provienen de dos fuentes: registros históricos de vibraciones de los dos últimos años (2015 – 2016)

proporcionados por la empresa en conjunto con el registro operativo individual de cada voladura; y registros in situ de los parámetros de voladuras y del banco de producción en conjunto con el informe de vibraciones respectivo. A partir de estos datos se construye y valida el modelo predictivo de niveles de vibraciones.

### **2.2.1. Análisis de registros históricos**

Los registros históricos de vibraciones corresponden a los reportes entregados por GeoEstudios a Mamut Andino como parte del plan de manejo ambiental de la explotación. Los registros proporcionan información detallada sobre las características de las vibraciones inducidas por la voladura, incluyendo datos de Velocidad Pico de Partícula (m/s) y Frecuencia Dominante (Hz) para los tres componentes de movimiento: transversal, vertical y longitudinal. Se proporciona también el Vector Suma Pico (m/s) que representa la mayor velocidad, tridimensional, inducida durante el registro.

La correlación se realiza utilizando las fichas técnicas individuales de cada voladura para estimar, en base a los parámetros operativos, la carga máxima por retardo (kg) detonada. Esta estimación se realiza a partir de los parámetros geométricos de la perforación: Longitud de Perforación

Máxima  $L_{Max}$  (m), Diámetro  $D$  (m) y Longitud de Taco  $T$  (m); y de los parámetros de la carga, específicamente la Densidad del Explosivo  $\rho$  ( $kg / m^3$ ), y el número de Boosters empleados ( $n$ ), que indica si se detonó la columna completa o se dislocó. Considerando que el taladro es un cilindro y en base al esquema de carga generalizado presentado previamente se puede construir la ecuación 2.1 para estimar la carga explosiva máxima detonada por retardo ( $Q_{Max}$ ).

$$Q_{Max} = \frac{\pi D^2}{4} \times (L_{Max} - T) \times \rho \quad (2.1)$$

En los registros de voladura se evidencia además que en ciertos casos se emplean diferentes tipos de explosivos en la misma columna de carga, utilizando ANFO, ANFO Aluminizado y varios tipos de emulsiones. Para considerar esta variación se transforma la cantidad de explosivo de otros tipos a masa equivalente de ANFO ( $Eq_{ANFO}$ ), debido a que es el explosivo más común. Para esto se toma como base el “Listado Referencial de Equivalencias de Productos Explosivos” del Ministerio de Defensa Nacional de Chile, donde se establece que el cálculo de equivalencia de masa explosiva se realiza como relación porcentual del calor de explosión



del producto ( $q_{exp}$ ) y de un explosivo de referencia, en este caso el ANFO de MAXAM ( $q_{ANFO}$ ) con un calor de explosión de  $849 \text{ cal/g}$  (Ecuación 2.2). En la **Tabla II** se presenta la equivalencia en masa de ANFO de los productos explosivos utilizados por Mamut Andino en Calizas Huayco S.A.

$$Eq_{ANFO} = \frac{q_{exp}}{q_{ANFO}} = \frac{q_{exp}}{849 \text{ cal/g}} \quad (2.2)$$

**Tabla II.** Equivalencias en peso de ANFO de los productos explosivos empleados.

<b>Explosivo</b>	<b>Calor de Explosión (cal/g)</b>	<b>Equivalencia en ANFO</b>
ANFO Aluminizado	1175	1.38
Emulsen 720	992	1.17
Emulnor 5000	1010	1.19

### 2.2.2. Registros in situ

Los registros in situ se realizan para validar el modelo y evaluar la posible influencia del grado de fracturamiento del banco en los niveles de vibraciones inducidas. Para esto se toman registros de dos tipos: carga explosiva por taladro y fracturamiento del banco.

La carga explosiva por taladro se registra mediante inspección visual durante la carga, taladro por taladro, para obtener valores reales de la

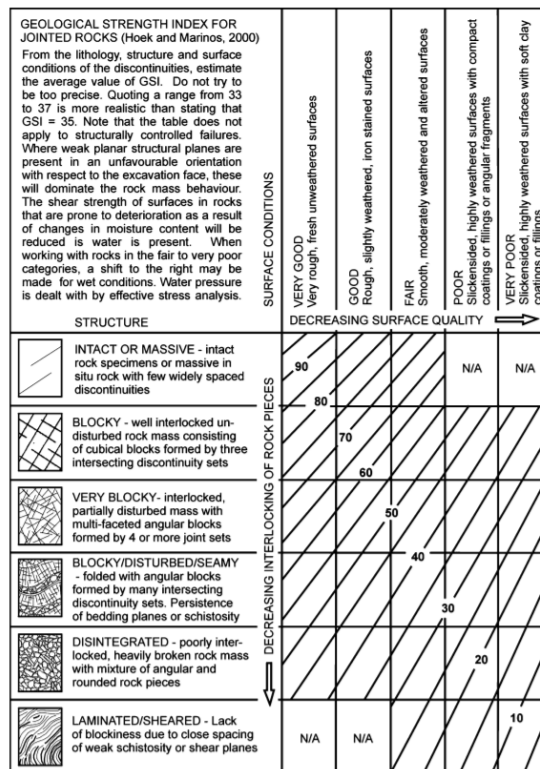
distribución y cantidad de masa explosiva detonada por retardo. Los explosivos son cargados tanto a granel, desde sacos, como también encartuchados, por lo tanto se registra el número de sacos o cartuchos utilizados. Para la evaluación del grado de fracturamiento del banco se consideran tres parámetros principales: el número de fracturas por metro  $\lambda$ , el índice RQD y el índice GSI.

Se considera el índice  $\lambda$  debido su influencia evidenciada en investigaciones previas, como se mencionó anteriormente. Este índice se mide directamente en la cara del banco tomando una referencia de 1 metro de longitud, y contando el número de fracturas que intersectan esta referencia. La orientación de la medición es vertical, paralelo a los taladros de producción.

Se considera el índice RQD como una alternativa más completa que el  $\lambda$  para la descripción del grado de fracturamiento del banco. Este parámetro se estima en campo en función de  $\lambda$ , mediante la relación establecida por (Priest & Hudson, 1976), que se presenta en la ecuación 2.3.

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1) \quad (2.3)$$

Finalmente se considera el índice GSI (Geological Strenght Index) debido a su representatividad de las características del macizo rocoso, integrando criterios geológicos y geotécnicos. La estimación del índice se realiza mediante una inspección visual de la cara del banco utilizando el gráfico general del GSI donde se obtiene un valor aproximado. Es sugerido que se tome un rango corto en lugar de un valor exacto para el GSI. En la **Figura 2.2** se incluye el gráfico para la estimación del GSI.



**Figura 2. 2:** Esquema para la estimación del GSI  
 Fuente: (Marinos, Marinos, & Hoek, 2005)

### 2.2.3. Registro de vibraciones

El registro de los niveles de vibraciones, llevado a cabo por la empresa GeoEstudios S.A., se realiza utilizando un sismógrafo modelo Minimate Plus de Instantel (**Figura 2.3**).



**Figura 2. 3:** Sismógrafo Minimate Plus

Este sismógrafo cuenta con tres transductores triaxiales con la capacidad de obtener un registro continuo de la velocidad de partícula inducida en el terreno en el punto instalado. Las especificaciones generales relacionadas al monitoreo de vibraciones del equipo se enlistan en la **Tabla III** a continuación.

**Tabla III.** Especificaciones del sismógrafo Minimate Plus empleado.

<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>
<i>Rango</i>	Hasta 254 mm/s (10 pulg/s)
<i>Resolución</i>	0.127 mm/s (0.005 pulg/s)
<i>Precisión (ISEE / DIN)</i>	+/- 5% o 0.5 mm/s (0.02 pulg/s)
<i>Densidad del Transductor</i>	2.13 g/cc
<i>Rango de Frecuencias (ISEE / DIN)</i>	2 a 250 Hz

**Fuente:** (Instantel, 2013)

Para la instalación del equipo se debe enterrar el geófono, o el sismógrafo en caso de que tenga geófonos internos, en el punto de interés para el monitoreo. El equipo tiene una flecha de indicación que debe apuntar hacia el evento de monitoreo, en este caso la voladura, al ser enterrado. El equipo cuenta con puntas de acero para asegurarlo en terreno suave y con pernos para su instalación en terrenos duros.

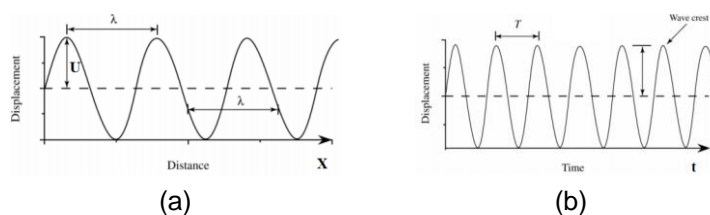
## **2.3. Marco Teórico**

### **2.3.1. Fundamentos de ondas sísmicas y vibraciones**

Una onda puede definirse como un movimiento oscilatorio de materia que transfiere energía ya sea a través de un medio, como las ondas mecánicas, o a través del vacío, como las ondas electromagnéticas.

Dentro del grupo de ondas mecánicas, aquellas que necesitan de un medio para transmitirse, se incluyen las ondas sísmicas las cuales se propagan a través de la tierra. Una característica importante de las ondas sísmicas es que estas son ondas elásticas, es decir no inducen una deformación permanente en el medio de propagación. Los terremotos son la fuente natural más común de las ondas sísmicas sin embargo existen muchas fuentes artificiales de ondas sísmicas producidas por la actividad del hombre. En la industria minera la perforación y voladura de rocas es la fuente artificial de ondas sísmicas más habitual. Cuando estas ondas son percibidas son referidas como “vibraciones” (Konya & Walter, 1991).

Los desplazamientos producto de cualquier tipo de onda, incluyendo registros típicos de vibraciones, pueden ser aproximados como una función sinusoidal que varía en relación al tiempo o a la distancia a lo largo de una línea longitudinal o radial desde la fuente (**Figura 2.4**).



**Figura 2. 4:** Aproximación sinusoidal de una onda. Desplazamiento sinusoidal, (a) en una posición fija ( $x = \text{constante}$ ); (b) en un instante ( $t = \text{constante}$ ).

**Fuente:** (Burger, Jones, & Sheenan, 2006)

Los parámetros más importantes para describir las características de una onda son su amplitud, longitud de onda, periodo, frecuencia y velocidad de propagación. La amplitud,  $U$ , de la onda corresponde al máximo desplazamiento que ocurre desde la posición de descanso y la longitud de onda,  $\lambda$ , hace referencia a la distancia entre dos puntos en la misma fase (cresta o valle). El periodo,  $T$ , de una onda es el tiempo que necesario para que ocurra un ciclo u oscilación completa y su frecuencia,  $f$ , corresponde al número de ciclos por segundo y es igual al inverso del periodo.

De esta forma se puede representar el comportamiento sinusoidal de una onda de manera generalizada en base a la ecuación 2.4 para el desplazamiento  $u$  (Dowding, 1985).

$$u = U \text{sen}(Kx + \omega t) \quad (2.4)$$

Donde la constante  $K$  se denomina el número de onda y representa la cantidad de oscilaciones por unidad de distancia siendo igual a  $2\pi/\lambda$ , y la constante  $\omega$  representa la frecuencia angular que se puede calcular como  $2\pi f$ . De esta ecuación generalizada puede expresarse el término relacionado con la posición,  $x$ , como constante para el análisis temporal de los desplazamientos oscilatorios en un punto fijo a una distancia dada de

la fuente de generación de ondas, como es la práctica común para el registro de vibraciones inducidas por voladuras. A través de la diferenciación la ecuación 2.4 con respecto al tiempo se pueden encontrar las aproximaciones sinusoidales para la velocidad,  $\dot{u}$ , y aceleración,  $\ddot{u}$ , de partículas sujetas a una onda (Dowding, 1985).

$$\dot{u} = \frac{du}{dt} = U\omega \cos(Kx + \omega t) \quad (2.5)$$

$$\ddot{u} = \frac{d\dot{u}}{dt} = -U\omega^2 \sin(Kx + \omega t) \quad (2.6)$$

La velocidad de propagación de la onda,  $c$ , es la velocidad con la cual la onda se propaga a través del medio, en este caso el macizo rocoso, y es diferente a la velocidad de desplazamiento de las partículas del movimiento oscilatorio producido por la onda descrito previamente. La velocidad de propagación puede ser calculada en base a la aproximación sinusoidal de la onda como  $\lambda f$  (Dowding, 1985).

Las ondas sísmicas se dividen en dos grandes clases: ondas de cuerpo y ondas de superficie. Las ondas de cuerpo son aquellas que se propagan a través de la masa rocosa y pueden ser de dos tipos: ondas longitudinales u ondas P, y ondas transversales u ondas S. Sobre y muy cerca de la superficie de un cuerpo sólido ocurren las ondas de superficie, la cuales

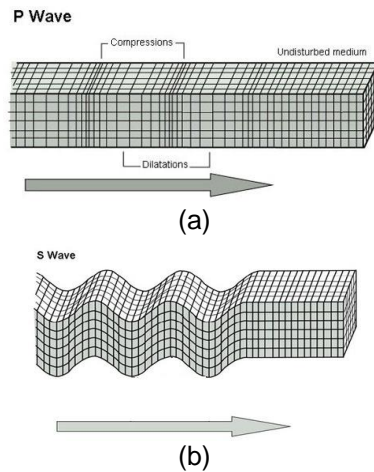


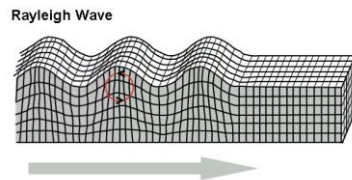
son generadas por la interacción de ondas de cuerpo, P y S, en una superficie libre. Las ondas de superficie son las que producen los mayores desplazamientos de partículas y son las que transportan la mayor cantidad de energía. Dentro de las ondas de superficie las ondas Rayleigh son las más comunes (Konya & Walter, 1991). Los diferentes tipos de onda producen patrones de movimiento diferentes en las partículas de suelo y roca a medida que las atraviesan. En la **Figura 2.5** se muestra los tipos de movimientos inducidos según el tipo de onda.

Las ondas P o longitudinales producen un movimiento de partícula paralelo a la dirección de propagación de la onda. Este movimiento puede ser de compresión, cuando el movimiento de las partículas es en el mismo sentido que el de propagación de la onda, o de tracción cuando está en sentido contrario. Las ondas S o transversales inducen un movimiento de partículas perpendicular a la dirección de propagación de la onda y únicamente pueden propagarse en sólidos, no en líquidos ni en gases. Las ondas Rayleigh (ondas de superficie) inducen un movimiento complejo, tanto en sentido horizontal como vertical a manera de elipse en planos normales a la superficie. La amplitud de los movimientos inducidos por las ondas Rayleigh decrece exponencialmente a medida que aumenta la

profundidad debido a que estas ondas están confinadas a la superficie de los cuerpos.

La velocidad de propagación también varía según los diferentes tipos de ondas y depende fundamentalmente de las características del medio. En base a características mecánicas comunes de los diferentes tipos de roca se estima que la velocidad de propagación de las ondas P es aproximadamente dos veces más grande que la velocidad de las ondas S. Por otro lado las ondas S son apenas más rápidas que las ondas Rayleigh, para condiciones comunes en macizos rocosos (Zhang, 2016).





(c)

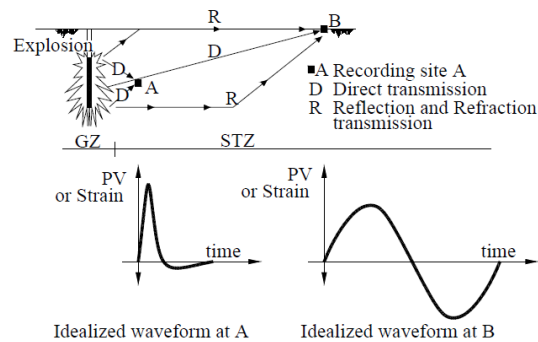
**Figura 2. 5:** Movimiento de partícula según el tipo de onda; (a) Onda P (b) Onda S (c) Onda Rayleigh.

**Fuente:** (Burger et al., 2006)

### 2.3.2. Vibraciones inducidas por voladuras

Durante la detonación de una carga explosiva la roca circundante es fracturada, fragmentada y desplazada. Resultados experimentales han mostrado que la detonación de taladros de voladura genera una expansión de las paredes originales de la perforación, una delgada zona de roca triturada seguida de la aparición de una zona fracturada rodeando la perforación (Johansson & Persson, 1970; Zhang, 2016).

La detonación de explosivos produce principalmente ondas de cuerpo (P y S) a distancias cortas, mientras a grandes distancias son las ondas de superficie, principalmente de tipo Rayleigh las que dominan. El comportamiento de las ondas inducidas por voladuras se idealiza de manera diferente a corta distancia y a grandes distancias, como se muestra en la **Figura 2.6**.



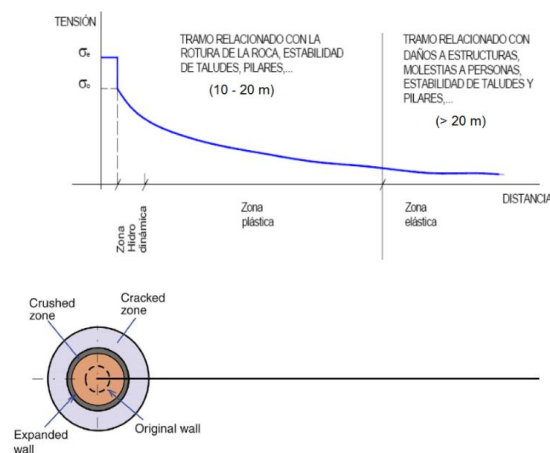
**Figura 2. 6:** Idealización del comportamiento de las ondas generadas en una operación de voladura.

**Fuente:** (Dowding, 1985)

A corta distancia (punto de medición A en la Figura 2.6) se genera un “pulso” o “pico” en el movimiento de las partículas debido a que están sujetas a la onda directa de la detonación de la carga explosiva, la cual es una onda de presión abrupta u onda de choque. Sin embargo a mayores distancias (punto de medición B en la Figura 2.6) el comportamiento de la onda será de tipo sinusoidal debido a la rápida atenuación de la onda inicial de choque y además al efecto combinado de la reflexión y refracción de las ondas a medida que se propagan (Dowding, 1985).

El comportamiento de los materiales y su respuesta ante las ondas inducidas por la detonación de taladros de voladura varía según la proximidad a la zona de detonación. La onda de choque genera una elevada presión llevando el material circundante mucho más allá de su límite elástico provocando un comportamiento hidrodinámico en la roca

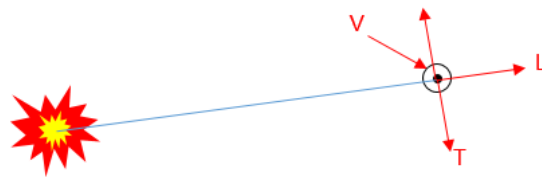
directamente en la periferia del taladro. Esta onda disipa gran parte de su energía a poca distancia radial del taladro original, triturando y fracturando la roca. La propagación de la onda más allá de este límite se efectúa con una menor energía, pero aún por encima del límite elástico de la masa rocosa, induciendo un comportamiento plástico o elasto-plástico. El límite de esta zona plástica que para efectos de monitoreo y control de voladuras se denomina *campo cercano*, se estima de 10 a 20 m radiales desde el taladro de voladura. Más allá de este límite la onda se vuelve elástica y puede propagarse por varios cientos de metros debilitándose hasta desaparecer totalmente, este dominio se conoce como *campo lejano* (Unión Española de Explosivos UEE, 2000; Yang, Rocque, Katsabanis, & Bawden, 1994). En la **Figura 2.7** se muestra un esquema representativo de este fenómeno.



**Figura 2. 7:** Trayectoria de la onda vibratoria a partir de la detonación de un taladro de voladura.

**Fuente:** (Unión Española de Explosivos UEE, 2000)

Las ondas generadas por la detonación de explosivos inducen un movimiento en las partículas del suelo a medida que se propagan por la superficie. Para describir completamente este movimiento de partículas se debe medir tres componentes perpendiculares de movimiento como se muestra en la **Figura 2.8**.



**Figura 2. 8:** Movimiento de partículas inducido por las ondas generadas de la detonación explosiva.

Este desplazamiento inducido por la onda, en tres direcciones y caracterizado por un comportamiento sinusoidal como se describió previamente, tiene asociado una velocidad de movimiento de partícula para cada instante. Ninguno de los tres componentes siempre domina en cada voladura, y el componente pico o mayor varía de acuerdo a las diferentes condiciones de operación. Esta diferencia, producto de la naturaleza de cada onda, plantea la duda de la importancia como

indicador entre el mayor componente pico individual entre los tres tipos de movimientos o la suma vector pico de estos. Sin embargo, experimentalmente se ha demostrado que los daños potenciales a estructuras, como agrietamiento, está más relacionado con los componentes individuales pico de velocidad de partícula, que son usados ampliamente como indicadores de los niveles de vibración inducida. Esta magnitud se la conoce como la Velocidad Pico de Partícula o PPV por sus siglas en inglés (Peak Particle Velocity) (Duvall & Fogelson, 1962).

### **2.3.3. Atenuación de ondas sísmicas y vibraciones**

La propagación de ondas sísmicas, ya sea naturales o inducidas por las actividades del hombre, podrían propagarse indefinidamente una vez generadas, si el suelo fuera perfectamente elástico, sin embargo no lo es y esto genera un efecto de atenuación de las ondas a medida que estas se propagan. A medida que las ondas viajan, la energía que transmite experimenta una continua transformación entre energía potencial y cinética, y además ejerce trabajo en el medio. Este trabajo puede tomar varias formas como calor y fricción, afectando la energía de la onda a medida que se propaga. Como resultado la amplitud de la onda sísmica, o de vibración, disminuye a medida que recorre mayor distancia desde la fuente, principalmente debido a dos mecanismos: pérdida friccional y disipación geométrica (Burger et al., 2006).

La disipación geométrica de energía se basa en el fundamento de que las ondas se propagan con un frente de onda esférico, para fuentes puntuales y en medios homogéneos. Este frente de onda se expande a medida que la onda se propaga, aumentando en área superficial. Sin embargo, la energía irradiada por la onda no puede variar, es constante según la ley de la conservación de la energía, y por lo tanto a medida que aumenta el área superficial del frente de onda esférico la energía por unidad de área disminuye. El área superficial,  $A$ , de una esfera es proporcional al cuadrado de su radio,  $r$ . Por lo tanto la energía por unidad de área,  $E$ , debe ser inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde la fuente de la onda [19]. Es decir, la velocidad de partícula inducida por el frente de onda a una distancia,  $R$ , de la fuente,  $\dot{u}(R)$ , está relacionada con la velocidad de partícula inicial o a una distancia unitaria ( $R = 1$ ),  $\dot{u}_0$ , y un factor de disipación  $R^{-n}$  como se presenta en la ecuación 2.7. El coeficiente  $n$  para voladuras se ha estimado que varía comúnmente entre 1 a 2 (ENAEX, 2005).

$$\dot{u}(r) = \dot{u}_0(R)^{-n} \quad (2.7)$$

El fenómeno de disipación geométrica por sí sola no explica en su totalidad la atenuación de la energía de las ondas sísmicas. Estas pérdidas se deben también a la absorción de energía causada por las



imperfecciones de la Tierra. La pérdida por fricción supone la pérdida de energía durante la propagación de una onda debida a que la fricción de las partículas en movimiento, las cuales están sometidas a esfuerzos cíclicos de compresión y relajación. La magnitud de esta atenuación está basada en un parámetro adimensional,  $Q$ , en términos de la pérdida de energía friccional por ciclo como se muestra en la ecuación 2.8 (Burger et al., 2006).

$$\frac{1}{Q} = -\frac{\Delta E}{2\pi E} \quad (2.8)$$

Donde  $E$  es la energía pico y  $-\Delta E$  la pérdida de energía por ciclo. Se conoce al parámetro  $Q$  como factor de calidad. La relación indica que, para materiales o zonas donde el factor  $Q$  es bajo, se tiene una mayor atenuación de las ondas que en zonas donde el factor  $Q$  es alto. Para la propagación de ondas sísmicas y vibraciones la atenuación de la velocidad inducida en las partículas se puede aproximar como se muestra en la ecuación 2.9 (ENAEX, 2005).

$$\dot{u}(r) = \dot{u}_0 e^{-\frac{\pi f r}{Qc}} \quad (2.8)$$

Donde  $c$  es la velocidad de propagación de la onda y  $f$  la frecuencia. Es claro que el espectro de ondas con mayores frecuencias sufre una mayor atenuación y pueden desaparecer a poca distancia, en comparación con los componentes de menor frecuencia.

#### **2.3.4. Daño producido por vibraciones de voladuras**

Una de las frecuentes dudas acerca de las vibraciones inducidas por las voladuras surge en relación al potencial daño que pueden generar a las estructuras cercanas. Se ha demostrado en base a observaciones in situ que la continua exposición de una estructura, ya sea una residencia pequeña o infraestructura industrial, al efecto de las vibraciones inducidas por voladuras puede causar agrietamiento en función de la cantidad de explosivo (energía) detonado. De manera análoga las personas reaccionan presentando molestias debido a las vibraciones a niveles mucho menores que los requeridos para generar daños potenciales a las estructuras. El potencial daño estructural y la reacción de las personas se relaciona con las deformaciones inducidas en el suelo debido a la propagación de las vibraciones inducidas por voladuras (Nicholls et al., 1971; Singh & Roy, 2010).

La afectación de las vibraciones de voladuras está relacionada con las deformaciones inducidas por el comportamiento oscilatorio de las

partículas a medida que las ondas se propagan. El estudio de las relaciones entre desplazamiento-velocidad de partícula y los esfuerzos-deformaciones que inducen en el suelo se basa en aproximaciones de ondas planas, es decir el análisis de la onda a una distancia tal que el frente de onda puede aproximarse como plano y los desplazamientos inducidos en la estructura de interés pueden suponerse paralelos. Esta distancia se estima en 15 m y es caso común en el análisis de afectaciones a estructuras o residencias cercanas a zonas de explotación (Dowding, 1985).

El comportamiento de una onda plana puede modelarse de manera sinusoidal, en función del tiempo y la posición. Bajo el supuesto de que la distancia que recorre la onda entre dos picos es igual al producto de la velocidad de propagación,  $c$ , y el intervalo de tiempo transcurrido,  $t_2 - t_1$ , se puede generalizar el comportamiento matemático del desplazamiento de las partículas,  $u$ , por la propagación de una onda plana como se presenta en la ecuación 2.9. Este caso representa el desplazamiento de partículas en dirección paralela a la dirección de propagación de la onda, es decir ondas P o longitudinales (Dowding, 1985).

$$u = \text{sen}(x - ct) \quad (2.9)$$

Donde  $x$  es la ubicación de la partícula debido al comportamiento oscilatorio de la onda. Debido a que la velocidad es definida como el cambio en desplazamiento por unidad de tiempo, la ecuación 2.10 presenta la velocidad de partícula,  $\dot{u}$ , inducida por la propagación de una onda plana.

$$\dot{u} = \frac{du}{dt} = -c \cdot \cos(x - ct) \quad (2.10)$$

En términos de ingeniería la deformación de un material se define como la razón entre el cambio en longitud y la longitud original. Este concepto se puede extender al problema en cuestión estableciendo que la deformación es equivalente al cambio en desplazamiento por unidad de distancia. A partir de la diferenciación de la ecuación 1.7 se puede obtener una expresión para la deformación,  $\varepsilon$ , inducida en el suelo por la propagación de una onda plana (ecuación 2.11) (Dowding, 1985).

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} = \cos(x - ct) \quad (2.11)$$

Combinando la ecuación 2.10 y 2.11 se obtiene una expresión que relaciona la deformación inducida con la velocidad de partículas debido a

la propagación de una onda plana longitudinal (ecuación 2.12) (Dowding, 1985).

$$\begin{aligned} \dot{u} &= -c \cdot \cos(x - ct) = -c\varepsilon \\ \varepsilon &= \frac{\dot{u}}{-c} \end{aligned} \quad (2.11)$$

El desarrollo para una onda plana transversal (onda S), es decir con un movimiento de partícula perpendicular a la dirección de propagación de la onda, es similar. La ecuación 2.12 presenta la deformación cortante,  $\gamma$ , inducida por la propagación de una onda plana transversal (Dowding, 1985).

$$\gamma = \frac{u_s}{c_s} \quad (2.11)$$

Donde  $u_s$  es la velocidad transversal de las partículas y  $c_s$  la velocidad de propagación de la onda transversal. La afectación de las vibraciones en las estructuras está relacionada también con la respuesta que éstas ofrecen a cargas dinámicas como ondas vibratorias. Esta respuesta está relacionada con la amplitud y frecuencia de las vibraciones pero también con la frecuencia natural de la estructura y el amortiguamiento que esta ofrece, factores relacionados con las características del material y la

estructura interna. La frecuencia de las vibraciones es un factor importante en el daño potencial, debido a que la deformación y el riesgo de agrietamiento de la estructura es mayor a medida que la esta frecuencia se acerca a la frecuencia natural de la estructura. La frecuencia natural de estructuras típicas de zonas residenciales o comerciales se ha estimado experimentalmente en un rango de 12 a 20 Hz, con un promedio de 15 Hz. Vibraciones de bajas frecuencias ( $< 15$  Hz) tienen un mayor potencial de daño que ondas de mayor frecuencia (Dowding, 1985).

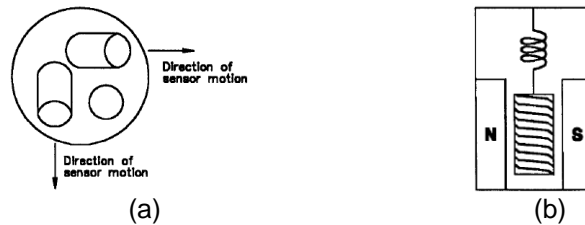
### **2.3.5. Monitoreo de vibraciones de voladuras**

El monitoreo de niveles de vibraciones se basa en el uso de instrumentación capaz de grabar un registro temporal del movimiento de la tierra en un punto fijo. Los instrumentos más usados son los sismógrafos, los cuales consisten de un sensor y un ordenador interno para procesar y almacenar la información (Konya & Walter, 1991).

El sensor del sismógrafo está compuesto por tres sensores independientes colocados perpendicularmente cada uno del otro. Una unidad se ubica en el plano vertical y los otros dos en el plano horizontal, pero a ángulos rectos. De esta manera cada sensor va a responder al movimiento en cada uno de estos ejes y se podrá obtener un registro

completo de los tres componentes que describen el movimiento de las partículas por la propagación de las ondas (Konya & Walter, 1991).

Los sensores del sismógrafo consisten de un transductor electromagnético que convierte el movimiento de la tierra en voltaje eléctrico, este sensor contiene una bobina suspendida en un permanente campo magnético. El magneto está sujeto e inamovible, pero la bobina suspendida en el campo magnético por resortes o bisagras es de libre movimiento. Cualquier movimiento de la bobina relativa al campo magnético genera un voltaje eléctrico proporcional a la velocidad del movimiento de esta. Cuando la superficie donde está instalado el sensor vibra el sensor sufre movimiento, sin embargo la bobina suspendida tiende a permanecer inmóvil debido a su inercia provocando un movimiento relativo entre la bobina y el campo magnético, generando un voltaje eléctrico. El procesador de la unidad toma el voltaje del sensor y lo convierte en movimiento, produciendo un registro visual de la historial temporal del movimiento del suelo y almacenando estos resultados. Ya que el sensor constituye de tres unidades mutuamente perpendiculares se tiene finalmente un registro de los tres componentes de movimiento para el punto de monitoreo (Konya & Walter, 1991). En la **Figura 2.9** se muestra un esquema gráfico representativo de los sensores y transductores empleados por los sismógrafos.



**Figura 2. 9:** Componentes de un sismógrafo; (a) Sensor de movimiento; (b) Componentes: bobina suspendida en un campo magnético que convierte movimiento relativo en voltaje eléctrico.

**Fuente:** (Konya & Walter, 1991)

### 2.3.6. Predicción de vibraciones de voladuras

La investigación en modelos predictivos de niveles de vibraciones por voladuras fue inicialmente sugerida por Devine (Devine, 1966), quien mostró experimentalmente que la PPV de las vibraciones inducidas por voladuras tienen una fuerte relación con la máxima carga por retardo  $W$ , es decir la cantidad de explosivo que detona en un instante generalmente definido como mayor a 8 ms. Los resultados de la investigación de Devine impulsaron a Hendron posteriormente (Ambraseys & Hendron, 1968), quien en base a investigaciones previas realizadas en el modelamiento de explosiones nucleares a pequeña escala, graficó la PPV contra un rango o distancia,  $R$ , escalada considerando la carga explosiva por retardo obteniendo un factor escalador de  $R/W^{1/3}$ . Los resultados de Hendron mostraron una fuerte correlación entre ambos parámetros, con cierto grado de dispersión, que impulsaron ampliamente el ajuste de estos modelos para diferentes condiciones geológicas de explotación, tanto a



cielo abierto como subterráneo, obteniendo modelos con un grado de confiabilidad aceptable para la predicción de PPV de vibraciones de voladuras a partir de la carga explosiva por retardo y la distancia entre la estructura y el frente de disparo (Sambuelli, 2009).

Estas relaciones se derivaron inicialmente mediante análisis dimensional a partir de la aplicación del teorema pi de Buckingham. Este teorema indica que si existe una ecuación significativa que relaciones un cierto número de  $n$  variables entonces puede ser escrito en términos de un número  $p = n - k$  de parámetros adimensionales contruidos de los parámetros originales, donde  $k$  es la cantidad de dimensiones físicas involucradas. Ambraseys & Hendron (1968) identificaron 6 factores adimensionales relacionados en la propagación de ondas vibratorias producto de voladuras siendo estos:  $u/R, \dot{u}/c, \ddot{u}R/c^2, ft, tc/R$  y  $W/\rho c^2 R^3$ . Debido a que la densidad de un tipo de roca no varía mucho más del 20% y la velocidad sísmica varía en factores menores de 2, la sensibilidad de un modelo es mucho mayor a variaciones de  $W$  y  $R$ . El teorema de Buckingham indica que los parámetros pueden ser elevados a cualquier potencia y multiplicados, por lo que siguiendo la aplicación de la teoría de atenuación de ondas en medios elásticos por disipación geométrica se establecieron los factores  $R/W^{1/3}$  y  $R/W^{1/2}$  que han sido corroborados experimentalmente con altas correlaciones (Dowding, 1985; Nicholls et al., 1971) (Yilmaz, 2016).

Estos modelos han sufrido variaciones por parte diferentes investigadores e institutos generando varias estructuras de relación entre las variables. Algunos de los modelos más reconocidos se plantean a continuación en las ecuaciones 2.12 a 2.15.

$$\text{USBM (Nicholls et al., 1971)} \quad PPV = K \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}}} \right)^{-B} \quad (2.12)$$

$$\text{Ambraseys – Hendron (Ambraseys & Hendron, 1968)} \quad PPV = K \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}^{1/3}}} \right)^{-B} \quad (2.13)$$

$$\text{Langefors – Khilstrom (Langefors & Kihlstrom, 1963)} \quad PPV = K \left( \frac{Q_{MAX}}{\sqrt{R^{2/3}}} \right)^B \quad (2.14)$$

$$\text{Estándar Indio (Bureau of Indian Standards, 1973)} \quad PPV = K \left( \frac{Q_{MAX}^{2/3}}{R} \right)^B \quad (2.15)$$

*\* K y B son coeficientes experimentales de sitio y  $Q_{MAX}$  es la carga máxima explosiva (kg) que detona por retardo.*

Estos modelos implícitamente consideran la atenuación de las ondas sísmicas por disipación geométrica incluyendo el factor  $R^{-n}$ . Sin embargo (Ghosh & Daemen, 1983) propusieron la inclusión de un factor que considere el amortiguamiento inelástico o atenuación friccional que la onda sufre a medida que se propaga. Resultados experimentales han mostrado que este factor se puede incluir en un modelo predictivo como un

parámetro de atenuación exponencial  $e^{-\alpha R}$ , donde  $\alpha$  es el factor de atenuación inelástico, esto se muestra en la ecuación 2.16 (Ghosh & Daemen, 1983; Johnston & Toksoz, 1981; Prange, 1977).

$$PPV = K \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}}} \right)^{-B} e^{-\alpha R} \quad (2.16)$$

Muchos investigadores han sugerido que el grado de fracturación del banco tiene influencia en la atenuación de las ondas inducidas por la detonación explosiva. (c) estudió la influencia de las discontinuidades en el comportamiento de la onda de choque producto de la detonación explosiva e identificó que parámetros como la apertura de las discontinuidades, su frecuencia y el ángulo incidente de las ondas relativo a las fracturas, son factores significantes y pueden reducir dramáticamente la amplitud y frecuencia de las ondas en campo cercano, teniendo esta una posterior influencia en los movimientos pico de las vibraciones en campo lejano (Wu et al., 1998). (Hao, Wu, Ma, & Zhou, 2001) realizó varias mediciones experimentales de vibraciones en medios fracturados en direcciones paralelas, perpendiculares y a 45° de la familia de fracturas predominante y encontró que las ondas producto de la voladuras sufren de una mayor atenuación si se propagan en una dirección perpendicular a las discontinuidades (Hao et al., 2001). Kuzu, C. (2008) indicó la importancia

del efecto de factores geológicos para la predicción de niveles de vibraciones inducidas por voladuras y enfatiza en la investigación del rol de las discontinuidades principales en la propagación de las ondas (Kuzu, 2008). Ak, H. & Konuk, A. (2008) propusieron la inclusión de un factor de atenuación en los modelos de predicción de vibraciones de voladura relacionado a la frecuencia de discontinuidades  $\lambda$ . La ecuación 2.17 muestra el modelo que probaron experimentalmente y obtuvieron resultados favorables, con una ligera mejora en el ajuste estadístico de los datos en relación con los modelos presentados previamente (Ak & Konuk, 2008).

$$PPV = K \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}}} \right)^{-B} \lambda^{-\alpha} \quad (2.17)$$

Para la construcción de cualquiera de estos modelos es necesario la recolección de mediciones experimentales y definir los parámetros  $K$  y  $B$  de mejor ajuste estadístico que no solo representan las características del área de estudio sino también de las condiciones de las voladuras. Es decir que para la aplicación posterior del modelo como herramienta predictiva se hace el supuesto implícito de que las condiciones de voladura no van a variar mucho de aquellas de las pruebas (Silva-Castro, 2012).

Para analizar la confiabilidad de un modelo estadístico se emplean coeficientes que miden la relación entre las dos variables relacionadas. Uno de los estadísticos más empleado es el coeficiente de determinación  $r^2$ . Este estadístico indica la proporción de la varianza en la variable dependiente que es predicha por la variable independiente. Varía de 0 a 1, siendo valores cercanos a 0 indicativos de una nula relación entre las variables según el modelo analizado, y valores cercanos a 1 una alta correlación. Este coeficiente se puede calcular como se muestra en la ecuación 2.18 (Zurita, 2010).

$$R^2 = \frac{\sigma^2_{XY}}{\sigma^2_X \sigma^2_Y} \quad (2.18)$$

Donde  $\sigma^2_{XY}$  es la covariancia entre la variable dependiente,  $Y$ , y la variable independiente,  $X$ ;  $\sigma^2_X$  es la varianza de la variable independiente  $X$  y  $\sigma^2_Y$  es la varianza de la variable dependiente  $Y$ .

En la **Tabla IV** se presenta la interpretación de rangos comúnmente aplicados para la análisis del coeficiente de determinación de un modelo (Taylor, 1990).

**Tabla IV.** Escala de interpretación del coeficiente de determinación  $r^2$

<b>Rango de <math>r^2</math></b>	<b>Descripción</b>
$\leq 0.35$	Correlación Baja
Entre 0.36 y 0.67	Correlación Moderada
Entre 0.68 y 0.89	Correlación Alta
Entre 0.90 y 1.00	Correlación Muy Alta

### **2.3.7. Otros factores que afectan los niveles de vibraciones**

Además de la carga explosiva por retardo, la distancia y el grado de fracturación existen otros factores que se han demostrado ejercen cierta influencia en los niveles de vibraciones inducidos por voladuras. Algunos parámetros significativos son las características del explosivo empleado, el sistema de iniciación y la geometría del disparo (Silva-Castro, 2012). A continuación se describe brevemente su influencia.

Características del Explosivo – Existen dos grandes tipos de explosivos acorde a su proceso de detonación: detonadores ideales y no ideales. Una detonación no ideal ocurre cuando el tiempo de aumento de presión requerido para alcanzar el valor pico es mayor y la pérdida de presión luego de alcanzar el valor pico es mucho más lenta, por otro lado un detonador ideal alcanza la presión pico en poco tiempo en comparación y la pérdida de presión post-pico es mucho más fuerte (Zhang, 2016). Muchas investigaciones experimentales sugieren que explosivos de

detonación no-ideal, de baja densidad y velocidad de detonación producen niveles de vibración menores en comparación con el uso de explosivos de detonación ideal (Chehreghani & Eskandarzadeh, 1995; Hossaini, 2006; Hunter, Fedak, & Todoeschuck, 1993).

Sistema de Iniciación – El tipo de sistema de iniciación usado y su precisión puede provocar el disparo de taladros fuera de secuencia y un traslape de varios taladros no planificado, generando la detonación una carga máxima efectiva mucho mayor. Esto debido a que se ha probado que los sistemas de iniciación no eléctricos pueden tener desviaciones en los tiempos de detonación de entre un 1.5% a 2.5%, precisiones muy bajas en comparación con sistemas de iniciación eléctricos o electrónicos (Silva-Castro, 2012) (Giraudi, 2013).

Geometría del disparo – La geometría del disparo toma en consideración factores como el diámetro de perforación, burden, espaciamento, longitud, retacado y sobre perforación. La relación entre estas variables determina el desempeño de la voladura y el diseño se hace en función de estas. Se han realizado investigaciones para explorar la influencia de estos parámetros en los niveles de vibraciones encontrando posible influencia. (Bilgin, Esen, & Kilic, 1998; Hudaverdi, 2012).

### 2.3.8. Estándares nacionales e internacionales

Existen diferentes criterios de regulación de niveles de vibraciones límites en el paraje internacional desarrollados por agencias locales para su aplicación dentro de cada país. Sin embargo, todos los estándares se basan en dos parámetros para establecer los límites permisivos de vibraciones y estos son: la velocidad pico de partícula (aunque algunos criterios presentan como adicional la transformación de los datos a aceleración pico), y la frecuencia de las vibraciones; debido a que como se ha detallado estos son los principales factores que pueden ejercer un daño potencial en las estructuras. Además, la Organización Mundial de Normalización, ISO (International Organization for Standardization), tiene también un instrumento regulatorio de vibraciones mecánicas de todo tipo, la ISO 4866, dentro de la cual hacen referencia a las vibraciones de voladura pero de manera muy general por lo que las diferentes normativas locales, y en especial la norma estadounidense (RI 8507) y la española (UNE 22-381), son más empleadas para el control de las vibraciones.

En la **Tabla V** se presentan algunas de las normas internacionales más empleadas para el control de vibraciones.

**Tabla V.** Regulaciones internacionales para el control de vibraciones

<b>Norma</b>	<b>País</b>	<b>Fecha</b>
USBM RI8507	Estados Unidos	1980
UNE 22-381	España	1993



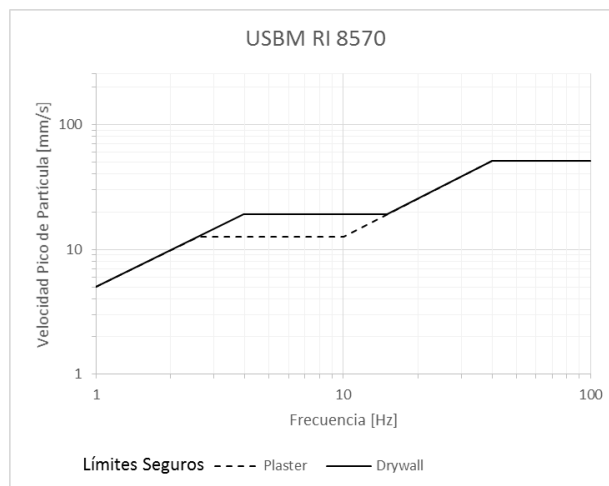
DIN 4150	Alemania	2001
SS 460 48 46	Suecia	1991
SN 460 312 <sup>a</sup>	Suiza	1992
PAN50	Escocia	2000

Los valores representativos de estas normas establecidos como velocidades de partícula varían en función de la frecuencia, estableciendo valores más restrictivos a frecuencias bajas debido a su potencial daño como se explicó en los epígrafes anteriores. A continuación, se describirán brevemente los valores representativos de límites de vibraciones para la norma USBM RI 8507, UNE 22-381 y DIN 4150, seleccionadas debido a su disponibilidad y a su amplia utilización y referencia en el panorama internacional.

#### **Norma Estadounidense RI 8507**

La norma RI 8507 fue publicada en 1980 como respuesta a la necesidad de una herramienta de control que aproveche de los avances realizados en el estudio y monitoreo de daños a estructuras por vibraciones de voladuras. El reporte de investigación publicado por Siskind, D. et al (1980) es producto de los estudios realizados por el Departamento de Minas de Estados Unidos en mediciones de respuesta de estructuras y daños a 76 casas durante 219 voladuras, además de considerar los resultados de otros nueve estudios de vibraciones previos, incluyendo el

de Nicholls, H. et al (1971). En la **Figura 2.10** se presenta el gráfico representativo para la aplicación de esta norma, que hace la diferencia entre tipos de construcciones antiguas típicamente asociadas con paredes de material “plaster” o yeso y construcciones modernas asociadas con la construcción de paredes por drywall, asignándoles a estas, niveles tolerables más altos.



**Figura 2. 10:** Límites de niveles seguros de vibraciones por parte de la USBM RI 8507.

Fuente: (Siskind, Stagg, Kopp, & Dowding, 1980)

### **Norma Española – UNE 22-381**

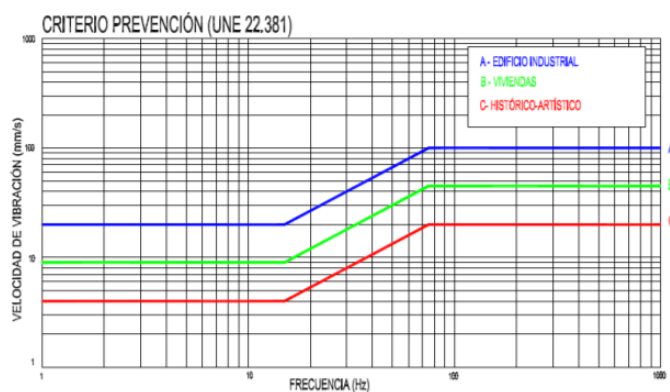
Publicada por la Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR y desarrollada por la Asociación para la Investigación y el Desarrollo Industrial de los Recursos Naturales AITEMIN, la norma UNE

22-381 reconoce la importancia del tipo de estructura para el establecimiento de límites permisibles de vibraciones. Clasifica la infraestructura en tres grupos principales:

Grupo I: Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas.

- Grupo II: Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo.
- Grupo III: Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presente sensibilidad.

El criterio establece límites más restrictivos en función de esta clasificación de la infraestructura, como se muestra en la **Figura 2.11**.



**Figura 2. 11:** Criterio UNE 22.381 para el límite de vibraciones segura.  
**Fuente:** (AITEMIN, 1993)

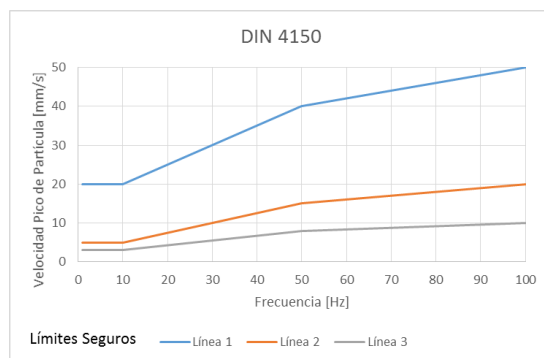
### **Norma Alemana – DIN 4150**

La norma DIN 4150, preparada por el Comité Técnico de Estándares para Edificaciones e Ingeniería Civil de Alemania, fue expedida inicialmente en 1975 sufriendo tres modificaciones en 1999 y 2001 actualizando conceptos con el desarrollo tecnológico del campo y añadiendo criterios para diferentes tipos de infraestructura como tuberías.

Esta norma clasifica los tipos de infraestructura en tres grupos para establecer los límites de vibraciones:

- Línea 1: Edificaciones para propósitos comerciales, industriales o de diseño similar.
- Línea 2: Residencias o construcciones similares.
- Línea 3: Edificaciones especialmente sensibles, como estructuras históricas o de preservación.

Los criterios límites de velocidad de partícula para estas clases se muestran en la **Figura 2.12**.

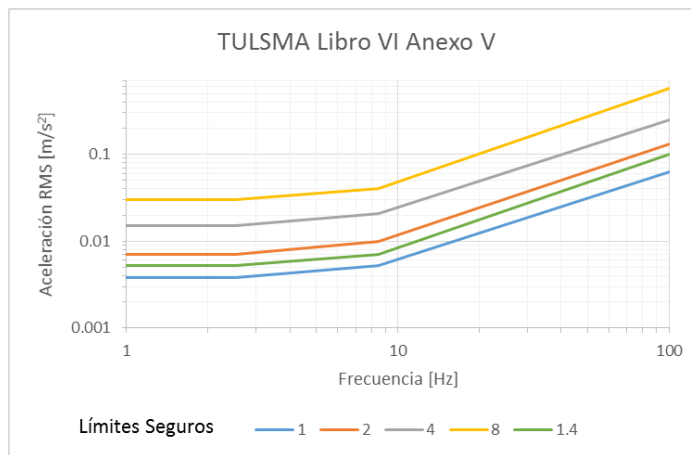


**Figura 2. 12:** Límites seguros de vibraciones según la normativa DIN 4150.

**Fuente:** (Building and Civil Engineering Standards Committee, 1999) Ecuador cuenta también con un instrumento regulatorio que establece niveles límites de vibraciones transmitidas a una estructura. Esta se encuentra en el Anexo V del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria TULSMA. Esta herramienta no toma como indicador la velocidad pico de partícula, en lugar de esta toma la aceleración de partícula máxima o RMS en ( $m/s^2$ ). Para establecer los límites de vibraciones se clasifican los tipos de infraestructura y además se considera el horario de afectación:

- Curva Base 1: Edificaciones hospitalarias, educativas o religiosas en periodo diurno o nocturno.
- Curva Base 2: Edificaciones residenciales en horario diurno.
- Curva Base 1.4: Edificaciones residenciales en horario nocturno.
- Curva Base 4: Oficinas en horario diurno y nocturno.
- Curva Base 8: Edificaciones comerciales en horario diurno y nocturno.

En la **Figura 2.13** se presenta el gráfico de aplicación de los criterios límites de niveles de vibraciones.



**Figura 2. 13:** Límites seguros de vibraciones en Ecuador según el TULSMA libro VI Anexo V.

**Fuente:** (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015)

## **CAPÍTULO 3**

### **DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

### 3.1. Ubicación

El área de estudio corresponde a la explotación de calizas en canteras llevada a cabo por la empresa Mamut Andino dentro de 8 concesiones mineras contiguas a lo largo del kilómetro 12.5 Vía a la Costa, en la periferia de la ciudad de Guayaquil. Las ocho concesiones mineras que integran el área de estudio son: A Guay el Huayco, Lérida, Progransa, Terraplén, Explosa, Decal, Fraga y Ampliación Precón; todas se encuentran inscritas dentro del catastro minero como explotación de minerales no metálicos. En la **Tabla VI** se indica la superficie (has) reportada por cada concesión.

**Tabla VI.** Área superficial reportada por cada concesión de estudio.

<b>Concesión Minera</b>	<b>Superficie (ha)</b>
A Guay el Huayco	79
Lérida	8
Progransa	2
Terraplén	2
Explosa	11
Decal	10
Fraga	10
Ampliación Precón	48





**Figura 3.1.** Ubicación del área de estudio. Google Earth, Mayo 2016.

El área de estudio se caracteriza por la proximidad entre los sectores de explotación minera y zonas urbanas residenciales, comerciales e industriales. En la Figura 3.1 se presenta un mapa de ubicación del área de estudio, donde se puede observar además las urbanizaciones contiguas a las concesiones mineras: Urbanización Portal al Sol, Casa Club, Portovita y Torres del Salado al E, y Terranostra al S; y la proximidad de una fábrica de cal y de un centro comercial.

### **3.2. Geología**

A continuación se presenta un breve resumen de la geología regional y local del área de estudio, a partir del “Mapa Geológico de la Margen Costera Ecuatoriana” por (Reyes & Michaud, 2012); así como también de la publicación “Geología del Ecuador” por Núñez del Arco, E. (Núñez del Arco, 2003).

El marco geológico y geomorfológico de la costa de Ecuador se caracteriza por extensas llanuras bajas que se encuentran cubiertas por sedimentos cuaternarios y terciarios representando el arco frontal de una zona de subducción, a lo largo de la cual predominan cuencas sedimentarias. La región costera de Ecuador está atravesada por cordilleras de poca elevación (200 a 600 m), entre ellos la cordillera Chongón – Colonche al Sur y próxima a la ciudad de Guayaquil. El área de estudio se encuentra ubicada en la

estribación sur de la cordillera Chongón Colonche y las principales unidades lito estratigráficas que se presentan en la geología regional, como se muestra en la Figura 1.2, son: Grupo Ancón, Grupo Azúcar, Miembro Guayaquil, Formación San Eduardo, Formación Cayo y la Formación Piñón.

#### *Grupo Ancón*

Ocurre en la península de Santa Elena en la zona de Ancón extendiéndose hacia el E. Constituido por dos unidades estratigráficas. La Formación Seca, que es la más reciente, y la Formación Socorro. La Formación Socorro incluye dos miembros, el miembro Socorro, de 700 m de espesor estimado, que está compuesto de flysch de capas delgadas de arenisca finas alternando con lutitas gris verde; y el miembro Clay Pebble Beds que comprende brechas sedimentarias derivadas de formaciones preexistentes en matriz de arcilla verde gris.

La Formación Seca está compuesta por dos miembros: el miembro superior Arenisca Punta Ancón, que corresponde a areniscas graywáckicas con capas arcillosas y calcáreas, y el más antiguo el miembro Lutitas Seca formado por capas gruesas de lutitas y areniscas.

#### *Grupo Azúcar*

El Grupo Azúcar está compuesto por facies de lutitas, conglomerados y areniscas los cuales han sido depositados en un ambiente de pie de talud continental. Comprende dos formaciones: la formación Chanduy que corresponde a conglomerados y areniscas masivas, y la formación Estancia que integra capas delgadas de lutitas.

#### *Miembro Guayaquil*

El miembro Guayaquil corresponde a la parte superior de la Formación Cayo, la cual fue elevada a la categoría de Formación por Benítez, S. en 1985. Corresponde a una monótona secuencia de argilitas silicificadas.

#### *Formación San Eduardo*

La Formación San Eduardo, donde se encuentra directamente ubicada el área de estudio, corresponde a un depósito en aguas profundas de calcarenitas y calcilitas sobre el flanco N del horst Playas – Ancón y el flanco S de la cordillera Chongón – Colonche. Está compuesta por dos miembros: el miembro Javita y el miembro San Eduardo el cual es el más antiguo.

El Miembro San Eduardo aflora en San Antonio, Playas, y cerca de Guayaquil. Corresponde a la parte inferior de la Formación San Eduardo y

está caracterizada por guijarros de calcilutitas, fragmentos de algas y chert. Está sobreyacente en discordancia con el miembro Guayaquil y se estima un espesor de hasta 200 m reportado.

El miembro Javita está compuesta de calcarenitas de grano grueso, de color gris a crema en alternancia con brechas o conglomerados. En la base del miembro es común la ocurrencia de lutitas calcáreas. Se estima un espesor de entre 0 a 60 metros.

#### *Formación Cayo*

La Formación Cayo comprende una amplia serie de estratos masivos de arenisca, conglomerados, arcillita, tobas, cherts y aglomerados volcánicos. Cerca de las localidades de Guayas se caracteriza por potentes capas de areniscas graywáckicas en alternancia con limolitas, areniscas y lutitas finas. Está formada por los miembros Calentura en su base y Cayo Sensu Stricto.

El miembro Calentura corresponde a calizas y pizarras altamente silicificadas de gris a pardo con alternancias de calcoargilitas y areniscas. El miembro Cayo S.S. está constituida por conglomerados, pizarras arcillosas, lutitas, argilitas, areniscas tobáceas con intercalaciones de bancos de lutitas tobáceas.

### *Formación Piñón*

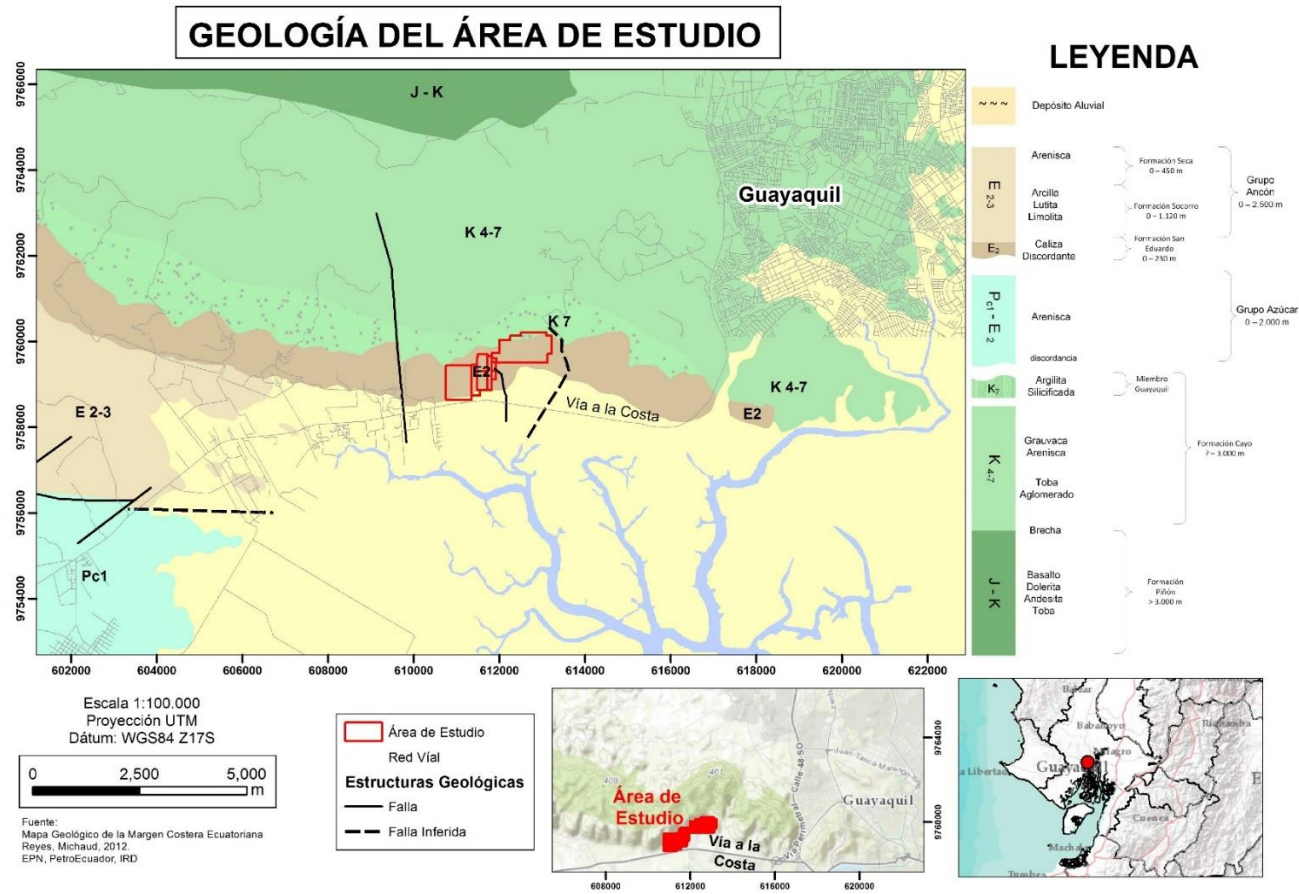
La Formación Piñón comprende principalmente una serie volcánica, que varía por sectores. Cerca de la ciudad de Guayaquil comprende de flujos diabásicos de forma amigdalóide. Se observan pocos estratos de arenisca tobácea y toba entrelazados con esta diabasa en la parte baja. La parte alta de la Fm. Piñón corresponde a porfirita ígnea básica con interestratificación de lutitas tobáceas, gris a crema, y limolitas silicificadas.

### **3.3. Características de la explotación**

Mamut Andino realiza una explotación por banqueo en la cantera de Calizas Huayco S.A., en diferentes frentes de arranque a lo largo de las ocho concesiones mineras que constituyen el área de operación, con una producción variable acorde a la demanda del mercado de agregados pero que promedia los 100,000 ton/mes para el último año.

El material explotado es principalmente caliza de la Formación San Eduardo, la cual es utilizada posteriormente para la producción de dos tipos de materiales comerciales: cal y agregados. El ciclo de la explotación minera comprende las etapas de arranque, carga y transporte, las cuales se describen a continuación.





**Figura 3.2.** Geología del área de estudio



El arranque del material se realiza mediante voladura en bancos con una altura promedio de 10 m y un tonelaje variable según los requerimientos de planta. Los procesos durante la etapa de arranque comprenden: perforación, carga de explosivos y voladura. La detonación de explosivos se realiza durante horas de la tarde, a partir de las 17h00 a 18h00.

La perforación se realiza con una perforadora modelo ECM 590RC de Atlas Copco, con diámetros de perforación en un rango de 64 a 115 mm, y longitud de perforación de hasta 22 m. La perforación se realiza en mallas cuadradas con burden y espaciamiento que varían entre 4 a 4.5 m, diámetros de perforación que varían desde 3.5 pulgadas (88.9 mm) a 4.5 pulgadas (115 mm), longitudes de perforación promedio de 10 m, pero que alcanzan los 16 m en algunos casos, y una inclinación de 10° con respecto a la vertical hacia la cara del banco.

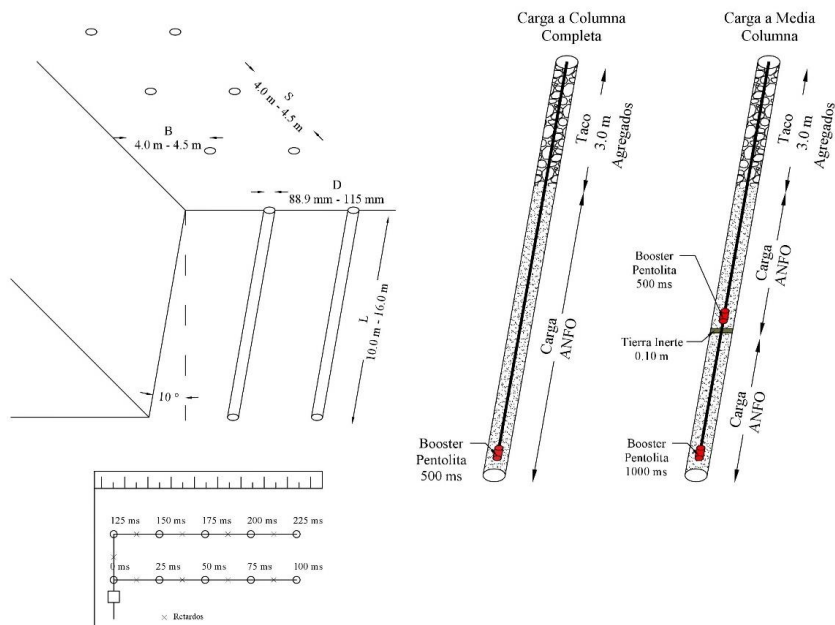
Para la operación de voladura se utilizan diferentes tipos de explosivos, siendo el ANFO el más comúnmente empleado como carga, sin embargo también se emplea ANFO Pesado y emulsiones encartuchadas en caso de tener presencia de agua en los taladros. Estos son cargados manualmente por los operadores dejando una longitud de retacado de 3 m, utilizando agregados para este fin. En la **Tabla VII** se enlistan los explosivos utilizados en las operaciones.

**Tabla VII.** Explosivos utilizados para el arranque por voladuras en la cantera Calizas Huayco S.A.

<b>Explosivo</b>	<b>Marca</b>	<b>Función</b>
ANFO	MAXAM	Carga
ANFO Aluminizado	MAXAM	Carga
ANEMUL 20/80	EXPLOCEN	Carga
Emulsen 720	EXPLOCEN	Carga en presencia de agua
Emulnor 5000	EXPLOCEN	Carga en presencia de agua
Pentolita 450 g	EXPLOCEN	Booster
Pentolita 240 g	EXPLOCEN	Booster
Pentolita 225 g	EXPLOCEN	Booster
Pentolita 150 g	EXPLOCEN	Booster

El sistema de iniciación consiste en el amarre mediante detonadores no eléctricos de retardo FANEL DUAL de FAMESA, con retardos de 25 ms entre taladro y 500 ms en profundidad, en casos donde la carga es dislocada a la mitad. El encendido se realiza sobre mecha lenta amarrada a un tramo de cordón detonante que inicia la voladura.

En la **Figura 3.3** a continuación se presenta un esquema general de la operación de voladura llevada a cabo.



**Figura 0.** Esquema general de la operación de voladura por Mamut Andino en Calizas Huayco S.A.

Una vez realizado el proceso de arranque, la carga del material se realiza mediante excavadoras hidráulicas Doosan 500 sobre dumpers Caterpillar 775 que transportan la carga hacia una planta de trituración ubicada en la concesión A Guay El Huayco, con una capacidad instalada de 700 ton/hora.

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS**

#### 4.1. Registro histórico de vibraciones

Para la construcción del modelo se procesaron un total de 163 registros históricos de vibraciones y la ficha técnica de la voladura correspondiente. En el **Anexo I** se presenta la tabla de los datos procesados, calculando la cantidad de carga explosiva máxima por retardo, y los parámetros de vibraciones asociados. En la **Figura 4.1** se muestra la distribución de los disparos en la cantera y los puntos de monitoreo correspondiente según el sector de explotación. El rango de los parámetros de estos registros de voladuras, con los cuales se construye el modelo, se enlista en la **Tabla VIII** y en la **Figura 4.2** se presentan el histograma de frecuencia de estos parámetros, relevantes a la generación de vibraciones. Se puede considerar que el modelo construido representa estas condiciones de evento, y en caso que se decida cambiar estos parámetros operativos significativamente el modelo deberá utilizarse con precaución.

**Tabla VIII.** Rango de parámetros de voladura del registro histórico

Parámetro	Rango
Número de perforaciones	6 – 88
Diámetro (pulgadas)	3 – 5
Longitud de perforación (m)	4 – 16
Burden (m)	3 – 5
Espaciamiento (m)	3 – 6
Carga explosiva total (kg)	100 – 6050
Carga máxima por retardo (kg)	7.5 - 115

El modelo predictivo se construye a partir del cálculo de una distancia escalada (SD) según los diferentes planteamientos teóricos que relacionan la carga explosiva máxima por retardo y la distancia desde el frente de la voladura hasta el punto de monitoreo. Esta distancia escalada se analiza en conjunto con la velocidad pico de partículas (nivel de vibraciones) mediante técnicas de regresión para definir la ecuación matemática de ajuste, cada planteamiento teórico diferente de la distancia escalada proporciona un modelo diferente de los cuales se debe seleccionar el de mejor ajuste a la explotación. En la **Tabla IX** a continuación se presentan los modelos de distancia escalada que se comparan en el presente estudio.

**Tabla IX.** Modelos de distancia escalada evaluados en este estudio

	<b>Distancia Escalada</b>	<b>Relación PPV-SD</b>
<b>USBM (Siskind et al., 1980)</b>	$\frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}}}$	$PPV = K \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}}} \right)^{-B}$
<b>Ambraseys Hendron (Ambraseys &amp; Hendron, 1968)</b>	$\frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}^{1/3}}}$	$PPV = K \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}^{1/3}}} \right)^{-B}$
<b>Langefors Khilstrom (Langefors &amp; Kihlstrom, 1963)</b>	$\frac{Q_{MAX}}{\sqrt{\frac{2}{R^3}}}$	$PPV = K \left( \frac{Q_{MAX}}{\sqrt{\frac{2}{R^3}}} \right)^B$
<b>Estándar Indio (Bureau of Indian Standards, 1973)</b>	$\frac{Q_{MAX}^{2/3}}{R}$	$PPV = K \left( \frac{Q_{MAX}^{2/3}}{R} \right)^B$

En la **Figura 4.3 (a), (b), (c) y (d)** a continuación se presenta el gráfico representativo de la aplicación de los diferentes modelos a los registros históricos de voladura. Se presentan en una escala log – log para facilitar la interpretación de los datos que siguen una tendencia logarítmica como indican los modelos teóricos planteados. Estos datos corresponden a la distancia escalada según el modelo indicado y su respectiva relación con la PPV, según el parámetro de la Suma Vectorial Pico, que representa la velocidad tridimensional máxima real inducida en el punto de monitoreo por el evento.

### UBICACIÓN DE VOLADURAS Y PUNTOS DE MONITOREO DE VIBRACIONES 2015 - 2016

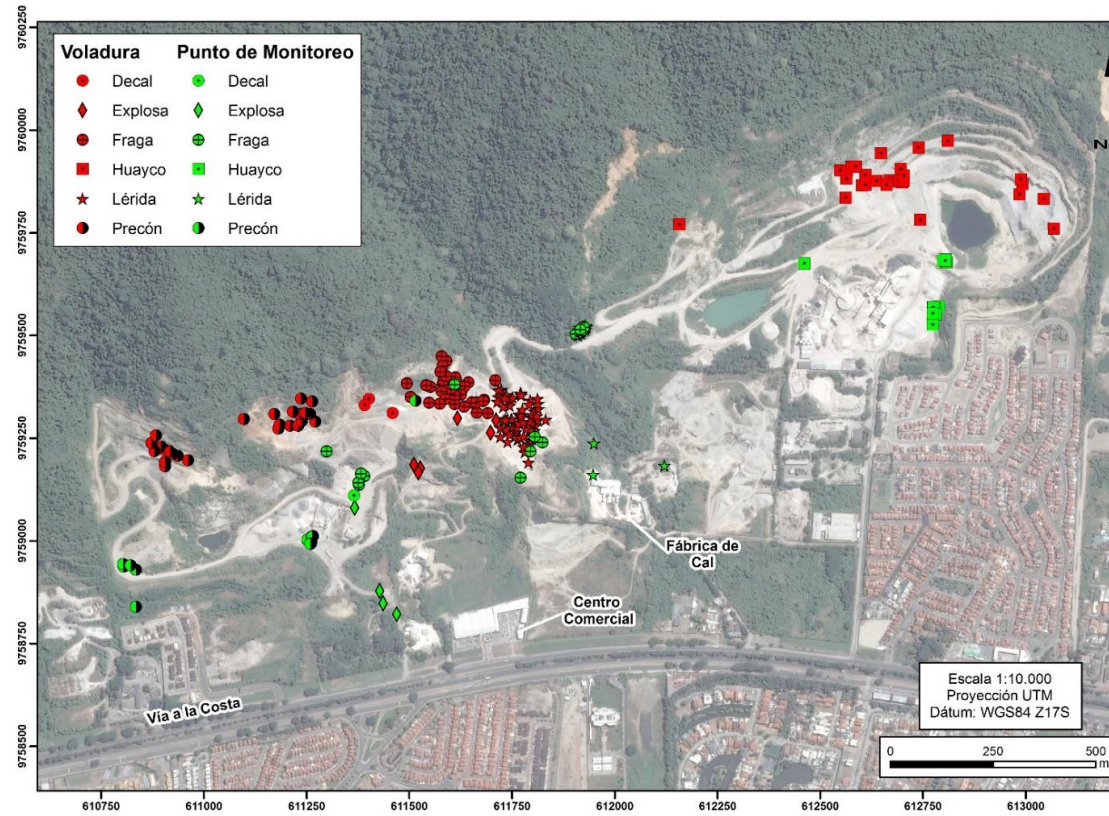
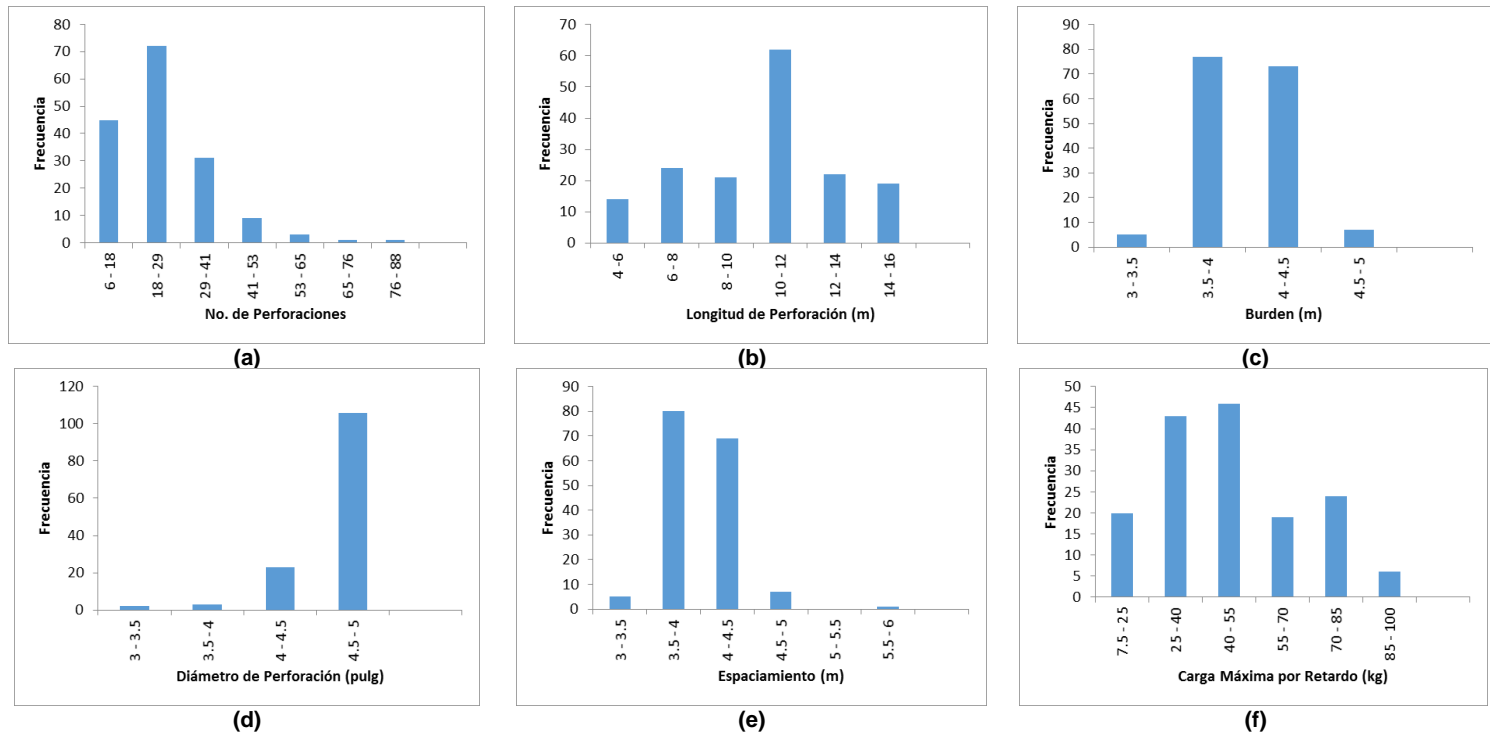
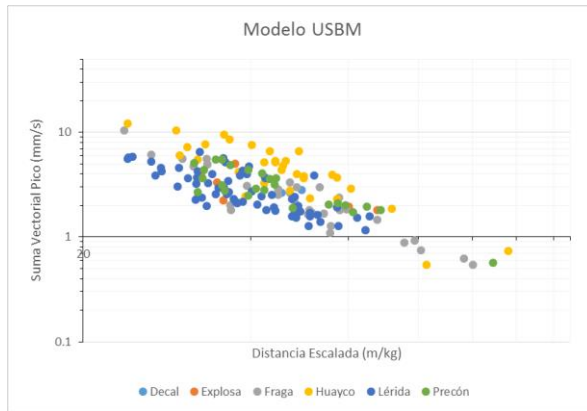


Figura 4. 1: Ubicación de voladuras y puntos de monitoreo de los registros históricos de vibraciones

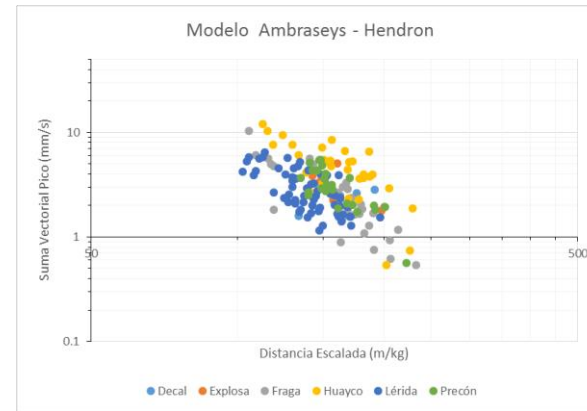




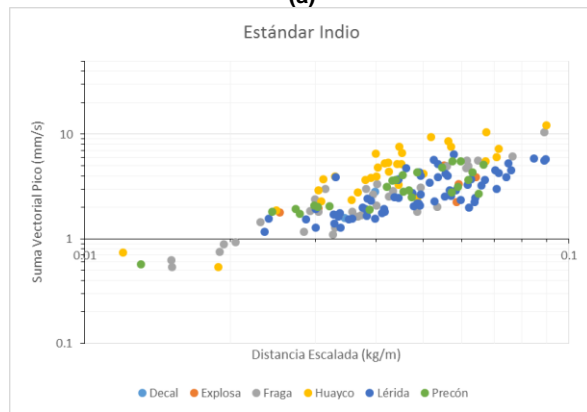
**Figura 4. 2:** Histograma de frecuencia de los parámetros relevantes a la generación de vibraciones de voladura en los datos para la construcción del modelo. **(a)** No. De perforaciones; **(b)** Longitud de perforación; **(c)** Burden; **(d)** Diámetro de Perforación; **(e)** Espaciamiento; **(f)** Carga máxima por retardo



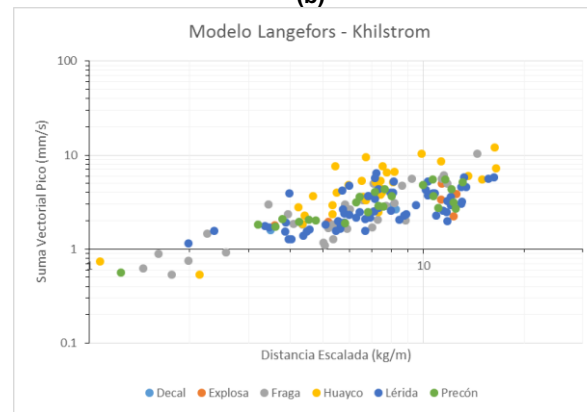
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 4. 3:** Gráfico de Distancia Escalada vs PPV **(a)** Modelo USBM; **(b)** Modelo Ambraseys – Hendron; **(c)** Estándar Indio; **(d)** Langefors – Khilstrom.

En los gráficos se representan los datos según el sector donde se realizó la voladura para analizar su tendencia. Se puede observar claramente que los datos correspondientes al sector de explotación de Huayco, siguen una tendencia diferente a los demás sectores de explotación, tomando valores más altos para una misma distancia escalada. Esta tendencia implica condiciones geológicas presentes en el sector de Huayco que amplifican las ondas sísmicas producto de la voladura generando una velocidad inducida de partícula mayor en el terreno.

Debido a esta tendencia observada, el análisis de regresión se realiza por separado a los datos correspondientes al sector de explotación de Huayco, que se encuentra al margen derecho del área de estudio a diferencia del resto de sectores, y los demás. Por lo tanto se obtendrán dos modelos predictivos de vibraciones, uno para el sector de Huayco y otro para el resto del área de estudio que representan las condiciones reflejadas en los datos.

Mediante el ajuste por regresión de una función potencial se pueden obtener los coeficientes de los modelos teóricos planteados. En la **Figura 4.4 (a), (b), (c) y (d)** se muestra el ajuste de la función en línea punteada para las dos tendencias identificadas en el área de estudio, así como la ecuación representativa del modelo. En la **Tabla X** se presentan las ecuaciones representativas de los diferentes modelos ajustados a los datos.

Estos modelos sirven como una herramienta predictiva para la estimación de los niveles de vibraciones, representados por la suma vectorial pico (mm/s), inducidos en el terreno por una voladura, a partir de la carga explosiva máxima por retardo (kg) y la distancia desde el frente hasta el punto de análisis (m).

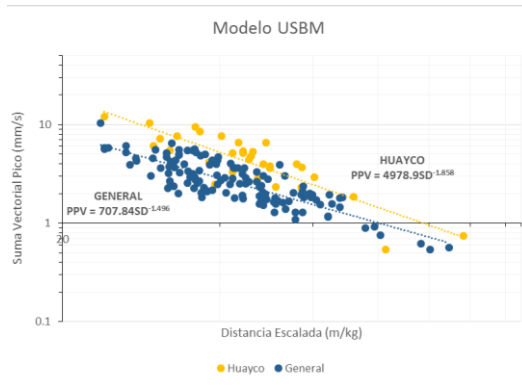
Al ser construidos en base a un extenso registro de datos reales de la explotación, estos modelos reflejan las condiciones geológicas reales del sitio que influyen en el complejo proceso de transmisión de ondas sísmicas a través de un medio. Por lo tanto, permiten obtener una predicción confiable para el control del impacto por vibraciones en zonas cercanas del proceso de voladura.

**Tabla X.** Modelos predictivos de vibraciones ajustados a los datos

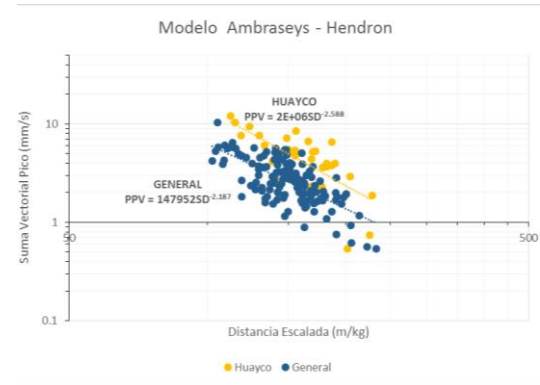
Modelo	General	Huayco
<b>USBM (Siskind et al., 1980)</b>	$PPV = 707.84 \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}}} \right)^{-1.496}$	$PPV = 4978.9 \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}}} \right)^{-1.858}$
<b>Ambraseys – Hendron (Ambraseys &amp; Hendron, 1968)</b>	$PPV = 147952 \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}^{1/3}}} \right)^{-2.187}$	$PPV = 2 \times 10^6 \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}^{1/3}}} \right)^{-2.588}$
<b>Langefors – Kihlstrom (Langefors &amp; Kihlstrom, 1963)</b>	$PPV = 0.5757 \left( \frac{Q_{MAX}}{\sqrt{R^2}} \right)^{0.7935}$	$PPV = 0.575 \left( \frac{Q_{MAX}}{\sqrt{R^2}} \right)^{1.0462}$
<b>Estándar Indio (Bureau of Indian Standards, 1973)</b>	$PPV = 104.35 \left( \frac{Q_{MAX}^{2/3}}{R} \right)^{1.1836}$	$PPV = 484.34 \left( \frac{Q_{MAX}^{2/3}}{R} \right)^{1.4956}$

La frecuencia de las vibraciones es un parámetro importante para la evaluación de la afectación producto de las vibraciones de voladuras en estructuras. Las vibraciones con de menor frecuencia, especialmente con frecuencias menores a los 40 Hz, son las más dañinas debido a que se aproximan a la frecuencia natural de estructuras comunes, típicamente < 30 Hz, y pueden generar resonancia. Mientras que vibraciones de altas frecuencias, mayores a 100 Hz, tienen menos potencial de generar afectación. A pesar de que el análisis de la respuesta estructural de las residencias y zonas urbanas cercanas escapa del alcance del presente trabajo es importante conocer las características de los rangos de frecuencia en los que se encuentran las vibraciones generadas. En la **Figura 4.5** se presenta un gráfico representativo de la distribución de frecuencias de las vibraciones inducidas por las voladuras en el área de estudio, según los registros históricos.

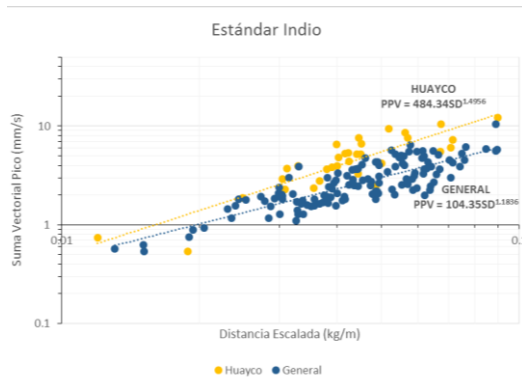




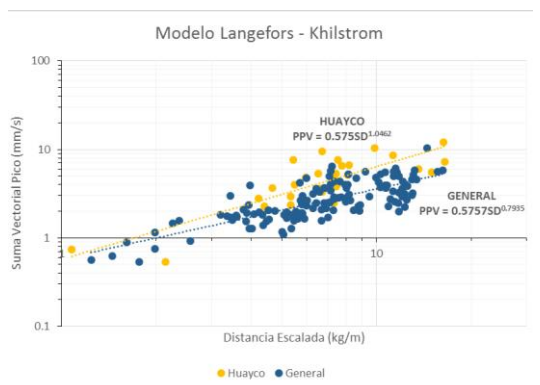
(a)



(b)

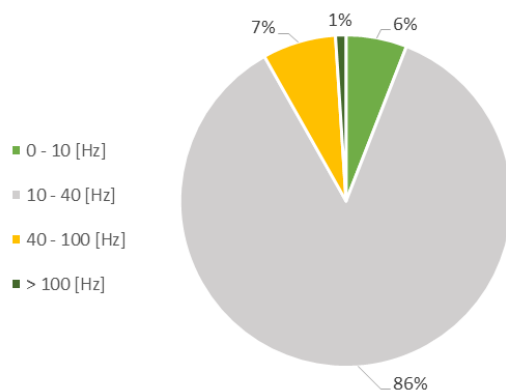


(c)



(d)

**Figura 4. 4:** Modelo ajustado a los datos **(a)** USBM; **(b)** Ambraseys – Hendron; **(c)** Estándar Indio; **(d)** Langefors – Khilstrom.



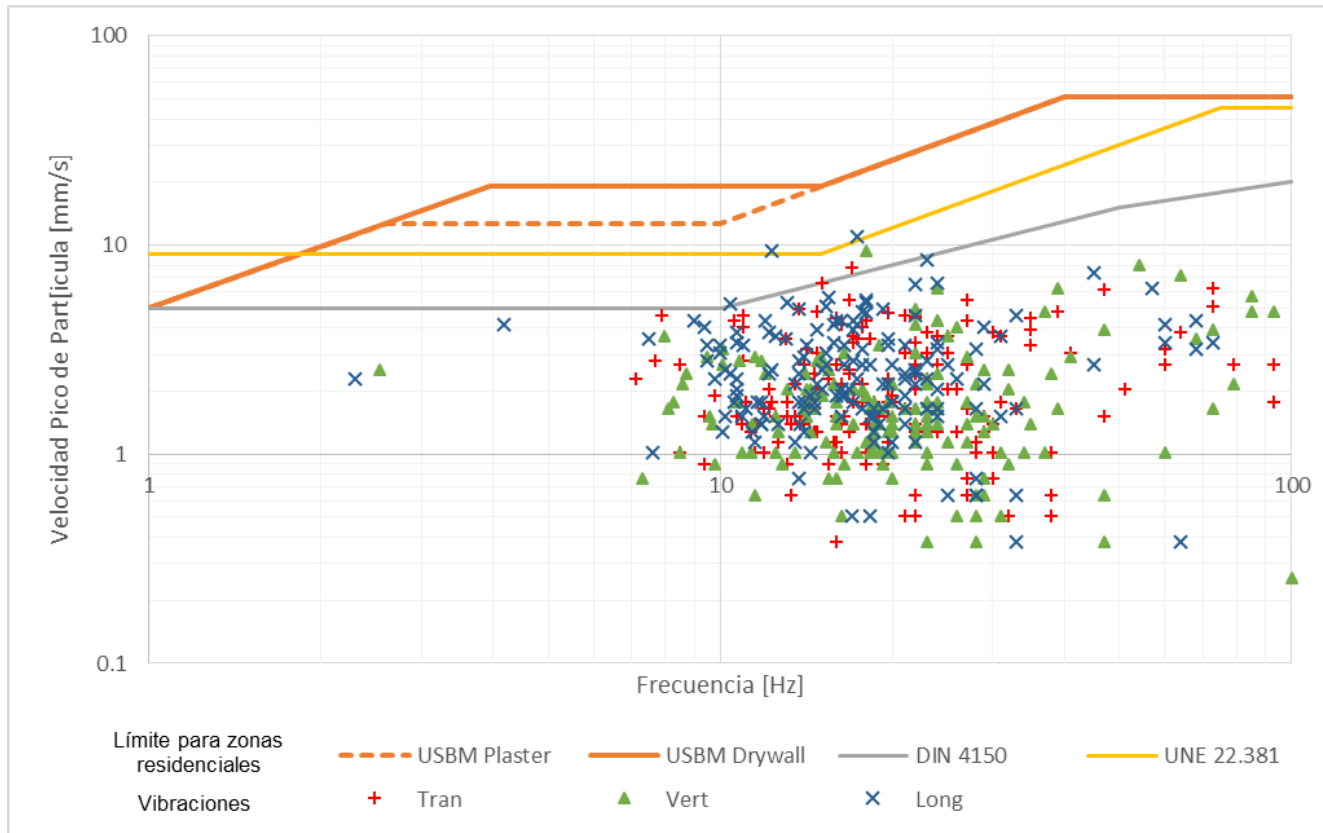
**Figura 4. 5:** Distribución de las frecuencias de las vibraciones inducidas por voladuras.

La gran mayoría de las vibraciones, el 86%, se sitúa dentro de un rango de frecuencias entre 10 y 40 Hz, un rango potencialmente dañino. Y en general, considerando las vibraciones con frecuencias menores a 10 Hz, el 92% de las vibraciones tienen un gran potencial de afectación a las estructuras debido a la naturaleza de su frecuencia. Este factor, producto de la naturaleza del área de estudio y el proceso operativo llevado a cabo, se debe considerar al momento de definir criterios de niveles de vibraciones límites para su control.

Los valores medidos de velocidad de partícula inducida por la voladura son bajos, debido a la escala del proceso extractivo de la cantera, por lo tanto la afectación hacia las estructuras es limitada. Como se observa en la **Figura 4.6** muy pocos componentes, ya sea transversal, longitudinal o vertical, de las vibraciones sobrepasan los límites establecidos por las normativas



mencionadas para zonas residenciales, sobrepasando apenas la normativa alemana DIN 4150 que es la más exigente y en 2 ocasiones la normativa española sin embargo no se acercan a los límites establecidos por la USBM. No obstante, es importante considerar la afectación humana que es sensible a niveles de vibraciones mucho menores que los establecidos para potencial daño estructural.



**Figura 4. 6:** Niveles de vibraciones de registros históricos según límites establecidos en normativas

## 4.2. Registros in situ

Con el fin de validar el modelo se realizaron registros in situ durante un mes de operación. Los registros consisten de la medición de los niveles de vibraciones por parte de un sismógrafo, los parámetros de la voladura y características del banco.

En el **Anexo II** se adjuntan las fichas correspondientes a los registros in situ, y en la **Tabla XI** se presenta el resumen de los datos registrados.

Además se realizó una medición colocando dos sismógrafos a 200 metros de diferencia aproximadamente para analizar el comportamiento de atenuación de las vibraciones y el desempeño del modelo para predecir y estimar los niveles de movimiento inducidos en el terreno.

**Tabla XI.** Datos correspondientes al registro de voladuras in situ.

Sector	Fecha	Distancia (m)	Carga máxima (kg)	PPV (mm/s)	$\lambda$	GSI
Lérida	06/12/2016	325	38	1.96	10	40
Fraga	09/12/2016	227	33.2	3.92	9	45
Lérida	12/12/2016	271	70	2.05	16	30
Precón	20/12/2016	300	39	3.15	6	55
Fraga	21/12/2016	271	66	3.31	11	40
Precón	31/01/2017	129	45	11.2	7	55
Precón	31/01/2017 (a)	298	45	2.43	7	55

# **CAPÍTULO 5**

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### 5.1. Selección del modelo

Se planteó el ajuste de diferentes modelos predictivos para el fenómeno de vibraciones de voladuras. La selección de un modelo específico como herramienta de control se realiza a partir del análisis de los coeficientes de correlación del ajuste, como se estableció previamente. Este coeficiente dependerá de la variabilidad de los datos representados en el modelo, que se puede observar rápidamente en los gráficos correspondientes.

De una inspección visual se puede observar que el modelo planteado por Ambraseys – Hendron es el que consta con la mayor variabilidad en los datos, tanto para el sector de explotación en Huayco como para el resto del área de estudio. Este es un indicativo de que el modelo planteado no representa en buen grado las condiciones del área de estudio reflejadas en los registros de vibraciones.

Los modelos que visualmente ofrecen la menor variabilidad en los datos son los planteados por el USBM y el Estándar Indio. Los datos reflejan una clara tendencia, con cierto grado de dispersión pero menor a los otros modelos analizados.

En la **Tabla XII** se muestran los coeficientes de correlación  $r^2$  para los modelos planteados, tanto para el sector de explotación de Huayco como para los demás sectores de la cantera.

Los modelos planteados por el USBM y el Estándar Indio son los que presentan un coeficiente de correlación mayor, de 0.701. Esto indica que

estos modelos explican hasta el 70% de la variabilidad en los datos, y de acuerdo a la clasificación expuesta por Taylor (Taylor, 1990) representan una alta correlación de estos modelos.

Por otro lado, los modelos planteados por Lanfegors – Khilstrom y Ambraseys – Hendron presentan los coeficientes de correlación más bajos con 0.615 y 0.484 representando una correlación moderada. A pesar que estos modelos representan la tendencia general de los datos no son capaces de explicar satisfactoriamente la variabilidad y dispersión de los mismos.

**Tabla XII.** Coeficientes de correlación para el ajuste de los modelos predictivos

Modelo	General	$r^2$	Huayco	$r^2$
<b>USBM</b>	$PPV = 707.84 \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}}} \right)^{-1.496}$	0.701	$PPV = 4978.9 \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}}} \right)^{-1.858}$	0.74 1
<b>Ambraseys – Hendron</b>	$PPV = 147952 \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}^{1/3}}} \right)^{-2.187}$	0.484	$PPV = 2 \times 10^6 \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}^{1/3}}} \right)^{-2.588}$	0.49 3
<b>Langefors – Khilstrom</b>	$PPV = 0.5757 \left( \frac{Q_{MAX}}{\sqrt{R^2}} \right)^{0.7935}$	0.615	$PPV = 0.575 \left( \frac{Q_{MAX}}{\sqrt{R^2}} \right)^{1.0462}$	0.68 4
<b>Estándar Indio</b>	$PPV = 104.35 \left( \frac{Q_{MAX}^{2/3}}{R} \right)^{1.1836}$	0.701	$PPV = 484.34 \left( \frac{Q_{MAX}^{2/3}}{R} \right)^{1.4956}$	0.75 2

Una herramienta de análisis de gran importancia para el análisis y selección de modelos predictivos son los gráficos de dispersión de valores reales y valores predichos (Gauch Jr., Hwang, & Fick, 2003; Piñeiro, Perelman, Guerschman, & Paruelo, 2008). Estos gráficos muestran claramente el desempeño de un modelo predictivo al graficar los resultados de una simulación frente a los valores reales observados. El caso ideal, donde el modelo explica a la perfección el fenómeno de estudio, se representa por una línea recta de pendiente unitaria e intercepto nulo indicando que los valores predichos son iguales a los observados y cualquier desviación de este caso es un indicativo de la incertidumbre inherente en el modelo construido.

Como parámetros de análisis se consideran la raíz cuadrada del error cuadrático medio (Root Mean Square Error o RMSE), que indica la variabilidad de los valores predichos con respecto a los reales, y el

intercepto y pendiente del gráfico de dispersión que deben ser muy cercanos a 0 y 1 respectivamente (caso ideal donde los valores predichos son iguales a los reales). El RMSE es un parámetro que tiene las mismas unidades que los valores resultado del modelo predictivo, en este caso representará la velocidad inducida en el terreno en mm/s, y es, en concepto, la media del error cuadrático entre los valores predichos y reales, es decir, provee de un rango promedio dentro del cual podemos esperar que los valores predichos por el modelo fluctúen en relación a los reales.

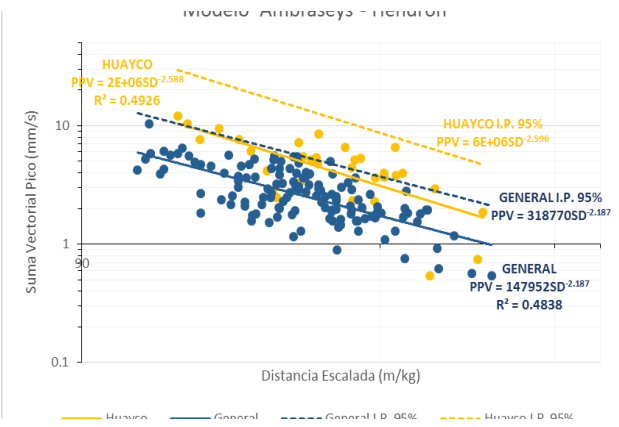
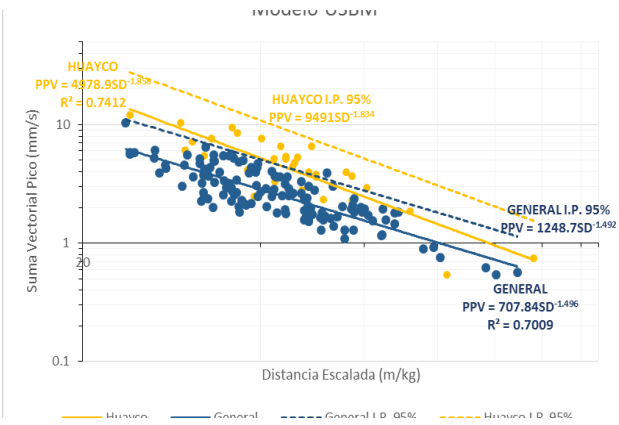
Otra herramienta importante para la implementación de los modelos predictivos es el cálculo de intervalos de predicción del 95%. Es decir, de un modelo que siguiendo la misma tendencia y estructura represente el 95% de los datos, representando en su totalidad las diferentes condiciones que generaron los datos observados, como factor de seguridad para la predicción en casos sensibles.

En la **Figura 5.1 (a), (b), (c) y (d)** a continuación se presentan los gráficos de dispersión y el intervalo de predicción del 95% para los modelos analizados. De igual manera en la **Tabla XIII** se muestra un resumen de los parámetros estadísticos significativos para el análisis del desempeño de estos modelos.

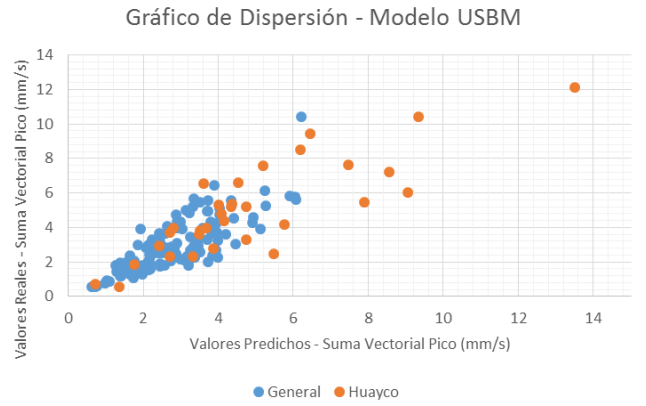


**Tabla XIII.** Intervalos de predicción del 95% y parámetros estadísticos representativos del gráfico de dispersión valores predichos vs valores reales: b – intercepto; m – pendiente.

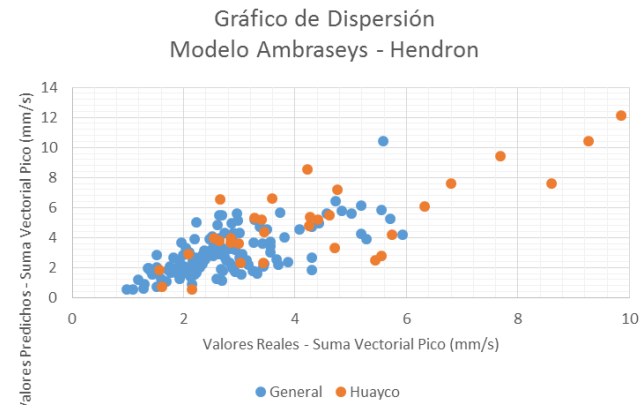
Sector	Intervalo de Predicción del 95%	RMSE (mm/s)	b	m
<b>USBM</b>	General $PPV = 1248.7 \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}}} \right)^{-1.492}$	0.957	0.046	1.027
	Huayco $PPV = 9491 \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}}} \right)^{-1.834}$	1.546	0.897	0.844
<b>Ambraseys – Hendron</b>	General $PPV = 318770 \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}^{1/3}}} \right)^{-2.187}$	1.140	0.222	0.987
	Huayco $PPV = 6 \times 10^6 \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}^{1/3}}} \right)^{-2.588}$	1.799	0.773	0.964
<b>Langefors – Khilstrom</b>	General $PPV = 1.122 \left( \frac{Q_{MAX}}{\sqrt{R^2}} \right)^{0.7898}$	1.121	0.076	1.029
	Huayco $PPV = 1.3573 \left( \frac{Q_{MAX}}{\sqrt{R^2}} \right)^{1.0224}$	2.029	1.332	0.769
<b>Estándar Indio</b>	General $PPV = 184.62 \left( \frac{Q_{MAX}^{2/3}}{R} \right)^{1.1836}$	0.973	0.013	1.038
	Huayco $PPV = 926.13 \left( \frac{Q_{MAX}^{2/3}}{R} \right)^{1.4738}$	1.634	0.964	0.832

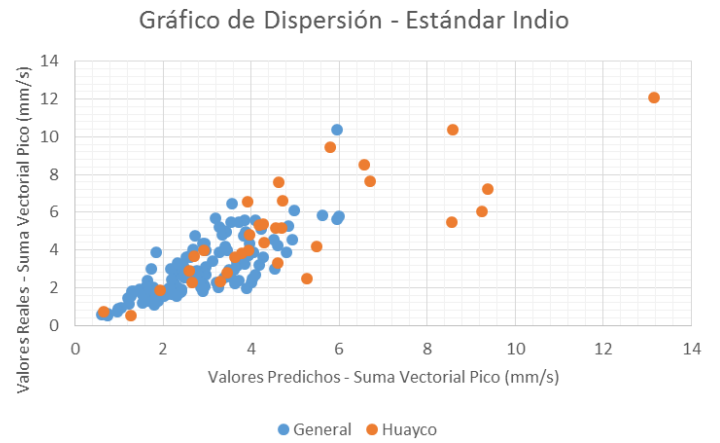
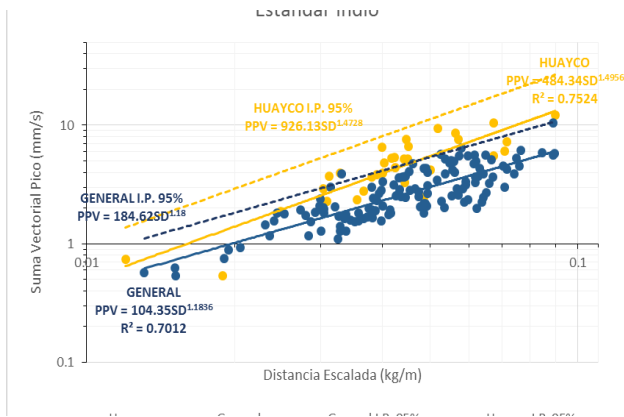


(a)

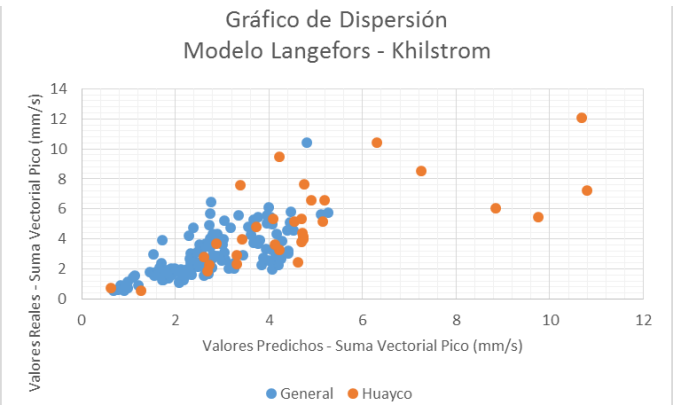
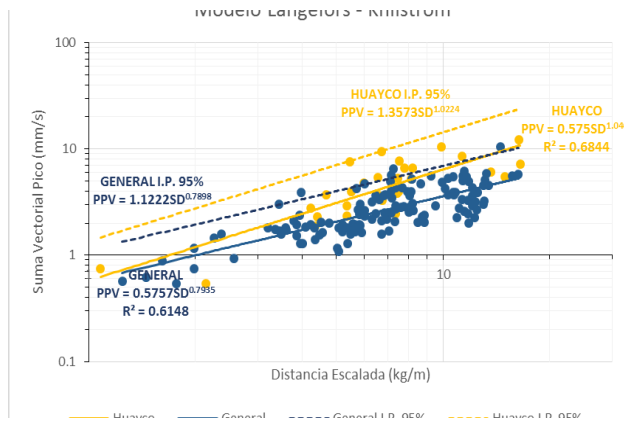


(b)





(c)



(d)

**Figura 5. 1:** Gráfico de modelo predictivo con intervalo de predicción del 95% y gráfico de dispersión para **(a)** Modelo USBM; **(b)** Modelo Ambraseys – Hendron; **(c)** Estándar Indio; **(d)** Modelo Langefors – Khilstrom

El modelo USBM presente un RMSE de 0.957 mm/s para el modelo general, siendo el valor más bajo de todos los modelos analizados. Este valor indica que se puede esperar que el modelo genere una predicción del nivel de vibración que, en promedio, estará en un rango de  $\pm 0.957$  mm/s del valor real. Como se observa en el gráfico de dispersión la tendencia del mismo es clara y los valores del intercepto y la pendiente son muy cercanos a los ideales, lo que indican que el modelo no tiene mayor sesgo. El modelo USBM para el sector de Huayco presenta un RMSE mayor, de 1.546 mm/s, indicando que hay una mayor dispersión y variabilidad en las predicciones. Sin embargo en este sector de explotación se presenta una tendencia de niveles de vibraciones más altos que los demás sectores de la cantera por lo que esta variación de  $\pm 1.546$  mm/s es aceptable, considerando además que es la más baja de todos los modelos analizados. Los valores del intercepto y pendiente del gráfico de dispersión para este sector difieren de los valores ideales indicando la posibilidad de algún sesgo.

El modelo planteado por el Estándar Indio presenta valores similares a los del USBM. Un RMSE de 0.973 mm/s para el sector general indica una buena confiabilidad de las predicciones del modelo, que se sitúan en un rango promedio de  $\pm 0.973$  mm/s de los valores reales, ligeramente inferior a la conseguida por el modelo USBM. El intercepto y la pendiente del gráfico de dispersión son muy cercanos a los valores ideales, lo que demuestra que las

predicciones son estadísticamente significativas y no hay mayor sesgo en el modelo. El estándar indio para la predicción de vibraciones en el sector de explotación Huayco demuestra un RMSE de 1.634 mm/s, mayor al obtenido por el modelo de la USBM por lo tanto su desempeño también es inferior. De igual manera, los valores en el intercepto y la pendiente para este sector indican un sesgo en las predicciones, más fuerte que en el modelo de la USBM.

Los modelos de Ambraseys – Hendron y Langefors – Khilstrom presentan valores significativamente mayores de RMSE tanto para el modelo general como para el sector de explotación Huayco, e igual manera valores de intercepto y pendiente que sugieren un fuerte sesgo en el modelo predictivo. Esto indica que los resultados obtenidos de estos modelos no representan significativamente el fenómeno de estudio debido a la gran variabilidad entre los valores predichos y los reales.

En base a los parámetros analizados se puede seleccionar el modelo ajustado de la USBM como el de mejor desempeño para la predicción de vibraciones inducidas por voladuras en el área de estudio. Este modelo, que no presenta sesgo según el análisis del gráfico de dispersión, con un coeficiente  $r^2$  igual a 0.701 representa el 70% de la variabilidad en los datos, es decir explica en gran manera el comportamiento del fenómeno de estudio y su relación con las características del área, y con un RMSE de  $\pm 0.957$  mm/s

genera predicciones que en promedio se encuentran cercanas al valor real. El modelo planteado por el estándar indio tiene un desempeño muy bueno pero ligeramente inferior en base al análisis de dispersión según el gráfico de valores predichos vs observados, por lo que se descarta a favor del modelo USBM. El modelo USBM seleccionado se presenta en la ecuación 4.1 y 4.2.

$$\text{Modelo General} \quad PPV = 707.84 \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}}} \right)^{-1.496} \quad (4.1)$$

$$\text{Modelo Sector Huayco} \quad PPV = 4978.9 \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}}} \right)^{-1.858} \quad (4.2)$$

## 5.2. Validación del modelo

La validación del modelo seleccionado se realiza en base a las mediciones registradas in situ para evaluar el desempeño de las predicciones. Las predicciones, en base al modelo seleccionado para el sector general de la cantera y a los datos de carga explosiva máxima (kg) y distancia (m), y el valor real medido del nivel de vibraciones se presenta en la **Tabla XIV** a continuación.

**Tabla XIV.** Comparación de valores medidos y predichos de niveles de vibraciones

Fecha	Código	PPV medido (mm/s)	PPV predicho (mm/s)	$\bar{e}$
06/12/2016	CLE-041	1.96	1.88	0.08
09/12/2016	CFR-036	3.92	2.93	0.99
12/12/2016	CLE-042	2.05	3.89	1.84
20/12/2016	CPC-026	3.15	2.16	0.99
21/12/2016	CSF-039	3.31	3.73	0.42
31/12/2017	CPR-04	1.89	2.43	0.54
31/12/2017 (a)	CPR-04	11.2	8.50	2.7

Las predicciones de dos registros, los correspondientes a las fechas del 06 de diciembre y al 21 de diciembre, se ajustan bastante a los niveles de vibraciones reales medidos con diferencias menores a  $\pm 0.4 \text{ mm/s}$ . En dos registros, los del 09 de diciembre y el 20 de diciembre, el modelo tuvo un error de  $\pm 1 \text{ mm/s}$  en la predicción lo cual se ajusta al *RMSE* del ajuste estadístico, es decir al error promedio que se puede esperar en las predicciones.

El registro del 12 de diciembre de 2016 generó una predicción muy por encima de los niveles de vibraciones medidos. El modelo predijo un valor con un error de  $+1.84 \text{ mm/s}$ , muy por encima del valor esperado. Sin embargo, este evento corresponde a una voladura en un banco muy fracturado, con los valores correspondientes de frecuencia de discontinuidades y GSI más bajos de los eventos registrados, por lo que se plantea la posible influencia del

grado de fracturamiento como mecanismo de atenuación de las ondas vibratorias.

### 5.3. Influencia del grado de fracturamiento

Los resultados del registro in situ y la aparición de dos tendencias de comportamiento en el área de estudio sugieren la influencia de otras variables en el fenómeno de atenuación de las ondas vibratorias. Como se refirió previamente en la sección 2.3.7 el grado de fracturamiento del banco ha sido investigado como un factor a considerar en la construcción de modelos predictivos de vibraciones de voladura.

Un medio altamente fracturado puede disipar gran parte de la energía liberada en la detonación explosiva, atenuando las ondas sísmicas desde la fuente y potencialmente disminuyendo el nivel de vibraciones inducidas en el terreno para una misma cantidad de carga explosiva.

Se evaluó la potencial influencia del fracturamiento del banco empleando dos índices, como se mencionó previamente, el GSI y la frecuencia de discontinuidades por metro lineal,  $\lambda$ . Estos parámetros son incluidos dentro del modelo numérico como se muestra en la ecuación 4.3 y ecuación 4.4.

$$PPV = K \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}}} \right)^{\beta} GSI^{\gamma} \quad (4.3)$$



$$PPV = K \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}}} \right)^{\beta} \lambda^{\gamma} \quad (4.4)$$

El ajuste estadístico de los datos, presentados en la **Tabla XI** de la sección 4.2, se realizó mediante una regresión no-lineal múltiple en base al método de ajuste por mínimos cuadrados utilizando la plataforma R de programación estadística.

La ecuación ajustada para los datos, con los coeficientes empíricos del sitio se presenta en la ecuación 4.5 y la ecuación 4.6 para el modelo considerando el GSI y la frecuencia de discontinuidades respectivamente.

$$PPV = 6.01 \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}}} \right)^{-1.466} GSI^{1.237} \quad (4.3)$$

$$PPV = 5475.19 \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{MAX}}} \right)^{-1.527} \lambda^{-0.863} \quad (4.4)$$

La evaluación del desempeño predictivo de estos modelos se realiza comparando los valores predichos con las mediciones reales para estimar el error promedio de la estimación. La **Tabla XV** a continuación presenta la estimación de la PPV (mm/s) para los eventos registrados y el valor medido por el sismógrafo. Para efectos de comparación se calculó el error de estimación como la diferencia absoluta entre el valor medido y el predicho.

**Tabla XV.** Comparación del desempeño de predicción de modelos predictivos con el factor del grado de fracturamiento.

Fecha	PPV medido	PPV(SD)		PPV(SD, GSI)		PPV(SD, $\lambda$ )	
	mm/s	mm/s	$e$ mm/s	mm/s	$e$ mm/s	mm/s	$e$ mm/s
06/12/2016	1.96	1.87	0.08	1.72	0.24	1.76	0.19
09/12/2016	3.92	2.90	1.02	3.05	0.87	3.02	0.90
12/12/2016	2.05	3.89	1.84	2.46	0.41	2.48	0.43
20/12/2016	3.15	2.16	0.99	2.92	0.23	3.16	0.01
21/12/2016	3.31	3.73	0.42	3.36	0.05	3.27	0.04
31/12/2016	1.89	2.43	0.54	3.28	1.39	3.12	1.23
31/12/2016	11.2	8.50	2.71	11.18	0.02	11.19	0.01
		$\bar{e}$	1.08	$\bar{e}$	0.46	$\bar{e}$	0.40

Los modelos que consideran el grado de fracturamiento en el mecanismo de atenuación de las ondas sísmicas generan un error de predicción promedio mucho menor al modelo en función únicamente de la relación carga – distancia. El error promedio de predicción para el modelo que incluye el GSI es de 0.46 mm/s, y para el modelo que toma la frecuencia de discontinuidades de 0.40 mm/s, mientras que para la ecuación que incorpora únicamente la distancia escalada tiene un error promedio de predicción de 1.08 mm/s aproximadamente, lo que concuerda con el *RMSE* de 0.957 mm/s.

#### 5.4. Herramientas prácticas para el control de voladuras

El modelo construido permite estimar el nivel de vibraciones que genera una voladura en base a la máxima carga explosiva detonada por retardo y a la distancia hacia un punto de interés. Sin embargo en las operaciones mineras el parámetro de interés que debe ser controlado durante la planificación de voladuras para evitar afectaciones y molestias significativas es la carga explosiva. Para facilitar la utilización del modelo y el control de vibraciones se pueden construir herramientas de control más prácticas, como un ábaco para la estimación de la carga explosiva máxima o crítica para evitar afectación o un mapa representando la distribución espacial de dicha carga. Como primer paso para la elaboración de estas herramientas se debe definir límites de niveles de vibraciones, de tal manera que se pueda estimar la carga máxima para evitar afectación a la distancia que se encuentra la estructura más cercana según la ubicación de la voladura.

#### **5.4.1. Definición del límite de vibraciones**

En la determinación de límites de vibraciones para el control de su afectación por voladuras se debe considerar el objetivo sobre el que se establece el límite. Los materiales y estándares de construcción de las estructuras difieren según su fin, y estas diferencias son tomadas en consideración por las diferentes normativas y estándares que establecen diferentes umbrales para zonas residenciales y para zonas comerciales o industriales, en base a los estudios pertinentes. En las cercanías de la

cantera de Calizas Huayco S.A. existen ambas zonas: urbanizaciones residenciales, centros comerciales y zonas industriales. Por lo tanto, es necesario establecer una diferencia que considere la estructura afectada.

De las normativas planteadas la alemana DIN 4150 presenta los valores más conservativos estableciendo que para un rango de frecuencias de hasta 40 Hz, donde se encuentra el 92% de las vibraciones de estudio, el nivel límite de velocidad pico de partícula debe ser de 10 mm/s para zonas residenciales y entre 20 mm/s hasta 35 mm/s para edificios de carácter industrial y comercial. Los límites establecidos por la USBM son los más permisivos, en 20 mm/s sin hacer diferencia entre edificaciones de carácter industrial y residencial. De acuerdo a estas normativas consideradas, los límites establecido por la DIN 4150, de 10 mm/s para zonas residenciales y 20 mm/s para comerciales/industriales, resultan más apropiados para el control de la afectación en el área de estudio debido a la gran cercanía de estas zonas a frentes de explotación continua.

Un factor comúnmente omitido en estudios de vibraciones de voladura es la respuesta humana. Si bien los límites establecidos previamente aseguran la integridad de las edificaciones, las personas reaccionan ante umbrales de vibraciones menores sintiendo molestias significativas. La USBM (Siskind et al., 1980) indica estudios significativos sobre la percepción humana y su respuesta ante vibraciones, estableciendo que,

para frecuencias en un rango de 6 a 40 Hz las vibraciones con magnitudes a partir de 5 mm/s generan molestias considerables, y a partir de 15 mm/s se vuelven intolerables. El factor humano es de mucha importancia para el caso de estudio debido a la gran cercanía de grandes zonas residenciales al sector de explotación y a las quejas formales que se han realizado por las operaciones mineras.

Para la construcción de las herramientas de control los límites establecidos servirán como guía para calcular la carga máxima por retardo (kg) de la voladura para evitar niveles excedentes de vibraciones con potencial de afectación según el objetivo.

#### **5.4.2. Ábaco empírico para determinación de carga máxima**

Una vez establecidos límites de niveles de vibraciones considerando la percepción humana, el potencial daño a estructuras residenciales y a estructuras comerciales, se pueden construir ábacos prácticos para la determinación de la carga máxima por retardo en base al modelo empírico establecido y la distancia desde el frente de voladura hacia el punto de interés. Estos gráficos sirven como una herramienta práctica de control para evitar la potencial afectación de las vibraciones inducidas por las voladuras de producción (Afeni & Osasan, 2009; Ak, Iphar, Yavuz, & Konuk, 2009; Ozer, Kahriman, Aksoy, Adiguzel, & Karadogan, 2008).

La construcción de estas gráficas se realiza despejando la variable de carga máxima por retardo, que pasa a ser la variable dependiente en el análisis, para dejar las ecuaciones 4.1 y 4.2 del modelo en términos de la distancia y del valor límite establecido de PPV. En la ecuación 4.3 y 4.4 se muestran la fórmula para la construcción del ábaco práctico. En la **Figura 5.2** se presenta el ábaco práctico para el control de los niveles de vibraciones de voladuras según los diferentes límites establecidos.

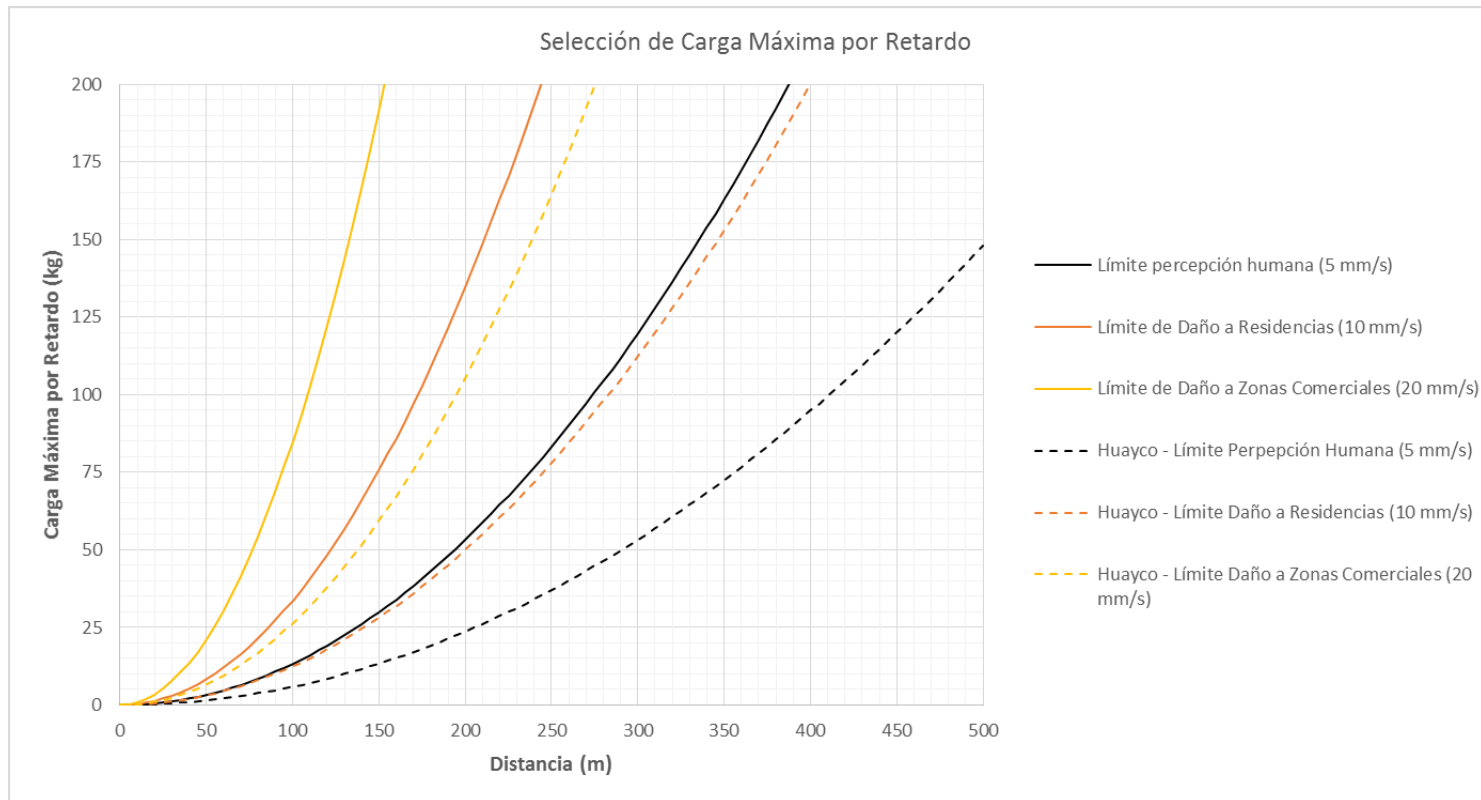
$$\text{Gráfico – General} \quad Q_{max} = \left( \frac{R}{1.496 \sqrt{\frac{707.84}{PPV}}} \right)^2 \quad (4.3)$$

$$\text{Gráfico – Sector Huayco} \quad Q_{max} = \left( \frac{R}{1.858 \sqrt{\frac{4978.9}{PPV}}} \right)^2 \quad (4.4)$$

#### 5.4.3. Mapas temáticos de control

El modelo seleccionado tiene un fuerte componente espacial al considerar la distancia entre el frente de voladura y el punto de interés (zonas urbanas, comerciales, etc.) y la carga explosiva máxima por retardo puede zonificarse en función de un límite establecido para los niveles de vibraciones. La utilización de mapas temáticos de zonificación de carga explosiva máxima dentro de las áreas activas de explotación de la cantera puede servir como una herramienta práctica y fácil de implementar para el control de los impactos de las operaciones de voladura.





**Figura 5. 2:** Ábaco empírico para la selección de la carga máxima por retardo para evitar sobrepasar los límites definidos de vibraciones según la distancia desde el frente de voladura hacia el punto de interés.



La potencialidad de los Sistemas de Información Geográficos para efectuar metodologías de análisis espacial sirve de plataforma para el estudio de la zonificación de cargas explosivas límites para mitigar el impacto de las vibraciones.

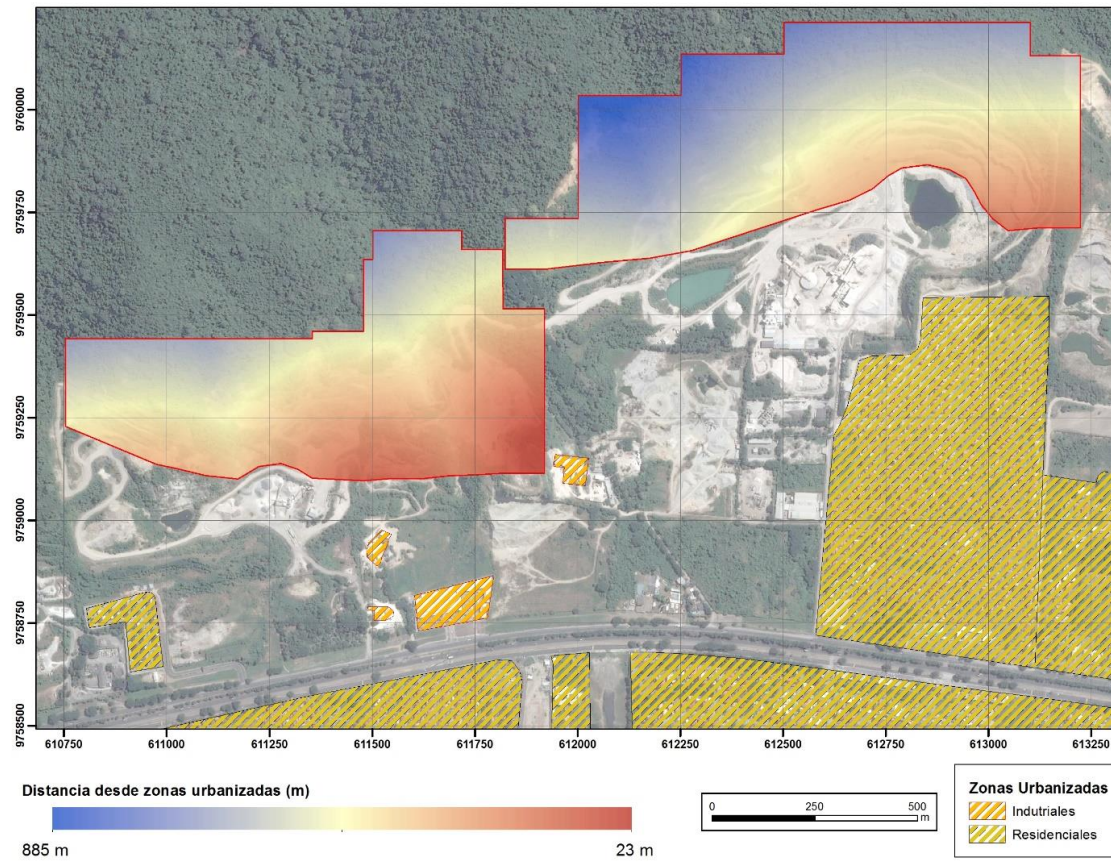
Para zonificar la carga explosiva dentro de las áreas operativas se calculó la distancia desde cada punto en las zonas de explotación hacia una polígono de delimitación de las zonas urbanizadas, tanto industriales como residenciales, sobre una cuadrícula con dimensiones de 1 metro por 1 metro. El cálculo de la distancia se realizó como distancia euclidiana, es decir distancia plana como diferencia cuadrática entre las coordenadas de los puntos. La **Figura 5.3** presenta la distribución de distancias en el área de estudio.

Sobre la cuadrícula de distancias, se puede emplear el modelo invertido para estimar la carga explosiva máxima por retardo (kg) que evita un exceso de vibraciones por encima de un límite, similar al procedimiento para la construcción de los ábacos empleando las ecuaciones 4.3 y 4.4 para el sector general de la cantera y el sector de explotación Huayco respectivamente.

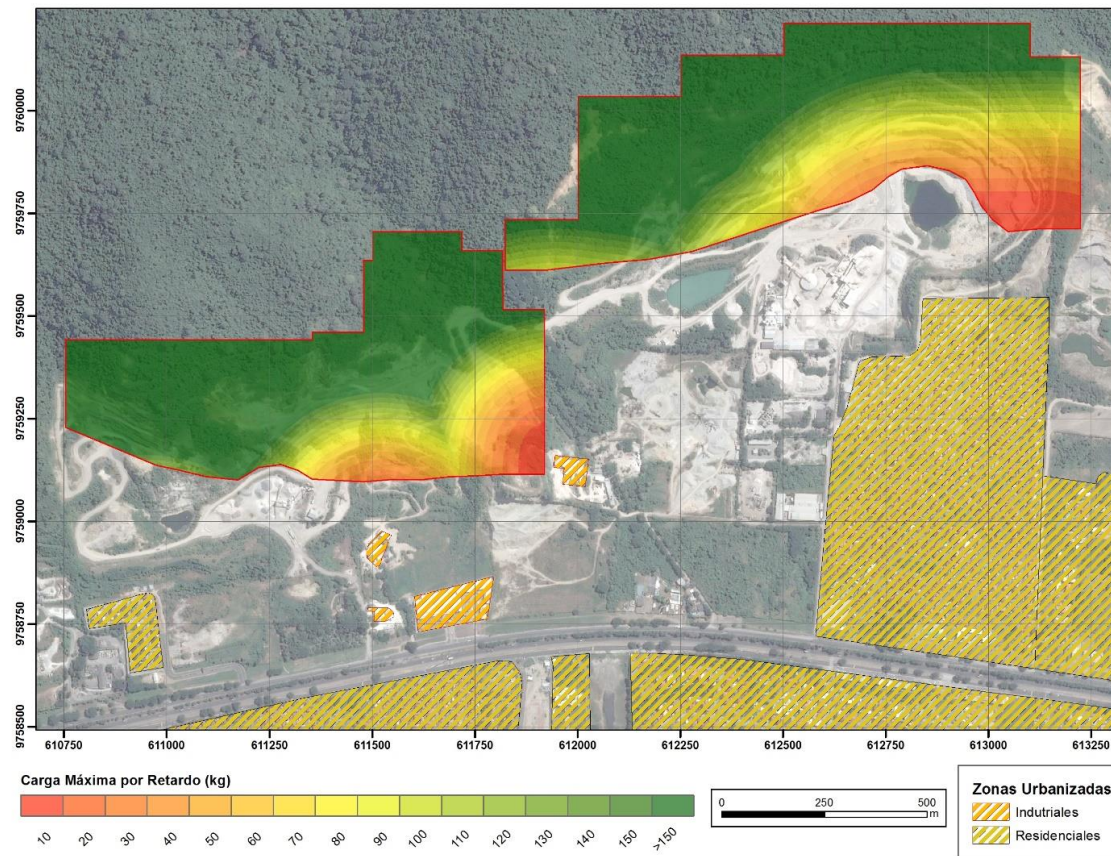
Para la construcción del mapa temático se seleccionó un límite de niveles de vibraciones en 5 mm/s, considerando la respuesta humana, para evitar

generar perturbaciones significativas en los residentes cercanos debido a la continua exposición a las vibraciones. La **Figura 5.4** muestra la distribución de la carga explosiva sobre los sectores operativos.

El uso de mapas temáticos como herramientas de control facilita la mitigación de los impactos negativos de las operaciones mineras. En este caso la zonificación de la carga explosiva máxima en base a un límite de vibraciones, considerando la relación espacial entre los sectores de explotación y las zonas urbanizadas, proporciona un medio eficiente para la planificación de futuras voladuras.



**Figura 5. 3:** Distancia desde los frentes de explotación hasta las zonas urbanizadas.



**Figura 5. 4:** Zonificación de carga máxima por retardo para evitar niveles de vibraciones por encima de 5 mm/s.

La explotación minera realizada en la cantera de Calizas Huayco S.A. se maneja en base a parámetros operativos estándares con respecto a las operaciones de voladura. Se manejan bancos de 12 metros de altura, con una longitud de perforación total de 13 metros debido al metro de sobre perforación, con retacado de 3 metros y el uso casi exclusivo de ANFO como agente de voladura. La variable operativa que influye decisivamente en la carga detonada por retardo es el diámetro de perforación. La empresa maneja 5 diámetros de perforación para sus operaciones: 3", 3.5", 4", 4.5" y 5". Cada diámetro tiene una carga explosiva asociada a la detonación de un taladro de voladura. La zonificación de carga explosiva puede ser reclasificada en función de la carga asociada a un diámetro de perforación. De esta manera se puede generar un mapa de zonificación del diámetro de perforación sugerido para evitar un exceso de vibraciones por encima del límite de 5 mm/s. La carga explosiva de ANFO asociada a los diferentes diámetros de perforación en base a las condiciones de explotación se presenta en la **Tabla XV**.

**Tabla XVI.** Carga de ANFO asociada a los diferentes diámetros operativos en base a las condiciones de explotación de la cantera.

Diámetro (pulg.)	Diámetro (mm)	Carga de ANFO asociada (kg)
3	76.2	40
3.5	88.9	52
4	101.6	68
4.5	114.3	87
5	127	108

La zonificación por diámetros de perforación se presenta en la **Figura 5.5**. El mapa contiene una zona crítica, donde la carga explosiva sugerida es menor a la contenida en un taladro de 3" diámetro según las condiciones de explotación. En esta zona se recomienda tomar medidas preventivas para evitar la afectación a zonas aledañas.

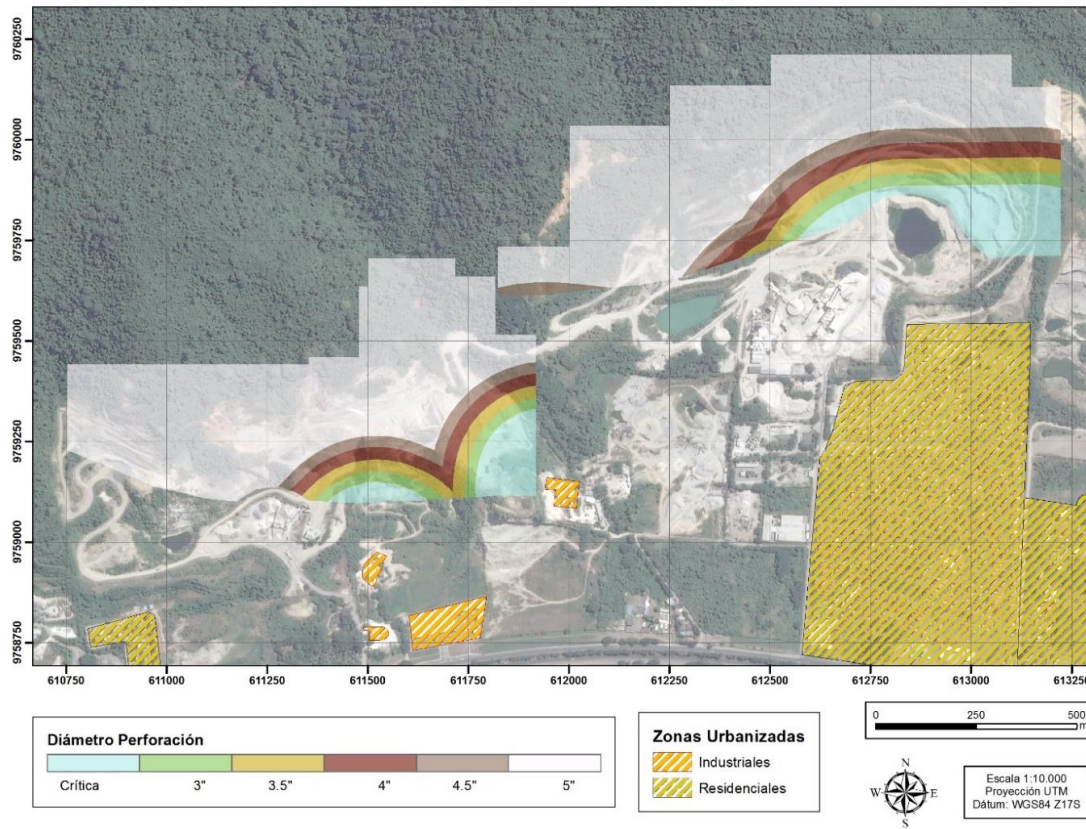


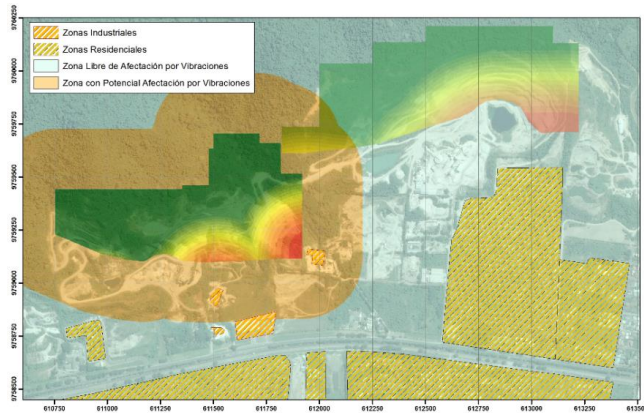
Figura 5. 5: Zonificación de los sectores de explotación en base al diámetro de perforación.

El modelo propuesto puede además servir de herramienta para plantear un límite seguro para la construcción de zonas residenciales. Nuevamente el uso de los Sistemas de Información Geográfico sirve de herramienta para el planteamiento de este límite.

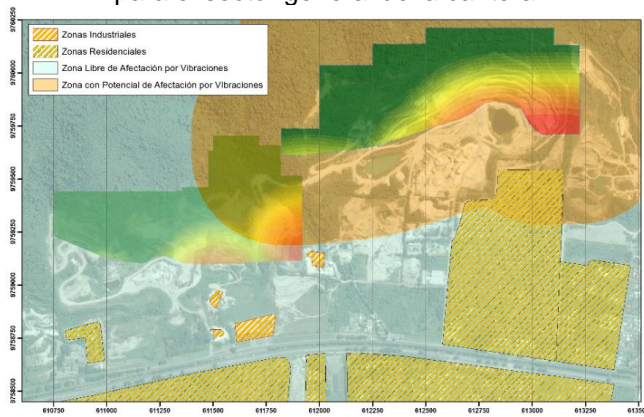
El primer paso es el cálculo de las distancias, procedimiento similar al presentado anteriormente, desde las zonas activas de explotación hacia el resto del área de estudio. Sobre este modelo de distancias, diferente para el sector de Huayco y para el sector general de la cantera debido a los modelos independientes que se tienen, se puede calcular el nivel de vibraciones a partir de las condiciones de explotación críticas es decir la detonación de un taladro de 5" de diámetro con una carga de ANFO de 10 metros.

La distribución de los niveles de vibraciones inducidos en el área circundante puede reclasificarse para mostrar la extensión de vibraciones hasta un límite de 5 mm/s (definido como perturbación significativa a seres humanos). En la **Figura 5.6** y la **Figura 5.7** se muestran estos límites para el sector general de la cantera y el sector de explotación Huayco.





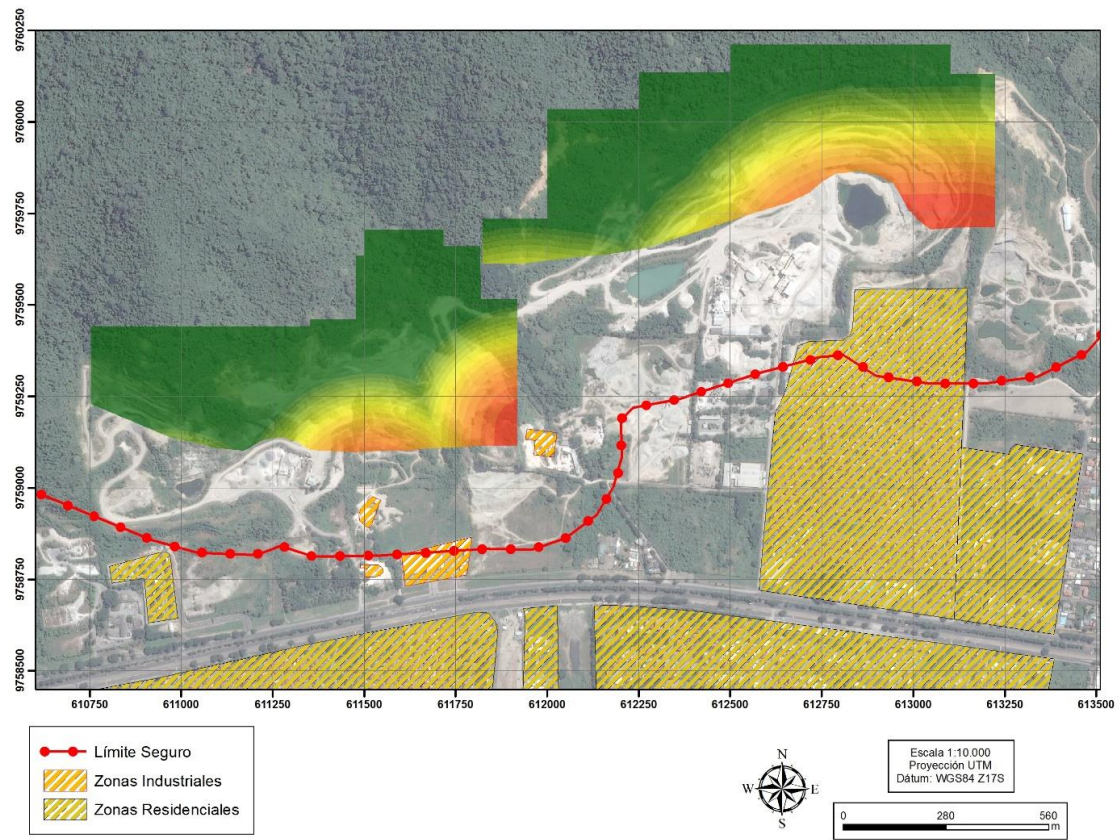
**Figura 5. 6:** Zona de influencia por afectación de vibraciones (5 mm/s) para el sector general de la cantera.



**Figura 5. 7:** Zona de influencia por afectación de vibraciones (5 mm/s) para el sector huayco de explotación.

A partir de esta zonificación se puede construir un límite seguro para la construcción de zonas residenciales en base al modelo generado que considera las características del sitio. Este límite se muestra en la **Figura 5.8.**

Se puede apreciar claramente como existe una zona crítica próxima al sector de explotación Huayco al lado Este de la cantera donde un tramo de la urbanización se encuentra a una proximidad potencialmente peligrosa del área de explotación.



**Figura 5. 8:** Delimitación de límite seguro para la construcción de urbanizaciones en base a la afectación por vibraciones.

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 6.1. Conclusiones

1. Se planteó una metodología clara para el procesamiento de datos experimentales de vibraciones de voladura y desarrollar herramientas que permitan mitigar y llevar un control sobre el impacto de las vibraciones inducidas por la explotación minera.
2. Se identificaron dos tendencias sobre el comportamiento de atenuación de ondas sísmicas en el registro histórico de vibraciones dentro del área de estudio. Un comportamiento diferente para el sector de explotación Huayco al Este de la cantera y otro para el sector oeste o general de la cantera.
3. Se determinaron dos modelos matemáticas correspondientes a las zonas identificadas en el área de estudio. Estos modelos presentan una correlación de 0.7 a 0.74, es decir explican más del 70% de la variabilidad de los datos y son representativos del comportamiento de las ondas vibratorias en el medio.
4. Se analizó la influencia del grado de fracturamiento del banco sobre la atenuación de las ondas sísmicas. Se plantearon modelos que integren los parámetros del GSI y frecuencia de discontinuidades por

metro consiguiendo una disminución en los errores de la predicción de hasta el 50% en base a 7 registros posteriores llevados a cabo.

5. Se desarrollaron herramientas de control en forma de ábacos prácticos y mapas temáticos para la selección de la carga explosiva máxima por retardo sugerida para evitar exceder un límite de vibraciones.

**Comentario [W6]:** Las conclusiones y las recomendaciones deben ir numeradas, no con viñeta y deben conservar el mismo formato que el cuerpo del trabajo final

## **6.2. Recomendaciones**

1. Considerar presentar el estudio como una metodología para la zonificación de áreas favorables para la construcción de urbanizaciones en zonas contiguas a explotaciones mineras.
2. En caso de que los parámetros operativos difieran significativamente de los empleados en los registros utilizados para la elaboración del modelo, actualizarlo.
3. Llevar un control operativo cuidadoso en cuanto a los tiempos de retardo en la voladura, para evitar que más de dos perforaciones detonen en un mismo instante de tiempo.

## **7.BIBLIOGRAFÍA**

- Afeni, T. B., & Osasan, S. K. (2009). Assessment of noise and ground vibration induced during blasting operations in an open pit mine - A case study on Ewekoro limestone quarry, Nigeria. *Mining Science and Technology*, 19(4), 420–424. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60078-8](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60078-8)
- AITEMIN. (1993). *Une 22-381-93*. España.
- Ak, H., Iphar, M., Yavuz, M., & Konuk, A. (2009). Evaluation of ground vibration effect of blasting operations in a magnesite mine. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(4), 669–676. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.07.003>
- Ak, H., & Konuk, A. (2008). The effect of discontinuity frequency on ground vibrations produced from bench blasting: A case study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(9), 686–694. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.11.006>
- Ambraseys, N., & Hendron, A. (1968). Dynamic Behaviour of Rock Masses. In *Rock Mechanics in Engineering Practice* (pp. 203–227). London: John Wiley and Sons.
- Bilgin, A., Esen, S., & Kilic, M. (1998). *The investigation to eliminate the environmental problems caused by blasting in Can open pit lignite mine facility*. Ankara, Turkey.
- Building and Civil Engineering Standards Committee. (1999). *DIN 4150: Structural Vibration. Part 3: Effects of vibration on structures*. Germany.
- Bureau of Indian Standards. (1973). *Criteria for Safety and Design of Structures Subject to Underground Blasts*. New Delhi.
- Burger, R., Jones, C., & Sheenan, A. (2006). *Introduction to Applied Geophysics* (First Edit). W.W. Norton & Company.
- CCSG Associates. (2016). *Buffer Zone Considerations for Mining Development in Proximity to Human Populations*. Ottawa, Ontario.
- Chehreghani, S., & Eskandarzadeh, M. (1995). Investigating the effect of explosive type on ground vibration in Sarcheshmeh copper mine Abstract :, (November), 2–7.
- Chen, G., & Huang, S. L. (2001). Analysis of ground vibrations caused by open pit production blasts - A case study. *Fragblast*, 5(1–2), 91–107. <https://doi.org/10.1076/frag.5.1.91.3316>
- Devine, J. . (1966). *Avoiding Damage to Residences form Blasiting*



- Vibrations. *Highway Research Record*, (135), 35–42.
- Dowding, C. (1985). *Blast Vibration Monitoring and Control*. (N. University, Ed.) (First Ed.). Prentice Hall International Series in Civil Engineering.
- Duvall, W., & Fogelson, D. (1962). *Review of Criteria for Estimating Damage to Residences from Blasting Vibrations*. Pittsburgh, PA.
- ENAEX. (2005). *Manual de Tronadura*. Santiago, Chile: ENAEX S.A.
- Gauch Jr., H. G., Hwang, J. T. G., & Fick, G. W. (2003). Model evaluation by comparison of model-based prediction and measured values. *Agron. J.*, 95(6), 1442–1446.
- Ghosh, A., & Daemen, J. (1983). A simple new blast vibration predictor (based on wave propagation laws). *The 24th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, (June), 151–162.
- Giraudi, A. (2013). A review of the benefit of electronic detonators. *Mineracao Mining, Escola de Minas de Ouro Preto*, 66(3), 375–382.
- Hao, H., Wu, Y., Ma, G., & Zhou, Y. (2001). Characteristics of surface ground motions induced by blasts in jointed rock mass. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21(2), 85–98. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00104-4](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00104-4)
- Holcim, & Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. (2009). *Guía de gestión ambiental para minería no metálica*. San José, Costa Rica.
- Hossaini, S. M. (2006). Ground Vibrations Arising from Using Two Types of Explosives - A Comparative Study. In *Coal 2006: Coal Operator's Conference* (pp. 349–364). University of Wollongong & The Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Hudaverdi, T. (2012). Application of multivariate analysis for prediction of blast-induced ground vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43, 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.08.002>
- Hunter, C., Fedak, K., & Todoeschuck, J. (1993). Development of low density explosives with wall control applications. In *19th Annual Conference of Explosives and Blasting Techniques* (pp. 549–555). California, USA: International Society of Explosive Engineers ISEE.
- Hustrulid, W. (2005). *Blasting Principles for Open Pit Mining* (2nd Ed). CRC Press.
- Instantel. (2013). *Minimate Plus Operator Manual*. Ontario, Canada.

- Johansson, C. H., & Persson, P. A. (1970). *Detonics of High Explosives* (First Edit). Academic Press Inc.
- Johnston, D., & Toksoz, D. (1981). Seismic Wave Attenuation. *Geophysics Reprint Series, Society of Exploration Geophysicists*, 2, 1–15.
- Konya, C., & Walter, E. (1991). *Rock Blasting and Overbreak Control*. Virginia, USA.
- Korose, C., Louchios, A., & Elrick, S. (2009). *The proximity of Underground Mines to Urban and Developed Lands in Illinois*.
- Kuzu, C. (2008). The importance of site-specific characters in prediction models for blast-induced ground vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(5), 405–414. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.06.013>
- Langefors, U., & Kihlstrom, B. (1963). *The modern technique of rock blasting*. New York: Wiley.
- Marinos, V., Marinos, P., & Hoek, E. (2005). The geological strength index: Applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(1), 55–65. <https://doi.org/10.1007/s10064-004-0270-5>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015). *TULSMA - Libro VI - Anexo V: Límites Permisibles de Niveles de Ruido Ambiente para Fuentes Fijas y Fuentes Móviles y para Vibraciones*. Ecuador.
- Nicholls, H., Johnson, C., & Duvall, W. (1971). *Blasting Vibrations and their effects on structures*. Pittsburgh, PA.
- NN.AA. (2012, April 29). Molestias por las canteras. *Diario El Universo*, p. 1. Guayaquil.
- Núñez del Arco, E. (2003). *Geología del Ecuador*. Guayaquil: ESPOL.
- Ortiz, H. (2014, May 18). Guayaquil, una ciudad que solo puede expandirse hacia vía a la Costa. *Andes. Agencia Pública de Noticias Del Ecuador Y Sudamérica*, p. 1. Guayaquil. Retrieved from <http://www.andes.info.ec/es/noticias/guayaquil-ciudad-solo-puede-expandirse-hacia-costa.html>
- Ozer, U., Kahriman, A., Aksoy, M., Adiguzel, D., & Karadogan, A. (2008). The analysis of ground vibrations induced by bench blasting at Akyol quarry and practical blasting charts. *Environmental Geology*, 54(4), 737–743. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0859-7>
- Piñeiro, G., Perelman, S., Guerschman, J. P., & Paruelo, J. M. (2008). How to

- evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecological Modelling*, 216(3–4), 316–322. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.05.006>
- Prange, B. (1977). Parameters Affecting Damping Properties. *Dynamic Methods in Soil and Rock Mechanics DMSR*, 1, 61–78.
- Priest, S. D., & Hudson, J. A. (1976). Discontinuity Spacings in Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 13(1), 135–148.
- Reyes, & Michaud, F. (2012). *Mapa Geológico de la Margen Costera Ecuatoriana*.
- Richards, A., & Moore, A. (2003). *Blast Vibration Course: Measurement - Assessment - Control*.
- Sambuelli, L. (2009). Theoretical derivation of a peak particle velocity-distance law for the prediction of vibrations from blasting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42(3), 547–556. <https://doi.org/10.1007/s00603-008-0014-0>
- Silva-Castro, J. (2012). *Blast Vibration Modelling Using Improved Signature Hole Technique for Bench Blast*. University of Kentucky.
- Singh, P. K., & Roy, M. P. (2010). Damage to surface structures due to blast vibration. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(6), 949–961. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.06.010>
- Siskind, D., Stagg, M., Kopp, J., & Dowding, C. (1980). *Structure Response and Damage Produced by Ground Vibrations from Surface Mining - USBM RI 8507*. Pittsburgh, PA.
- Taylor, R. (1990). Interpretation of the Correlation Coefficient: A Basic Review. *Journal of Diagnostic Medical Sonography*, 6, 35–39. <https://doi.org/10.1177/875647939000600106>
- Unión Española de Explosivos UEE. (2000). Control de vibraciones producidas por voladuras. *Jornadas Técnicas*.
- Velasco, J. (2016). *Estudio Ambiental de los problemas Socio Ambientales que se generan por los asentamientos de las urbanizaciones a lo largo de la Vía a la Costa desde Puerto Azul hasta Puerto Hondo. Propuesta de Soluciones*. Universidad Católica Santiago de Guayaquil. Retrieved from <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/5466/3/T-UCSG-PRE-ING-IC-137.pdf>

- Wu, Y. K., Hao, H., Zhou, Y. X., & Chong, K. (1998). Propagation characteristics of blast-induced shock waves in a jointed rock mass. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17(6), 407–412. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(98\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(98)00030-X)
- Yang, R. L., Rocque, P., Katsabanis, P., & Bawden, W. F. (1994). Measurement and analysis of near-field blast vibration and damage. *Geotechnical and Geological Engineering*, 12(3), 169–182. <https://doi.org/10.1007/BF00426985>
- Yilmaz, O. (2016). The comparison of most widely used ground vibration predictor equations and suggestions for the new attenuation formulas. *Environmental Earth Sciences*, 75(3), 269. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5011-5>
- Zhang, Z.-X. (2016). *Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications* (First Edit). Elsevier Ltd.
- Zhunio Pacheco, J. L. (2014). *ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS DE CAÑONEO EN LOS POZOS DE LOS CAMPOS PINDO Y PALANDA YUCA SUR. EVALUACIÓN DE RECAÑONEO Y AMPLIACIÓN*. Escuela Politécnica Nacional.
- Zurita, G. (2010). *Probabilidad y Estadística: Fundamentos y Aplicaciones* (Primera Ed). Guayaquil, Ecuador: Instituto de Ciencias Matemáticas ICM - ESPOL.

## **8. ANEXOS**

### ANEXO I. Base de datos de registro histórico

No.	Área	Fecha	Coord. Voladura		Coord. Monitoreo		Distancia al punto de monitoreo (m)	Carga Máxima por retardo (kg)	Suma Vectorial Pico (mm/s)
			X	Y	X	Y			
1	Decal	29/04/2016	611652	9759710	611503	9759365	376	57.89	2.82
2	Decal	13/07/2015	611710	9759676	611616	9759475	222	21.15	1.58
3	Decal	6/10/2015	611642	9759695	611514	9759374	346	57.93	2.64
4	Explosa	1/6/2016	611762	9759550	611720	9759186	366	37.14	1.95
5	Explosa	28/03/2016	611949	9759628	612168	9759873	329	84.78	2.25
6	Explosa	15/03/2016	611962	9759658	612168	9759873	298	83.70	3.87
7	Explosa	28/10/2015	611868	9759663	611618	9759445	332	78.50	5.02
8	Explosa	7/10/2015	611778	9759541	611687	9759213	338	25.00	1.8
9	Explosa	21/08/2015	611773	9759531	611679	9759243	303	75.80	3.34
10	Fraga	15/09/2016	611942	9759676	612175	9759887	314	29.50	1.82
11	Fraga	8/9/2016	611895	9759751	612167	9759872	298	40.18	2.65
12	Fraga	2/9/2016	611867	9759751	612167	9759872	323	35.63	1.67
13	Fraga	25/08/2016	611841	9759803	612156	9759869	322	40.48	1.64
14	Fraga	22/08/2016	611915	9759677	612156	9759869	306	36.11	1.81
15	Fraga	18/08/2016	611878	9759731	612156	9759869	310	47.92	2.52
16	Fraga	10/8/2016	611885	9759741	612046	9759583	226	56.25	5.58
17	Fraga	4/8/2016	611876	9759721	612075	9759605	230	52.97	4.73
18	Fraga	19/07/2016	611903	9759702	612156	9759869	303	39.20	3.01
19	Fraga	11/7/2016	611913	9759702	612021	9759519	213	33.33	1.82
20	Fraga	6/7/2016	611884	9759692	612021	9759519	221	69.45	6.11

21	Fraga	22/07/2016	611861	9759698	612156	9759869	341	37.50	1.28
22	Fraga	19/05/2016	612923	9759742	612178	9759881	290	54.17	3.08
23	Fraga	27/04/2016	611861	9759720	612056	9759619	219	42.86	4.94
24	Fraga	4/3/2016	611852	9759735	612169	9759873	345	51.25	2.07
25	Fraga	2/3/2016	611831	9759746	611861	9759746	332	17.79	0.925
26	Fraga	22/02/2016	611829	9759729	611638	9759524	280	57.89	2.02
27	Fraga	25/01/2016	611745	9759748	611549	9759583	256	14.35	1.45
28	Fraga	15/01/2016	611960	9759756	612168	9759873	239	10.00	0.889
29	Fraga	15/12/2015	611839	9759711	611627	9759506	295	26.17	2.37
30	Fraga	4/12/2015	611802	9759740	611628	9759501	296	78.50	4.96
31	Fraga	26/11/2015	611825	9759699	612172	9759877	390	36.74	1.17
32	Fraga	13/11/2015	611834	9759756	612176	9759885	365	50.18	1.69
33	Fraga	11/11/2015	611933	9759708	612176	9759885	301	9.72	0.622
34	Fraga	4/11/2015	611863	9759763	611641	9759523	327	53.37	2.87
35	Fraga	21/07/2015	611829	9759814	611627	9759507	355	12.50	0.539
36	Fraga	8/7/2015	611792	9759744	611627	9759507	289	75.00	5.59
37	Fraga	18/08/2015	611832	9759791	611633	9759529	329	35.00	1.09
38	Fraga	14/08/2015	611931	9759706	612167	9759880	293	13.16	0.751
39	Fraga	17/06/2015	611799	9759701	611633	9759529	247	21.61	3
40	Fraga	5/6/2015	611841	9759766	611633	9759529	315	44.92	3.32
41	Fraga	22/05/2015	611826	9759777	611633	9759529	314	27.78	1.84
42	Fraga	5/5/2015	611754	9759715	611633	9759529	222	87.78	10.4
43	Huayco	7/6/2016	612408	9760135	612712	9760040	316	14.58	0.539
44	Huayco	3/5/2016	612922	9760242	613040	9759935	328	113.83	7.22

45	Huayco	22/04/2016	612919	9760242	613030	9759929	332	56.25	5.18
46	Huayco	15/04/2016	612931	9760242	613030	9759929	326	102.94	5.48
47	Huayco	7/4/2016	612937	9760240	613030	9759929	325	56.25	6.6
48	Huayco	4/4/2016	612853	9760230	613030	9759929	349	38.81	3.96
49	Huayco	31/03/2016	612944	9760242	613026	9759920	332	51.56	5.31
50	Huayco	22/03/2016	612861	9760231	613026	9759920	352	52.97	3.97
51	Huayco	11/3/2016	612950	9760237	613027	9759924	322	77.37	8.52
52	Huayco	7/3/2016	612861	9760255	613026	9759933	362	52.97	3.81
53	Huayco	25/11/2015	612947	9760270	613032	9759916	364	55.46	6.56
54	Huayco	28/10/2015	612888	9760241	613025	9759891	376	38.56	2.92
55	Huayco	24/06/2015	612990	9760322	613056	9760043	287	39.36	4.79
56	Huayco	26/06/2015	613913	9760239	613056	9760043	243	101.91	12.1
57	Huayco	3/7/2015	612995	9760146	613025	9759918	230	41.17	9.45
58	Huayco	13/07/2015	612813	9760200	613059	9760043	292	47.78	5.19
59	Huayco	17/07/2015	612955	9760241	613059	9760043	224	45.77	7.63
60	Huayco	11/6/2015	612913	9760231	613056	9760047	233	33.55	7.6
61	Huayco	9/6/2015	613062	9760338	613056	9760047	291	43.29	5.36
62	Huayco	25/05/2015	613236	9760208	613056	9760047	242	26.41	2.79
63	Huayco	21/05/2015	612815	9760246	613056	9760047	313	29.98	2.29
64	Huayco	18/05/2015	612899	9760308	613056	9760047	307	36.07	2.34
65	Huayco	6/5/2015	612800	9760266	613056	9760047	337	45.87	3.63
66	Huayco	29/04/2015	612816	9760266	613056	9760047	325	51.28	4.39
67	Huayco	31/03/2015	612714	9760391	613056	9760049	324	32.07	3.69
68	Huayco	18/03/2015	612827	9760275	613025	9758918	408	32.32	1.87




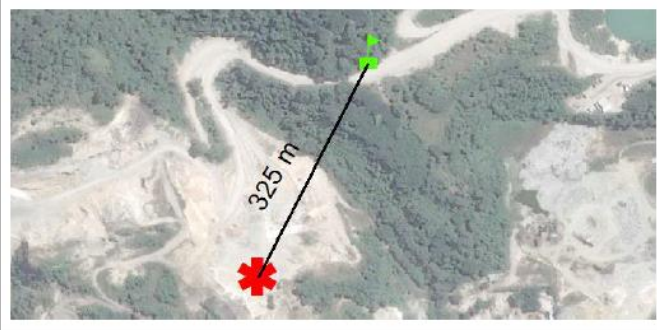
69	Huayco	16/03/2015	612955	9760253	613056	9760049	228	60.32	10.4
70	Huayco	5/3/2015	612837	9760276	613056	9760049	315	7.35	0.741
71	Huayco	9/2/2015	613244	9760233	613056	9760047	264	48.05	4.17
72	Huayco	3/2/2015	613320	9760125	613050	9760046	282	89.32	6.05
73	Huayco	27/01/2015	613239	9760245	613056	9760047	269	47.30	2.47
74	Huayco	20/01/2015	613295	9760197	613056	9760047	281	44.12	3.29
75	Lérida	30/03/2016	611998	9759709	612168	9759873	236	21.37	1.7
76	Lérida	25/02/2016	611973	9759640	612161	9759865	293	37.50	1.65
77	Lérida	15/02/2016	611979	9759657	612173	9759882	297	78.50	3.27
78	Lérida	4/2/2016	611990	9759606	612168	9759873	321	78.50	2.57
79	Lérida	20/01/2016	611990	9759662	612168	9759873	276	62.02	2.93
80	Lérida	15/01/2016	612055	9759680	612168	9759873	223	12.04	1.16
81	Lérida	13/01/2016	612011	9759630	612168	9759873	289	25.58	1.93
82	Lérida	7/1/2016	612006	9759653	612168	9759873	273	78.50	3.63
83	Lérida	28/01/2016	611987	9759635	612168	9759873	299	38.81	2.41
84	Lérida	29/02/2016	611972	9759618	612168	9759873	311	57.35	2.04
85	Lérida	24/06/2016	612057	9759645	612156	9759869	245	41.91	2.09
86	Lérida	16/06/2016	612051	9759649	612156	9759869	244	44.74	3.43
87	Lérida	10/6/2016	612045	9759707	612198	9759526	237	96.91	5.61
88	Lérida	31/05/2016	612050	9759664	612168	9759873	240	49.38	3.99
89	Lérida	23/05/2016	612049	9759672	612168	9759873	234	38.79	2.17
90	Lérida	17/05/2016	612064	9759686	612168	9759873	214	34.38	2.67
91	Lérida	12/5/2016	612032	9759581	612168	9759873	322	45.94	1.57
92	Lérida	9/5/2016	612029	9759594	612168	9759873	312	37.21	1.57

93	Lérida	5/5/2016	612064	9759699	612177	9759883	216	60.83	4.26
94	Lérida	29/04/2016	612042	9759697	612167	9759877	219	79.84	5.83
95	Lérida	8/4/2016	612023	9759723	612166	9759872	207	61.05	5.26
96	Lérida	28/06/2016	612041	9759556	612372	9759548	331	74.83	3.9
97	Lérida	21/09/2016	611995	9759624	612162	9759870	297	37.15	1.98
98	Lérida	8/9/2016	612003	9759642	612167	9759872	282	57.35	2.29
99	Lérida	2/9/2016	612064	9759659	612167	9759872	236	23.86	1.53
100	Lérida	29/08/2016	612044	9759601	612156	9759869	290	30.26	1.63
101	Lérida	25/08/2016	612014	9759611	612156	9759869	295	26.32	1.28
102	Lérida	16/08/2016	612061	9759669	612156	9759869	221	20.31	1.75
103	Lérida	11/8/2016	612020	9759617	612156	9759869	286	28.75	1.4
104	Lérida	29/07/2016	612045	9759608	612179	9759879	302	47.92	2.51
105	Lérida	22/07/2016	612017	9759673	612156	9758690	240	31.62	1.81
106	Lérida	15/07/2016	612050	9759612	612156	9758690	278	47.92	2.73
107	Lérida	12/7/2016	612986	9759579	612156	9758690	349	31.58	1.54
108	Lérida	11/7/2016	612063	9759711	612156	9758690	183	32.39	4.21
109	Lérida	8/7/2016	612050	9759623	612156	9758690	267	36.41	1.77
110	Lérida	1/6/2016	612055	9759633	612156	9758690	257	44.12	2.17
111	Lérida	6/11/2015	612044	9759635	612177	9759885	283	77.22	2.47
112	Lérida	28/10/2015	612036	9759638	612180	9759886	295	37.50	1.93
113	Lérida	26/10/2015	612043	9759655	612179	9759888	270	37.50	1.92
114	Lérida	19/10/2015	612083	9759660	612179	9759888	267	70.37	2.26
115	Lérida	6/10/2015	612024	9759666	612179	9759888	271	84.12	3.02
116	Lérida	28/09/2015	612012	9759641	612179	9759888	298	87.12	3.22

117	Lérida	18/09/2015	611975	9759733	612179	9759888	255	85.25	4.56
118	Lérida	11/9/2015	612982	9759627	612179	9759888	326	83.04	2.93
119	Lérida	29/06/2015	611987	9759720	612172	9759877	243	101.57	5.78
120	Lérida	3/7/2015	611984	9759662	612172	9759877	285	44.83	3.64
121	Lérida	14/07/2015	611998	9759660	612177	9759885	288	53.57	3.98
122	Lérida	21/07/2015	611968	9759731	612177	9759885	260	52.08	5.21
123	Lérida	21/07/2015	612000	9759661	612177	9759885	285	45.23	3.69
124	Lérida	27/07/2015	611985	9759659	612182	9759886	301	40.15	2.32
125	Lérida	17/11/2015	612029	9759619	612172	9759877	295	78.50	1.99
126	Lérida	16/11/2015	612016	9759652	612172	9759877	273	84.12	4.55
127	Lérida	7/8/2015	612028	9759653	612167	9759880	266	47.26	4.33
128	Lérida	20/08/2015	611992	9759708	612167	9759880	245	50.00	2.55
129	Lérida	25/08/2015	611995	9759694	612167	9759880	253	15.00	1.57
130	Lérida	28/08/2015	612021	9759724	612167	9759880	213	43.27	6.45
131	Lérida	2/9/2015	612023	9759719	612167	9759880	216	64.12	3.9
132	Lérida	15/06/2015	611968	9759715	612172	9759877	260	65.81	3.72
133	Lérida	12/5/2015	611965	9759704	612172	9759877	270	41.67	2.47
134	Lérida	21/04/2015	612002	9759714	612168	9759884	238	44.31	5.68
135	Lérida	26/02/2015	611979	9759691	612165	9759876	262	25.40	3.9
136	Lérida	23/02/2015	611983	9759712	612200	9759602	243	37.50	4.73
137	Lérida	13/02/2015	612022	9759670	612165	9759884	257	25.58	1.28
138	Lérida	11/2/2015	612026	9759685	612165	9759884	243	55.34	2.36
139	Precón	27/09/2016	611460	9759645	611512	9759362	288	47.22	4.05
140	Precón	5/9/2016	611156	9759546	611085	9759294	262	43.75	2.49

141	Precón	22/07/2016	611156	9759557	611085	9759294	273	69.45	3.67
142	Precón	15/07/2016	611480	9759645	611512	9759362	284	48.24	2.9
143	Precón	22/06/2016	611489	9759656	611766	9759706	281	42.21	3.61
144	Precón	14/06/2016	611522	9759655	611513	9759375	280	50.12	4.34
145	Precón	8/6/2016	611212	9759561	611085	9759294	296	87.50	5.12
146	Precón	13/05/2016	611155	9759587	611055	9759302	302	50.98	2.83
147	Precón	18/04/2016	611146	9759594	611054	9759308	300	24.17	1.73
148	Precón	15/03/2016	611130	9759583	611085	9759294	292	82.69	2.68
149	Precón	11/3/2016	611509	9759673	611503	9759368	305	30.53	2.04
150	Precón	17/02/2016	611123	9759603	611085	9759294	311	75.00	2.76
151	Precón	10/2/2016	611483	9759673	611513	9759375	300	71.42	5.48
152	Precón	11/1/2016	611467	9759679	611516	9759376	307	78.50	5.48
153	Precón	8/1/2016	611187	9759572	611085	9759204	296	38.81	1.89
154	Precón	25/11/2015	611175	9759576	611085	9759294	296	80.74	4.34
155	Precón	17/11/2015	611168	9759582	611085	9759294	300	66.59	4.83
156	Precón	17/07/2015	611432	9759638	611512	9759362	287	25.00	2.09
157	Precón	22/07/2015	611134	9759621	611072	9759305	321	21.95	1.82
158	Precón	30/07/2015	611514	9759704	611512	9759362	342	33.33	2.01
159	Precón	26/10/2015	611435	9759647	611514	9759374	284	41.38	3.16
160	Precón	13/10/2015	611348	9759661	611514	9759374	332	55.76	3.65
161	Precón	4/9/2015	611487	9759711	611511	9759358	354	30.00	1.94
162	Precón	20/05/2015	611422	9759673	611511	9759358	327	84.91	3.15
163	Precón	27/04/2015	611497	9759676	611510	9759357	318	8.50	0.566

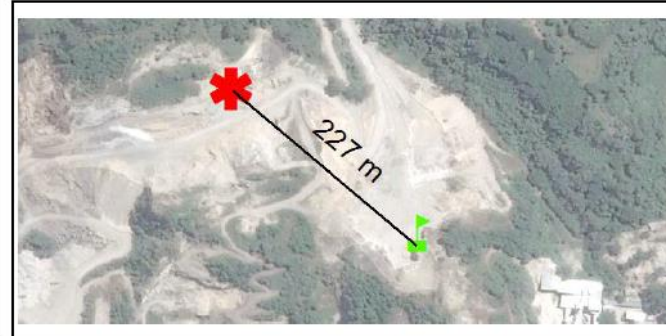
**ANEXO II. Fichas de registro in-situ**

VOLADURA CLE - 041 - 2016			
	<b>Fecha:</b>	6 - Diciembre - 2016	<b>Coord. X:</b> 612031
	<b>Sector:</b>	Lérida	<b>Coord. Y:</b> 9759578
	<b>Roca:</b>	Caliza	
			
Parámetros de Fracturamiento		Parámetros de Monitoreo	
<b>GSI:</b>	40	<b>Coord. X:</b>	612172
<b>Juntas por metro:</b>	10	<b>Coord. Y:</b>	9759871
Consumo Explosivo		<b>Distancia:</b>	325 m
<b>ANFO:</b>	925 kg	<b>PPV</b>	(mm/s)
<b>Pentolita:</b>	18 u	<b>ZC Freq</b>	(Hz)
<b>Emulsen:</b>	25 kg	Trans	1.14
<b>Fanel 500/25 15m:</b>	18 u	Vert	0.889
<b>Carga por retardo:</b>	38 kg	Long	1.65
		<b>PVS (mm/s)</b>	1.96

**VOLADURA CFR - 036 - 2016**



<b>Fecha:</b>	9 - Diciembre - 2016	<b>Coord. X:</b>	611836
<b>Sector:</b>	Fraga	<b>Coord. Y:</b>	9759743
<b>Roca:</b>	Caliza		



**Parámetros de Fracturamiento**

<b>GSI:</b>	45	<b>Juntas por metro:</b>	9
-------------	----	--------------------------	---

**Consumo Explosivo**

<b>ANFO:</b>	1925 kg	<b>Pentolita:</b>	46 u
<b>Emulsen:</b>	-	<b>Fanel 500/25 15m:</b>	9 u
<b>Carga por retardo:</b>	33.2 kg		

**Parámetros de Monitoreo**

<b>Coord. X:</b>	612054	<b>Coord. Y:</b>	9759570
------------------	--------	------------------	---------

<b>Distancia:</b>	227 m
-------------------	-------

<b>PPV</b>	(mm/s)	<b>ZC Freq</b>	(Hz)
Trans	2.67		20
Vert	3.05		34
Long	3.17		38

<b>PVS (mm/s)</b>	3.92
-------------------	------

**VOLADURA CLE - 042 - 2016**



<b>Fecha:</b>	12-Diciembre-2016	<b>Coord. X:</b>	612070
<b>Sector:</b>	Lérida	<b>Coord. Y:</b>	9759619
<b>Roca:</b>	Caliza		



**Parámetros de Fracturamiento**

<b>GSI:</b>	30	<b>Juntas por metro:</b>	16
-------------	----	--------------------------	----

**Consumo Explosivo**

<b>ANFO:</b>	2100 kg	<b>Pentolita:</b>	31 u
<b>Emulsen:</b>	-	<b>Fanel 500/25 15m:</b>	26 u
<b>Carga por retardo:</b>	70 kg		

**Parámetros de Monitoreo**

<b>Coord. X:</b>	612172	<b>Coord. Y:</b>	9759871
------------------	--------	------------------	---------

<b>Distancia:</b>	271
-------------------	-----

<b>PPV</b>	(mm/s)	<b>ZC Freq</b>	(Hz)
Trans	1.27		32
Vert	1.27		15.8
Long	1.78		7.5

<b>PVS (mm/s)</b>	2.05
-------------------	------

**VOLADURA CPC - LUT - 026 - 2016**



<b>Fecha:</b>	20-Diciembre-2016	<b>Coord. X:</b>	611180
<b>Sector:</b>	Precón	<b>Coord. Y:</b>	9759579
<b>Roca:</b>	Lutita		



**Parámetros de Fracturamiento**

<b>GSI:</b>	55	<b>Juntas por metro:</b>	6
-------------	----	--------------------------	---

**Consumo Explosivo**

<b>ANFO:</b>	625	<b>Pentolita:</b>	16 u
<b>Emulsen:</b>	-	<b>Fanel 500/25 20m:</b>	8 u
<b>Carga por retardo:</b>	39 kg		

**Parámetros de Monitoreo**

<b>Coord. X:</b>	611085	<b>Coord. Y:</b>	9759294
------------------	--------	------------------	---------

<b>Distancia:</b>	300 m
-------------------	-------

<b>PPV</b>	(mm/s)	<b>ZC Freq</b>	(Hz)
Trans	2.41		21
Vert	1.65		28
Long	2.67		17.7

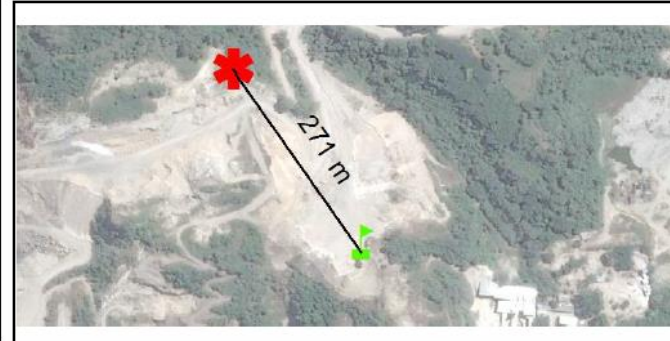
<b>PVS (mm/s)</b>	3.15
-------------------	------



**VOLADURA CSF - 039 - 2016**



<b>Fecha:</b>	21-Diciembre-2016	<b>Coord. X:</b>	611895
<b>Sector:</b>	Fraga	<b>Coord. Y:</b>	9759790
<b>Roca:</b>	Caliza		



**Parámetros de Fracturamiento**

<b>GSI:</b>	40	<b>Juntas por metro:</b>	11
-------------	----	--------------------------	----

**Consumo Explosivo**

<b>ANFO:</b>	1100 kg	<b>Pentolita:</b>	31 u
<b>Emulsen:</b>	-	<b>Fanel 500/25 20m:</b>	18 u
<b>Carga por retardo:</b>	66 kg		

**Parámetros de Monitoreo**

<b>Coord. X:</b>	612054	<b>Coord. Y:</b>	9759570
------------------	--------	------------------	---------

<b>Distancia:</b>	271 m
-------------------	-------

<b>PPV</b>	(mm/s)	<b>ZC Freq</b>	(Hz)
Trans	2.03		28
Vert	1.52		54
Long	2.92		51

<b>PVS (mm/s)</b>	3.31
-------------------	------

**VOLADURA CPR - 04 - 2017**



<b>Fecha:</b>	31-Enero-2016	<b>Coord. X:</b>	611186
<b>Sector:</b>	Precón	<b>Coord. Y:</b>	9759535
<b>Roca:</b>	Lutita		



**Parámetros de Fracturamiento**

<b>GSI:</b>	55	<b>Juntas por metro:</b>	7
-------------	----	--------------------------	---

**Consumo Explosivo**

<b>ANFO:</b>	300 kg	<b>Pentolita:</b>	66 u
<b>Emulnor:</b>	975 kg	<b>Fanel 500/25 15m:</b>	33 u
<b>Carga por retardo:</b>	45 kg		

**Parámetros de Monitoreo**

<b>Coord. X:</b>	611035	<b>Coord. Y:</b>	9759278
------------------	--------	------------------	---------

<b>Distancia:</b>	298 m
-------------------	-------

<b>PPV</b>	(mm/s)	<b>ZC Freq</b>	(Hz)
Trans	1.78		18.6
Vert	1.27		26
Long	1.78		19

<b>PVS (mm/s)</b>	1.89
-------------------	------

**VOLADURA CPR - 04a - 2017**



<b>Fecha:</b>	31-Enero-2016	<b>Coord. X:</b>	611186
<b>Sector:</b>	Precón	<b>Coord. Y:</b>	9759535
<b>Roca:</b>	Lutita		



**Parámetros de Fracturamiento**

<b>GSI:</b>	55	<b>Juntas por metro:</b>	7
-------------	----	--------------------------	---

**Consumo Explosivo**

<b>ANFO:</b>	300 kg	<b>Pentolita:</b>	66 u
<b>Emulnor:</b>	975 kg	<b>Fanel 500/25 15m:</b>	33 u
<b>Carga por retardo:</b>	45 kg		

**Parámetros de Monitoreo**

<b>Coord. X:</b>	611091	<b>Coord. Y:</b>	9759446
------------------	--------	------------------	---------

<b>Distancia:</b>	129 m
-------------------	-------

<b>PPV</b>	(mm/s)	<b>ZC Freq</b>	(Hz)
Trans	8.25		30
Vert	7.75		39
Long	9.78		29

<b>PVS (mm/s)</b>	11.2
-------------------	------