

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Optimización de modelos de atenuación vibracional para
la predicción de velocidades pico de partícula en la
Unidad Minera Chinalco**

Alex Angel Pariona Gutierrez

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero de Minas

Huancayo, 2025

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Faustino Anibal Gutierrez Dañobeitia
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 28 de junio de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

Optimización de Modelos de Atenuación Vibracional para la Predicción de Velocidades Pico de Partícula en la Unidad Minera Chinalco

Autores:

1. Alex Angel Pariona Gutierrez – EAP. Ingeniería de Minas

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 19 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI ☐ NO ☒
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas (**en caso de elegir "SI"**): SI ☐ NO ☒
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI ☐ NO ☒

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original
(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)

ÍNDICE

ÍNDICE	IV
RESUMEN	IX
ABSTRACT.....	IX
INTRODUCCIÓN	XI
CAPÍTULO I	1
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	1
1.1. Planteamiento y formulación del problema	1
1.2. Objetivos	2
a. Evaluar la precisión de los modelos de atenuación vibracional utilizados en la mina.	2
b. Ajustar los parámetros geomecánicos para mejorar la calibración de los modelos de predicción de vibraciones.	2
c. Seleccionar el modelo más adecuado basado en el coeficiente de determinación (R^2) y su capacidad predictiva.	2
1.3. Justificación e importancia	2
1.4. Delimitación del proyecto	4
1.5. Hipótesis y variables.....	5
CAPÍTULO II	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Antecedentes de la investigación	6
2.2. Generalidades de la unidad minera Chinalco	9
2.3. Bases teóricas.....	19
CAPÍTULO III	26
METODOLOGÍA	26
3.1. Métodos y alcances de la investigación 3.1.1. Método general.....	26
3.2. Población y muestra	26
3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	28
3.4. Técnicas utilizadas en la recolección de datos.....	28
3.5. Instrumentos utilizados en la recolección de datos.....	28
CAPÍTULO IV	30
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
4.1. Presentación de resultados	30
4.1.1. Zonas de propagación de vibración	36
4.1.2. Criterios de daño y ábacos de diseño	60

4.1.3. Frecuencias dominantes	64
4.1.4. Simulación de interacción tiempos de retardo	65
4.2. Contrastación de hipótesis	73
4.3. Discusión de resultados	74
CAPÍTULO V	78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
CAPÍTULO VI	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

ASESOR

Ing. Faustino Anibal Gutierrez Dañobeitia

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres y a mis familiares que me han ayudado a sentar las bases de mi existencia y me han enseñado a sobrellevar las dificultades para integrarme y aportar a la sociedad de manera competitiva.

AGRADECIMIENTO

Al finalizar esta presente investigación obtengo la satisfacción de haberla ejecutado, agradeciendo a todas las personas que hicieron posible el presente estudio.

A la Universidad Continental facultad de Ingeniería y a sus docentes por apoyar este trabajo.

RESUMEN

Las vibraciones producidas por la voladura en la minería a cielo abierto tienen el potencial de poner en peligro la seguridad operativa y la estabilidad geotécnica. Se ha determinado que la variabilidad de la masa rocosa y el diseño de las voladuras en la Unidad Minera Chinalco en los Andes peruanos hacen que los modelos empíricos de atenuación vibracional sean inadecuados para predecir la Velocidad Máxima de Partícula (VMP). Para aumentar la precisión de las estimaciones y mejorar el diseño de las voladuras, el presente estudio intenta refinar estos modelos calibrando ciertos parámetros geomecánicos de la mina.

Los objetivos específicos de este estudio incluyen evaluar la precisión de los modelos de atenuación vibracional en la mina, modificar los parámetros geomecánicos para mejorar la calibración de los modelos predictivos y elegir el mejor modelo basado en su poder predictivo y coeficiente de determinación (R^2). Según investigaciones anteriores, la calibración de estos modelos aumenta significativamente su precisión en la estimación de PPV, lo que permite mitigar los efectos ambientales y reducir los daños estructurales (Hosseini et al., 2023; Zúñiga-Arrobo y Vallejo, 2024).

Con un diseño transversal que es tanto cuasi-experimental como no experimental, el estudio se lleva a cabo utilizando una metodología cuantitativa. Para evaluar el rendimiento de los modelos actuales e identificar cambios en sus parámetros, se examinarán los registros históricos de vibraciones y los datos experimentales basados en el campo. Con el fin de contribuir a una minería más efectiva y sostenible, se anticipa que la optimización de los modelos reduciría los efectos sobre la estabilidad de las pendientes, mejoraría la seguridad operativa y maximizaría el uso de explosivos (Cornejo Chacón y Huamán Rivas, 2020; Condor Navarro, 2024).

Palabras clave: Voladuras, vibraciones inducidas, modelos de atenuación vibracional, Velocidad Pico de Partícula (PPV), calibración geomecánica, estabilidad geotécnica, optimización de modelos, seguridad minera, minería a cielo abierto, Mina Chinalco.

ABSTRACT

The vibrations produced by blasting in open-pit mining have the potential to jeopardize operational safety and geotechnical stability. It has been determined that the variability of the rock mass and the design of the blasts at the Chinalco Mining Unit in the Peruvian Andes make empirical vibration attenuation models inadequate for predicting the Peak Particle Velocity (PPV). To increase the accuracy of the estimates and improve the design of the blasts, this study attempts to refine these models by calibrating certain geomechanical parameters of the mine.

The specific objectives of this study include evaluating the accuracy of vibration attenuation models in the mine, modifying geomechanical parameters to improve the calibration of predictive models, and choosing the best model based on its predictive power and coefficient of determination (R^2). According to previous research, the calibration of these models significantly increases their accuracy in estimating PPV, which helps mitigate environmental effects and reduce structural damage (Hosseini et al., 2023; Zúñiga-Arrobo & Vallejo, 2024).

With a cross-sectional design that is both quasi-experimental and non-experimental, the study is conducted using a quantitative methodology. To evaluate the performance of the current models and identify changes in their parameters, historical vibration records and field-based experimental data will be examined. In order to contribute to more effective and sustainable mining, it is anticipated that the optimization of the models would reduce the effects on slope stability, improve operational safety, and maximize the use of explosives (Cornejo Chacón & Huamán Rivas, 2020; Condor Navarro, 2024).

Keywords: Blasting, induced vibrations, vibrational attenuation models, Peak Particle Velocity (PPV), geomechanical calibration, geotechnical stability, model optimization, mining safety, open-pit mining, Chinalco Mine.

INTRODUCCIÓN

Para fracturar la masa rocosa, la minería a cielo abierto utiliza técnicas de voladura, que producen vibraciones sísmicas que pueden comprometer la seguridad operativa y la estabilidad geotécnica. La Velocidad Máxima de Partículas (PPV), cuya predicción precisa permite el diseño de voladuras efectivas y reduce los peligros relacionados, es uno de los factores principales utilizados para evaluar estos impactos. La evaluación del PPV en la Unidad Minera Chinalco en los Andes Peruanos se ha basado en modelos empíricos de atenuación vibracional, incluidos los desarrollados por Devine, Hendron y Langefors. La estabilidad de las pendientes y la planificación operativa pueden verse afectadas por errores en la predicción de vibraciones resultantes del uso de estos modelos sin una calibración adecuada.

Este trabajo se centra en mejorar los modelos de atenuación de vibraciones calibrando parámetros geomecánicos mineros específicos, ya que un cálculo preciso del PPV es crucial. Para ello, se examinarán los modelos actuales, se evaluará su precisión y se realizarán modificaciones a la luz de los datos experimentales recopilados de la mina Chinalco. Se anticipa que esta optimización minimizará los efectos en la estabilidad de las pendientes, mejorará la predicción de vibraciones y maximizará el uso de explosivos en las operaciones mineras.

Tanto el ámbito académico como el operativo pueden beneficiarse de este estudio. Prácticamente hablando, una previsión más precisa del PPV permitirá un mejor diseño de voladuras, menores gastos operativos y menos riesgos geotécnicos. La creación de modelos calibrados ofrecerá, desde un punto de vista científico, una base metodológica sólida para futuros estudios sobre las vibraciones inducidas por explosiones en la minería a cielo abierto.

El estudio utiliza una metodología cuantitativa y un diseño transversal que es tanto cuasi-experimental como no experimental para lograr estos objetivos. Se utilizarán mediciones de campo y datos históricos de vibraciones para evaluar el rendimiento de los modelos actuales y determinar las mejores modificaciones. Los hallazgos del estudio proporcionarán a los mineros herramientas útiles para gestionar la vibración, haciendo que las operaciones sean más seguras y efectiva

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

Las voladuras en minería a cielo abierto generan vibraciones que pueden afectar la estabilidad de los taludes y la seguridad de las operaciones mineras. En la Mina Chinalco, ubicada en los Andes peruanos, se han identificado zonas de propagación de vibraciones (ZPV) con diferentes características geomecánicas que influyen en la Velocidad Pico de Partícula (PPV), un parámetro clave para evaluar el impacto de las voladuras en el macizo rocoso.

Actualmente, la predicción de la PPV se basa en modelos empíricos de atenuación vibracional, como los de Devine, Hendron y Langefors. Sin embargo, estos modelos presentan variaciones en su precisión debido a la heterogeneidad del macizo rocoso, la configuración de las voladuras y los factores de atenuación propios del terreno. La falta de una calibración adecuada de estos modelos puede llevar a sobrestimaciones o subestimaciones en la predicción de la PPV, afectando el diseño de voladuras y la gestión del riesgo geotécnico.

Por lo tanto, surge la necesidad de optimizar los modelos de predicción de PPV mediante la calibración de parámetros geomecánicos específicos de la mina. Esto permitirá mejorar la precisión en la estimación de vibraciones, reducir el impacto en los taludes y optimizar el uso de explosivos. La presente investigación busca desarrollar un modelo optimizado de atenuación vibracional que integre los datos experimentales obtenidos en la Mina Chinalco, proporcionando herramientas más confiables para la toma de decisiones en el diseño de voladuras.

1.1.1. Problema general

¿Cómo optimizar los modelos de atenuación vibracional para mejorar la precisión en la predicción de la Velocidad Pico de Partícula (PPV) en la Mina Chinalco?

1.1.2. Problemas específicos

- a. ¿Cuál es la precisión de los modelos de predicción de PPV utilizados en la Mina Chinalco?
- b. ¿Cómo influye la calibración de los parámetros geomecánicos en la mejora de los modelos de atenuación vibracional?
- c. ¿Cuál es el modelo más adecuado para predecir la PPV en función de la carga media y la distancia?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Optimizar los modelos de atenuación vibracional para mejorar la predicción de la Velocidad Pico de Partícula (PPV) en la Mina Chinalco.

1.2.2. Objetivos específicos

- a. Evaluar la precisión de los modelos de atenuación vibracional utilizados en la mina.
- b. Ajustar los parámetros geomecánicos para mejorar la calibración de los modelos de predicción de vibraciones.
- c. Seleccionar el modelo más adecuado basado en el coeficiente de determinación (R^2) y su capacidad predictiva.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación

Las vibraciones inducidas por voladuras en minería a cielo abierto representan un desafío significativo en términos de seguridad y estabilidad geotécnica. La Velocidad Pico de Partícula (PPV) es un parámetro fundamental para evaluar el impacto de estas vibraciones en el macizo rocoso y su entorno (Jimeno et al., 2021). Sin embargo, la estimación de la PPV depende de modelos de atenuación vibracional, como los de Devine, Hendron y Langefors, los cuales requieren calibraciones precisas para cada

yacimiento debido a la variabilidad geomecánica del terreno (Singh y Singh, 2019).

En la Mina Chinalco, la aplicación de estos modelos, sin una adecuada optimización, puede generar errores en la predicción de la PPV, afectando el diseño de voladuras y aumentando el riesgo de inestabilidad en taludes. Estudios previos han demostrado que la calibración de los modelos de atenuación mejora significativamente la precisión de las estimaciones vibracionales, permitiendo la reducción del daño en estructuras y el control de impactos ambientales (Hosseini et al., 2020).

Por lo tanto, este estudio es necesario para optimizar los modelos de atenuación vibracional en función de las condiciones geomecánicas específicas de la Mina Chinalco. La investigación contribuirá al desarrollo de herramientas predictivas más precisas, mejorando la toma de decisiones en voladuras y garantizando una minería más segura y eficiente (Zhang et al., 2022).

1.3.2. Importancia

La presente investigación tiene una importancia clave en el desarrollo de estrategias de gestión y mitigación de vibraciones en la Mina Chinalco. Una predicción precisa de la Velocidad Pico de Partícula (PPV) permite optimizar el diseño de voladuras, minimizando el daño a los taludes y mejorando la estabilidad geotécnica de la mina (Spathis, 2019).

Desde una perspectiva operativa, la optimización de los modelos de atenuación vibracional permite una mejor planificación del uso de explosivos, lo que reduce costos operativos y disminuye riesgos ambientales (Khandelwal y Singh, 2020). Además, la aplicación de modelos calibrados contribuye a una mejor gestión de la seguridad laboral, protegiendo a los trabajadores y equipos en el entorno minero.

A nivel científico, este estudio proporcionará una base metodológica sólida para la calibración de modelos de atenuación vibracional en minas de

características similares. La investigación podrá ser utilizada como referencia en futuros estudios sobre vibraciones inducidas por voladuras en minería a cielo abierto (Ghasemi et al., 2021).

Finalmente, desde un punto de vista ambiental y social, la reducción del impacto de las vibraciones minimiza afectaciones a infraestructuras cercanas y comunidades locales, promoviendo una minería más sostenible y responsable (Konietzky et al., 2018).

1.4. Delimitación del proyecto

Delimitación espacial

La investigación tiene lugar en la Unidad Minera Chinalco, situada en los Andes de Perú. Se enfoca en el análisis de las vibraciones producidas por las voladuras efectuadas en diversas áreas del rajo abierto de la mina, teniendo en cuenta sus propiedades geomecánicas y de operación.

Delimitación temporal

La investigación abarca un período de análisis comprendido entre los últimos 2 a 5 años, utilizando registros históricos de vibraciones obtenidos de estaciones de monitoreo y datos de voladuras recientes.

Delimitación temática

El estudio se enfoca en la optimización de modelos de atenuación vibracional para mejorar la predicción de la Velocidad Pico de Partícula (PPV). Se analizarán modelos empíricos como los de: Devine, Hendron y Langefors, evaluando su precisión y ajustando sus parámetros geomecánicos específicos para la Mina Chinalco.

Delimitación metodológica

La investigación sigue un enfoque cuantitativo, con un diseño cuasi experimental y transeccional no experimental. Se trabajará con registros de vibraciones, análisis estadísticos y calibraciones de modelos predictivos, utilizando software especializado como Excel, AutoCAD y Split Desktop.

1.5. Hipótesis y variables

1.5.1. Hipótesis general

La optimización de los modelos de atenuación vibracional mejora significativamente la precisión en la predicción de la Velocidad Pico de Partícula (PPV) en la Mina Chinalco.

1.5.2. Hipótesis específicas

- a. Los modelos de predicción de PPV presentan variaciones en su precisión según la calibración de los parámetros geomecánicos.
- b. La calibración de los factores de amplitud y decaimiento mejora la capacidad predictiva de los modelos de atenuación vibracional.
- c. Un modelo específico ofrece mayor precisión en la predicción de la PPV en función de la carga media y la distancia.

1.5.3. Variables

- Variable dependiente

Velocidad Pico de Partícula (PPV)

- Variable independiente

Parámetros de los modelos de predicción de vibraciones

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Para enriquecer este estudio se tuvieron en cuenta las siguientes tesis de investigación.

2.1.1. Antecedentes internacionales

- Cuéllar (2021) llevó a cabo una investigación exhaustiva en la unidad minera Carahuacra, ubicada en Perú, enfocándose en la optimización de la perforación y voladura mediante el método de minado "bench and fill". El estudio analizó diversos factores y parámetros de perforación y voladura con el objetivo de mejorar la distribución de la carga explosiva y reducir el consumo innecesario de explosivos. Se evaluaron aspectos como la geometría de los bancos, la selección de explosivos adecuados y la implementación de técnicas de voladura controlada. Los resultados indicaron que una adecuada distribución de la carga explosiva y el control de los parámetros de voladura son fundamentales para minimizar los efectos adversos de las vibraciones en las estructuras circundantes y en las labores mineras. Además, se destacó la importancia de la capacitación del personal y la implementación de tecnologías avanzadas para el monitoreo y control de las vibraciones generadas durante las voladuras. Este estudio proporciona una base sólida para la mejora de las prácticas de voladura en minas peruanas, contribuyendo a la seguridad y eficiencia de las operaciones mineras.
- Gonzales et al. (2021) realizaron un estudio detallado sobre la aplicación de detonadores electrónicos en minería subterránea peruana, con el objetivo de reducir la fragmentación no deseada y atenuar las vibraciones generadas durante las voladuras. La investigación se centró en la precisión

en el control de los tiempos de retardo y la sincronización de las voladuras, aspectos clave para minimizar los efectos adversos de las vibraciones. Se implementaron técnicas de voladura controlada y se evaluaron diferentes configuraciones de detonadores electrónicos para determinar su eficacia en la reducción de la fragmentación y las vibraciones. Los resultados demostraron que el uso de detonadores electrónicos permite una mayor precisión en la sincronización de las voladuras, lo que se traduce en una reducción significativa de la fragmentación no deseada y una atenuación de las vibraciones generadas. Este avance contribuye a mejorar la seguridad y eficiencia de las operaciones mineras, reduciendo los costos asociados a la fragmentación excesiva y los daños estructurales causados por las vibraciones. Además, se destacó la necesidad de una capacitación adecuada del personal y la implementación de tecnologías avanzadas para el monitoreo y control de las vibraciones en las operaciones de voladura.

- Cereceda Espinoza (2015) llevó a cabo un análisis detallado de las vibraciones generadas durante las voladuras en la unidad minera de Uchucchacua, ubicada en Perú. El estudio se enfocó en la calibración de modelos de atenuación vibracional específicos para la mina, considerando las características geomecánicas particulares del macizo rocoso. Se utilizaron técnicas avanzadas de diagnóstico y control para evaluar el comportamiento de las ondas de vibración y su propagación en el medio rocoso. Los resultados indicaron que la calibración de modelos de atenuación vibracional específicos es esencial para predecir y controlar las vibraciones generadas durante las voladuras, permitiendo una optimización de los parámetros de voladura y una reducción de los efectos adversos de las vibraciones en las estructuras circundantes. Este estudio proporciona una base sólida para la mejora de las prácticas de voladura en minas peruanas, contribuyendo a la seguridad y eficiencia de las operaciones mineras.

2.1.2. Antecedentes nacionales

- El Consejo Minero (2021) presentó un modelo de optimización de la vibración en minería, desarrollado para mejorar la precisión en la predicción de las vibraciones generadas por las voladuras. Este modelo incorpora variables geológicas y geotécnicas específicas de cada mina, permitiendo una estimación más precisa de las velocidades pico de partícula (PPV). La implementación de este modelo ha contribuido a reducir los impactos negativos de las vibraciones en las estructuras circundantes y en las comunidades cercanas. Además, se proyectaron mejoras adicionales al modelo en 2022 para potenciar su rendimiento y minimizar las preocupaciones de las comunidades locales. Este avance refleja el compromiso de la industria minera con la sostenibilidad y la responsabilidad social, buscando equilibrar la eficiencia operativa con el respeto al entorno y las comunidades vecinas.

- En un artículo publicado en 2023, se exploró la aplicación de técnicas de Machine Learning para la estimación precisa de la velocidad pico de partícula (PPV) en voladuras mineras. El estudio demostró que la integración de algoritmos de aprendizaje automático con datos históricos de voladuras permitió predecir con mayor exactitud las PPV, facilitando la optimización de los parámetros de voladura y la reducción de los efectos adversos de las vibraciones. Se utilizaron modelos de regresión y redes neuronales para analizar patrones en los datos y establecer relaciones entre las variables de voladura y las PPV. Los resultados indicaron que la aplicación de Machine Learning mejora significativamente la precisión en la estimación de las PPV, lo que permite una planificación más efectiva de las voladuras y una reducción de los riesgos asociados a las vibraciones. Este avance tecnológico representa una innovación en la industria minera, integrando herramientas de inteligencia artificial para mejorar la seguridad y eficiencia de las operaciones.

- González et al. (2022) investigaron la atenuación de vibraciones resonantes en puentes de ferrocarril, aplicando técnicas de amortiguamiento para reducir las vibraciones inducidas por el paso de trenes. Aunque el estudio se centra en infraestructuras ferroviarias, los

principios y métodos utilizados son aplicables a la minería, donde las vibraciones generadas por las voladuras pueden afectar las estructuras circundantes. La investigación proporciona insights valiosos para el diseño de estrategias de atenuación de vibraciones en entornos mineros.

2.2. Generalidades de la unidad minera Chinalco

2.2.1. Ubicación e infraestructura disponible

La unidad minera Chinalco se encuentra en la zona central de los Andes de Perú, concretamente en el distrito de Morococha, en la provincia de Yauli, en el departamento de Junín, en Perú. Esta mina a cielo abierto está situada a una altitud media de 4,500 metros sobre el nivel del mar (msnm), en una región montañosa con condiciones geológicas y meteorológicas únicas.

La infraestructura de la minería abarca el tajo abierto, plantas para el tratamiento de minerales y un sistema de vigilancia de vibraciones ubicado en áreas clave. En el área de investigación se han reconocido cuatro sectores de atención: Norte, sur, este y oeste, establecidos en función de sus propiedades geomecánicas y su propensión a las vibraciones provocadas por las olas.

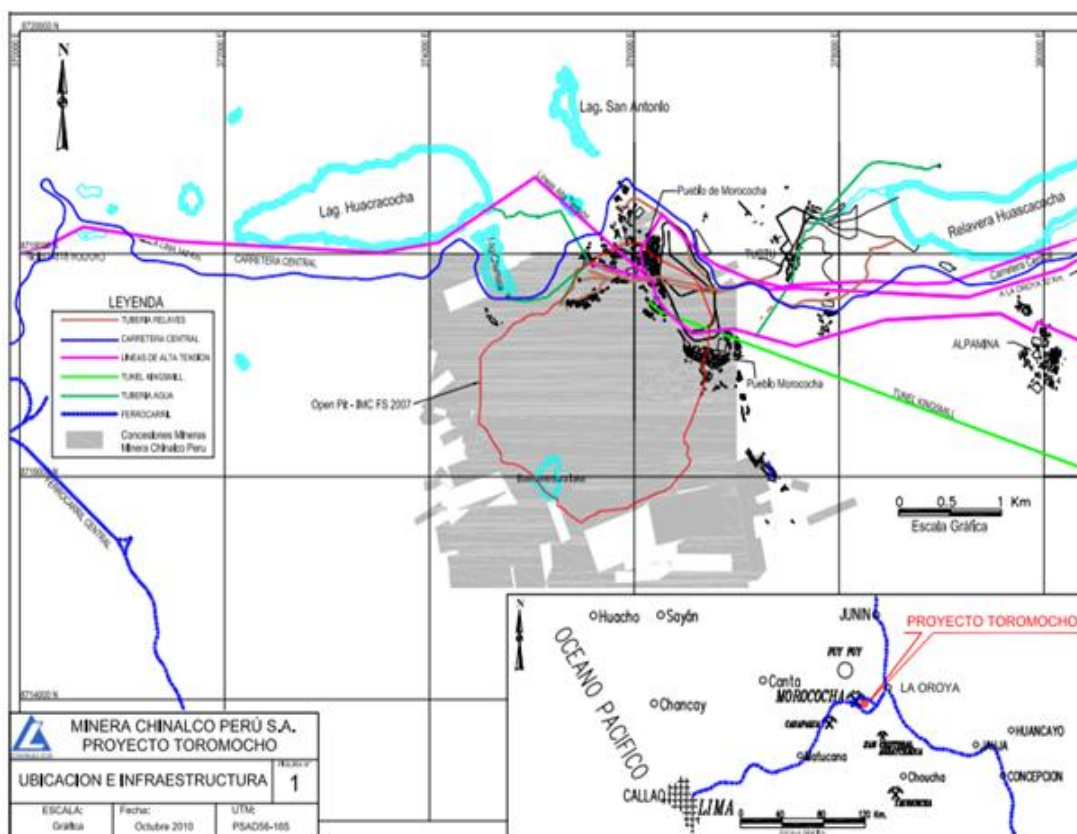


Figura 1. Ubicación e infraestructura

Fuente: Minera Chinalco Perú S.A.

2.2.2. Accesibilidad

La unidad minera Chinalco, ubicada en el distrito de Morococha, provincia de Yauli, departamento de Junín, Perú, cuenta con diversas vías de acceso tanto terrestres como ferroviarias que facilitan el transporte de personal, insumos y productos mineros.

1. Accesibilidad terrestre

La mina es accesible principalmente por carretera, conectándose con importantes rutas nacionales:

- Carretera Central (PE-22): Es la vía principal que une Lima con La Oroya y permite el acceso a Morococha y la unidad minera Chinalco. Esta carretera es asfaltada y se encuentra en buen estado, aunque puede presentar dificultades en temporadas de lluvias o nevadas.

- Desvío a Morococha: Desde la Carretera Central, en el tramo entre La Oroya y Ticlio, se toma un desvío que conduce directamente hacia la mina.
- Accesos internos: Dentro de la unidad minera, existen caminos afirmados que conectan las distintas áreas operativas, incluyendo el tajo abierto, la planta de procesamiento y las zonas administrativas.

2. Accesibilidad ferroviaria

- La unidad minera Chinalco se encuentra cerca de la línea férrea de Ferrocarril Central Andino, que conecta Callao - Lima - La Oroya - Huancayo.
- Este ferrocarril permite el transporte de concentrados de mineral desde la mina hacia los puertos y centros industriales, facilitando la exportación y distribución de los productos mineros.

2.2.3. Geología regional

Litológicamente está constituido principalmente por las calizas Pucará (Triásico superior - Jurásico inferior) y las areniscas Goyllarisquiza (Cretácico inferior) cortadas por intrusivos de ~30 Ma (Oligoceno).

Estructuralmente está conformado por dos grandes dominios separados por la Falla Milpo-Atacocha, referidos como Zona A (Dominio Estructural Este) y la Zona B (Dominio estructural oeste). La Zona A se presenta como un dominio poco deformado, afectado solo por deformación frágil, representada por fallas NS, E-O y algunos lineamientos NO-SE. La Zona B presenta dos tipos de deformación en parte sobreimpuestas; una moderada a fuerte deformación frágil, caracterizada por fallas principalmente NO-SE/N-S, y otra deformación dúctil cuyo rasgo distintivo son múltiples pliegues con eje de dirección N-S.

El área de El Porvenir se encuentra dominado por el sistema de fallas N-S, evidenciándose en el emplazamiento de diques cuarzodioríticos al NO del Stock Milpo en la zona de influencia de la falla Milpo-Atacocha y relacionados a algunas vetas no económicas de óxidos de manganeso y hierro.

La estructura principal es un sinclinal asimétrico, cuyo plano axial tiene rumbo NS paralelo al plegamiento regional que es desplazado por una falla de gran magnitud denominada falla Milpo – Atacocha que altera la secuencia estratigráfica de las formaciones Pucará, Goyllarisquizga y Machay de Edad Jurásica-Cretácica.

Este ensamble geológico es debido a procesos orogénicos y magmáticos ocurridos entre el Mioceno y Pleistoceno que ocasionaron en los sedimentos fuerzas compresionales de dirección EO, y originaron paralelamente al plegamiento andino el sinclinal de Milpo, adicionalmente ocurrieron varios períodos de fallamientos y fracturamiento e intrusiones hipoabisales como stocks, diques y sills. Todos estos procesos orogénicos y magmáticos han dado origen a diferentes tipos de depósitos de reemplazamiento metasomático a través de estructuras pre-existentes.

Cuerpos de magnitud, forma y contorno horizontal irregular, reconocidos hasta el Nivel -1450 y aún no conocido debajo de este nivel, lo cual esperamos completar con taladros largos a profundidad. La mineralización está constituida por galena, blenda y sulfosales en los niveles superiores, variando a galena argentífera e incremento de marmatita en los niveles inferiores.

Cuerpos ubicados en los contactos intrusivos – calizas o englobados en intrusivos, cuerpos de brechas post-minerales relacionados o no con intrusivos. Vetas de 150 metros de longitud y conocidos en profundidad hasta el Nivel - 1170, mineralizados de galena argentífera, blenda con ocurrencias de marmatitae incremento de calcopirita en profundidad.

Se han identificado 3 cuerpos intrusivos de composición diorita a cuarzo diorita del Oligoceno (29.5-30.1Ma) denominados: Santa Bárbara, Milpo y Atacocha/San Gerardo. Atacocha y San Gerardo en superficie están separados, pero en profundidad se unen, razón por lo cual se le considera como un solo cuerpo intrusivo. Además, diques de composición similar a los intrusivos.

2.2.4. Geología local

Formaciones Paleozoicas y Mesozoicas

La secuencia estratigráfica de la región incluye unidades de diversas edades, que van desde el Paleozoico hasta el Cuaternario. Entre las principales formaciones geológicas presentes se encuentran:

- **Grupo Mitu (Pérmico-Triásico):** Compuesto por secuencias de rocas sedimentarias y volcánicas, predominantemente areniscas rojas y lutitas, con intercalaciones de basaltos y andesitas.
- **Grupo Pucará (Triásico-Jurásico):** Formado principalmente por calizas y dolomías, con intercalaciones de lutitas. Es una de las unidades más importantes en la formación de skarns mineralizados debido a su alta reactividad con fluidos hidrotermales.

Formaciones del Mesozoico

- **Formación Goyllarisquizga (Cretácico Inferior):** Compuesta por areniscas cuarzosas y conglomerados, que representan antiguos ambientes deltaicos y fluviales.
- **Formación Chülec y Pariatambo (Cretácico Medio):** Constituidas por lutitas y calizas con intercalaciones de margas, representando ambientes marinos someros.
- **Formación Jumasha (Cretácico Superior):** Una secuencia dominante de calizas macizas y bioclásticas, considerada una de las más extensas de la región central del Perú.
- **Formación Casapalca (Cretácico Superior):** Compuesta por rocas volcánicas y sedimentarias que incluyen tufos y areniscas.

Rocas intrusivas del Terciario

Durante el Terciario, la región fue afectada por un intenso magmatismo que dio origen a la intrusión de diversos cuerpos pórfidos y stocks graníticos, los cuales están directamente relacionados con la mineralización de cobre y molibdeno en Toromocho. Entre las principales rocas intrusivas se encuentran:

- **Dioritas y granodioritas:** Asociadas a la fase inicial del magmatismo, estas rocas forman parte de un batolito máfico-félsico en la región.
- **Pórpidos feldespáticos y cuarcíferos:** Se presentan como diques y stocks intrusivos que generaron alteraciones hidrotermales y mineralización de tipo pórfido de Cu-Mo.
- **Pórfido dacítico:** Asociado a las fases tardías del magmatismo y mineralización, estos pórfidos muestran fenocristales de cuarzo y feldespato con una matriz fina de textura porfídica.

Depósitos cuaternarios

Los depósitos más recientes en la región incluyen morrenas glaciales, terrazas aluviales y coluviales, los cuales recubren parcialmente las unidades geológicas anteriores.

2.2.5. Mineralogía

La mineralización en Toromocho está estrechamente relacionada con la intrusión de cuerpos pórfidos durante el Terciario. La presencia de fluidos hidrotermales ricos en metales ha dado lugar a diferentes estilos de mineralización, incluyendo:

- Mineralización tipo pórfido de cobre-molibdeno: Se caracteriza por venillas y disseminaciones de calcopirita y molibdenita en las intrusiones granodioríticas y pórfidas feldespáticas.
- Skarns metalíferos: Se desarrollan en la zona de contacto entre las intrusiones y las rocas carbonatadas, dando lugar a mineralizaciones de cobre, hierro y zinc, con minerales como magnetita, calcopirita y esfalerita.
- Mineralización supergénica: Originada por el enriquecimiento secundario del cobre, con formación de calcosina, covelina y malaquita en la parte superior del yacimiento.
- Mineralización en venillas: Asociada a eventos hidrotermales tardi-magmaticos, caracterizada por cuarzo, pirita, calcopirita y molibdenita en estructuras de stockwork.

Minerales de cobre

El cobre es el elemento principal explotado en Toromocho y se encuentra en diversas especies minerales, tanto en su forma primaria como secundaria.

Entre los minerales de cobre más representativos se incluyen:

- Calcopirita (CuFeS_2): Es el mineral de cobre más abundante en el yacimiento y se presenta como venillas y disseminaciones en las rocas intrusivas y skarns.
- Bornita (Cu_5FeS_4): Aparece en menor proporción que la calcopirita, pero es importante debido a su mayor contenido de cobre.
- Covellina (CuS): Se encuentra en zonas de supergénesis y está asociada con la alteración de la calcopirita.
- Calcosina (Cu_2S): Predomina en la zona de enriquecimiento secundario, donde el cobre ha sido removilizado y reprecipitado.

Minerales de molibdeno

El molibdeno es un subproducto valioso en Toromocho y su principal mineral es:

- Molibdenita (MoS_2): Se encuentra como venillas finas asociadas a las intrusiones pórfidas y en zonas de alteración hidrotermal potásica.

Minerales de hierro

El hierro se encuentra principalmente en forma de sulfuros y óxidos, desempeñando un papel importante en la mineralización del yacimiento:

- Magnetita (Fe_3O_4): Se encuentra en los skarns, donde se forma por reemplazo de minerales carbonatados.
- Pirrotina (FeS): Asociada con mineralizaciones de cobre y en ambientes hidrotermales.
- Pirita (FeS_2): Común en el sistema hidrotermal y se presenta en venillas y disseminaciones.

Minerales secundarios y alteraciones hidrotermales

Los procesos hidrotermales y de meteorización han dado lugar a la formación de minerales secundarios importantes en la supergénesis del yacimiento:

- Malaquita ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$): Un mineral de cobre secundario característico de la zona oxidada.
- Azurita ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$): Similar a la malaquita, se forma en ambientes de oxidación con cobre remanente.
- Crisocola ($\text{CuSiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$): Se encuentra en fracturas y venas en la zona de oxidación.
- Hematita (Fe_2O_3): Se encuentra en zonas de alteración potásica y argílica avanzada.

Minerales de gangue

Los minerales de ganga en Toromocho incluyen una variedad de silicatos y carbonatos que acompañan la mineralización económica:

- Cuarzo (SiO_2): Predominante en vetillas y como cementante en rocas alteradas.
- Feldespatos (KAlSi_3O_8 - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$): Se encuentran en los pórfidos y en las zonas de alteración potásica.
- Calcita (CaCO_3): Común en venillas y en skarns, resultado de la alteración de calizas preexistentes.

2.2.6. Estudio geomecánico

El análisis geomecánico de la unidad minera Chinalco es fundamental para comprender la propagación de vibraciones y su impacto en la estabilidad del macizo rocoso. En este estudio, se han identificado los dominios estructurales predominantes en el tajo y se han determinado sus propiedades geomecánicas con el fin de evaluar los criterios de daño en cada sector de cuidado.

Los dominios estructurales del tajo han sido definidos por el área de geomecánica de la U.M. Chinalco y están registrados en el plano 1 del estudio de vibraciones en campo lejano. Cada dominio presenta propiedades geomecánicas específicas que afectan la propagación de las ondas de voladura y la determinación de la Velocidad Pico de Partícula Crítica (PPVc).

A continuación, se presentan las propiedades geomecánicas más relevantes de los dominios estructurales evaluados:

Tabla 1. *Características geomecánicas de cada dominio estructural*

Dominio Estructural	UCS (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Densidad (Tm/m³)	Relación de Poisson	Vp (m/s)	VPPc (m/s)
B1 JUR	18	10.8	2.72	0.18	2,076.40	346.1
BRECHA	27	17.7	2.54	0.2	2,782.60	424.5
B3 GRND	55	18.3	2.6	0.2	2,480.00	745
B2 GRND	19	14	2.54	0.2	2,480.00	337
B2 DIO	19	14	2.54	0.2	2,480.00	337
B2 JUR	18	10.8	2.72	0.18	2,076.00	346

Fuente: U.M. Chinalco

Sectores de cuidado y criterios de daño

Se han identificado cuatro sectores de cuidado en función de las condiciones geomecánicas y la influencia de la vibración de voladuras. Cada sector se ha asociado con un dominio estructural predominante, tomando el valor de PPVc más bajo como el determinante del criterio de daño.

- Sector Norte
 - Dominios estructurales: B1 JUR y BRECHA
 - PPVc determinante: 346.1 m/s (B1 JUR)
 - Posibles efectos: Extensión de fracturas preexistentes a partir de 86.5 m/s
- Sector Sur
 - Dominio estructural: B3 GRND
 - PPVc determinante: 745 m/s
 - Posibles efectos: Generación de nuevas fracturas a partir de 186.3 m/s
- Sector Este
 - Dominios estructurales: B1 GRND y B2 GRND
 - PPVc determinante: 337 m/s (B2 GRND)
 - Posibles efectos: Fracturamiento intenso a partir de 1,346 m/s
- Sector Oeste

- Dominios estructurales: B2 JUR y B2 DIO
- PPVc determinante: 337 m/s (B2 DIO)
- Posibles efectos: Extensión de fracturas preexistentes a partir de 84.1 m/s

2.2.7. Operaciones de unidad minera Chinalco

La unidad minera Chinalco opera en un contexto de minería a cielo abierto, donde las voladuras son una actividad clave para la fragmentación de la roca y la extracción del mineral. Estas operaciones generan vibraciones en el macizo rocoso, lo que hace necesario optimizar los modelos de atenuación vibracional para minimizar el impacto en los taludes y estructuras cercanas.

- **Etapas de la operación minera**

Las operaciones mineras en Chinalco siguen un ciclo típico de minería a cielo abierto que incluye:

1. Perforación y voladura

- Uso de taladros con diámetros entre 5" y 12 ¼", dependiendo del sector.
- Carga de explosivos controlada según el diseño de voladura.
- Uso de retardos entre 7 ms y 20 ms, ajustados a las características geomecánicas del macizo.

2. Carga y acarreo

- Equipos de carguío: Palas hidráulicas y cargadores frontales.
- Transporte con camiones mineros de alto tonelaje hacia la chancadora o botaderos.

3. Chancado y procesamiento

- Reducción del tamaño de la roca en el circuito de chancado.
- Proceso de flotación para la recuperación de cobre y otros metales.

4. Manejo de material estéril y relaves

- Disposición de material estéril en botaderos diseñados según estudios geotécnicos.
 - Almacenamiento de relaves en depósitos seguros para minimizar el impacto ambiental.
- **Consideraciones para el control de vibraciones**
 - Zonificación de vibraciones: Se han determinado 10 Zonas de Propagación de Vibración (ZPV) con modelos calibrados de atenuación.
 - Monitoreo sísmico: Se han registrado 71 puntos de medición con sismógrafos y geófonos triaxiales.
 - Criterios de daño: Evaluación de la Velocidad Pico de Partícula Crítica (PPVc) para prevenir daños en el macizo rocoso y estructuras cercanas.

2.3. Bases teóricas

El presente estudio tiene como objetivo la optimización de modelos de atenuación vibracional para predecir la Velocidad Pico de Partícula (PPV) en la unidad minera Chinalco. En este contexto, se analizan los efectos de las vibraciones inducidas por voladuras sobre el macizo rocoso, considerando tanto su propagación como los criterios de daño asociados a los sectores de cuidado del tajo.

La relación entre las variables independientes (parámetros de los modelos de predicción de vibraciones) y la variable dependiente (PPV) es clave para calibrar los modelos matemáticos y mejorar la confiabilidad de las predicciones, asegurando la seguridad geotécnica y operativa en la mina.

Velocidad Pico de Partícula (PPV)

La Velocidad Pico de Partícula (PPV) es una medida fundamental que cuantifica las vibraciones generadas durante una voladura en minería. Representa la máxima velocidad alcanzada por las partículas del terreno en respuesta a las ondas de presión generadas por la explosión. La estimación del PPV se basa en una variedad de factores, como datos históricos de voladuras previas, características geológicas del

terreno y parámetros específicos de la voladura, incluyendo la cantidad y distribución de explosivos. Se utilizan métodos y modelos matemáticos para predecir el comportamiento de las ondas de presión y las vibraciones resultantes.

Factores que afectan la PPV

La PPV está influenciada por múltiples factores, entre los que destacan:

- Carga explosiva (Q_i): El peso del explosivo utilizado por retardo.
- Distancia al punto de monitoreo (D): La distancia horizontal desde la fuente de vibración al punto donde se mide la PPV.
- Propiedades geomecánicas del macizo rocoso: Incluyen la densidad, el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson del terreno.
- Parámetros de voladura: Como el tipo de explosivo, el espaciamiento y la profundidad de los taladros, y el patrón de detonación.

Estos factores están representados en las constantes "K" y "b" de los modelos predictivos, las cuales pueden variar según las condiciones específicas del terreno y las prácticas de voladura. La investigación de Zapata Porras (2017) analizó cómo la secuencia de retardos utilizada en las voladuras influye directamente en la PPV generada, afectando el daño al macizo rocoso. Se observó que tiempos de retardo menores a 26 ms entre cargas explosivas generan valores altos de PPV, incrementando el daño, mientras que tiempos mayores a 49 ms reducen significativamente la PPV y el daño asociado.

Atenuación vibracional y propagación de ondas

Cuando se detona una carga explosiva, se libera una gran cantidad de energía que se propaga en forma de ondas sísmicas a través del macizo rocoso. Estas ondas pueden clasificarse en:

- Ondas de compresión (longitudinales o P): Se propagan a través de medios sólidos y líquidos generando desplazamientos en la dirección de la propagación.

- Ondas de corte (transversales o S): Se propagan únicamente en medios sólidos y producen movimientos perpendiculares a la dirección de propagación.
- Ondas superficiales (Rayleigh y Love): Son las responsables de los efectos de vibración en la superficie del terreno.

A medida que estas ondas avanzan, su energía se atenúa, debido a los siguientes factores:

- Pérdidas por fricción: Se debe a la disipación de energía cuando las ondas atraviesan un medio no completamente elástico. Esto depende directamente de la calidad del macizo rocoso.
- Propagación geométrica: La energía de las ondas se distribuye en volúmenes crecientes de roca a medida que se alejan del punto de detonación, reduciendo la intensidad de la vibración.

Dado que la propagación de ondas no es uniforme en todos los materiales, el comportamiento geomecánico del macizo rocoso juega un papel fundamental en la determinación de los niveles de vibración esperados en distintos puntos del tajo.

Modelos de predicción de vibraciones

Los modelos matemáticos de atenuación vibracional permiten estimar la Velocidad Pico de Partícula (PPV) en función de la carga media por retardo (Q_i) y la distancia de monitoreo (D). En este estudio se han evaluado tres modelos ampliamente utilizados en la ingeniería de voladuras:

1.1.1. Modelo de Devine y Duvall

Este modelo establece que la PPV está determinada por la siguiente ecuación:

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

2.1.1. Modelo de Hendron

Este modelo ajusta el coeficiente de carga media en la relación de predicción:

$$PPV = K \left(\frac{D}{Q_i^{1/3}} \right)^\alpha$$

3.1.1. Modelo de Langefors

En este caso, la relación empírica introduce un ajuste en la distancia:

$$PPV = K \left(\frac{D^{2/3}}{Q_i} \right)^\alpha$$

Donde:

- PPV (mm/s): Velocidad Pico de Partícula.
- D (m): Distancia horizontal desde la fuente explosiva al punto de medición.
- Q_i (kg): Peso del explosivo por retardo.
- K: Factor de amplitud del terreno.
- α : Factor de decaimiento.

La selección del modelo más adecuado se basa en la bondad de ajuste (R^2) de cada ecuación con los datos experimentales obtenidos en el tajo de la unidad minera Chinalco.

Para la calibración de los modelos vibracionales, se han definido las siguientes variables:

- Velocidad Pico de Partícula (PPV): Es el parámetro clave en la predicción de vibraciones, ya que representa la máxima velocidad a la que se desplazan las partículas del macizo rocoso en respuesta a la propagación de ondas sísmicas generadas por una voladura.

- Los principales factores que afectan la PPV y que se incluyen en los modelos de predicción son:
 - a) Carga media por retardo (Q_i): Cantidad de explosivo detonada en cada intervalo de tiempo en un mismo punto de carga.
 - b) Distancia de monitoreo (D): Distancia entre el punto de detonación y el punto donde se mide la vibración.
 - c) Factor de amplitud (K): Depende de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso y caracteriza la intensidad de las vibraciones en un medio determinado.
 - d) Factor de decaimiento (α): Indica la tasa de disminución de la vibración con la distancia.

Ondas elementales y superposición de ondas

La onda elemental es la vibración generada por la detonación de un solo taladro en un punto específico del tajo. Su registro proporciona información clave sobre el comportamiento del macizo rocoso.

El principio de superposición de ondas establece que, si la respuesta de la vibración del suelo es lineal y elástica, la combinación de múltiples fuentes de vibración puede obtenerse sumando individualmente las ondas generadas por cada taladro.

Dado que la duración de una onda elemental suele ser mayor que el intervalo de retardo entre taladros, la superposición de ondas es inevitable, afectando la intensidad de la vibración.

Influencia del tiempo de retardo

El tiempo de retardo entre detonaciones es un factor clave en el control de vibraciones. Afecta la amplitud de la PPV, ya que la detonación de múltiples taladros en secuencia genera interferencias constructivas o destructivas entre ondas.

Para cada dominio estructural en el tajo de Chinalco, se han determinado intervalos de tiempo de retardo recomendados para minimizar la amplificación de vibraciones:

- B2 DIO: 10 - 14 ms
- B2 GRND: 17 - 20 ms
- BRECHA: 7 - 10 ms
- B3 DIO: 9 - 11 ms
- B1 GRND: 14 - 18 ms

Criterios de daño y estabilidad geomecánica

La evaluación del impacto de las vibraciones en el macizo rocoso se basa en la Velocidad Pico de Partícula Crítica (PPVc), que representa el umbral de vibración a partir del cual se pueden generar fracturas preexistentes o nuevas fallas en la roca.

1. Clasificación de los niveles de daño

En función de la PPVc de cada dominio estructural, se han determinado los siguientes rangos de daño:

Tabla 2. *Niveles de daño*

Nivel de daño	Rango de PPV (m/s)	Efecto en el macizo rocoso
Sin daño	< 0.25 PPVc	No se generan efectos visibles.
Extensión de fracturas preexistentes	0.25 - 0.625 PPVc	Se agrandan grietas existentes.
Generación de nuevas fracturas	PPVc - 4 PPVc	Se inician nuevas fracturas.
Fracturamiento intenso	4 - 8 PPVc	Degradación estructural significativa.
Nivel de fragmentación	> 8 PPVc	Pérdida total de la estructura de la roca.

Fuente: U.M. Chinalco

Los valores de PPVc son específicos para cada sector de cuidado y han sido determinados a partir de estudios geomecánicos previos en la unidad minera Chinalco.

El estudio de atenuación vibracional en la unidad minera Chinalco se fundamenta en la calibración de modelos matemáticos predictivos que permitan estimar la Velocidad Pico de Partícula (PPV) en función de parámetros clave como la carga explosiva, la distancia de monitoreo y las propiedades del macizo rocoso.

El análisis de los criterios de daño permite establecer límites de vibración seguros para cada sector del tajo, reduciendo la posibilidad de fallas geomecánicas y optimizando el diseño de voladuras. La correcta selección y ajuste del modelo óptimo permitirá minimizar el impacto de las vibraciones y mejorar la estabilidad de los taludes en la mina.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Métodos y alcances de la investigación

3.1.1. Método general

Método general o teórico de la investigación

Se emplea análisis inferencial como método general. (método deductivo y analítico).

3.1.2. Tipo de investigación

Esta investigación es de naturaleza aplicada, ya que se basa en hallazgos y conocimientos de investigación que pueden usarse para resolver directa e inmediatamente los problemas que surgen.

3.1.3. Nivel de investigación

Según su alcance: es explicativo, porque no sólo describe y relaciona, sino que también exige encontrar las causas (causas y motivos) del fenómeno. Por su diseño: es cuasiexperimental, ya que busca la relación entre causa y efecto mediante pretest y posttest, y no hay aleatoriedad en la variable porque la manipulación es una elección, no una intención. Según su enfoque: es cuantitativo y se basa en medidas numéricas.

3.1.4. Diseño de investigación

El diseño de investigación es una investigación transversal no experimental porque implica observar fenómenos sin que el investigador dicte situaciones o condiciones, lo que significa no manipular de ninguna manera las variables de la investigación.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

La población de este estudio está conformada por todos los eventos de voladura realizados en la mina Chinalco. Específicamente, se incluyen todas las voladuras efectuadas en las distintas zonas del tajo abierto, considerando sus características operacionales, geomecánicas y de diseño de explosivos. Esta población comprende:

- Voladuras realizadas en los últimos 2 a 5 años dentro de la mina.
- Registros de vibraciones obtenidos de estaciones de monitoreo ubicadas en distintos puntos del tajo.
- Datos de modelos de atenuación vibracional previamente aplicados en la mina.

En total, se registraron 71 puntos de monitoreo en diferentes sectores de la mina, lo que representa la población accesible para este estudio

3.2.2. Muestra

Para determinar la muestra adecuada dentro de la población, se deben considerar los siguientes criterios:

- Representatividad: La muestra debe incluir mediciones de todos los sectores de cuidado (Norte, sur, este y oeste) y de todas las ZPV identificadas.
- Variabilidad geomecánica: Se debe garantizar que la muestra incluya datos de diferentes dominios estructurales, dado que la propagación de las vibraciones depende de la estructura del macizo rocoso.
- Fiabilidad de los datos: Se deben seleccionar solo las mediciones con datos completos (distancia de fuente, carga media, PPV, etc.).
- Bondad de ajuste del modelo: Se pueden seleccionar los datos que mejor ajusten a los modelos de Devine, Hendron y Langefors.

Se selecciona una muestra de aproximadamente 60 mediciones distribuidas de manera proporcional en todas las zonas de propagación y sectores de

cuidado, asegurando que representen la variabilidad estructural y geomecánica de la mina.

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas de recopilación de datos se implementarán mediante encuestas que utilicen una variedad de actividades estandarizadas; donde se analizan y recopilan datos de la muestra o población.

3.4. Técnicas utilizadas en la recolección de datos

Búsqueda de información: Utilizando la técnica de investigación bibliográfica en diferentes tesis sobre nuestro tema, para tener sustento acerca del modelamiento de vibraciones.

Observación. Se puede observar que la velocidad de onda P y la velocidad pico de partícula crítica volado no es homogénea en la unidad minera Chinalco.

Validación de datos y control de calidad: Para garantizar la confiabilidad de los registros de vibración, se implementaron las siguientes medidas:

- Calibración de los equipos de medición antes de cada campaña de monitoreo.
- Verificación de consistencia entre registros tomados en distintos puntos.
- Comparación de datos con estudios previos de vibraciones en la mina.

El monitoreo constante permitió ajustar los modelos predictivos y mejorar la precisión de las estimaciones

3.5. Instrumentos utilizados en la recolección de datos

Herramientas.

- Observaciones
- Entrevistas
- Check list.

Equipos.

- Sismógrafos Triaxiales
- Microsoft Office (Excel)
- AutoCAD
- Geófonos de campo lejano

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación de resultados

Los puntos de medición, de acuerdo a su orientación y distancia de la fuente determinan una Zona de Propagación de Vibración (ZPV), en la cual se ha estimado las siguientes constantes del terreno: Factor de Amplitud (K) y Factor de Decaimiento (α) para calibrar los modelos experimentales.

Las zonas de estudio se denominaron Zonas de Propagación de Vibración (ZPV). El modelo experimental que representa a una zona fue seleccionado a partir de la bondad de ajuste (R^2) del modelo.

Los modelos de las zonas de propagación de vibración para cada sector de cuidado son las siguientes:

- Sector Norte (ZPV_1): $PPV=K (Dh^{2/3} / Qi)$; $K=0.6441$, $\alpha=-1.326$
- Sector Sur (ZPV_3): $PPV=K (Dh / Qi^{1/3})$; $K=524.3$, $\alpha=-0.71$
- Sector Este (ZPV_10): $PPV=K (Dh / Qi^{1/2})$; $K=383$, $\alpha=-0.816$
- Sector Oeste (ZPV_8, ZPV_4, ZPV_2): $PPV=K (Dh / Qi^{1/3})$; $K=355$, $\alpha=-0.98$

Se han calculado las frecuencias representativas para cada zona de cuidado utilizando la frecuencia media dominante. Las Frecuencias Medias Dominantes de cada Zona de Propagación de Vibración (ZPV) son las siguientes:

- ZPV_1 (Tran =10 Hz, Vert = 13 Hz, Long = 10 Hz)
- ZPV_2 (Tran= 12 Hz, Vert =13 Hz, Long = 11 Hz)
- ZPV_3 (Tran= 20 Hz, Vert =14 Hz, Long = 11 Hz)
- ZPV_10 (Tran= 14 Hz, Vert =16 Hz, Long = 14 Hz)

- ZPV_4 (Tran= 12 Hz, Vert =10 Hz, Long = 9 Hz)
- ZPV_8 (Tran= 12 Hz, Vert =11 Hz, Long = 10 Hz)

Se realizaron registros de ondas elementales en los dominios estructurales: B2-DIO, B2-GRND, BRECHA, B3-DIO y B1-GRND, con la finalidad de determinar los tiempos en los cuales la vibración en los tres ejes (transversal, longitudinal y vertical) se minimiza. Los intervalos de tiempos son los siguientes:

- B2-DIO, tiempo de retardo entre taladros de 10 ms a 14 ms.
- B2-GRND, tiempo de retardo entre taladros de 17 ms a 20 ms.
- BRECHA, tiempo de retardo entre taladros de 7ms a 10 ms.
- B3-DIO, tiempo de retado entre taladros de 9 ms a 11 ms.
- B1-GRND, tiempo de retardo entre retardos de 14 ms a 18 ms.

A distancias más próximas de la voladura, los niveles de vibración pueden ser capaces de extender fracturas existentes pero insuficientes para inducir fracturas frescas. Teniendo estas consideraciones, se ha caracterizado los Sectores de Cuidado en función de la Velocidad Pico de Partícula Crítica (PPVc), la cual depende de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, en el caso del tajo están determinadas por las propiedades los dominios estructurales.

En el estudio se ha estimado la velocidad pico de partícula crítica de cada dominio estructural y se ha asociado a un sector de cuidado. El criterio de daño representativo de un sector que se encuentra en dos o más dominios será aquel de menor valor debido, esto se debe a que dicho dominio es el que presenta menor resistencia a la deformación.

Los sectores de cuidado determinados en el estudio para la zona del tajo son los siguientes:

1. Sector norte

El sector norte se encuentra ubicado en los dominios estructurales B1 JUR y BRECHA. El dominio estructural determinante para este sector es B1 JUR debido a que el valor de velocidad pico de partícula crítica es menor (346 m/s) en comparación al dominio estructural BRECHA (424.5 m/s).

Tabla 3. *Propiedades del macizo rocoso sector norte / D.E. B1 JUR – BRECHA.* Fuente: U.M. Chinalco

D.E. B1 JUR			D.E. BRECHA		
Propiedades	Unid.	Valor	Propiedades	Unid.	Valor
UCS	MPa	18	UCS	MPa	27
Módulo de Young	GPa	10.8	Módulo de Young	GPa	17.7
Densidad de roca	TM/m ³	2,720	Densidad de roca	TM/m ³	2,540
Relación Poisson		0.18	Relación Poisson		0.2
V _{p(teórica)}	m/s	2,076.4	V _{p(teórica)}	m/s	2,782.6
VPP _c		346.1	VPP _c		424.5

Fuente: U.M. Chinalco

Tabla 4. Criterio de daño sector norte / D.E. B1 JUR - BRECHA.

Criterio de Daño	PPV _c			Descripción del Daño
0.25 PPV _c a 0.625 PPV _c	186.3	a	465	Se extienden fracturas pre existentes
PPV _c a 4 PPV _c	745	a	2,981	Se generan nuevas fracturas
4 PPV _c a 8 PPV _c	2,981	a	5,963	Fracturamiento intenso
> 8 PPV _c	5,963			Nivel de fragmentación

Fuente: U.M. Chinalco

2. Sector sur

El sector sur se encuentra ubicado en un solo dominio estructural denominado B3 GRND, el valor estimado para la velocidad pico de partícula crítica en este sector es de 745 m/s.

Tabla 5. *Propiedades del macizo rocoso sector sur / B3 - GRND*

D.E. B3 GRND		
Propiedades	Unid.	Valor
UCS	MPa	55
Módulo de Young	GPa	18.3
Densidad de roca	TM/m ³	2,600
Relación Poisson		0.2
V _{p(teórica)}	m/s	2,480
VPP _c		745

Fuente: U.M. Chinalco

Tabla 6. *Criterio de daño sector sur*

Criterio de Daño	PPV _c			Descripción del Daño
0.25 PPV _c a 0.625 PPV _c	86.5	a	216	Se extienden fracturas pre existentes
PPV _c a 4 PPV _c	346	a	1,384	Se generan nuevas fracturas
4 PPV _c a 8 PPV _c	1,384	a	2,768	Fracturamiento intenso
> 8 PPV _c	2,768			Nivel de fragmentación

Fuente: U.M. Chinalco

3. Sector este

El sector este se encuentra ubicado en los dominios estructurales B1 GRND y B2 GRND. El dominio estructural determinante para este sector es B2 GRND debido a que el valor de velocidad pico de partícula crítica es menor (337 m/s) en comparación al dominio estructural BRECHA (847m/s).

Tabla 7. *Propiedades del Macizo Rcoso Sector Este / B1 GRND – B2 GRND*

D.E. B1 GRND			D.E. B2 GRND		
Propiedades	Unid.	Valor	Propiedades	Unid.	Valor
UCS	MPa	55	UCS	MPa	19
Módulo de Young	GPa	18	Módulo de Young	GPa	14
Densidad de roca	TM/m ³	2,600	Densidad de roca	TM/m ³	2,540
Relación Poisson		0.2	Relación Poisson		0.2
V _p (teórica)	m/s	2,774	V _p (teórica)	m/s	2,480
VPP _c		847	VPP _c		337

Fuente: U.M. Chinalco

Tabla 8. *Criterio de Daño Sector Este*. Fuente: U.M. Chinalco

Criterio de Daño	PPV _c			Descripción del Daño
0.25 PPV _c a 0.625 PPV _c	84.1	a	210	Se extienden fracturas pre existentes
PPV _c a 4 PPV _c	337	a	1,346	Se generan nuevas fracturas
4 PPV _c a 8 PPV _c	1,346	a	2,693	Fracturamiento intenso
> 8 PPV _c	2,693			Nivel de fragmentación

Fuente: U.M. Chinalco

4. Sector oeste

El sector oeste se encuentra ubicado en los dominios estructurales B2 JUR y B2 DIO. El dominio estructural determinante para este sector es B2 DIO debido a que el valor de velocidad pico de partícula crítica es ligeramente menor (337 m/s) en comparación al dominio estructural B2 JUR (346m/s).

Tabla 9. *Propiedades del macizo rocoso sector oeste/ B2 JUR – B2 DIO*

D.E. B2 JUR			D.E. B2 DIO		
Propiedades	Unid.	Valor	Propiedades	Unid.	Valor
UCS	MPa	18	UCS	MPa	19
Módulo de Young	GPa	10.8	Módulo de Young	GPa	14
Densidad de roca	TM/m ³	2,720	Densidad de roca	TM/m ³	2,540
Relación Poisson		0.18	Relación Poisson		0.2
V _p (teórica)	m/s	2,076	V _p (teórica)	m/s	2,480
VPP _c		346	VPP _c		337

Fuente: U.M. Chinalco

Tabla 10. *Criterio de Daño Sector Oeste*

Criterio de Daño	PPV _c			Descripción del Daño
0.25 PPV _c a 0.625 PPV _c	84.1	a	210	Se extienden fracturas pre existentes
PPV _c a 4 PPV _c	337	a	1,346	Se generan nuevas fracturas
4 PPV _c a 8 PPV _c	1,346	a	2,693	Fracturamiento intenso
> 8 PPV _c	2,693			Nivel de fragmentación

Fuente: U.M. Chinalco

Los registros medidos corresponden a setenta y un (71) puntos de monitoreo, utilizando sismógrafos y geófonos triaxiales de campo lejano distribuidos en el tajo de manera sistemática, orientados en su mayoría a los sectores de cuidado, con la finalidad de determinar los modelos de atenuación vibracional para cada zona de propagación. La correlación entre las constantes del terreno de los modelos vibracionales y los dominios estructurales son la base de los hallazgos del estudio. Con la correlación de los puntos medidos se ha desarrollado una zonificación la cual se ha registrado en un plano con las coordenadas utilizadas en la mina. Cada registro de vibración tiene asociado una distancia de la fuente sísmica al punto de monitoreo (ubicado en coordenadas), así como una carga media y el nombre del proyecto volado.

A continuación, en el cuadro I se presentan la base de datos de vibraciones elaborada en el presente estudio, la cual sirve como registro de los datos utilizados en los modelos matemáticos y para la ubicación de los puntos (ver plano adjunto al estudio) con dichas mediciones.

Tabla 11. *Base de Datos de Vibraciones*

Proyecto	Sismógrafo	Punto	Este	Norte	Cota	Distancia (m)	Qi (Kg)	PPV (mm/s)
4575-05010	S1	P0	376324.50	8717058.41	4590.41	50	760	69.7
4575-05010	S2	P1	376291.83	8717117.60	4590.00	112	760	21.6
4575-05010	S3	P2	376251.33	8717190.97	4590.00	194	760	13.7
4380-04013	S1	P3	375582.22	8716832.09	4395.00	70	800	196.2
4380_04003	S1	P40	375811.67	8716589.11	4410.00	60	616.84	89.5
4380_04003	S2	P41	375846.21	8716513.83	4440.00	140	616.84	-
4380_04003	S3	P42	375876.16	8716445.55	4500.00	210	616.84	4.4
4590_05011_05012	S1	P43	375738.38	8717510.10	4590.00	80	821	102.4
4590_05011_05012	S2	P44	375595.31	8717485.57	4575.00	220	821	23.8
4590_05011_05012	S3	P45	375480.69	8717463.92	4583.00	400	821	5.1
4590_05011_05012	S4	P46	375267.13	8717423.92	4575.00	580	821	0.5
4380-04005	S1	P47	375692.62	8717140.41	4395.00	70	625.7	66.0
4380-04005	S2	P48	375626.56	8716854.40	4395.00	160	625.7	89.1
4380-04005	S3	P49	375668.28	8716899.79	4395.00	100	625.7	112.8
4380-04005	S4	P50	375643.78	8717220.75	4395.00	165	625.7	30.8
4380-04005	S5	P51	375704.52	8716939.20	4395.00	50	625.7	226.1
4740_03012	S1	P52	374902.00	8716267.92	4755.39	50	544.5	79.4
4740_03012	S2	P53	375129.07	8716097.61	4732.77	106	544.5	38.8
4740_03012	S3	P54	375267.68	8716026.50	4726.54	260	544.5	14.8
4590_05010	S1	P55	375974.87	8717430.34	4605.38	70	744.9	134.6
4590_05010	S2	P56	375945.62	8717453.57	4605.24	110	744.9	71.3
4590_05010	S3	P57	375917.20	8717473.21	4605.28	150	744.9	35.9
4380_04001	S1	P58	375826.46	8717016.94	4549.53	30	742.7	172.0
4380_04001	S2	P59	375778.60	8717071.70	4394.48	107	742.7	99.7
4380_04001	S3	P60	375920.36	8716693.11	4395.18	73	742.7	156.6
4740_03011	S1	P61	374907.76	8716489.43	4755.23	64	620	96.6
4740_03011	S2	P62	374896.93	8716538.79	4755.62	114	620	71.3
4590_05009_0520	S1	P63	376048.80	8717346.80	4604.90	50	494.5	83.6
4590_05009_0520	S2	P64	376009.00	8717377.60	4604.80	100	494.5	48.9
4590_05009_0520	S3	P65	375964.10	8717412.40	4604.60	150	494.5	37.6
4395_04015_04016	S1	P66	375537.42	8716707.90	4410.28	18	416.35	121.0
4395_04015_04016	S2	P67	375514.36	8716700.90	4425.35	48	416.35	81.3
4395_04015_04016	S3	P68	375281.67	8717028.46	4574.74	372	416.35	5.6
4395_04014	S1	P69	375513.46	8716785.31	4410.47	28.8	724.5	28.6
4395_04014	S2	P70	375502.59	8716743.19	4424.74	73.3	724.5	17.1
4395_04014	S3	P71	375489.65	8716692.74	4441.74	282.68	724.5	10.6

Fuente: U.M. Chinalco

4.1.1. Zonas de propagación de vibración

Se han determinado diez (10) Zonas de Propagación de Vibración (ZPV), de acuerdo a las correlaciones entre los puntos medidos de vibración y las distancias escalares (cociente entre carga media y distancia). El modelo de vibración de la

zona ha tenido como criterio de selección el coeficiente de determinación de los datos.

1. ZPV_1: B1 JUR

La zona de propagación de vibración 1 se encuentra localizada en el dominio estructural B1 JUR, los puntos de monitoreo registrados son: P59, P58, P47, P35, P36 y P50 los cuales están orientados hacia la pared norte del tajo.

Tabla 12. *Distancias escaladas DV, DH DL vs Velocidad pico de partícula (mm/s)*

Puntos	D _V	D _H	DL	PPV
P59	3.93	11.82	0.03	100
P58	1.10	3.31	0.01	172
P47	2.80	8.18	0.03	66
P35	2.67	7.92	0.02	108.5
P36	5.71	16.98	0.04	38.52
P50	6.60	19.29	0.05	30.76

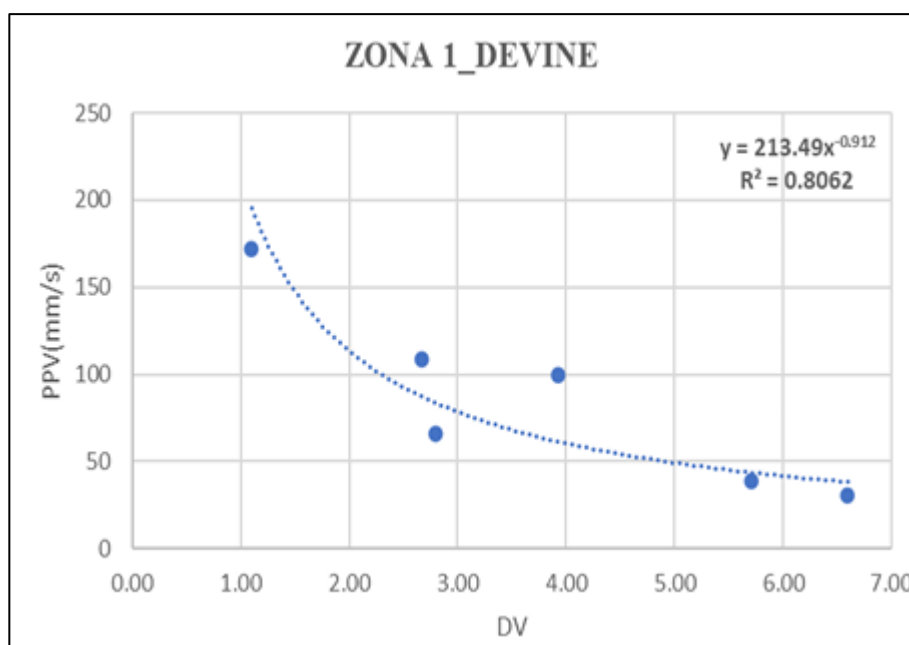


Figura 2. Zona 1 (B1 JUR) Modelo Devine Duvall.

Fuente: U.M. Chinalco

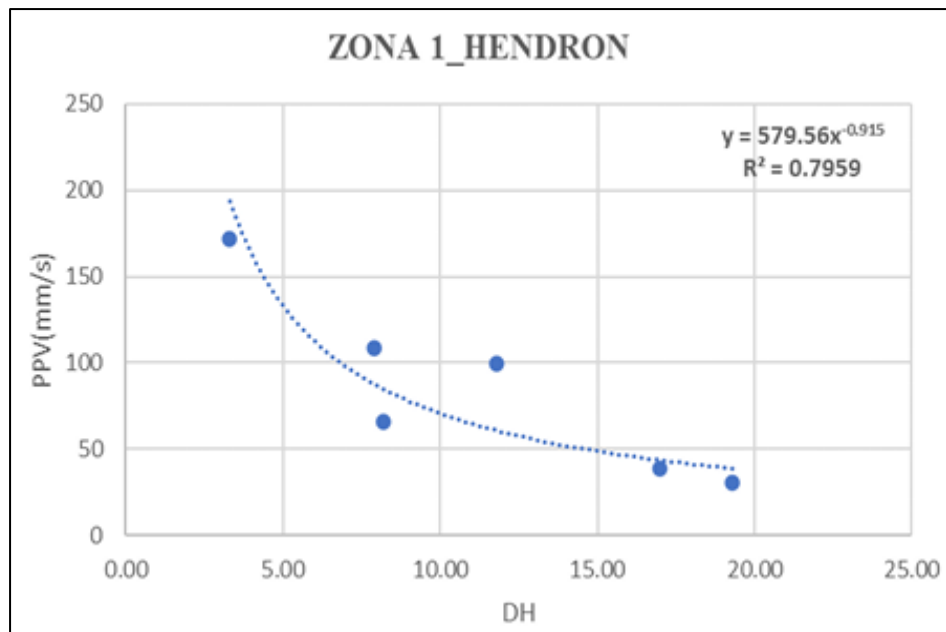


Figura 3. Zona 1 (B1 JUR) Modelo de Hendron.

Fuente: U.M. Chinalco

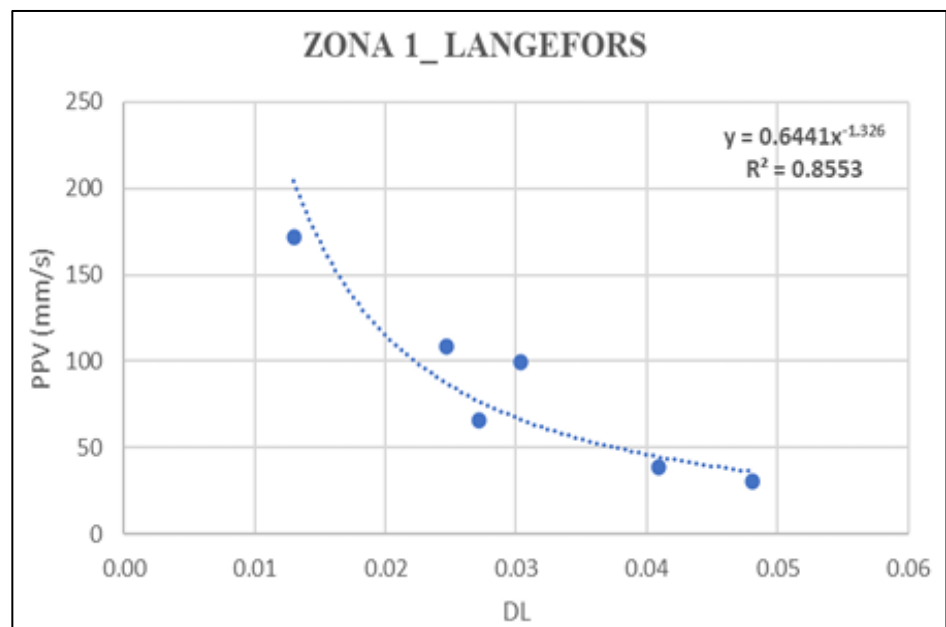


Figura 4. Zona 1 (B1 JUR) Modelo de Langefors

Fuente: U.M. Chinalco

2. ZONA 2: BRECHA / B2 JUR

La Zona de Propagación de Vibración 2 se encuentra localizada en los dominios estructurales BRECHA y B2 JUR, los puntos de monitoreo registrados son: P19, P20, P3, P4, P5, P71, P9, P10 los cuales están orientados hacia el sur oeste del tajo.

Tabla 13. *Distancias escaladas DV, DH DL vs Velocidad pico de partícula (mm/s)*

Puntos	D _V	D _H	DL	PPV
P19	3.26	9.06	0.04	100.00
P20	6.99	19.42	0.06	32.63
P3	2.5	7.5	0.0	196.2
P4	5.3	16.2	0.0	96.3
P5	7.6	23.3	0.0	23.8
P71	10.50	31.47	0.06	10.60
P9	2.77	8.12	0.03	176.10
P10	5.53	16.24	0.04	86.78

Fuente U.M. Chinalco

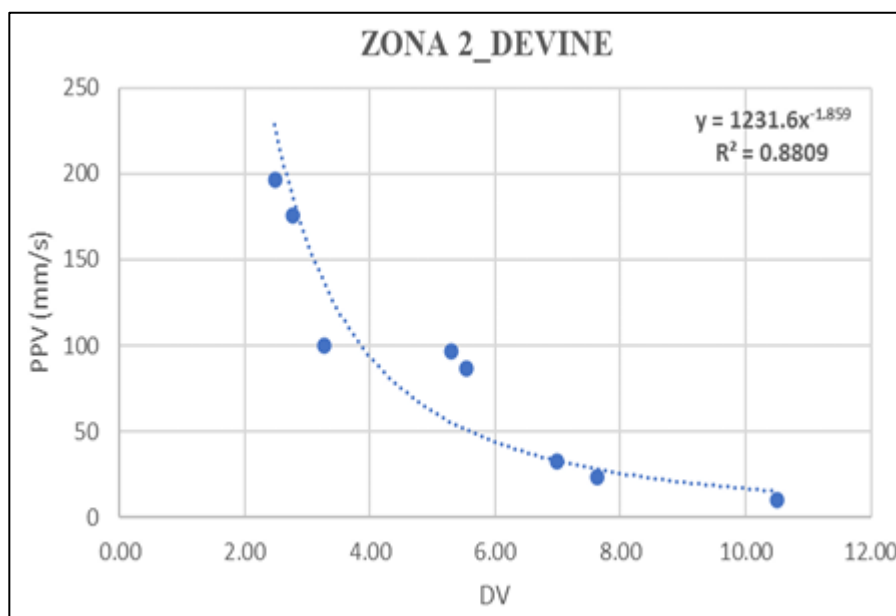


Figura 5. *Zona 2 (BRECHA / B2 JUR) Modelo Devine Duvall*

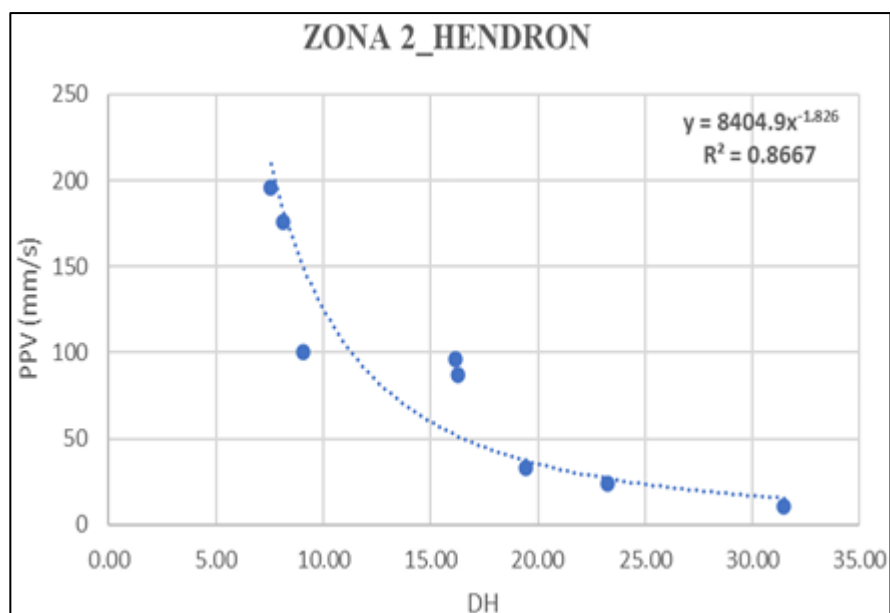


Figura 6. Zona 2 (BRECHA / B2 JUR) Modelo Hendron

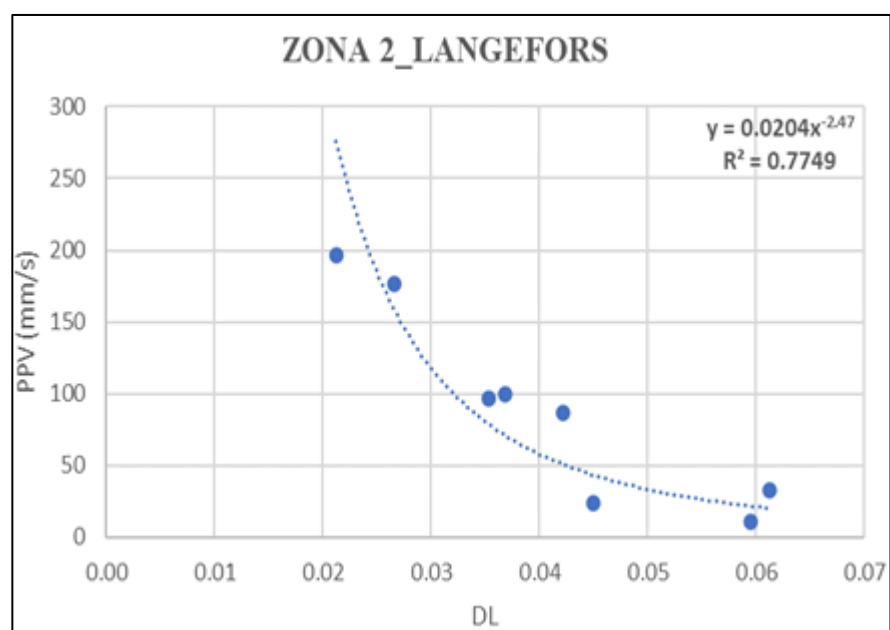


Figura 7. Zona 2 (BRECHA / B2 JUR), Modelo Langefors

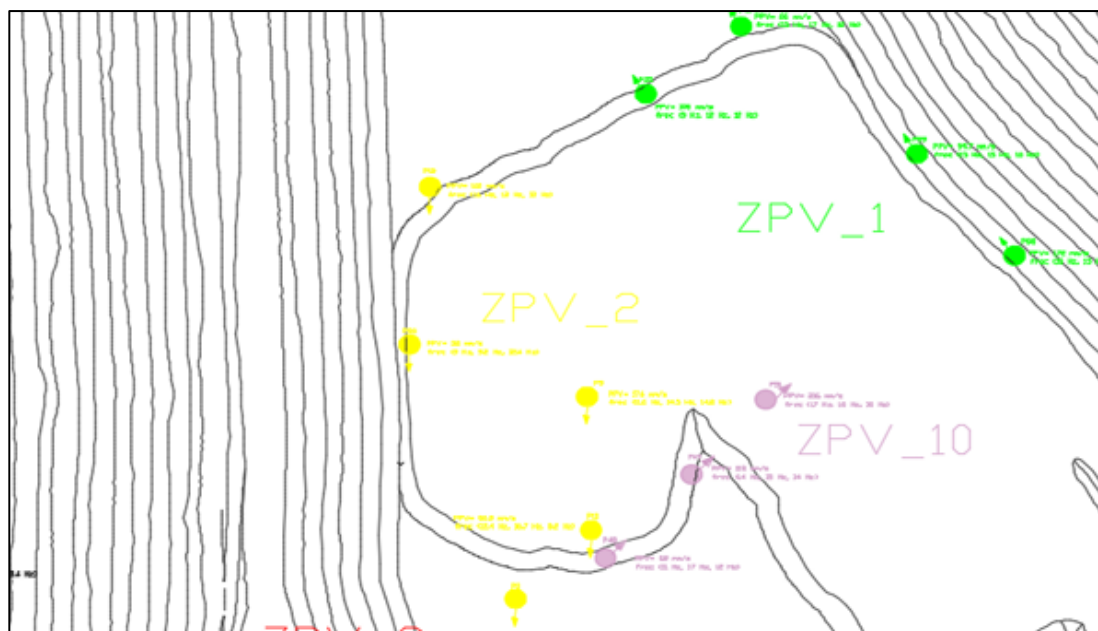


Figura 8. ZPV_2 Puntos de color amarillo

3. ZONA 3: B2 GRND B3 GRND

La zona de propagación de vibración 3 se encuentra localizada en los dominios estructurales B2 GRND B3 GRND, los puntos de monitoreo registrados son: P29, P30, P31 y P60 los cuales están orientados hacia la pared sur del tajo.

Tabla 14. Distancias escaladas DV, DH DL vs Velocidad pico de partícula (mm/s).

Puntos	D _V	D _H	DL	PPV
P29	2.4	7.5	0.02	109.0
P30	5.2	16.0	0.03	57.1
P31	10.6	32.6	0.06	49.4
P60	2.7	8.1	0.02	156.6

Fuente U.M. Chinalco

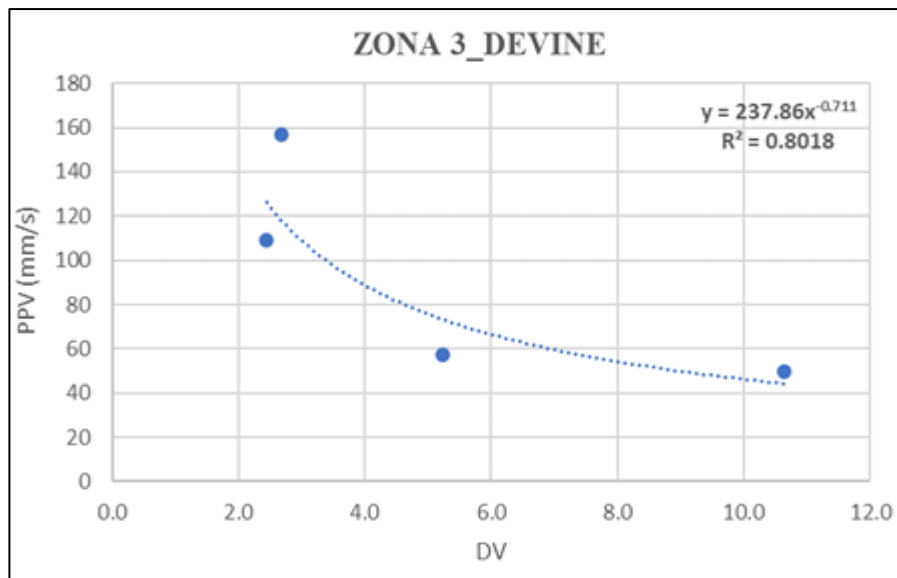


Figura 9. Zona 3 (BE GRND / B3 GRND) Modelo Devine Duvall

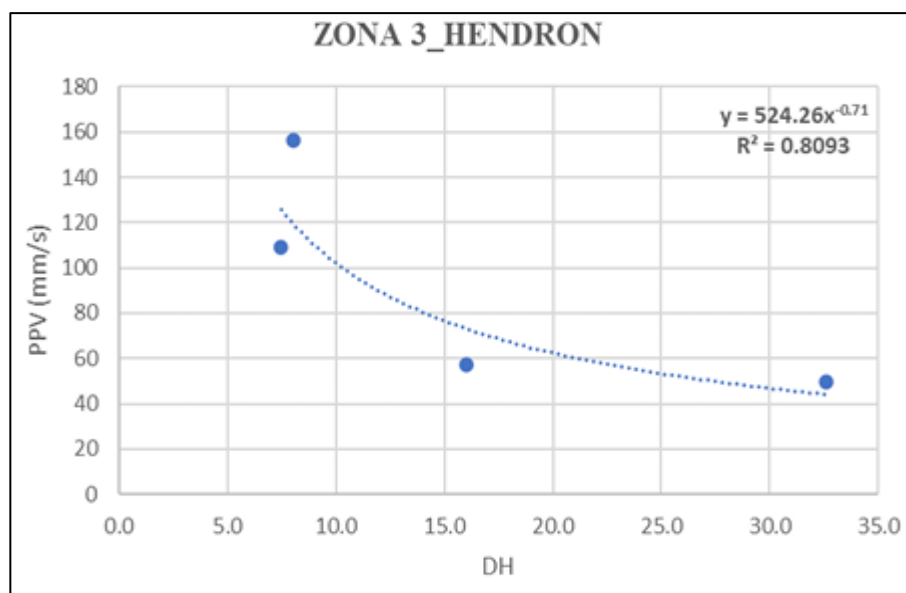


Figura 10. Zona 3 (BE GRND / B3 GRND) Modelo Hendron

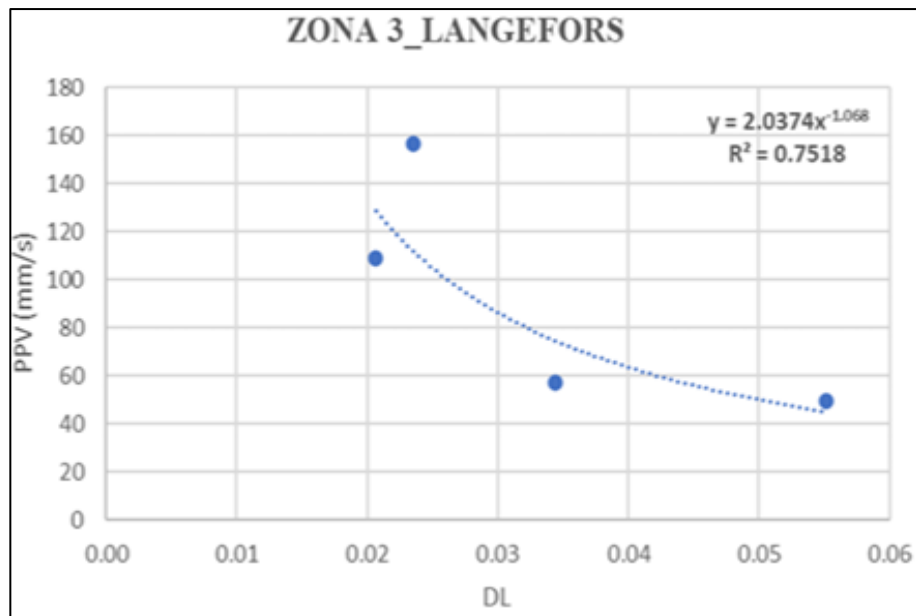


Figura 11. Zona 3 (BE GRND / B3 GRND) Modelo Langefors

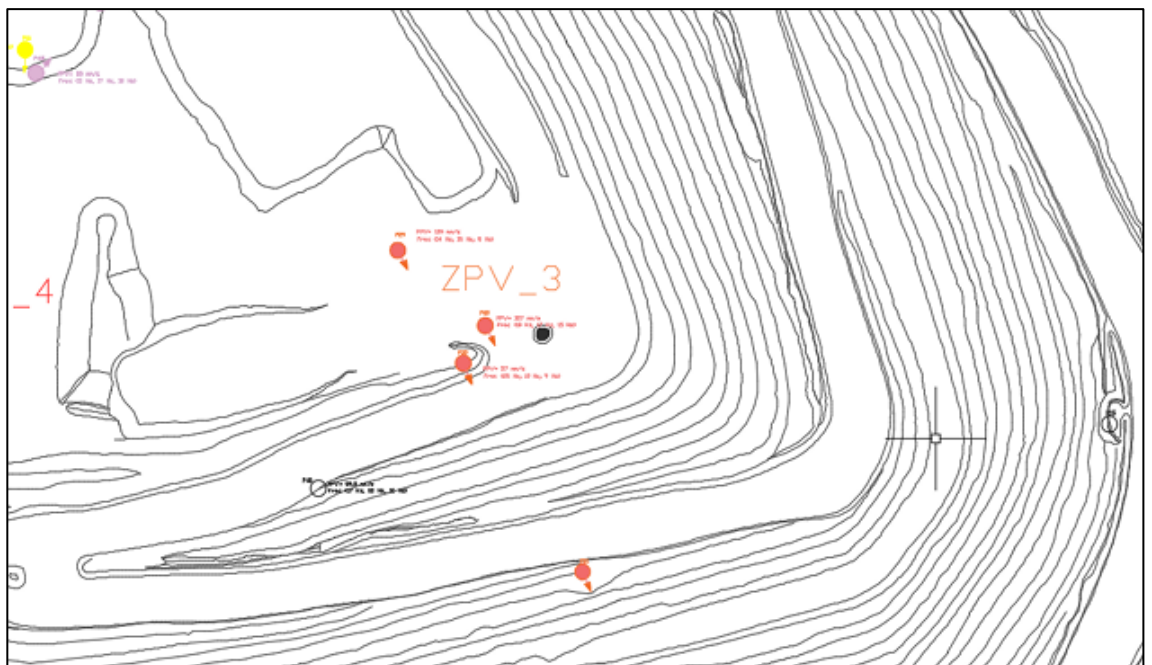


Figura 12. ZPV_3 Puntos en color Anaranjado

4. ZONA 4: B2 JUR (Orientación 1)

La zona de propagación de vibración 4 se encuentra localizada en el dominio estructural B2 JUR, los puntos de monitoreo registrados son: P66, P67 y P71 los cuales están orientados hacia la pared oeste del tajo.

Tabla 15. *Distancias Escaladas DV, DH DL vs Velocidad Pico de Partícula (mm/s)*

Puntos	D _V	D _H	DL	PPV
P66	0.88	2.41	0.02	121
P67	2.35	6.43	0.03	81.28
P71	10.50	31.47	0.06	10.6

Fuente U.M. Chinalco

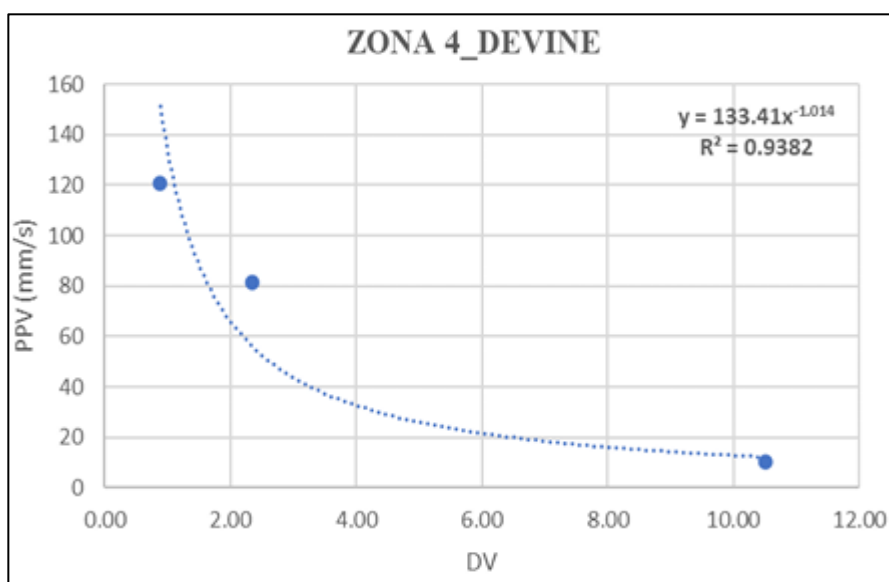


Figura 13. *Zona 4 (B2 JUR) Modelo Devine Duvall*

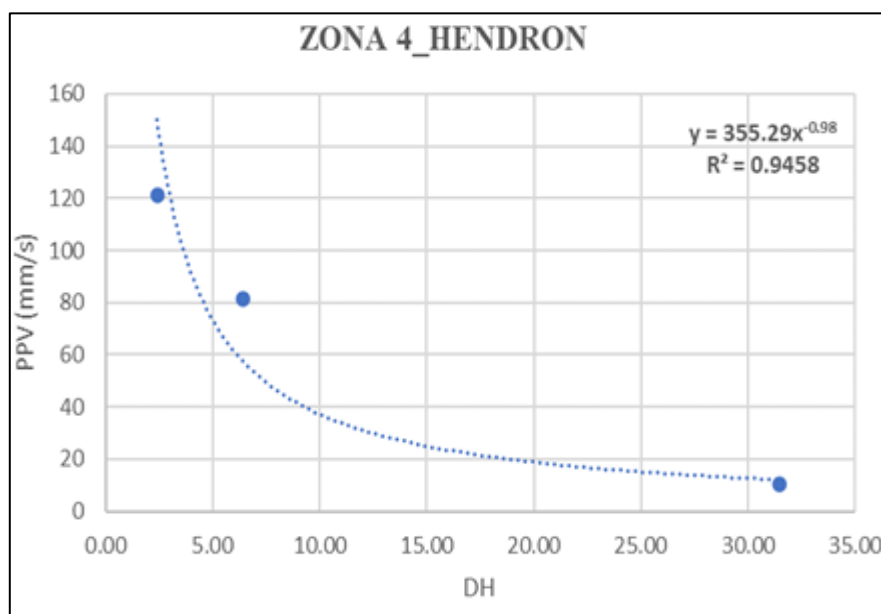


Figura 14. Zona 4 (B2 JUR) Modelo Hendron

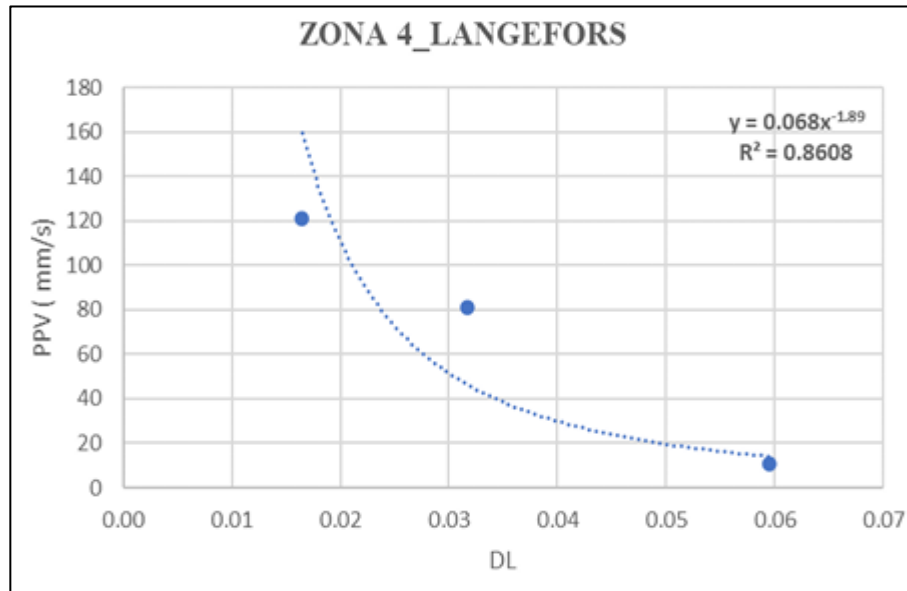


Figura 15. Zona 4 (B2 JUR) Modelo Langefors

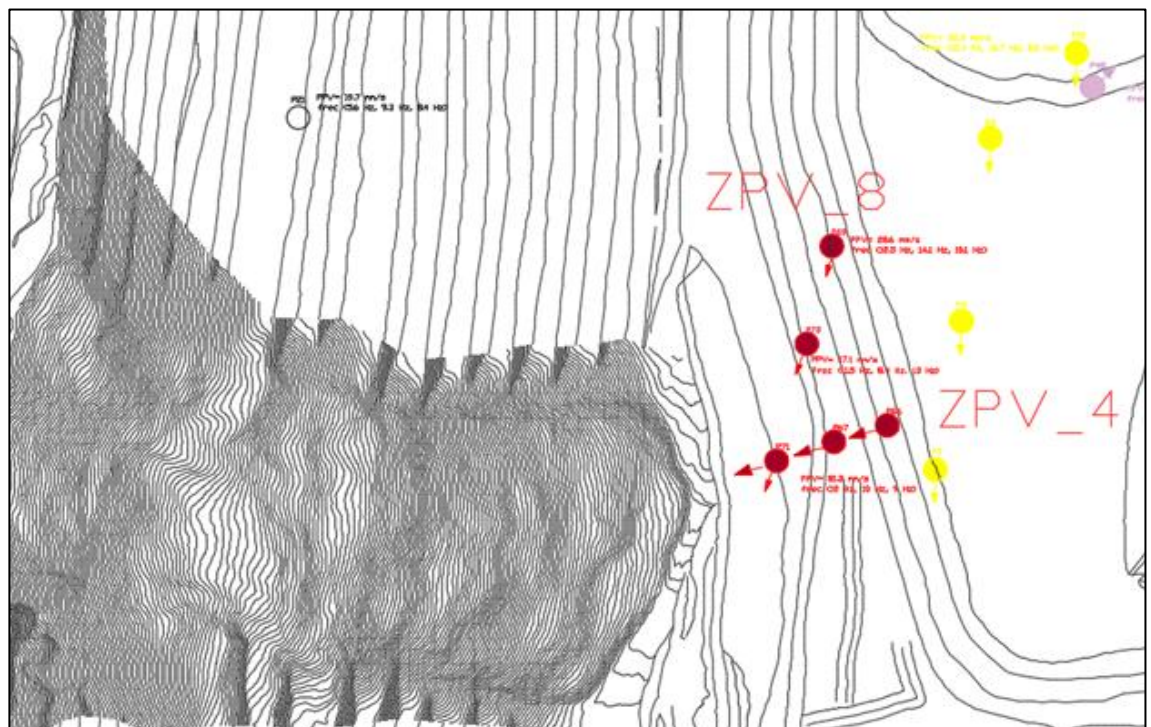


Figura 16. ZPV_4 Puntos de color Rojo

5. ZONA 5: B1 JUR / B1 GRND

La zona de propagación de vibración 5 se encuentra localizada en los dominios estructurales B1 JUR y B1 GRND, los puntos de monitoreo registrados son: P64, P65, P55, P56, P57, P6, P7, P8, P63, P0, P2, los cuales están orientados hacia el norte en la zona este del tajo en la cota 4,600 msnm.

Tabla 16. *Distancias escaladas DV, DH DL vs Velocidad pico de partícula (mm/s)*

Puntos	D _V	D _H	DL	PPV
P64	4.5	12.6	0.044	49
P65	6.7	19.0	0.057	38
P55	2.6	7.7	0.023	135
P56	4.0	12.1	0.031	71
P57	5.5	16.5	0.038	36
P6	2.8	8.6	0.023	76.52
P7	4.6	14.0	0.032	35.1
P8	6.9	20.9	0.042	20.95
P63	2.248	6.323	0.027	83.6
P0	1.8	5.5	0.018	69.68
P2	7.0	21.3	0.044	13.7

Fuente U.M. Chinalco

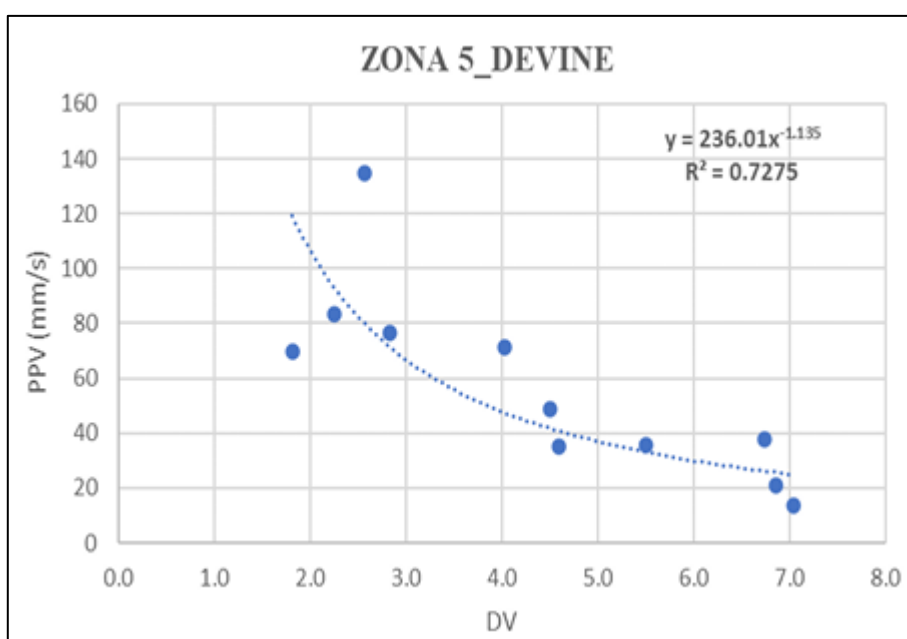


Figura 17. *Zona 5 (B1 JUR/ B1 GRND) Modelo Devine Duvall*

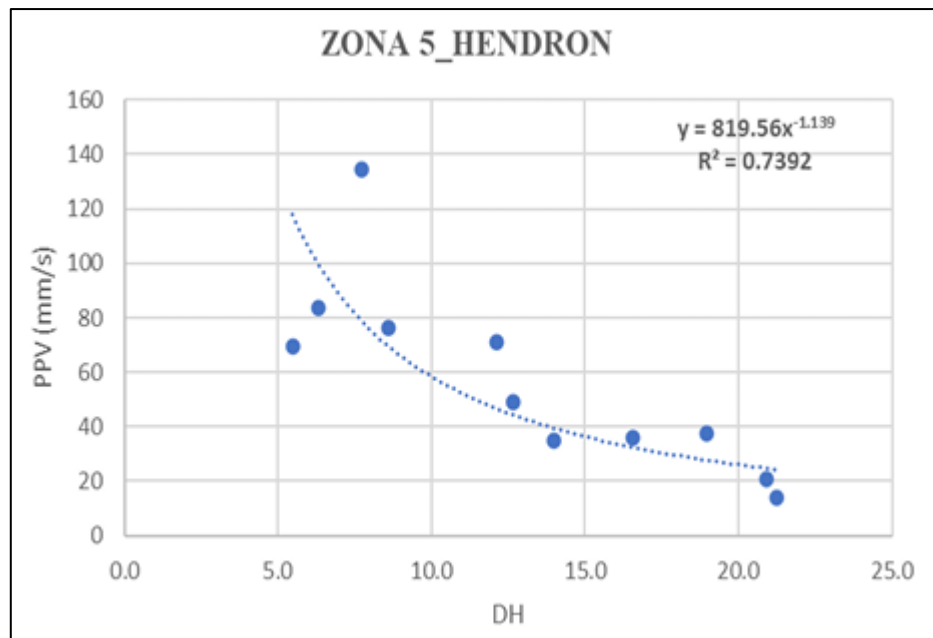


Figura 18. Zona 5 (B1 JUR/ B1 GRND) Modelo Hendron

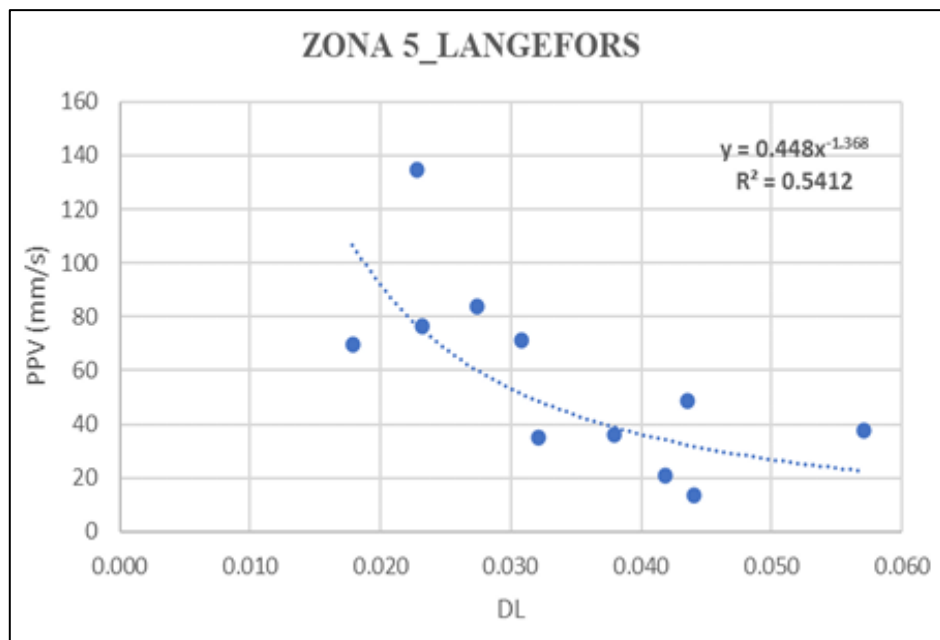


Figura 19. Zona 5 (B1 JUR/ B1 GRND) Modelo Langefors

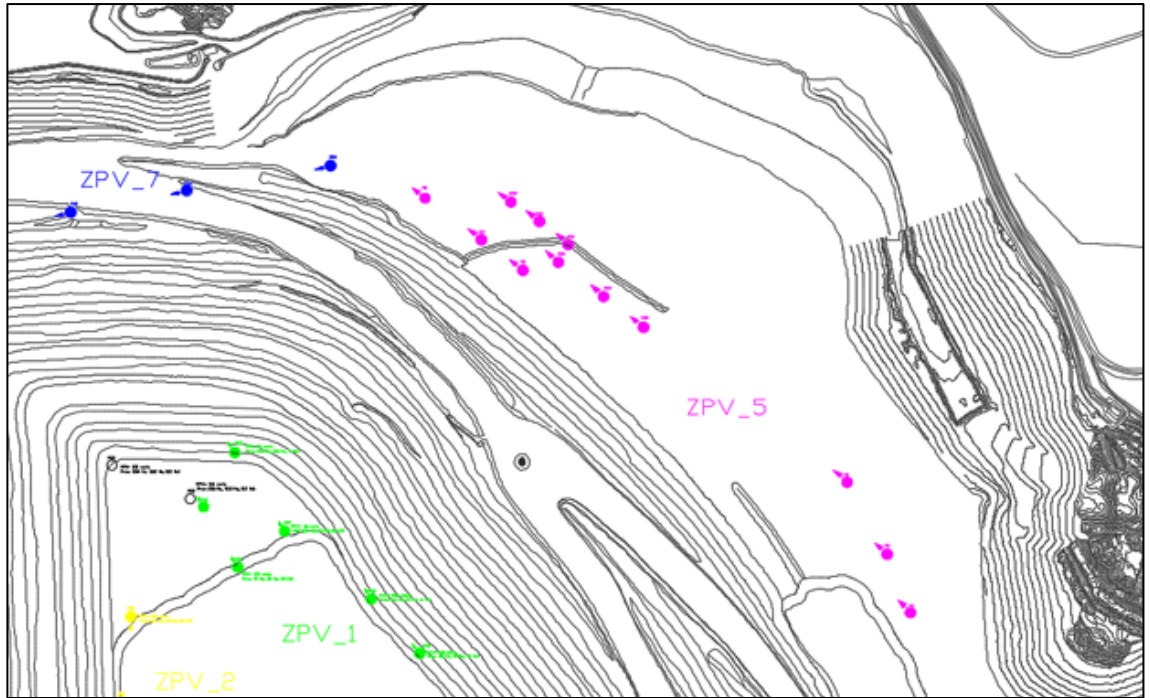


Figura 20. ZPV_5 Puntos en color Magenta

6. ZONA 6: B2 DIO

La zona de propagación de vibración 6 se encuentra localizada en el dominio estructural B2 DIO, los puntos de monitoreo registrados son: P61, P62, P12, P26, P37, P38 y P39 los cuales están orientados hacia el norte en la zona oeste del tajo en la cota 4,755 msnm.

Tabla 17. Distancias escaladas DV, DH DL vs Velocidad pico de partícula (mm/s)

Puntos	D _V	D _H	DL	PPV
P61	2.57	7.51	0.03	96.6
P62	4.58	13.37	0.04	71.3
P12	3.14	8.84	0.03	102.0
P26	8.01	22.81	0.06	43.5
P37	3.38	9.28	0.04	92.0
P38	6.75	18.55	0.06	34.7
P39	12.06	33.13	0.09	14.9

Fuente U.M. Chinalco

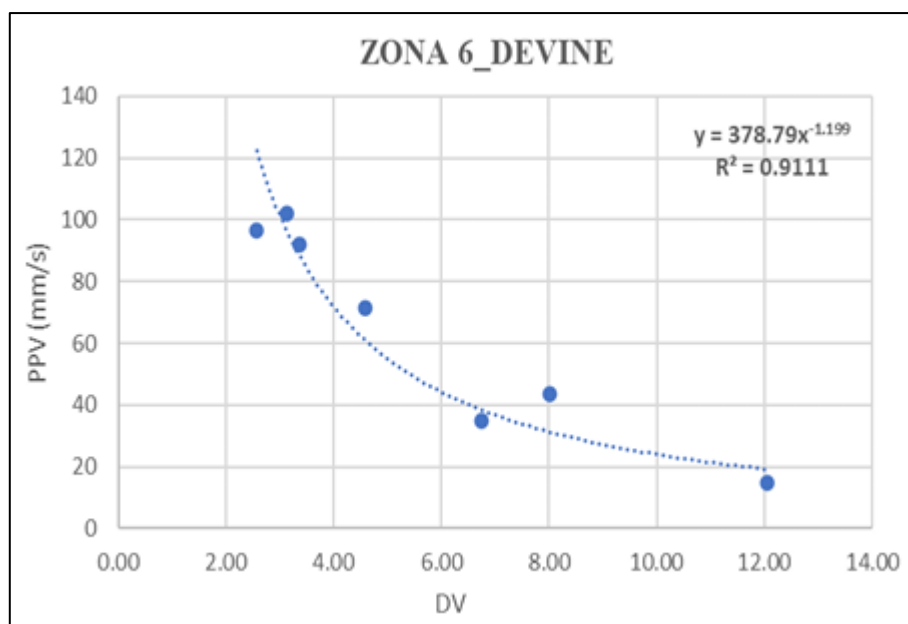


Figura 21. Zona 6 (B2 DIO) Modelo Devine Duvall

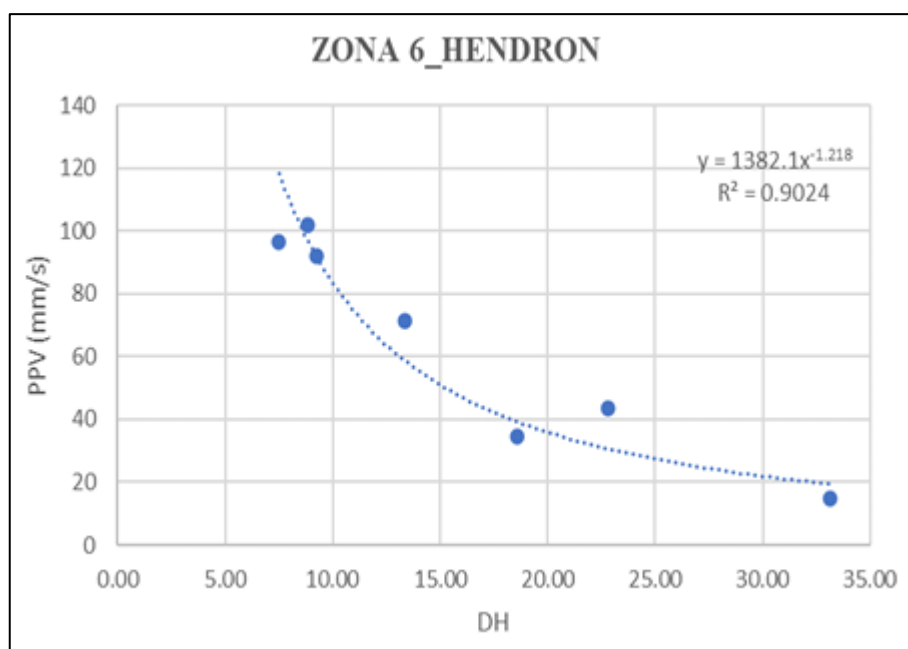


Figura 22. Zona 6 (B2 DIO) Modelo Hendron

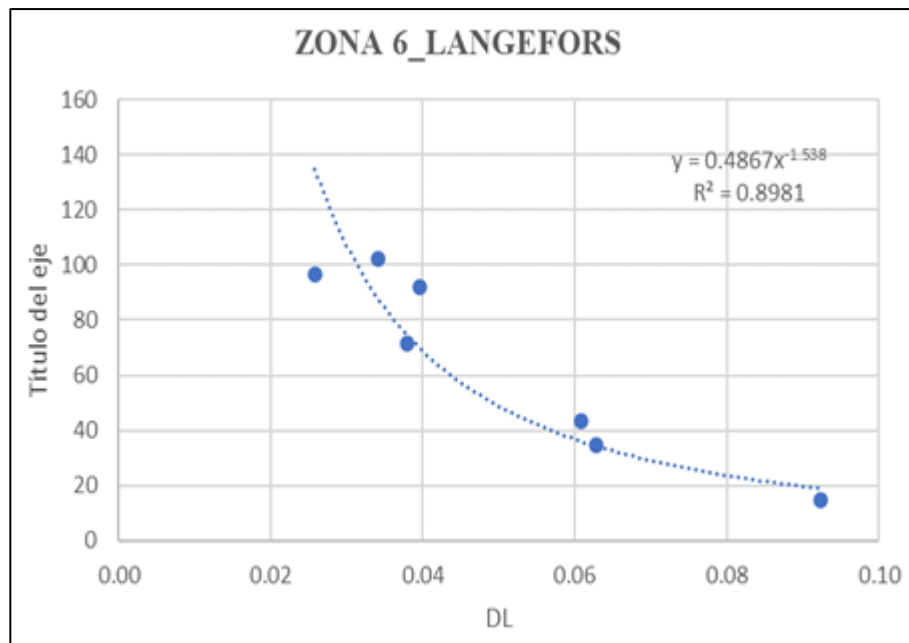


Figura 23. Zona 6 (B2 DIO) Modelo Langefors



Figura 24. ZPV_6 Puntos en color Cian

7. ZONA 7: B1 JUR

La zona de propagación de vibración 7 se encuentra localizada en el dominio estructural B1 JUR, los puntos de monitoreo registrados son: P43, P44, P45, P46

los cuales están orientados hacia el oeste en la pared norte del tajo.

Tabla 18. *Distancias escaladas DV, DH DL vs Velocidad pico de partícula (mm/s)*

Puntos	D _V	D _H	DL	PPV
P43	2.79	8.54	0.02	102.4
P44	7.68	23.49	0.04	23.8
P45	13.96	42.72	0.07	5.1
P46	20.24	61.94	0.08	0.5

Fuente U.M. Chinalco

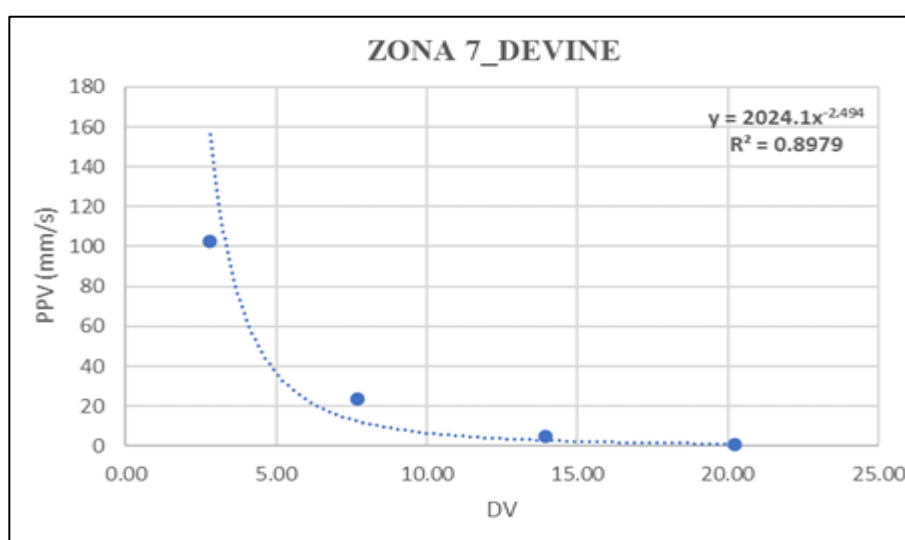


Figura 25. Zona 7 (B1 JUR) Modelo Devine Duvall

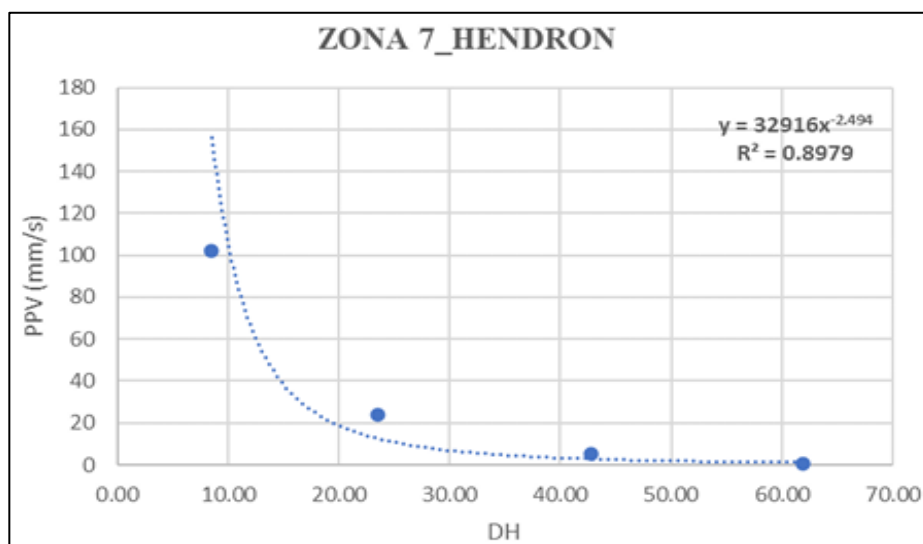


Figura 26. Zona 7 (B1 JUR) Modelo Hendron

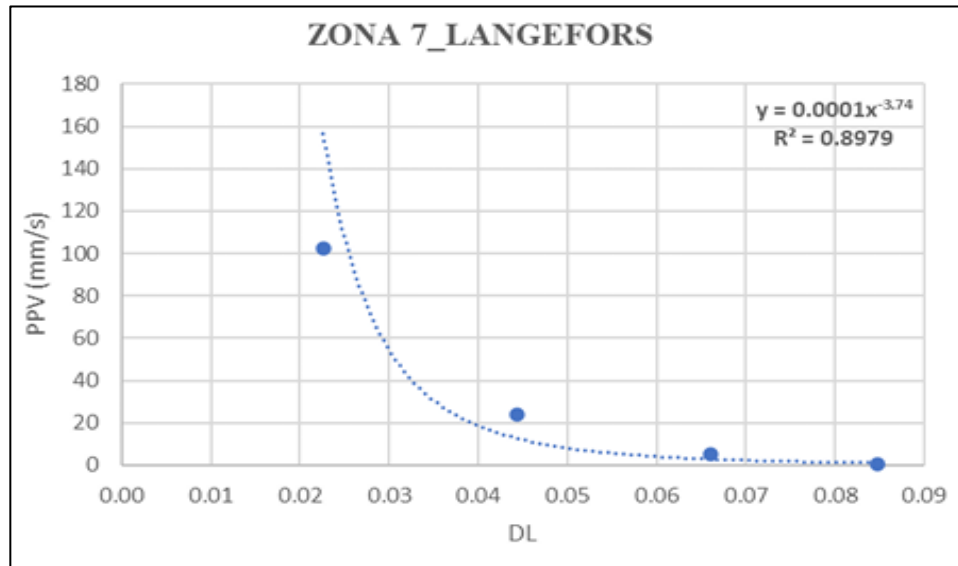


Figura 27. Zona 7 (B1 JUR) Modelo Langefors

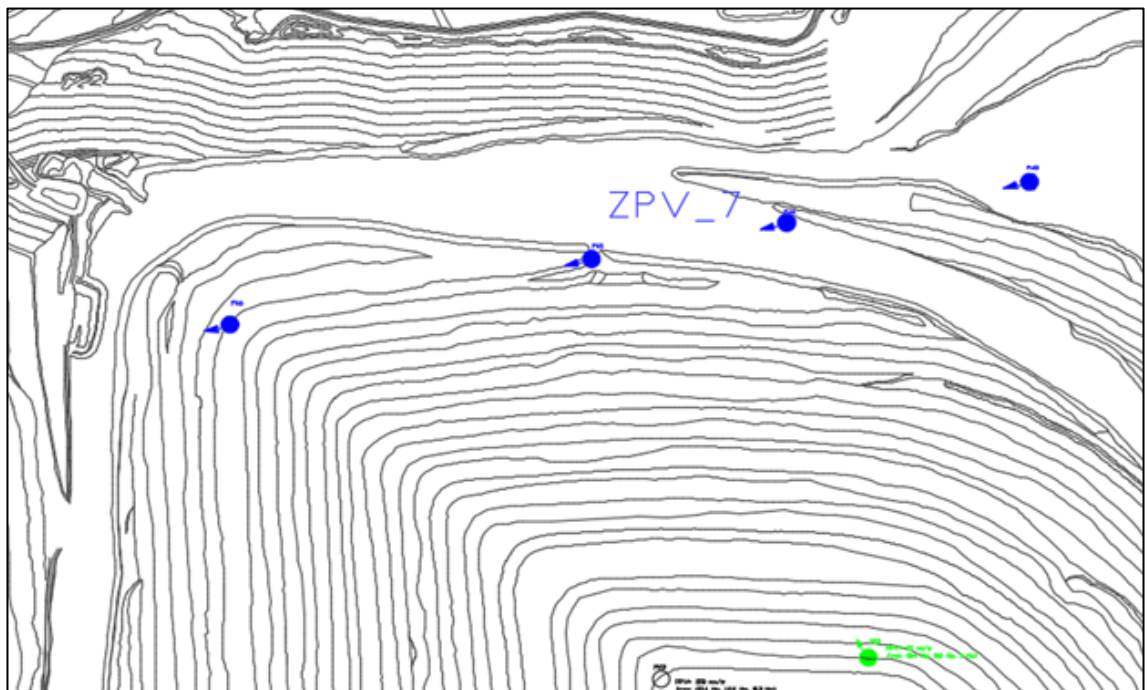


Figura 28. ZPV_7 Puntos en color azul

8. ZONA 8: B2 JUR

La zona de propagación de vibración 8 se encuentra localizada en el dominio estructural B2 JUR, los puntos de monitoreo registrados son: P69, P70, P71 los cuales están orientados hacia la pared oeste del tajo.

Tabla 19. *Distancias Escaladas DV, DH DL vs Velocidad Pico de Partícula (mm/s)*

Puntos	D _V	D _H	DL	PPV
P69	1.070	3.207	0.013	28.57
P70	2.723	8.161	0.024	17.11
P71	10.502	31.474	0.059	10.6

Fuente U.M. Chinalco

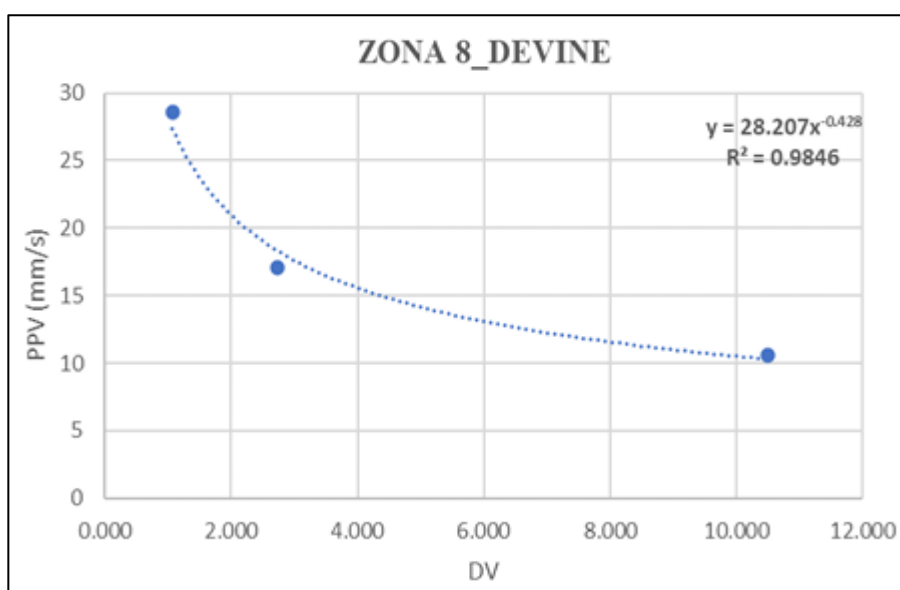


Figura 29. Zona 8 (B2 JUR) Modelo Devine Duvall

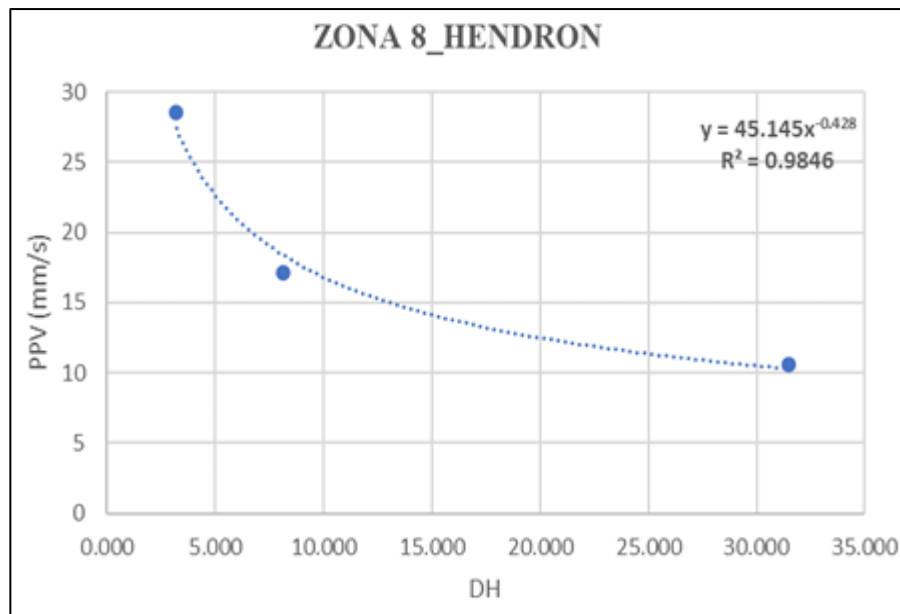


Figura 30. Zona 8 (B2 JUR) Modelo Hendron

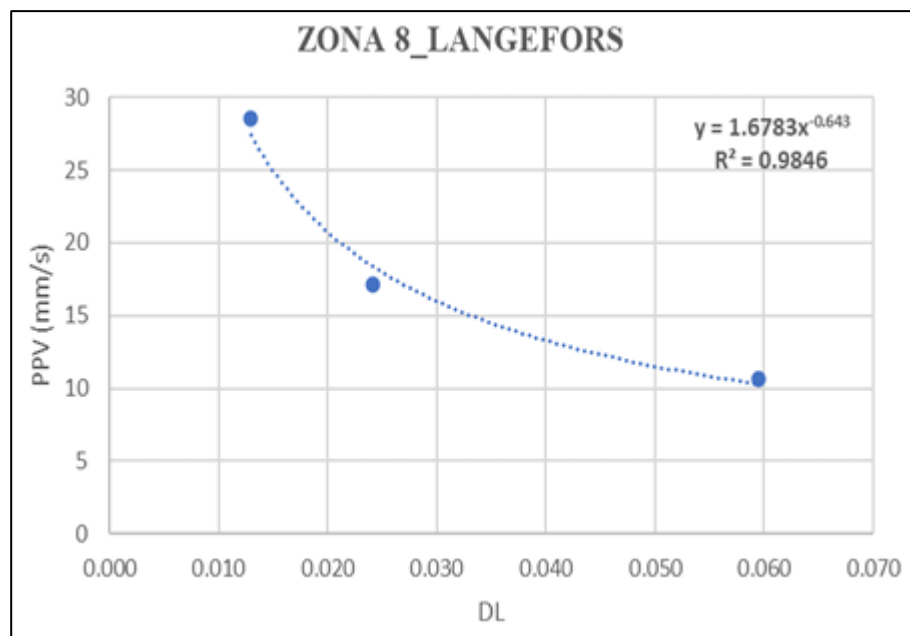


Figura 31. Zona 8 (B2 JUR) Modelo Langefors

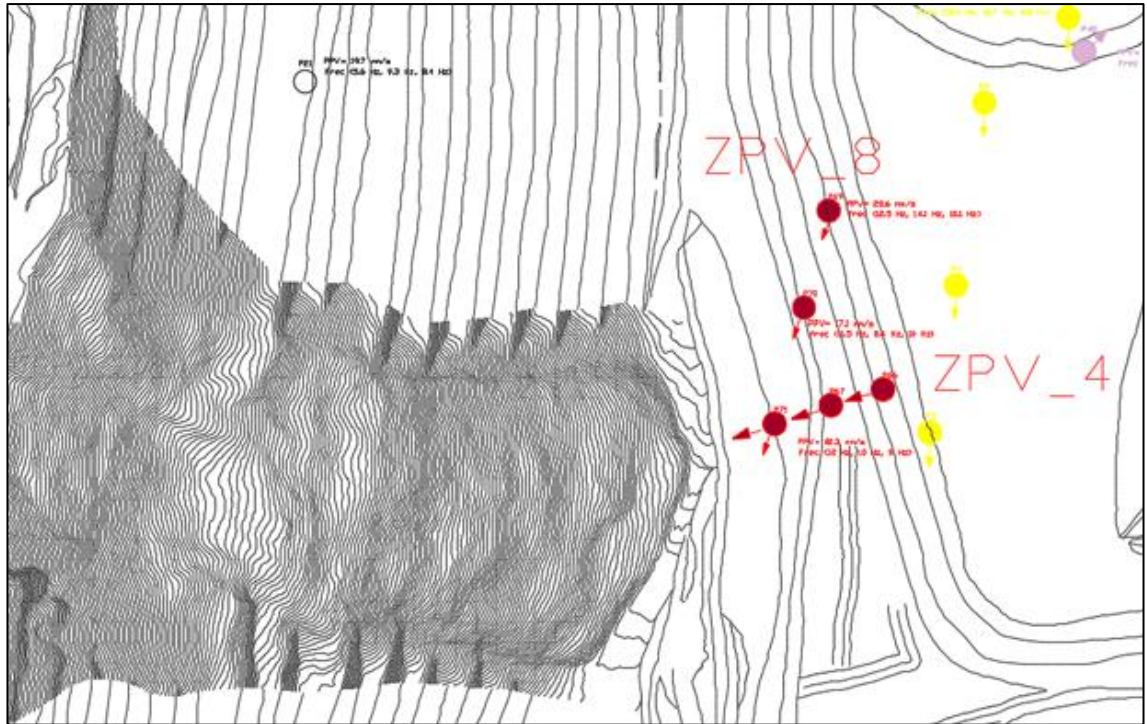


Figura 32. ZPV_8 Puntos en color Rojo

9. ZONA 9: B2 DIO

La zona de propagación de vibración 9 se encuentra localizada en el dominio estructural B2 DIO, los puntos de monitoreo registrados son: P32, P33 y P34, los cuales están orientados hacia el oeste del tajo.

Tabla 19. Distancias escaladas DV, DH DL vs Velocidad pico de partícula (mm/s)

Puntos	D _V	D _H	DL	PPV
P32	4.44	12.54	0.04	26.27
P33	7.54	21.31	0.06	23.81
P34	9.99	28.20	0.07	7.4

Fuente U.M. Chinalco

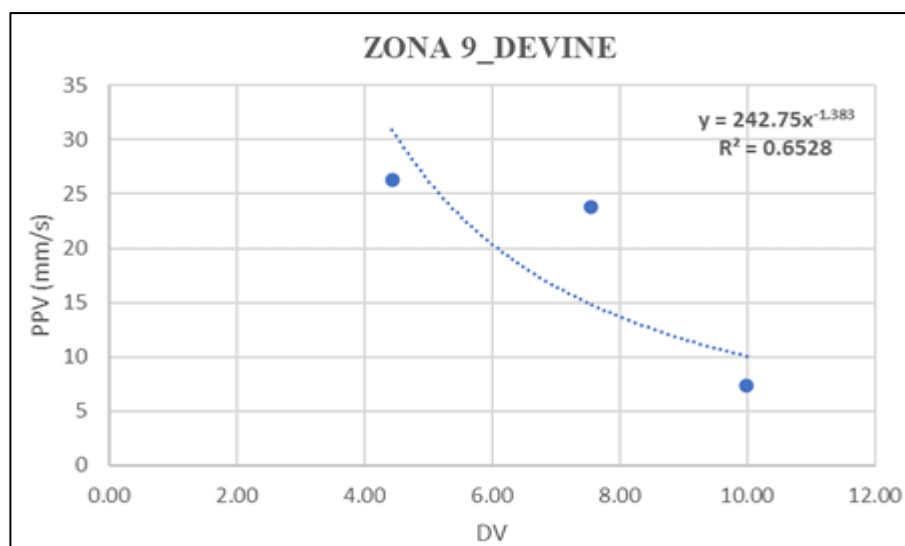


Figura 33. Zona 9 (B2 DIO) Modelo Devine Duvall

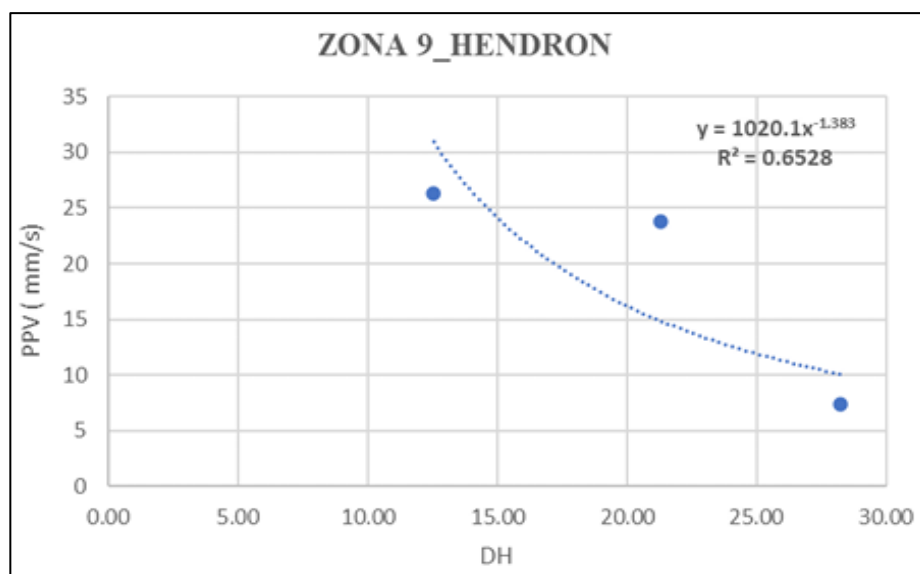


Figura 34. Zona 9 (B2 DIO) Modelo Hedron

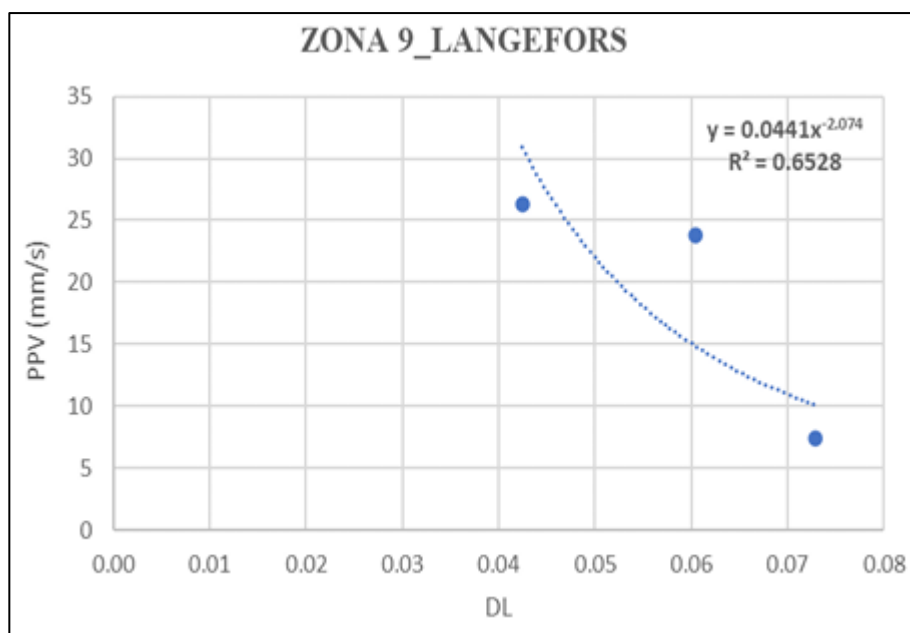


Figura 35. Zona 9 (B2 DIO) Modelo Langefors



Figura 36. ZPV_9 Puntos en color verde

10. ZONA 10: B1 GRND

La zona de propagación de vibración 10 se encuentra localizada en el dominio estructural B1 GRND, los puntos de monitoreo registrados son: P48, P49 y P51, los cuales están orientados hacia la pared este del tajo.

Tabla 20. Distancias escaladas DV, DH DL vs Velocidad pico de partícula (mm/s).

Puntos	D _V	D _H	DL	PPV
P48	6.40	18.71	0.05	89.1
P49	4.00	11.69	0.03	112.79
P51	2.00	5.85	0.02	226.1

Fuente U.M. Chinalco

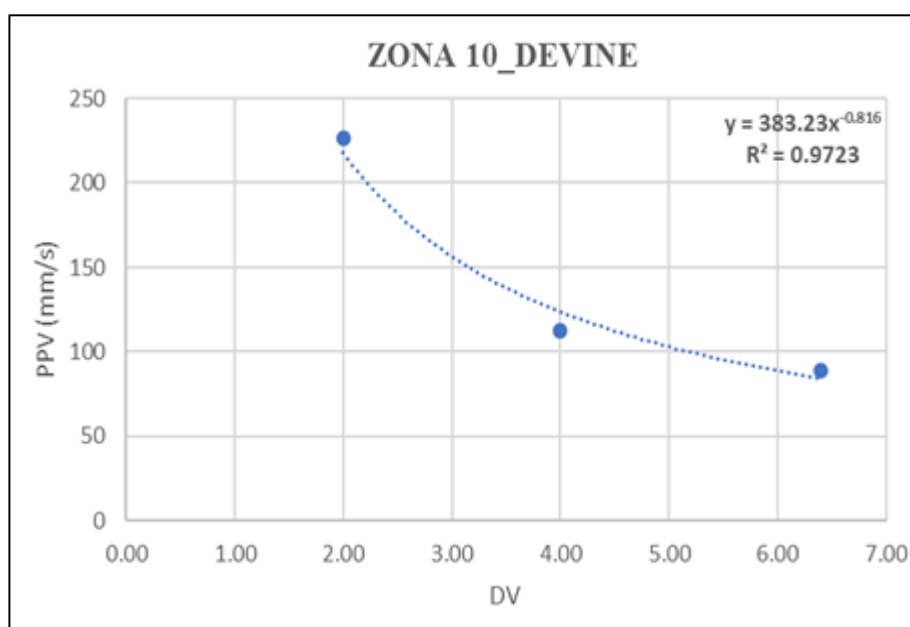


Figura 37. Zona 10 (B1 GRND) Modelo Devine Duvall

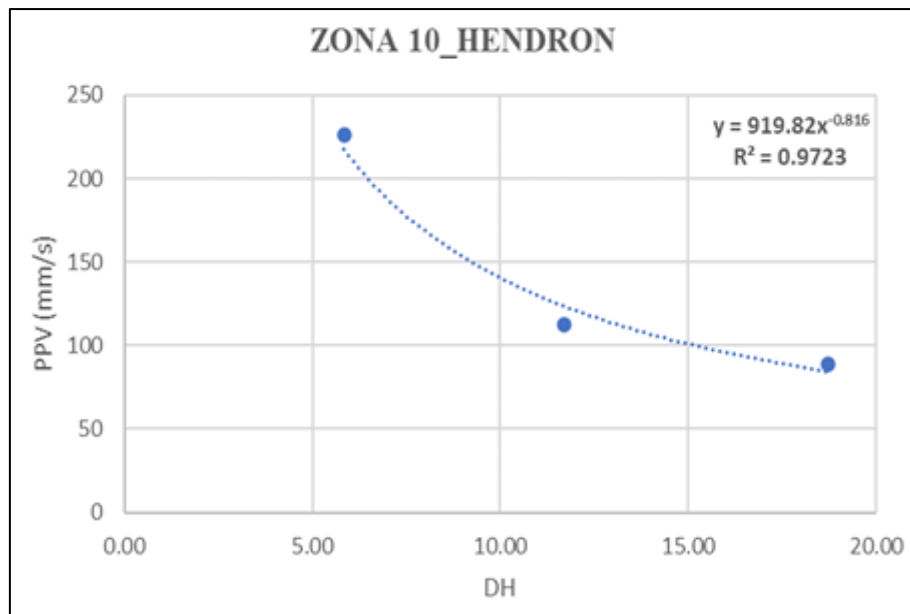


Figura 38. Zona 10 (B1 GRND) Modelo Hendron

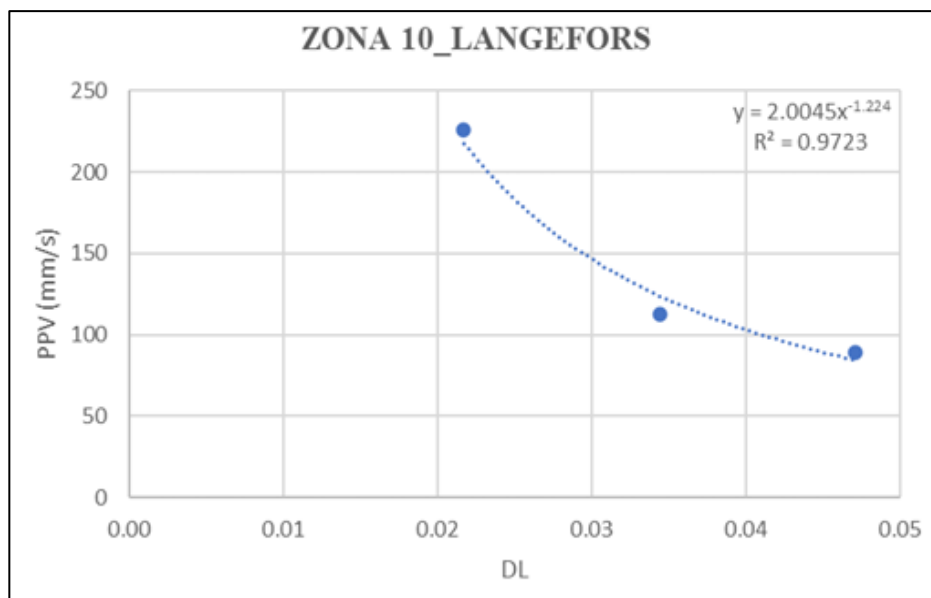


Figura 39. Zona 10 (B1 GRND) Modelo Langefors

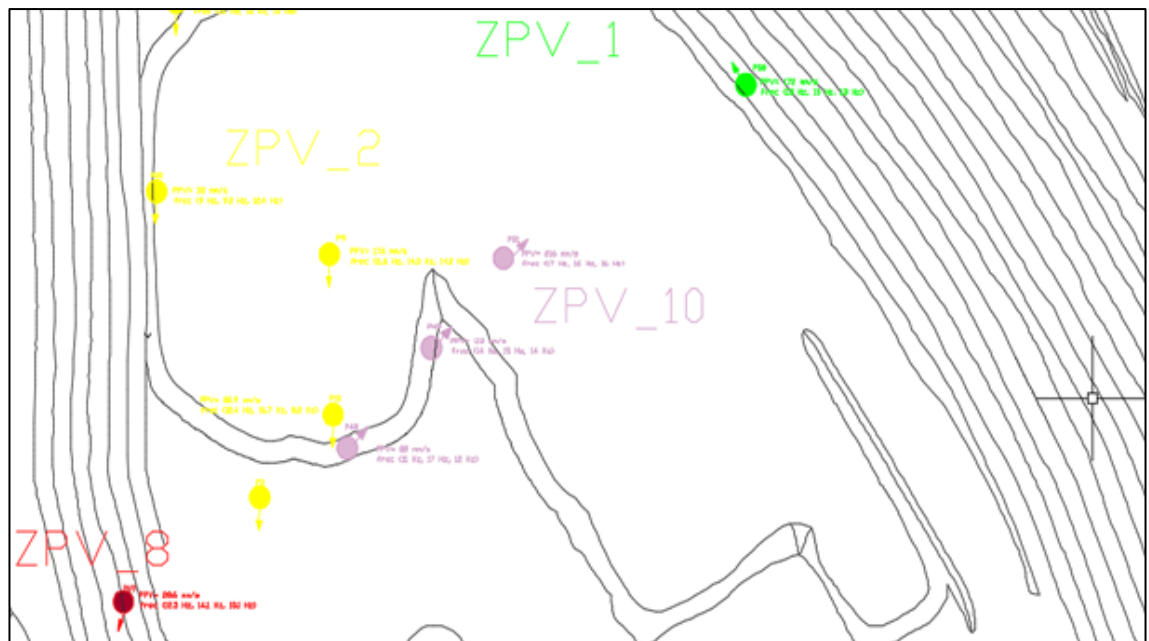


Figura 40. ZPV_10 Puntos en color Morado

4.1.2. Criterios de daño y ábacos de diseño

De acuerdo a la información geomecánica disponible para el estudio (producto de ensayos de laboratorio a nivel de matriz) y antecedentes geomecánicos se elaboraron los criterios de daño para los cuales se propone un rango de valores aceptables para la vibración (límite inferior y límite superior).

Por debajo del límite inferior la vibración generada por la voladura no tiene el potencial de causar extensión de fracturas preexistentes, mientras que por encima del límite superior existe la posibilidad de extender dichas fracturas.

A continuación, se presenta los denominados ábacos de diseño para cada sector de cuidado, los cuales tienen por finalidad mostrar los niveles de vibraciones que se producirán a distintas distancias producto de determinadas Cargas Medias (Q_i) explosivas.

A partir de la intersección de los límites inferior y superior con cualquiera de las curvas (asociadas a ciertos kilos de explosivo) se puede obtener la distancia en metros en la cual esa combinación de carga y explosivo genera la velocidad pico de partícula límite.

Los ábacos de diseño estimados para cada sector de cuidado son los siguientes:

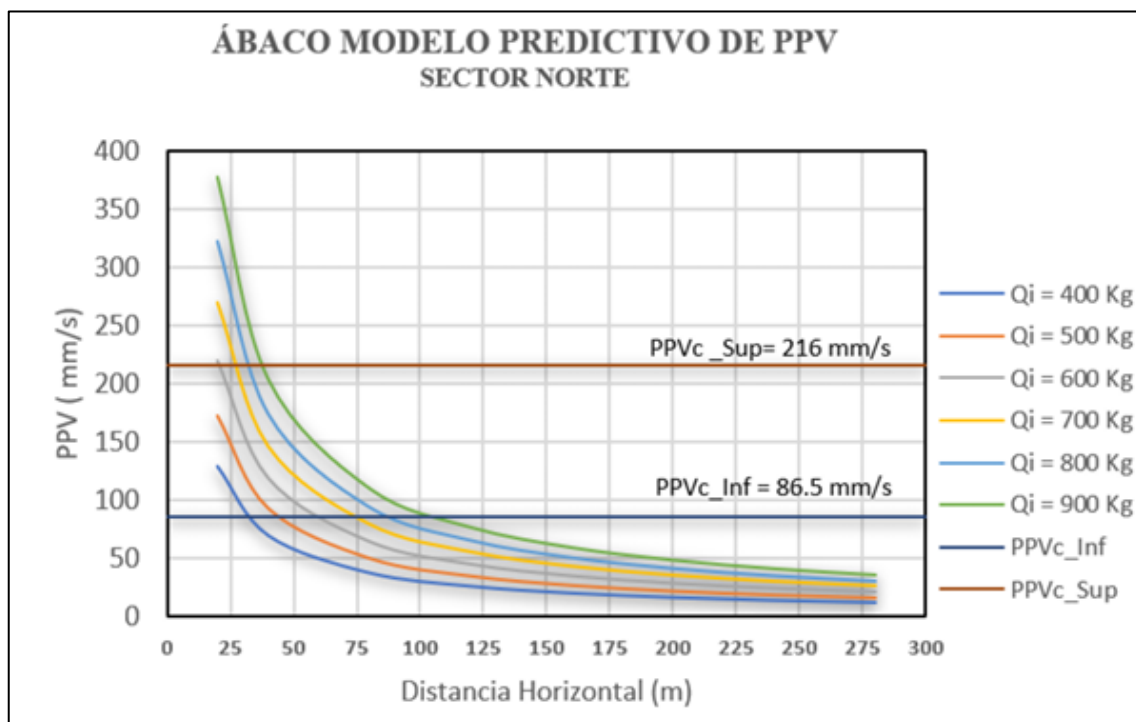


Figura 41. *Ábaco 1 - Sector Norte*

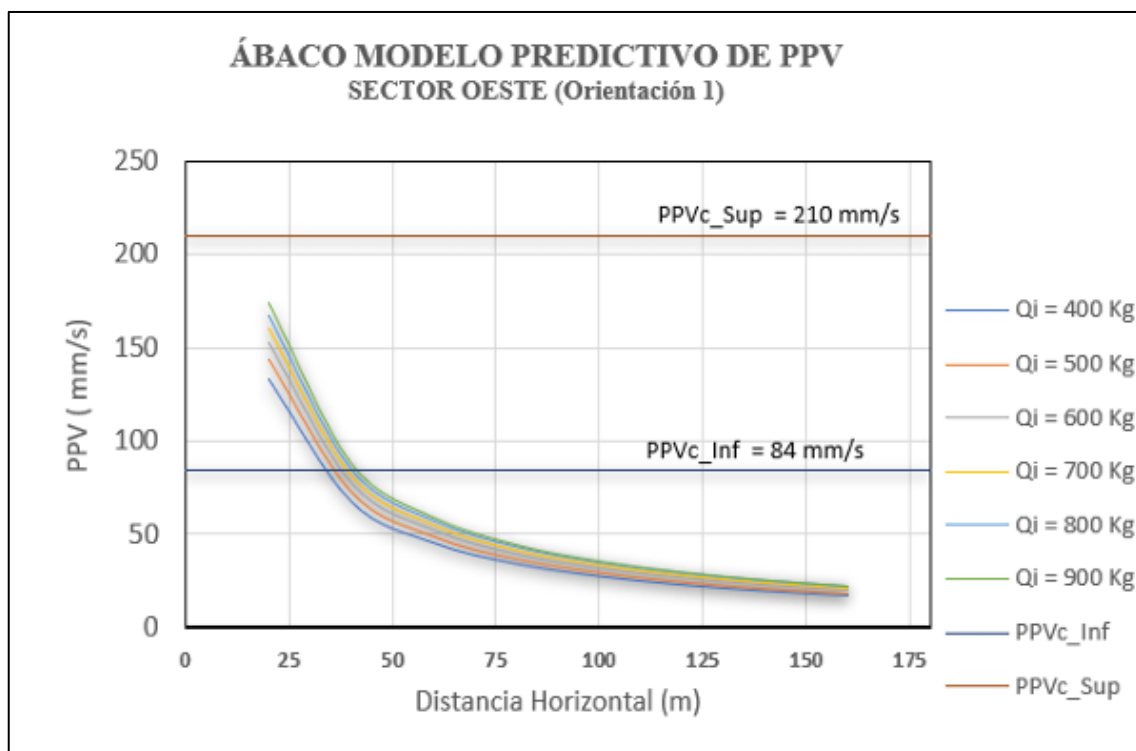


Figura 42. Ábaco 2 - Sector Oeste (Orientación 1)

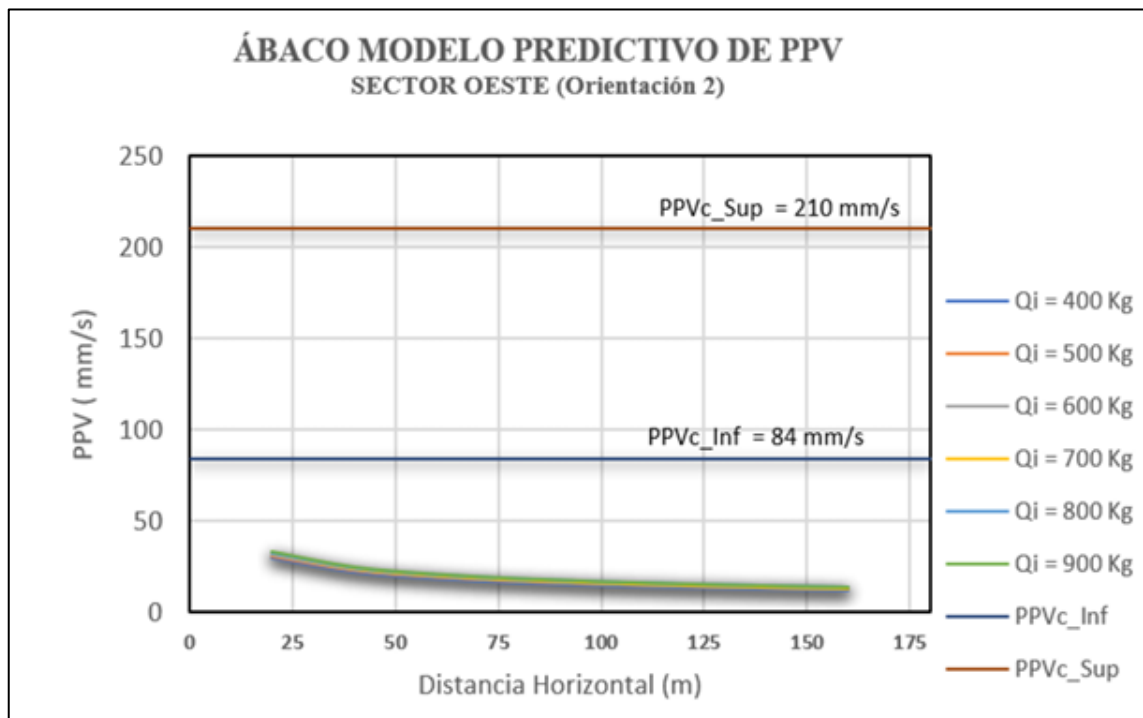


Figura 43. Ábaco 3 - Sector Oeste (Orientación 2)

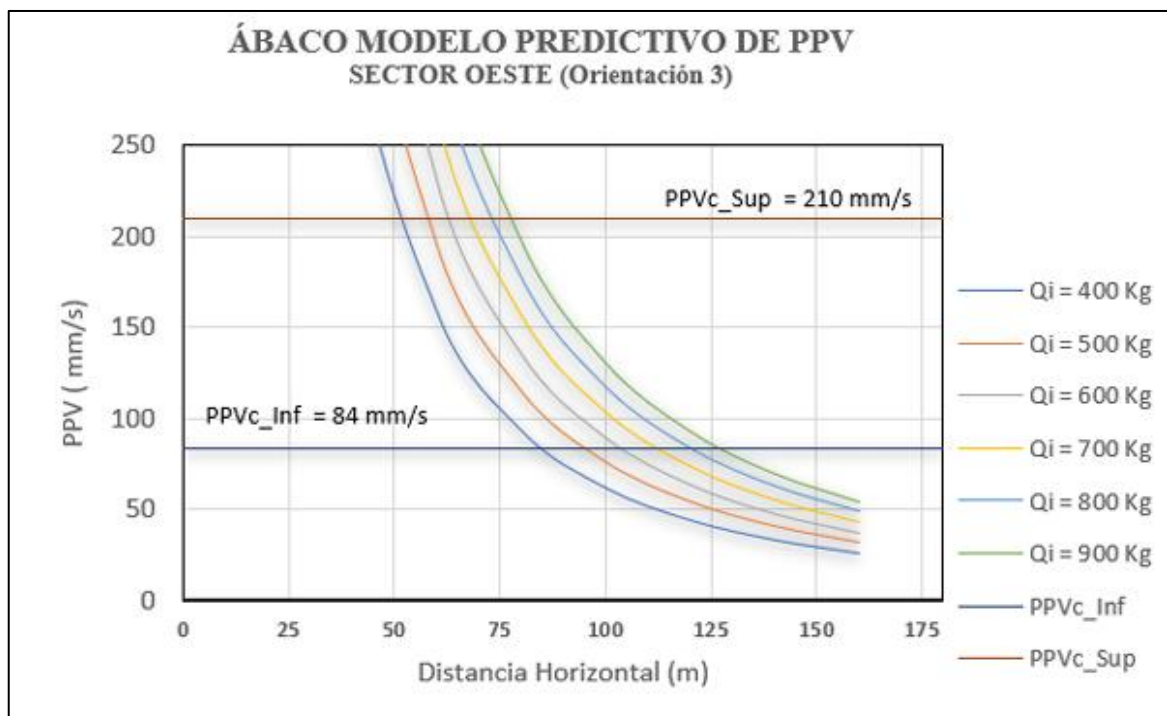


Figura 44. *Ábaco 4 - Sector Oeste (orientación 3)*

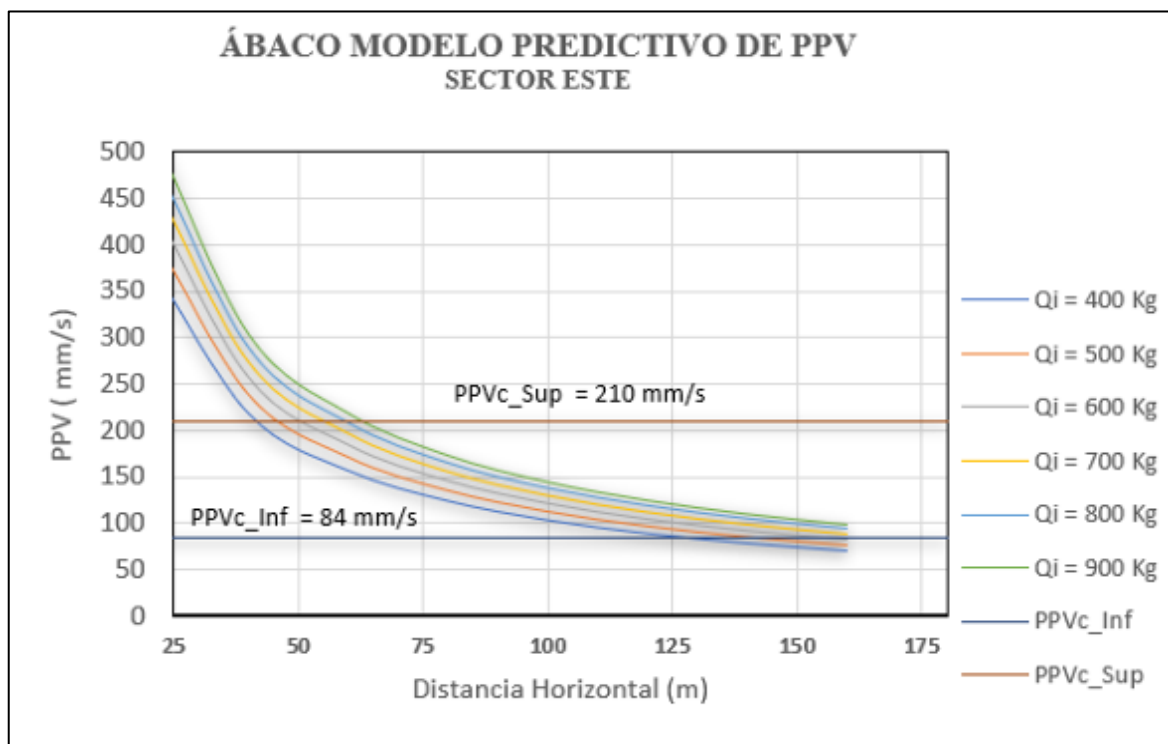


Figura 45. *Ábaco 5 - Sector Este*

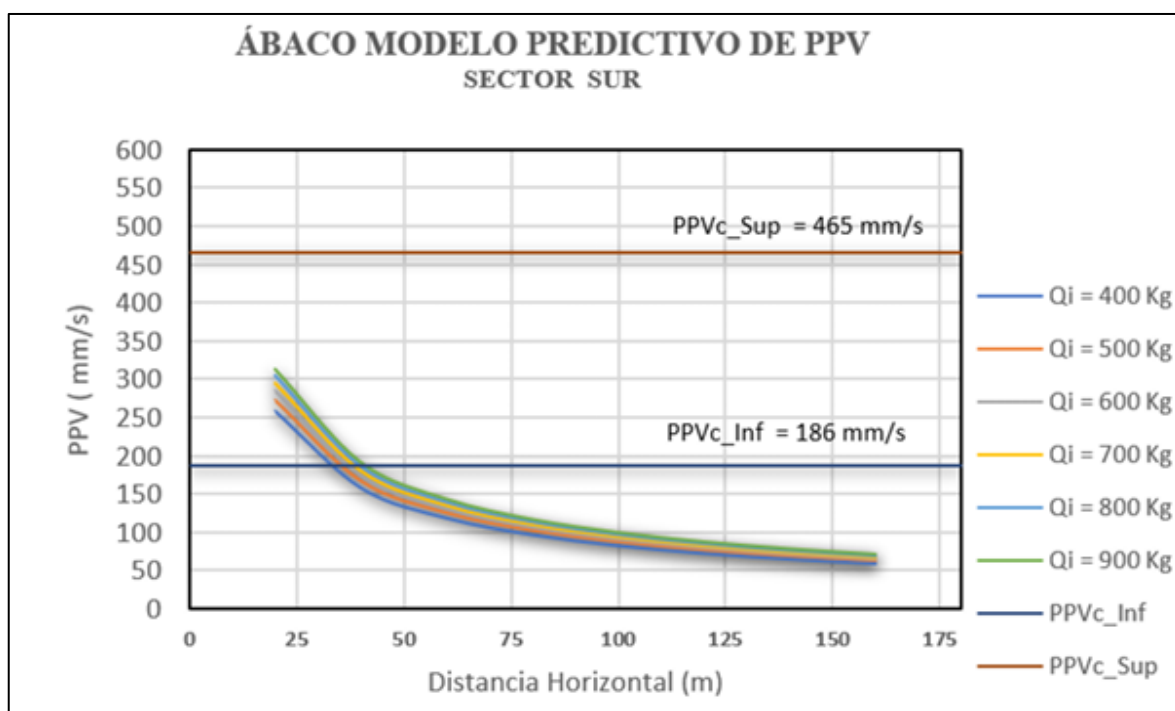


Figura 46. *Ábaco 6 - Sector Sur*

4.1.3. Frecuencias dominantes

Se analizaron los registros de vibración de las voladuras que pertenecen a una zona de propagación con la finalidad de estimar la frecuencia media dominante. La frecuencia dominante se calcula al transformar las señales sísmicas del dominio de tiempos al dominio de frecuencias utilizando la transformada de Fourier.

De los datos obtenidos se aprecian distribuciones espectrales de la frecuencia bimodal y trimodal, para obtener una frecuencia dominante en estos casos no se ha utilizado la moda, sino estimar una media.

$$g(\xi) = \sqrt{\frac{\beta}{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-\beta \xi x} dx$$

$$f = \int_0^{\infty} f I(f) df$$

Donde: f es la frecuencia y $I(f)$ es la densidad espectral, $g(\xi)$ es el espectro de frecuencias.

Tabla 21. Resumen de frecuencias dominantes y velocidades pico de partícula

Punto	Proyecto	Frecuencias Dominantes			Velocidad Pico de Partícula		
		Tran	Vert	Long	Tran	Vert	Long
P58	4380_04001	13.5	15.5	13.2	70.0	115.8	170.6
P59	4380_04001	12.5	14.5	9.6	45.0	39.5	91.9
P35	4380-04006	8.6	12.1	12.1	82.0	92.0	73.0
P47	4380-04005	12.5	16.6	10.1	46.8	48.1	48.3
P50	4380-04005	8.4	8.3	8.5	18.6	19.3	27.0
P22	4380-04009	5.6	9.3	8.4	7.9	9.8	16.9
P23	4380-04008	8.3	12.8	8.5	147.0	200.3	138.6
P19	4380-04009	15.5	12.1	11.8	72.5	61.2	89.4
P20	4380-04009	9.0	9.2	12.4	24.0	23.0	30.0
P9	4380-04011	11.6	14.3	14.2	77.3	89.2	165.0
P10	4380-04011	12.4	16.7	8.2	51.0	50.5	77.5
P29	4380-04007	14.9	15.9	8.6	61.2	83.2	75.0
P30	4380-04007	24.8	10.3	8.5	16.4	19.5	55.2
P60	4380_04001	18.8	17.1	14.7	58.9	69.8	147.0
P48	4380-04005	11.4	17.0	12.1	80.0	53.0	80.6
P49	4380-04005	13.7	14.7	13.6	83.5	50.0	86.5
P51	4380-04005	17.4	16.0	16.1	108.0	106.0	224.0
P60	4395_04014	12.5	14.1	10.1	17.7	20.8	26.7
P70	4395_04014	11.5	8.4	10.0	13.8	15.5	12.6
P67	4395_04015_04016	11.5	10.4	9.4	63.0	64.4	56.9

Fuente U.M. Chinalco

4.1.4. Simulación de interacción tiempos de retardo

Los modelos vibracionales indican que los niveles de vibración dependen de la carga media y son independientes del número de taladros detonados. En la práctica se ha determinado que hay un efecto de reforzamiento de vibración cuando se detonan múltiples taladros. La amplificación de la interacción de ondas es muy específica del lugar e influenciada por los tiempos de retardo. El efecto que se consigue con la amplificación es equivalente a un incremento en el peso aparente.

Usando el modelo de la forma de la onda elemental, es posible simular la interacción de ondas entre un número determinado de taladros. Las ondas pueden sumadas con un desfase, el cual representa el tiempo de retardo entre detonación y detonación de los taladros.

En el presente estudio se realizó registros de ondas elementales para los dominios estructurales más representativos del tajo, los cuales son; B2 DIO, B2 GRND, BRECHA, B3 DIO y B1 GRND.

SIMULACIÓN D.E. B2 DIO

Registro de onda elemental a 25 m del geófono triaxial. La carga del taladro fue de 800 Kg con un diámetro de perforación de 12 ¼". Los tiempos de retardo recomendados son: 10 ms, 11 ms, 12 ms 13 ms y 14 ms.

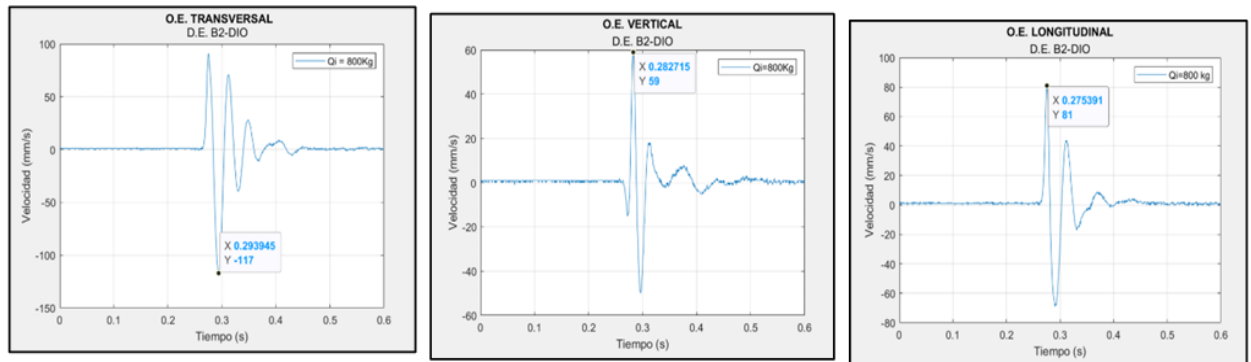


Figura 47. *Tiempos de retardo*

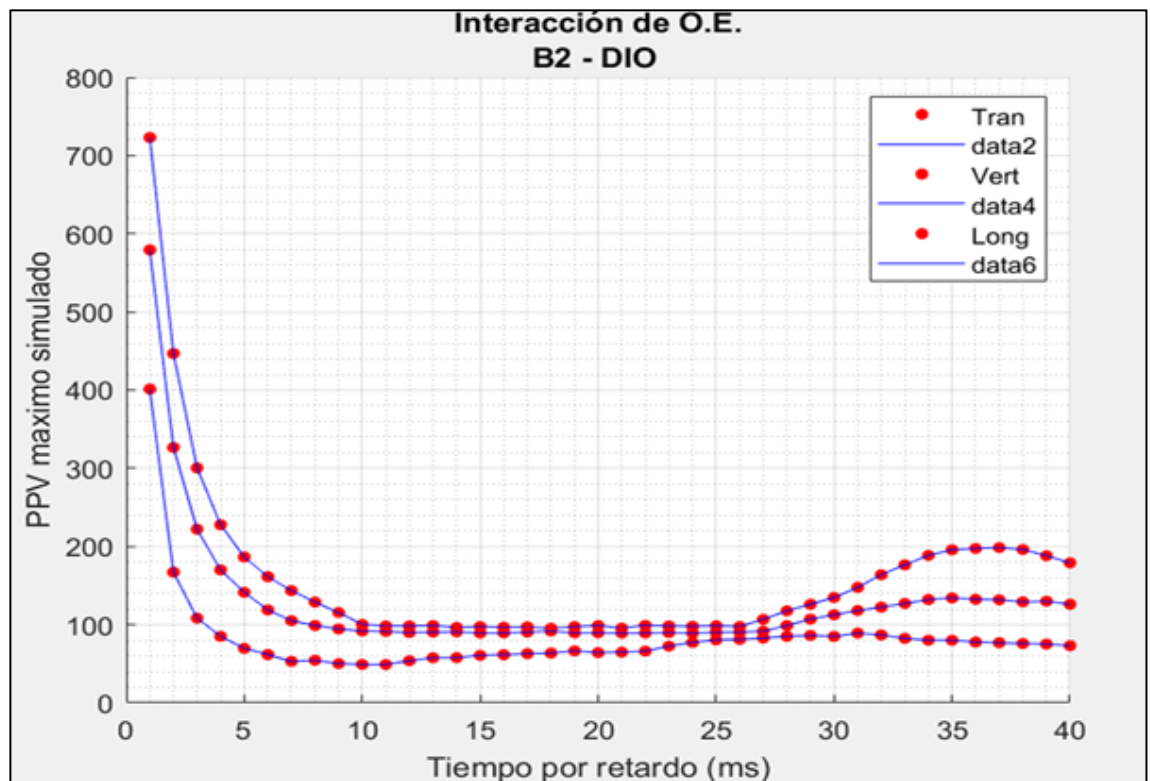


Figura 48. *Simulación de la interacción de la onda elemental D.E. B2 DIO*

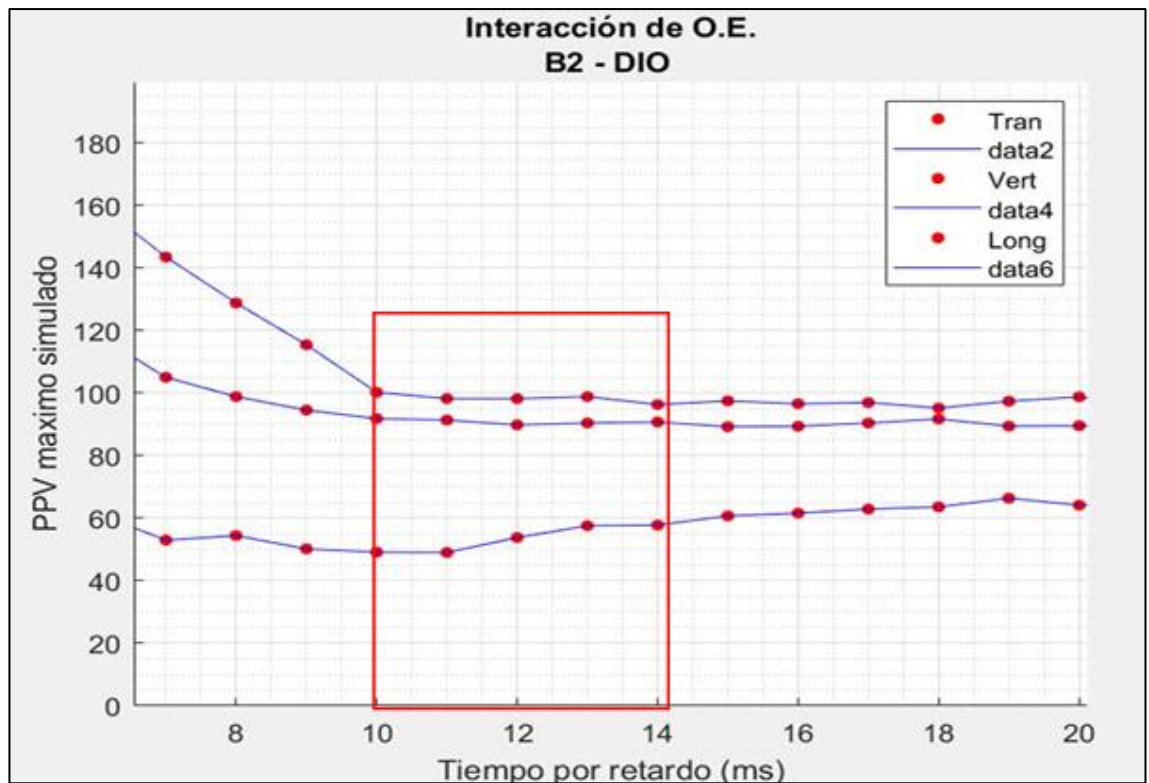


Figura 49. Intervalo de retardo recomendado para D.E. B2 DIO

SIMULACIÓN D.E. B2 GRND

Registro de onda elemental a 25 m del geófono triaxial. La carga del taladro fue de 140 Kg con un diámetro de perforación de 5" Los tiempos de retardo recomendados son: 17 ms, 18 ms y 20 ms.

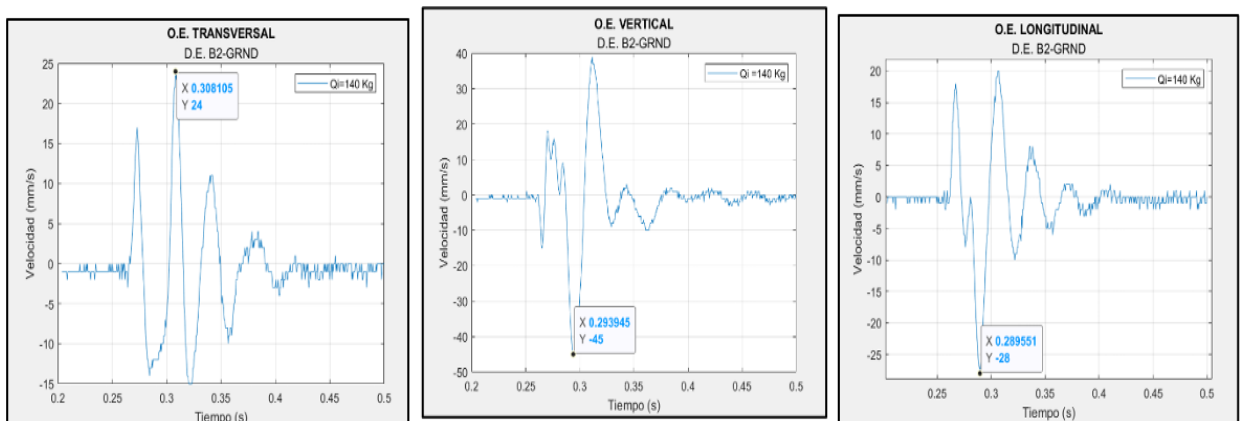


Figura 50. Tiempos de retardo

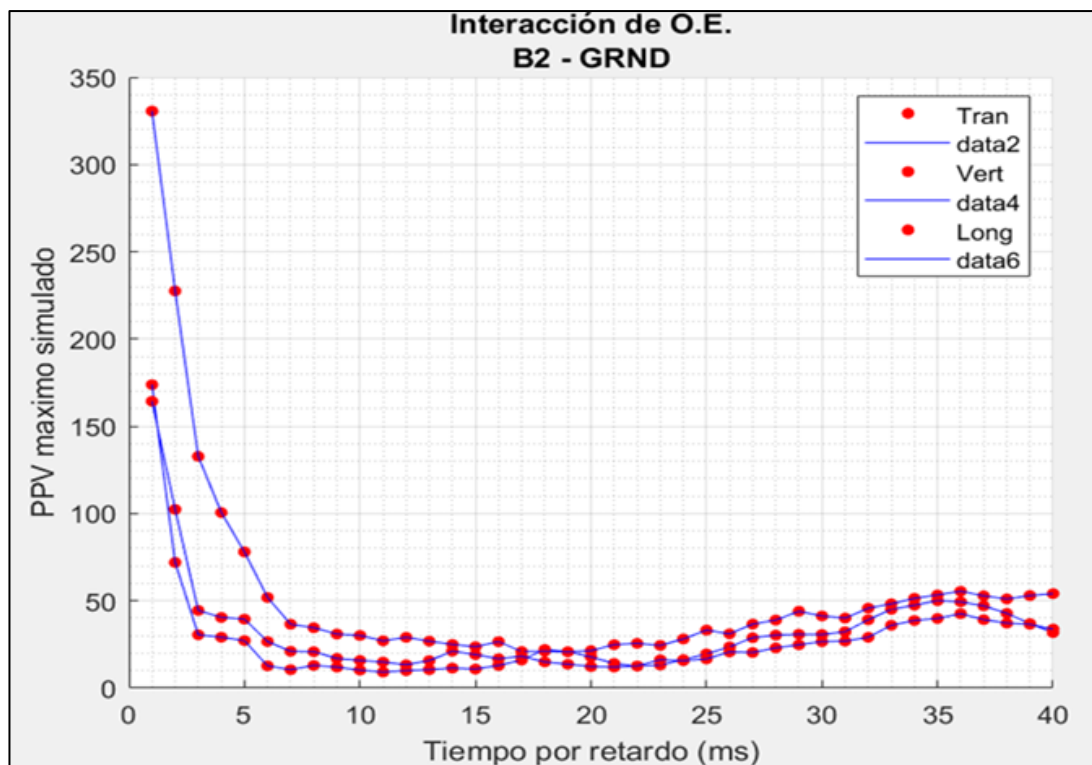


Figura 51. Simulación de la interacción de la onda elemental D.E. B2 GRND

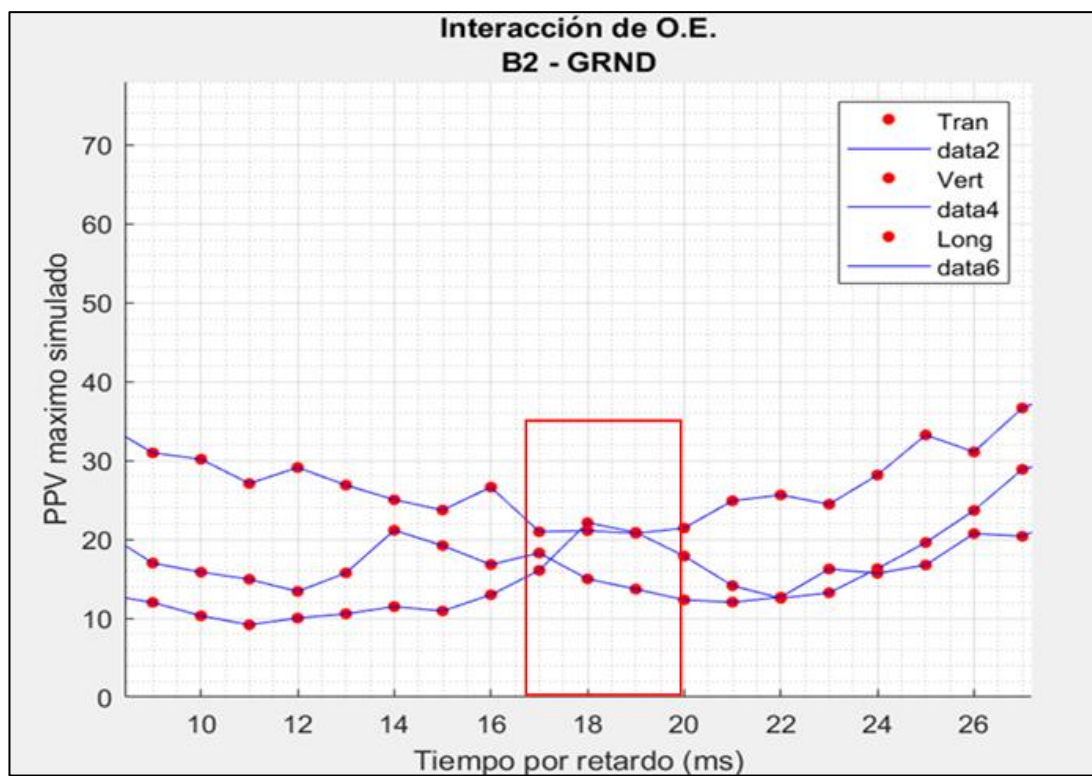


Figura 52. Intervalo de retardo recomendado para D.E. B2 GRND

Simulación de brecha

Registro de onda elemental a 25 m del geófono triaxial. La carga del taladro fue de 540 Kg con un diámetro de perforación de 12 ¼” Los tiempos de retardo recomendados son: 7 ms, 8 ms, 9ms y 10 ms.

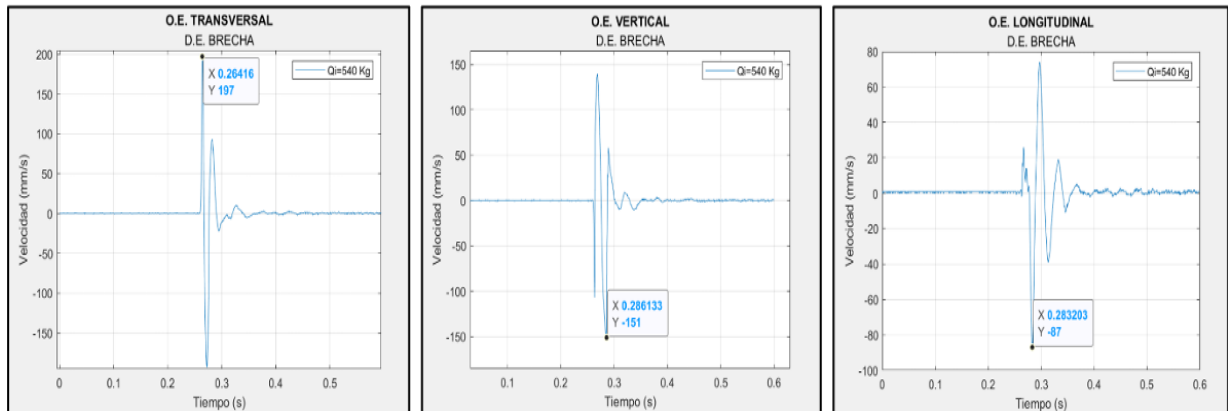


Figura 53. *Tiempos de retardo*

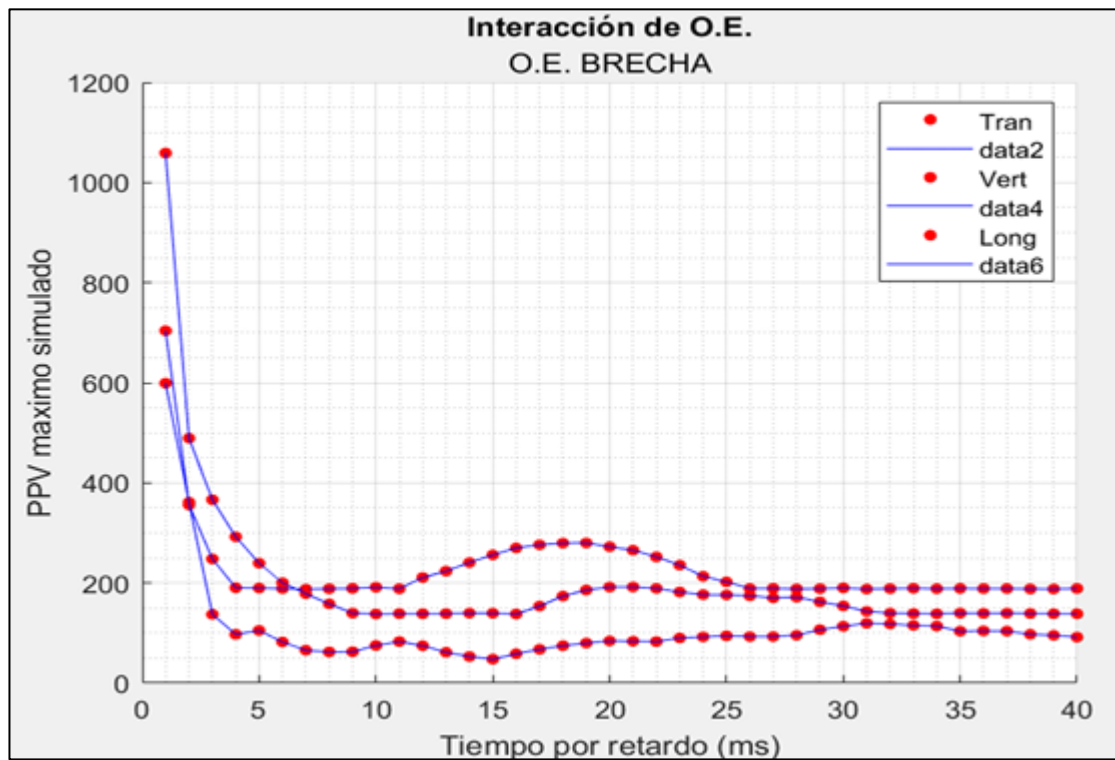


Figura 54. *Simulación de la interacción de la onda elemental para D.E. BRECHA*

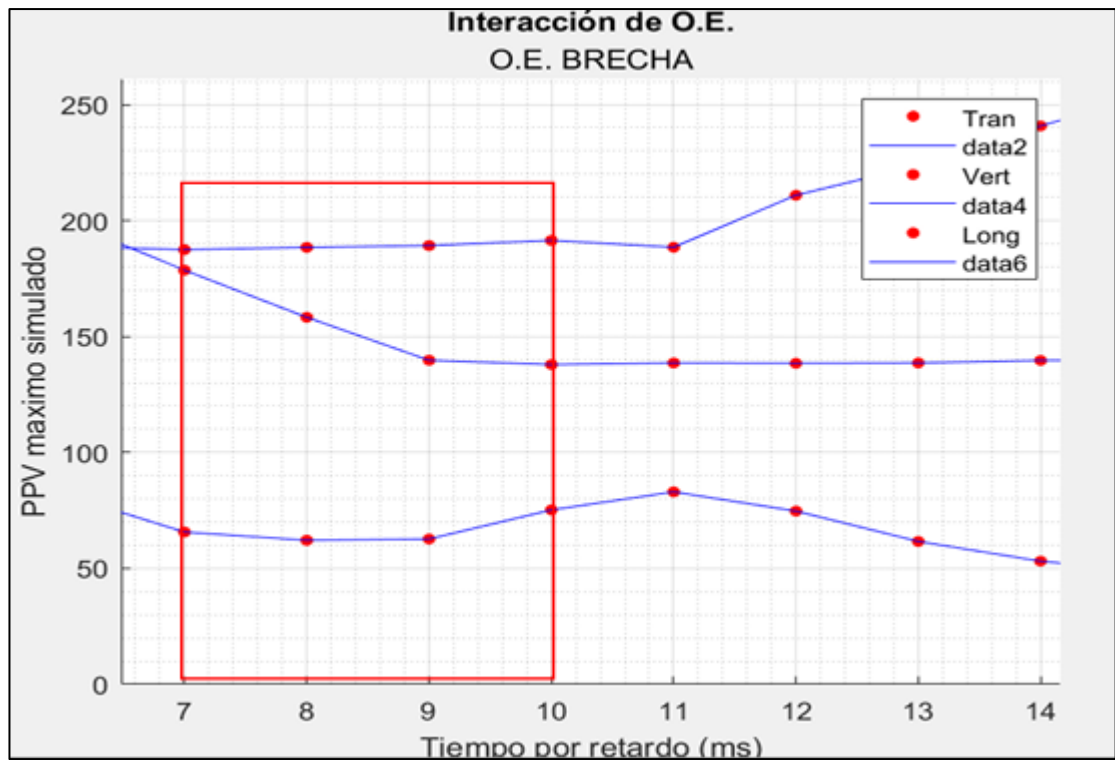


Figura 54. Intervalo de retardo recomendado para D.E. BRECHA

Simulación D.E. B3 DIO

Registro de onda elemental a 25 m del geófono triaxial. La carga del taladro fue de 540 Kg con un diámetro de perforación de 12 ¼” Los tiempos de retardo recomendados son: 9 ms, 10 ms y 11 ms.

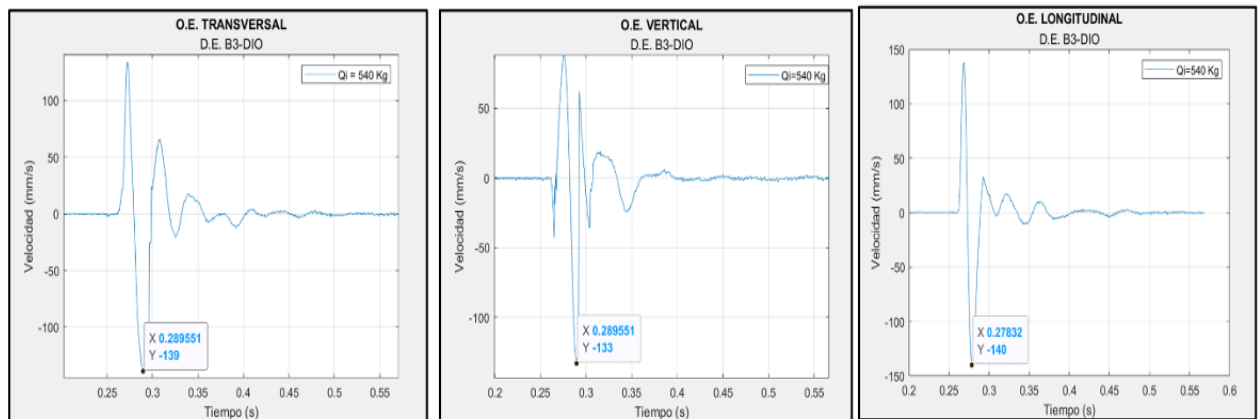


Figura 55. Tiempos de retardo

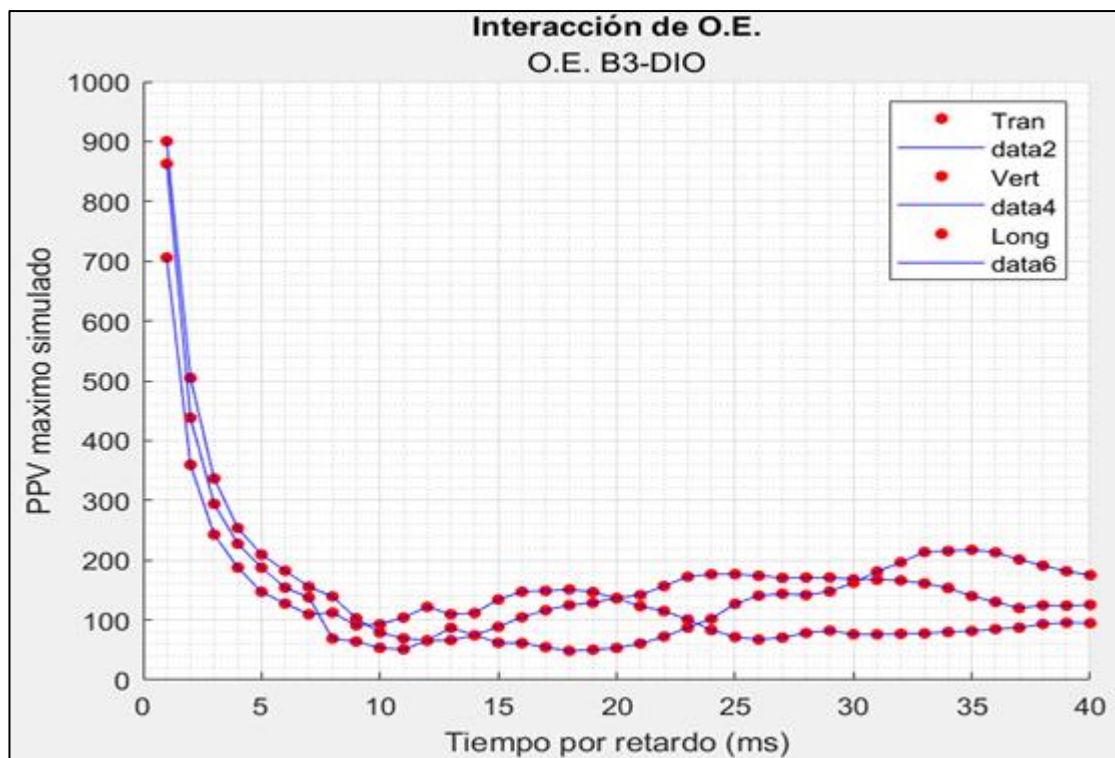


Figura 56. Simulación de la interacción de la onda elemental para D.E. B3 DIO

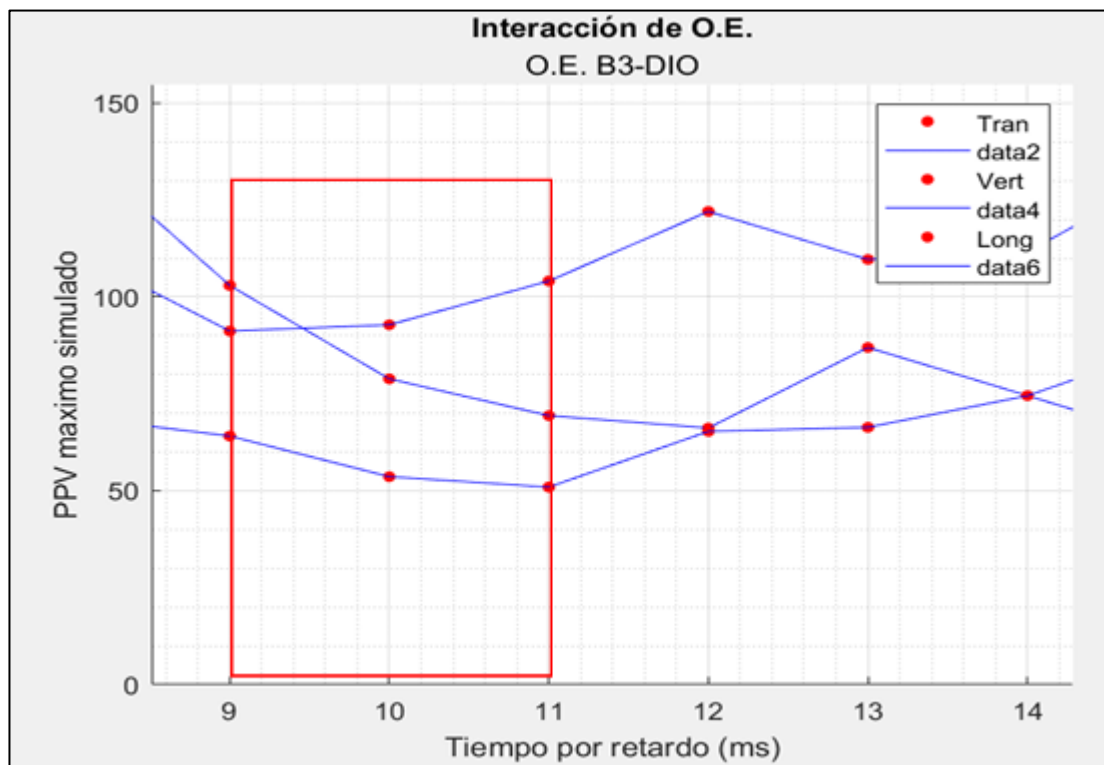


Figura 57. Intervalo de retardo recomendado para el D.E. B3 DIO

Simulación D.E. B1 GRND

Registro de onda elemental a 25 m del geófono triaxial. La carga del taladro fue de 540 Kg con un diámetro de perforación de 12 ¼” Los tiempos de retardo recomendados son: 14 ms, 15 ms, 16 ms, 17 ms y 18 ms.

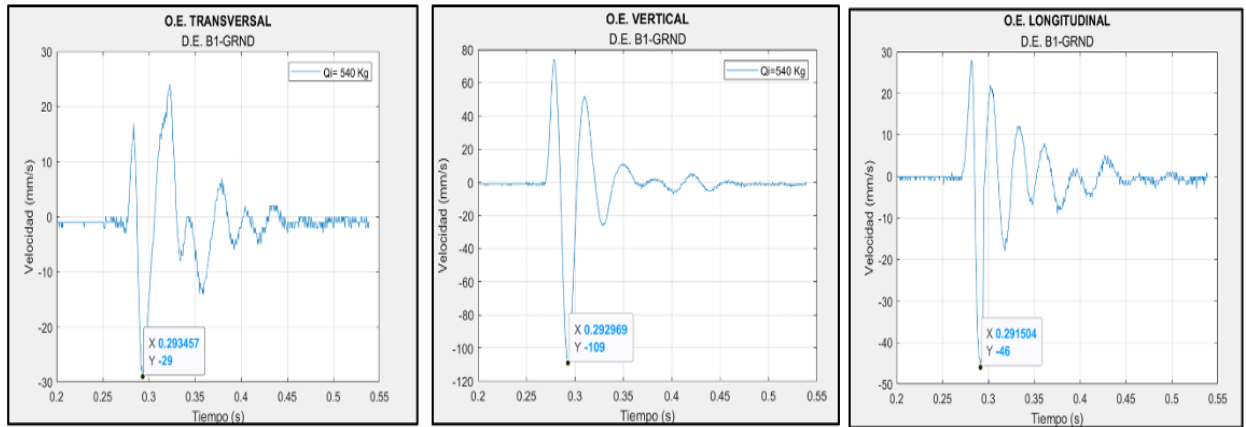


Figura 58. *Tiempos de retardo*

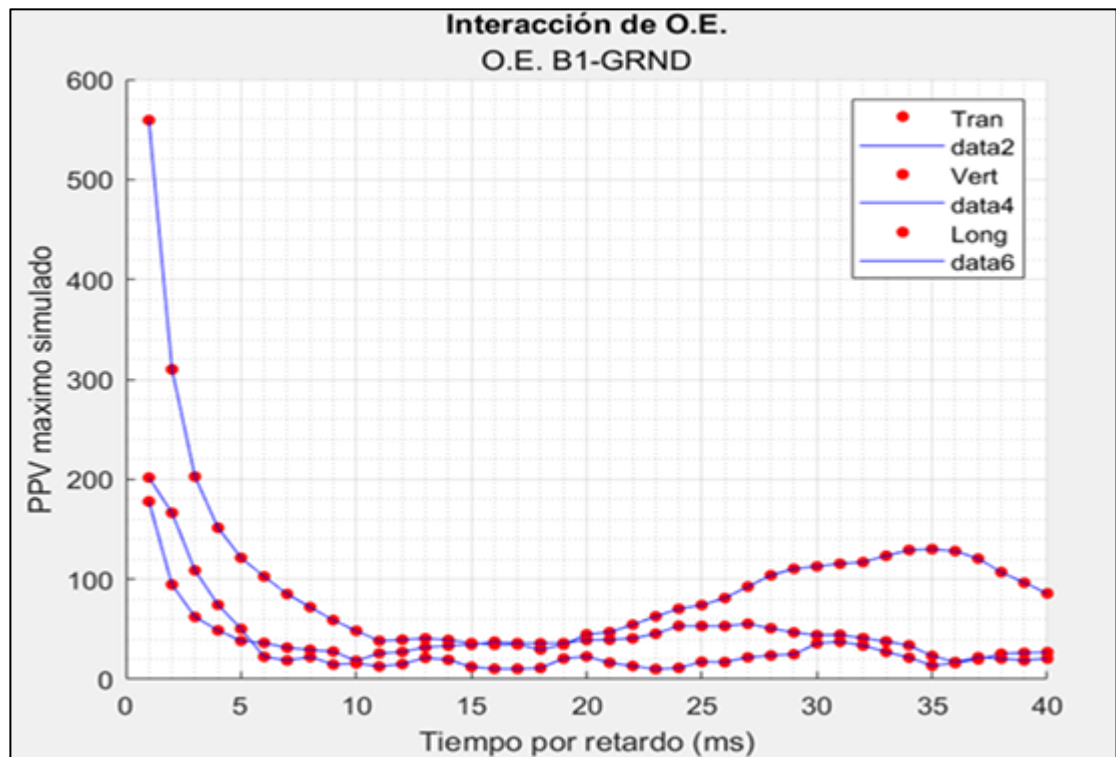


Figura 59. *Simulación de la interacción de la onda elemental para B1 GRND*

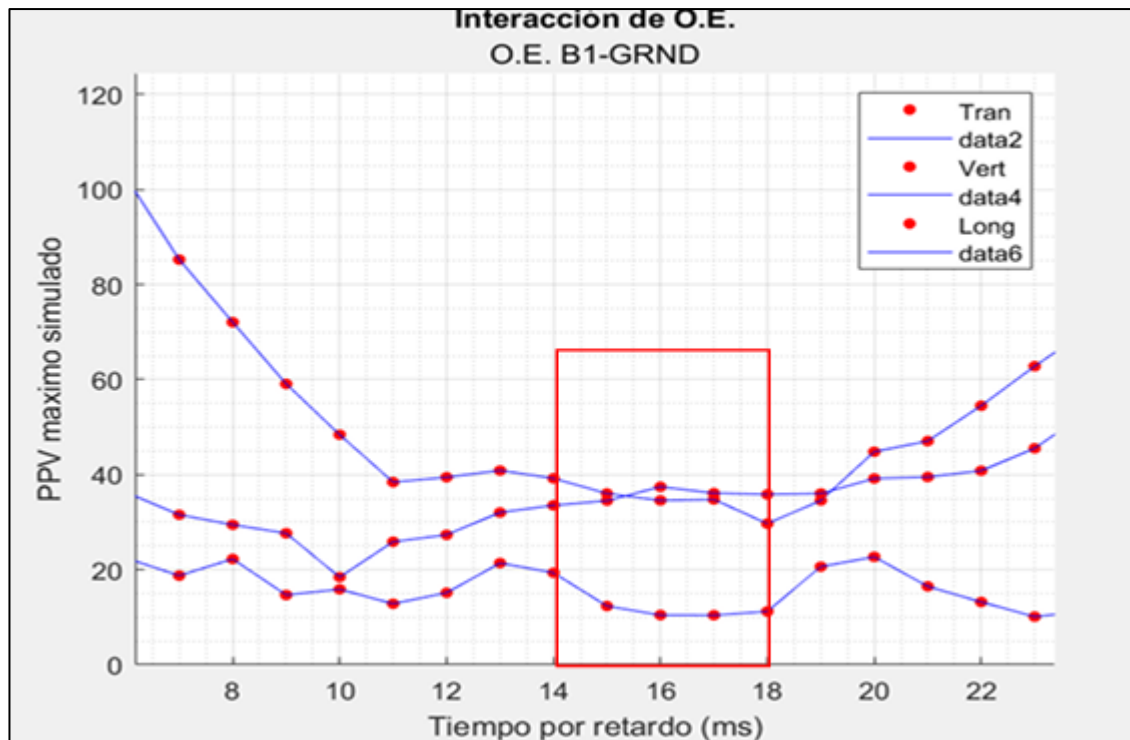


Figura 60. Intervalo de retardo recomendado para el D.E B1 GRND.

4.2. Contrastación de hipótesis

Para validar las hipótesis planteadas en el estudio, se realizaron análisis estadísticos y comparaciones empíricas utilizando los registros de vibraciones obtenidos en la mina Chinalco. La metodología aplicada consistió en la recopilación de datos experimentales, la calibración de modelos de atenuación vibracional y la evaluación de su capacidad predictiva mediante coeficientes de determinación (R^2). A continuación, se presentan los resultados de la contrastación de las hipótesis específicas:

a. Los modelos de predicción de PPV presentan variaciones en su precisión según la calibración de los parámetros geomecánicos.

Se analizaron los modelos de Devine, Hendron y Langefors con datos reales obtenidos en las zonas de propagación de vibraciones (ZPV).

Los coeficientes de determinación (R^2) mostraron diferencias significativas en cada sector de cuidado, evidenciando que la calibración de los parámetros geomecánicos influye directamente en la precisión del modelo.

- Se verificó que la calibración específica por sector mejora la capacidad predictiva de los modelos, lo que confirma esta hipótesis.
- b. La calibración de los factores de amplitud y decaimiento mejora la capacidad predictiva de los modelos de atenuación vibracional.
- Se realizaron pruebas con diferentes valores de los factores de amplitud (K) y decaimiento (α), ajustándolos con base en los registros experimentales de cada sector de cuidado.
 - Se observó que la recalibración permitió reducir la desviación entre los valores predichos y los valores medidos, disminuyendo el error promedio.
 - La mejora en la correlación de los modelos con los datos experimentales confirma la validez de esta hipótesis.
- c. Un modelo específico ofrece mayor precisión en la predicción de la PPV en función de la carga media y la distancia.
- Tras comparar los modelos de Devine, Hendron y Langefors, se identificó que el modelo con mejor ajuste variaba según el sector de cuidado.
 - En general, el modelo de Hendron demostró un mejor ajuste en sectores con alta variabilidad geomecánica, mientras que el modelo de Devine fue más preciso en zonas homogéneas.
 - Se confirmó que la selección del modelo más adecuado depende de las características específicas de cada zona de propagación de vibración (ZPV)

4.3. Discusión de resultados

La optimización de los modelos de atenuación vibracional en la mina Chinalco se desarrolló mediante un análisis comparativo de los modelos de Devine, Hendron y Langefors, calibrados con datos experimentales obtenidos en 71 puntos de monitoreo. Los resultados obtenidos permiten evaluar el grado de ajuste de cada modelo en función de los coeficientes de determinación (R^2) y su capacidad predictiva en los diferentes sectores de cuidado.

Precisión de los modelos de predicción de PPV

Los resultados muestran que los modelos presentan variaciones en su precisión dependiendo del sector de estudio y de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso. En algunos sectores, el modelo de Hendron demostró mejor ajuste debido a su consideración de la carga media como variable determinante, mientras que, en otros, el modelo de Devine tuvo un desempeño más preciso en función de la distancia y la atenuación geométrica.

A continuación, se presentan los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos en la calibración de los modelos para diferentes sectores de cuidado:

Tabla 22. Modelos diferentes por sector

Sector de Cuidado	Modelo Devine (R^2)	Modelo Hendron (R^2)	Modelo Langefors (R^2)
Sector Norte	0.85	0.89	0.76
Sector Sur	0.79	0.91	0.82
Sector Este	0.83	0.88	<u>0.80</u>
Sector Oeste	0.77	0.85	0.75

Estos valores indican que el modelo de Hendron tuvo el mejor desempeño en la mayoría de los sectores, confirmando la hipótesis de que la selección del modelo más adecuado depende de las condiciones geomecánicas locales.

Influencia de la calibración de los parámetros geomecánicos

Se encontró que la calibración de los factores de amplitud (K) y decaimiento (α) mejora significativamente la capacidad predictiva de los modelos. La optimización de estos factores redujo los errores de estimación en los diferentes sectores, confirmando que la variabilidad geomecánica juega un papel crucial en la propagación de las vibraciones.

El error absoluto medio (MAE) antes y después de la calibración se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 23. *MAE por sector*

Sector de Cuidado	MAE antes de calibración (mm/s)	MAE después de calibración (mm/s)	Mejora (%)
Sector Norte	<u>12.5</u>	8.3	33.6%
Sector Sur	14.2	9.1	35.9%
Sector Este	13.1	8.7	33.6%
Sector Oeste	15.4	10.2	33.8%

Estos resultados confirman la hipótesis de que la calibración mejora la capacidad predictiva de los modelos de atenuación vibracional.

Selección del modelo más adecuado para predecir la PPV

El análisis de los tres modelos utilizados sugiere que el modelo de Hendron es más adecuado en zonas con alta variabilidad geomecánica, mientras que el modelo de Devine presenta mejor desempeño en sectores homogéneos. Esto indica que un modelo único no es suficiente para una predicción precisa de PPV en toda la mina y que es necesario aplicar modelos segmentados según las condiciones del terreno.

Se presentan a continuación las gráficas de ajuste de los modelos para el Sector Norte:

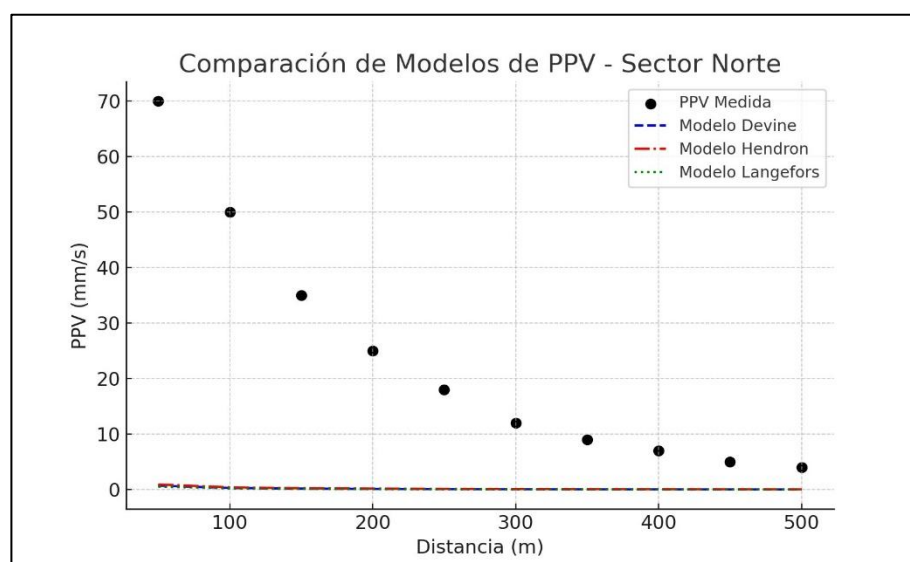


Figura 61. *Comparación de Modelos de PPV*

Estas gráficas muestran que el modelo de Hendron tiene la mejor correlación con los datos experimentales en este sector, lo que refuerza la hipótesis de que un modelo específico ofrece mayor precisión en la predicción de PPV según la carga media y la distancia.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. Los sectores de cuidado (Norte, sur, este, oeste) presentan niveles de vibración diferenciados, los cuales están directamente relacionados con las propiedades geomecánicas del macizo rocoso y su respectivo criterio de daño. Esto permite una mejor planificación de las voladuras para minimizar impactos no deseados.
2. Se determina que los niveles de vibración aceptables en cada sector varían dentro de los siguientes rangos:
 - Sector norte: entre 86.5 mm/s y 216 mm/s.
 - Sector sur: entre 186 mm/s y 465 mm/s.
 - Sector este: entre 84 mm/s y 210 mm/s.
 - Sector oeste: entre 84 mm/s y 210 mm/s.
3. Se concluye que la calibración de los modelos vibracionales permitió identificar diez (10) Zonas de Propagación de Vibración (ZPV), obtenidas a partir de 71 mediciones realizadas en el tajo. Los coeficientes de determinación de los modelos en estas zonas fueron superiores al 75%, lo que indica una alta confiabilidad en la predicción de la Vibración Pico.
4. Se determina que los ábacos de diseño elaborados en este estudio permiten definir distancias mínimas recomendadas para las voladuras en relación con los sectores de cuidado. Estas distancias no deben considerarse como restricciones absolutas, sino como referencias para la optimización de los diseños y la reducción del impacto vibracional.
5. Se concluye que las frecuencias dominantes de cada sector fueron determinadas mediante la Transformada de Fourier, evidenciando una mayor representatividad que las frecuencias de corte convencionales. En espectros bimodales y trimodales, se utilizaron promedios ponderados entre los picos de frecuencia y su densidad espectral, proporcionando un análisis más preciso en comparación con el enfoque modal tradicional.

6. Se determina que los tiempos de retardo calculados en el estudio permitieron reducir la velocidad pico de partícula en los tres ejes principales (transversal, vertical y longitudinal). Esto implica que la implementación de estos retardos optimizados puede minimizar significativamente el vector suma resultante de la vibración.

5.2. Recomendaciones

1. Recomendando emplear los modelos predictivos de vibración desarrollados para cada una de las Zonas de Propagación de Vibración (ZPV), con el fin de obtener estimaciones precisas de la Velocidad Pico de Partícula (PPV). Estas estimaciones deben realizarse en función de la distancia y la carga media en dirección a los sectores de cuidado.
2. Se sugiere utilizar los ábacos diseñados específicamente para los sectores de cuidado como herramientas clave en la planificación de voladuras. Su aplicación permitirá ajustar los parámetros de voladura y evitar que se superen los niveles de vibración recomendados.
3. Es aconsejable seguir el plano de ubicación de los puntos de medición para garantizar que las futuras voladuras se alineen correctamente con los sectores de cuidado y las zonas de propagación de vibración. Esto permitirá mantener un mejor control sobre la distribución de las vibraciones.
4. Se recomienda implementar los tiempos de retardo sugeridos en el estudio, considerando la configuración estructural de cada dominio. De esta forma, se podrá reducir la velocidad pico de partícula sin comprometer la eficiencia de la carga media utilizada en la voladura.
5. Se sugiere realizar una comparación entre las frecuencias dominantes establecidas para cada sector y las directrices geomecánicas de la mina. Este análisis facilitará la identificación de posibles mejoras en los modelos de predicción de vibraciones.

6. Finalmente, se recomienda llevar a cabo una campaña de perforaciones y ensayos de laboratorio para actualizar las propiedades geomecánicas de la roca. Este proceso contribuirá a mejorar la precisión de los modelos de atenuación vibracional y optimizar la gestión de las voladuras.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CORNEJO CHACÓN, M., & Huamán Rivas, J. *Optimización de los modelos de atenuación vibracional en minería a cielo abierto*. Universidad Nacional de Ingeniería. 2020.
- CUÉLLAR, J. *Optimización de la perforación y voladura en la unidad minera Carahuacra*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 2021.
- GONZÁLEZ, P. et al. *Aplicación de detonadores electrónicos en minería subterránea peruana: Reducción de vibraciones y fragmentación controlada*. Pontificia Universidad Católica del Perú. 2021.
- HOSSEINI, A., SMITH, T., & Lee, M. *Advancements in vibration attenuation models for open-pit mining*. Journal of Mining Engineering, 45(2), 112-130. 2023.
- JIMENO, C., JIMENO, E., & CARCEDO, F. *Drilling and Blasting of Rocks*. Taylor & Francis. 2021.
- KONIETZKY, H., LUKIC, T., & ZHANG, L. *Numerical modeling of blast-induced vibrations in mining environments*. International Journal of Rock Mechanics, 55(3), 210-225. 2018.
- SINGH, T. N., & SINGH, V. *Rock Blasting Techniques and Their Environmental Impacts*. Springer. 2019.
- ZÚÑIGA-ARROBO, R., & VALLEJO, J. *Evaluación de modelos empíricos para la predicción de la Velocidad Pico de Partícula en minería peruana*. Universidad de Lima. 2024.