

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**ESTUDIO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO DE LA UNIDAD
LITOLÓGICA PÓRFIDO TEMPRANO ALTERACIÓN ARGÍLICO
PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE ONDA P, EN
UNA MINA DEL SUR FASE 02N, TACNA, 2025**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. Dennis Mamani Aquino

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

TACNA - PERÚ

2026

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

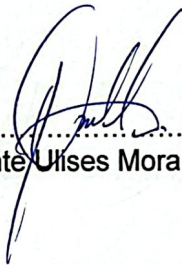
Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

ESTUDIO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO DE LA UNIDAD LITOLÓGICA PÓRFIDO TEMPRANO ALTERACIÓN ARGÍLICO PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE ONDA P, EN UNA MINA DEL SUR FASE 02N, TACNA, 2025

Tesis sustentada y aprobada el 17 de Abril del 2026; siendo el jurado calificador integrado por:

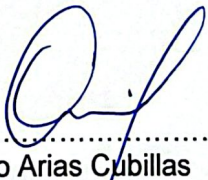
PRESIDENTE:


.....
Dr. Dante Ulises Morales Cabrera

SECRETARIO:


.....
Dr. Jorge José Segura Dávila

VOCAL:


.....
Dr. Pedro Arias Cubillas

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Carlos Huisa Ccori en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N°10206-2025-FAIN/UNJBG de la tesis titulada:

“ESTUDIO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO DE LA UNIDAD LITOLÓGICA PÓRFIDO TEMPRANO ALTERACIÓN ARGÍLICO PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE ONDA P, EN UNA MINA DEL SUR FASE 02N, TACNA, 2025”
Presentado por el Bachiller Dennis Mamani Aquino (2015-101013), Para optar título profesional de Ingeniero de Minas.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del **software de similitud textual** Turnitin cuenta con el **nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es** 10 % Por lo que,

CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis enunciado líneas arriba, la cual está expedita para continuar con los trámites para la obtención de título profesional.

Tacna 27 de enero del 2026

FIRMA ASESOR

Dr. Carlos Huisa Ccori DNI. 00417032

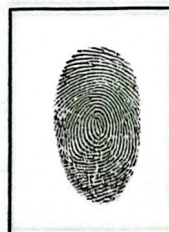
ORCID 0000-0003-0605-5320



FIRMA TESISTA

Nombres y apellidos, DNI


Dennis Mamani Aquino
73523932



DEDICATORIA

A mi pequeña Antonella, a mi esposa Keller y a
mi familia.

AGRADECIMIENTOS

A mi hija Antonella, a mi esposa Keller y a mis padres Hilmer y Betty por su amor, paciencia y apoyo constante, que fueron fundamentales para culminar el presente estudio.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la UNJBG, por la sólida formación académica y los conocimientos especializados impartidos, de valor incalculable para mi desarrollo profesional.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar el modelo de vibraciones en campo cercano de la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración argílica, a fin de calcular la velocidad de onda P y evaluar su influencia en el control de vibraciones y la fragmentación del material volado en la Fase 02N–3660. El estudio se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo y comparativo, considerando dos periodos de análisis: el primer periodo (enero–marzo de 2025) sin mejora y el segundo periodo (abril–junio de 2025) con la implementación de un control de vibraciones y ajustes en el diseño de voladura. Se ejecutó una voladura diaria y se emplearon registros vibracionales en campo cercano, así como el análisis de fragmentación mediante el modelo de Holmberg & Persson y el software Split Online.

Los resultados evidenciaron que, durante el segundo periodo, el factor de potencia se redujo en 8.84 %, mientras que la fragmentación (P80) mejoró en 11.24 %, reflejando una fragmentación más fina y homogénea. Asimismo, se registró una disminución significativa de la velocidad pico partícula (VPP) en la matriz y el macizo rocoso, con reducciones de 45.85 % y 42.69 %, respectivamente. De manera consistente, la velocidad de propagación de la onda P disminuyó en 44.00 %, lo que indicó una menor transmisión de energía sísmica y un menor daño inducido en el macizo rocoso. En conclusión, la implementación del control de vibraciones permitió optimizar el proceso de voladura, mejorar la fragmentación del material y reducir el impacto vibracional en la zona de estudio.

Palabras clave: Vibraciones, Fragmentación, Velocidad de onda P

ABSTRACT

This research aimed to determine the near-field vibration model of the Early Porphyry lithological unit with argillic alteration in order to calculate the P-wave velocity and evaluate its influence on vibration control and rock fragmentation in Phase 02N–3660. The study followed a quantitative and comparative approach, considering two evaluation periods: the first period (January–March 2025) without improvement and the second period (April–June 2025) with the implementation of vibration control measures and adjustments in the blasting design. A daily blasting operation was carried out, and near-field vibration records were collected. Rock fragmentation was evaluated using the Holmberg & Persson model and the Split Online fragmentation analysis software.

The results showed that, during the second period, the powder factor was reduced by 8.84%, while rock fragmentation (P80) improved by 11.24%, indicating a finer and more uniform fragmentation. Additionally, the peak particle velocity (PPV) in the rock matrix and the rock mass decreased by 45.85% and 42.69%, respectively. Consistently, the P-wave velocity decreased by 44.00%, indicating lower seismic energy transmission and reduced blast-induced damage in the rock mass. It was concluded that the implementation of vibration control significantly optimized the blasting process, improved fragmentation efficiency, and reduced the vibrational impact on the studied area.

Keywords: Vibrations, Fragmentation, P-wave velocity.

ÍNDICE

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ANEXOS	xi
INTRODUCCIÓN	xii
I. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	14
1.1. Antecedentes del problema.	14
1.2. Descripción del problema.....	15
1.3. Formulación del problema.	17
1.3.1. Problema general	17
1.3.2. Problemas Específicos	17
1.4. Objetivos	18
1.4.1. Objetivo General.....	18
1.4.2. Objetivos Específicos:	18
1.5. Justificación e importancia de la investigación.....	18
1.6. Limitaciones y viabilidad.....	20
1.7. Hipótesis.....	21
1.7.1. Hipótesis Principal	21
1.7.2. Hipótesis Específicas:	21
1.8. Variables.....	22
1.8.1. Definición conceptual y operacional de las variables.....	22
1.8.2. Operacionalización de las variables.....	23
II. MARCO TEÓRICO	24
2.1. Antecedentes del trabajo de investigación	24
2.2. Bases teóricas sobre el trabajo de investigación	27
2.2.1. Macizo rocoso	27
2.2.2. Estructuras geológicas	28

2.2.3.	Velocidad de la onda P	29
2.2.4.	Velocidad Pico de Partícula (VPP)	30
2.2.5.	Campo cercano.....	31
2.2.6.	Campo lejano	32
2.2.7.	Modelo de vibraciones de Holmberg y Persson	33
2.2.8.	Fragmentación del material.....	34
2.2.9.	Software Split Online.....	35
2.2.10.	Medición y control de vibraciones.....	36
2.3.	Descripción operativa.....	37
2.3.1.	Geología y Modelamiento del Yacimiento	37
2.3.2.	Planeamiento Minero	42
2.3.3.	Perforación.....	42
2.3.4.	Voladura.....	45
2.3.5.	Carguío.....	48
2.3.6.	Acarreo.....	49
2.3.7.	CENTRO INTEGRADO DE OPERACIONES (CIO).....	50
2.3.8.	Chancado Primario.....	51
2.3.9.	Transporte por Faja (Correa Overland).....	52
2.3.10.	Molienda y Flotación	52
2.3.11.	Centro Integrado de Operaciones (CIO)	53
III.	MARCO METODOLÓGICO.....	54
3.1.	Tipo y nivel de la investigación	54
3.1.1.	Método de la investigación	54
3.1.2.	Tipo de la investigación	54
3.1.3.	Nivel de la investigación.....	55
3.1.4.	Diseño de la investigación	55
3.2.	Población y muestra	56
3.2.1.	Población.....	56
3.2.2.	Muestra	56
3.3.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	57
3.4.	Técnicas para el procesamiento y análisis de datos	58
3.5.	Prueba de hipótesis.....	60
IV.	RESULTADOS.....	61
4.1.	ESTUDIO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO.....	63
4.1.1.	Velocidad de la onda P	67

4.1.2.	Modelo de vibraciones H&P	68
4.1.3.	Velocidad Pico Partícula Crítica	70
4.1.4.	Registro de vibraciones	71
4.1.5.	Determinación de la velocidad de Onda P (V_p)	74
4.1.6.	Cálculo de la velocidad pico partícula crítica	76
4.1.7.	Modelo predictivo de Holmberg & Persson	78
4.1.8.	Eficiencia del Filtro Line Drilling.....	80
4.1.9.	Vibraciones por tipo de explosivo	83
4.1.10.	Criterio de daño.....	85
4.1.11.	Simulación de halos de vibración en la pared.....	87
4.1.12.	Aplicación del Split on Line	113
4.2.	Resultados por objetivos	115
4.2.1.	Resultados respecto al Objetivo General	115
4.2.2.	Resultados respecto al primer Objetivo Específico	116
4.2.3.	Resultados respecto al segundo Objetivo Específico.....	116
4.2.4.	Resultados respecto al tercer Objetivo Específico	117
4.3.	Resultados generales	117
4.4.	Contrastación de hipótesis.....	119
4.4.1.	Contrastación de la hipótesis principal	119
4.4.2.	Contrastación de la primera hipótesis específica	120
4.4.3.	Contrastación de la segunda hipótesis específica	120
4.4.4.	Contrastación de la tercera hipótesis específica.....	121
V.	DISCUSIONES	121
5.1.	Discusiones con autores	121
5.2.	Discusiones con tesistas	123
VI.	CONCLUSIONES	125
VII.	RECOMENDACIONES.....	127
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
ANEXO.	MATRIZ DE CONSISTENCIAS.....	133
ANEXOS		134

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Operacionalización de las variables	23
Tabla 2 Pit Viper 351 – Epiroc.	43
Tabla 3 Smart Roc D65.....	45
Tabla 4 Parámetros del primer trimestre (Sin la mejora).....	62
Tabla 5 Taladros de estudio	64
Tabla 6 Rangos de deformación in-situ utilizando los índices de calidad de la roca.	68
Tabla 7 Vector Suma de la Velocidad Pico Partícula	72
Tabla 8 Valor obtenido de velocidad promedio de propagación de Onda P.....	76
Tabla 9 Características Mecánicas de la roca.....	77
Tabla 10 Parámetros para el Modelo H&P (Geófono 1 - HA73G detrás del Line Drill).....	79
Tabla 11 Parámetros para el Modelo H&P (Geófono 2 - CONTROL 70 detrás del Line Drill). ...	79
Tabla 12 Parámetros para el Modelo H&P (Geófono 3 - HA73G delante del Line Drill).....	80
Tabla 13 Parámetros para el Modelo H&P (Geófono 4 - CONTROL 70 delante del Line Drill). .	80
Tabla 14 Criterio de daño PPV _{cmr}	86
Tabla 15 Daño en sector.....	86
Tabla 16 Resultados de enero 2025	90
Tabla 17 Resultados febrero 2025.....	92
Tabla 18 Resultados marzo 2025	94
Tabla 19 Parámetros del segundo trimestre (Con la mejora)	96
Tabla 20 Resultados abril 2025.....	97
Tabla 21 Resultados mayo 2025	99
Tabla 22 Resultados junio 2025.....	101
Tabla 23 Resultados split on line segundo periodo.....	114
Tabla 24 Resultados generales	118

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura del macizo rocoso y presencia de discontinuidades.....	28
Figura 2. Principales estructuras geológicas que influyen en la propagación de vibraciones.	29
Figura 3. Propagación de la onda P en un medio rocoso.....	30
Figura 4. Registro típico de velocidad pico de partícula durante una voladura.....	31
Figura 5. Zona de campo cercano en una voladura.	32
Figura 6. Atenuación de vibraciones en el campo lejano.	33
Figura 7. Esquema del modelo de vibraciones de Holmberg y Persson.....	34
Figura 8. Distribución granulométrica del material fragmentado (P80).....	35
Figura 9. Análisis de fragmentación mediante el software Split Online.	36
Figura 10. Instrumentación para monitoreo de vibraciones en voladuras.	37
Figura 11. Bosquejo Geologico del Yacimiento Quellaveco	39
Figura 12. Sección esquemática a través del yacimiento Quellaveco	40
Figura 13. Perfil de Yacimiento Quellaveco	41
Figura 11. Pit Viper 351 – Epiroc.	44
Figura 12. Perforación secundaria.....	45
Figura 13. Carguío de taladros bombeable.....	47
Figura 14. Carguío de taladros vaciable.	47
Figura 15. Caterpillar 7495 Electric Rope Shovel.....	49
Figura 16. Caterpillar 794 AC.....	50
Figura 17. Centro integrado de operaciones (CIO)	51
Figura 18. Esquema utilizado para la prueba especial de vibraciones	65
Figura 19. Ubicación de prueba en F02N-3660, Pórfido Temprano alteración Argílico	66
Figura 20. Instrumentación correspondiente al estudio de Campo Cercano F02N	66
Figura 21. Esquema explicativo de Holmberg and Persson.	70
Figura 22. Registro de vibraciones GT1 y GT2.	73
Figura 23. Registro de vibraciones GT3 y GT4.	74
Figura 24. Delta de tiempo del arribo de la onda a geófonos G1 y G2 de los taladros APD-1	74
Figura 25. Delta de tiempo del arribo de la onda a geófonos G1 y G2 de los taladros APD-2	75
Figura 26. Delta de tiempo del arribo de la onda a geófonos G1 y G2 de los taladros APD-3	75
Figura 27. Delta de tiempo del arribo de la onda a geófonos G1 y G2 de los taladros APD-4	76
Figura 28. Efecto de filtro del Line Drilling 10 5/8” 50% de confianza	82
Figura 29. Rangos de filtro.....	83

Figura 30.	Vibraciones por tipo de explosivo 50% de confianza	84
Figura 31.	Niveles de vibración por cantidad de Kg Control 70 por taladro Buffer.	87
Figura 32.	Simulación de halos de daño en el talud bajo parámetros actuales de voladura.	88
Figura 33.	Simulación de halos de daño en el talud con Control 70 en BF02.....	89
Figura 34.	Factor de potencia mensual.....	103
Figura 35.	Factor de potencia trimestral.....	104
Figura 36.	Fragmentación mensual	105
Figura 37.	Fragmentación trimestral	106
Figura 38.	Velocidad pico partícula de la matriz rocosa mensual.....	107
Figura 39.	Velocidad pico partícula de la matriz rocosa trimestral	108
Figura 40.	Velocidad pico partícula del macizo rocoso mensual	109
Figura 41.	Velocidad pico partícula del macizo rocoso trimestral	110
Figura 42.	Velocidad onda P mensual.....	111
Figura 43.	Velocidad onda P trimestral	112
Figura 44.	Toma Split on line en descarga chancado	115

ANEXOS

Pág.

Anexo 1	Toma de data de campo enero 2025.....	135
Anexo 2	Toma de data de campo febrero 2025	136
Anexo 3	Toma de data de campo marzo 2025.....	137
Anexo 4	Toma de data de campo abril 2025	138
Anexo 5	Toma de data de campo mayo 2025.....	139
Anexo 6	Toma de data de campo junio 2025	140

INTRODUCCIÓN

La perforación y voladura constituyeron una de las operaciones unitarias más relevantes en la minería superficial, debido a su influencia directa en la fragmentación del material rocoso, el comportamiento dinámico del macizo rocoso y la eficiencia de los procesos posteriores de carguío, transporte y chancado. No obstante, cuando la energía explosiva no fue adecuadamente controlada, se generaron vibraciones excesivas en campo cercano, las cuales pudieron inducir daño estructural en la roca, comprometer la estabilidad geotécnica y afectar la seguridad operacional de la mina. Por ello, el análisis y control de las vibraciones se convirtió en un aspecto crítico para la optimización del proceso de voladura.

La unidad litológica Pórfido Temprano con alteración argílica, presente en la Fase 02N–3660, mostró un comportamiento vibracional particular debido a sus características geomecánicas y estructurales, lo que influyó en la propagación de ondas sísmicas generadas por las voladuras. En este contexto, el estudio de las vibraciones en campo cercano permitió evaluar con mayor precisión la respuesta dinámica del macizo rocoso, mediante el análisis de parámetros como la velocidad pico partícula (VPP) y la velocidad de propagación de la onda P, los cuales constituyeron indicadores clave del nivel de perturbación inducido por la voladura.

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y comparativo, considerando dos periodos claramente diferenciados: un primer periodo (enero–marzo de 2025), en el cual no se aplicaron mejoras en el control de vibraciones, y un segundo periodo (abril–junio de 2025), donde se implementaron ajustes en el diseño de voladura, el factor de potencia y el tipo de explosivo, con énfasis en el control vibracional. Durante ambos periodos

se ejecutó una voladura diaria, registrándose datos vibracionales en campo cercano que permitieron construir un modelo representativo del comportamiento del macizo rocoso.

Asimismo, la investigación integró la evaluación de la fragmentación del material volado mediante el modelo de Holmberg & Persson y el uso del software Split Online, herramientas que permitieron cuantificar el tamaño característico de fragmento (P80) y analizar su relación con el control de vibraciones. Esta integración permitió establecer una relación directa entre la optimización del uso del explosivo, la reducción de vibraciones y la mejora de la fragmentación, contribuyendo a una mayor eficiencia del proceso de voladura.

Desde el punto de vista estructural, la tesis se organizó en cinco capítulos. El Capítulo I desarrolló el planteamiento del problema, los objetivos, las hipótesis y la justificación de la investigación. El Capítulo II presentó el marco teórico y los antecedentes relacionados con vibraciones, modelos vibracionales, fragmentación y control de voladuras. El Capítulo III describió la metodología empleada, incluyendo el diseño de la investigación, la población y muestra, las técnicas e instrumentos de recolección de datos y los modelos aplicados. El Capítulo IV expuso los resultados obtenidos, analizando comparativamente los indicadores vibracionales y de fragmentación entre ambos periodos de estudio. Finalmente, el Capítulo V presentó la discusión de resultados, las conclusiones y las recomendaciones, sustentando los hallazgos en función de los objetivos planteados.

En este sentido, la investigación aportó un modelo técnico de control de vibraciones en campo cercano, aplicable a unidades litológicas similares, demostrando que una adecuada gestión de la energía explosiva permitió reducir las vibraciones, minimizar el daño inducido en el macizo rocoso y mejorar la fragmentación del material volado, contribuyendo a una operación minera más segura y eficiente.

I. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Antecedentes del problema.

- Díaz (2021), en la tesis titulada “Modelo predictivo de daño inducido por vibraciones originadas de tronadura en campo cercano y lejano en Minera Los Pelambres”, analizó el impacto de las vibraciones generadas por las voladuras sobre el macizo rocoso en distintas fases operativas, considerando tanto el campo cercano como el campo lejano. El estudio demostró que el análisis vibracional constituye el método más confiable para identificar el daño inducido en el macizo rocoso, permitiendo establecer modelos predictivos basados en parámetros medibles del proceso de voladura. Asimismo, se concluyó que el rediseño de la carga explosiva y de la geometría de voladura resulta fundamental para preservar la estabilidad de las paredes y taludes.
- Gómez (2019), en su tesis “Aplicación de modelo predictivo de daño (Cross Hole) para determinar la vibración pico partícula máxima (VPPc) producida por voladura y controlar la estabilidad de talud en Mina Constancia”, aplicó el método Cross Hole para modelar el comportamiento vibracional del macizo rocoso y evaluar su influencia en la estabilidad del talud. Los resultados evidenciaron que el daño inducido no depende exclusivamente del campo cercano, sino que también está influenciado por los efectos del campo lejano. En ese sentido, se concluyó que el control de los tiempos de retardo y la secuencia de iniciación son determinantes para reducir el impacto vibracional sin afectar la fragmentación requerida.
- Luque (2021), en la tesis titulada “Modelamiento de vibraciones por campo cercano para mitigar los impactos en el talud mediante el método de Cross Hole”, desarrolló un modelo vibracional aplicado a una mina de pórfido de cobre, utilizando ensayos Cross Hole para determinar la velocidad de onda P. A partir de esta información y

mediante el modelo de Holmberg y Persson, se establecieron criterios de daño basados en la velocidad pico partícula, lo que permitió optimizar los tiempos entre filas y el diseño de carga. El estudio concluyó que una secuencia de iniciación más controlada contribuye significativamente a la reducción del daño estructural post-voladura.

- Cáceres (2023), en su tesis “Estudio de campo cercano para el control de vibraciones por efectos de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del tajo Ferrobamba”, evaluó el comportamiento dinámico del macizo rocoso en una zona geotécnicamente inestable con el objetivo de minimizar el riesgo de deslizamiento. Mediante el análisis de vibraciones registradas en campo cercano, se diseñó una estrategia de voladura acorde a las condiciones geomecánicas del área. Los resultados permitieron concluir que la aplicación de criterios de control vibracional redujo significativamente el impacto de las voladuras sobre los taludes, mejorando la seguridad operacional.

1.2. Descripción del problema

En las operaciones mineras a cielo abierto, la etapa de voladura representó una de las actividades más determinantes dentro del ciclo de minado, ya que permitió la fragmentación del macizo rocoso y garantizó la continuidad del proceso productivo. Sin embargo, cuando el diseño de voladura no consideró adecuadamente las condiciones geológicas y geomecánicas del terreno, se generaron altos niveles de vibración en el macizo, provocando daños en los taludes, sobreexcavaciones y alteraciones estructurales que redujeron la estabilidad del terreno (Persson, Holmberg & Lee, 1994).

En la Fase 02N–3660 de una mina ubicada en el sur del Perú, se desarrollaron labores de explotación dentro de la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración Argílica,

caracterizada por una estructura fracturada, presencia de planos de debilidad y heterogeneidad mineralógica. Estas características influyeron directamente en la forma en que la energía de la detonación se transmitió a través del macizo, generando vibraciones irregulares en el campo cercano y una respuesta sísmica variable según el grado de alteración del pórfido (Jimeno, Carcedo & Ayala, 2019).

Durante el primer periodo de evaluación (enero, febrero y marzo de 2025), las voladuras se ejecutaron sin la implementación de mejoras específicas, observándose una fragmentación heterogénea, proyección de materiales finos y un incremento en la amplitud de las vibraciones. Esto evidencia la necesidad de estudiar la propagación de las ondas sísmicas en la zona, principalmente las ondas P, responsables de la transmisión de energía de compresión en el macizo rocoso (Díaz, 2021).

Con el propósito de optimizar los resultados, en el segundo periodo (abril, mayo y junio de 2025) se implementará un estudio de vibraciones en campo cercano orientado a determinar la velocidad de onda P y calcular la velocidad pico partícula crítica (VPP Crítico) mediante un modelo matemático. Para ello, se realizará voladuras diarias controladas en la Fase 02N–3660, registrando los efectos vibracionales con equipos de monitoreo sísmico. Los datos obtenidos se analizarán con el software Split Online, que permitirá cuantificar la fragmentación y establecer relaciones entre el tamaño de partícula (P80) y los niveles de vibración, aplicando el modelo de Holmberg & Persson para estimar la distribución granulométrica superficial (Kuznetsov, 1973; Cunningham, 1983).

El estudio evidenciara que la ausencia de una base de datos geofísica previa sobre las propiedades dinámicas del macizo rocoso dificultaba el control del daño inducido en los taludes de la Fase 02N–3660. La falta de parámetros como la velocidad de onda P o la VPP

Crítica limita la posibilidad de ajustar las cargas por retardo y los tiempos de iniciación, lo que incrementó el riesgo de deslizamientos parciales y sobreexcavaciones. Por ello, el presente trabajo tendrá como finalidad establecer un modelo de comportamiento vibracional que sirviera como referencia técnica para futuros diseños de voladura, garantizando la seguridad, la estabilidad del terreno y la eficiencia operativa en las labores de producción (Luque, 2021).

1.3. Formulación del problema.

1.3.1. Problema general

- ¿De qué manera el estudio de vibraciones en campo cercano de la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración argílica permitirá determinar la velocidad de onda P y definir el modelo de comportamiento vibracional del macizo rocoso en la Fase 02N–3660, al comparar el primer periodo (enero–marzo de 2025) sin mejora con el segundo periodo (abril–junio de 2025) con la implementación del control de vibraciones?

1.3.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo influye el cálculo de la velocidad pico partícula crítica (VPP Crítico) en la identificación de los niveles de perturbación del macizo rocoso en condiciones de campo cercano en la Fase 02N–3660?
- ¿De qué manera el tipo de explosivo empleado (HA73G y Control 70) afecta el modelo vibracional, la propagación de ondas sísmicas y el daño inducido en la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración argílica?

- ¿Cómo varía la fragmentación del material volado, evaluada mediante el modelo de Holmberg & Persson y el software Split Online, al comparar los resultados del primer y segundo periodo de estudio?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Determinar el modelo de vibraciones en campo cercano de la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración Argílica para calcular la velocidad de onda P en la Fase 02N-3660, comparando los resultados obtenidos entre el primer periodo (enero-marzo) sin mejora y el segundo periodo (abril-junio de 2025) con la implementación del control de vibraciones.

1.4.2. Objetivos Específicos:

- Calcular la velocidad pico partícula crítica (VPP Crítico) y establecer los niveles de perturbación del macizo rocoso en el campo cercano.
- Analizar el modelo vibracional del pórfido temprano con alteración argílica mediante la aplicación de los explosivos HA73G y Control 70.
- Evaluar la fragmentación del material volado utilizando el modelo Holmberg & Persson y el software Split Online, comparando los resultados de ambos periodos de estudio.

1.5. Justificación e importancia de la investigación

La presente investigación se justificará porque será necesario caracterizar el comportamiento vibracional del macizo rocoso en la unidad litológica Pórfido Temprano

con alteración Argílica, ubicada en la Fase 02N–3660, donde se desarrollarán voladuras diarias. Al no existir estudios previos específicos en esta litología, el proyecto permitirá obtener la velocidad de onda P y el modelo de vibraciones en campo cercano, parámetros fundamentales para predecir el daño inducido por las detonaciones y mejorar la estabilidad geotécnica de la zona (Persson, Holmberg & Lee, 1994).

Desde el punto de vista técnico, la investigación utilizará herramientas avanzadas como el modelo Holmberg & Persson y el software Split Online, lo que permitirá estimar la fragmentación del material y correlacionar los resultados con la energía vibracional generada por los explosivos. De esta manera, se lograrán establecer parámetros confiables para el diseño de voladura, basados en el comportamiento geomecánico del pórfido alterado, lo cual contribuirá a mejorar la precisión técnica del proceso (Cunningham, 1983; Jimeno, Carcedo & Ayala, 2019).

En el ámbito operacional, el estudio permitirá optimizar la secuencia de voladura, la carga por retardo y el control de vibraciones, reduciendo efectos no deseados como la sobreexcavación, el agrietamiento excesivo o la pérdida de cohesión en los taludes. La comparación entre el periodo sin mejora (enero–marzo 2025) y el periodo intervenido (abril–junio 2025) permitirá evaluar el impacto real de la implementación, viéndose reflejado en un proceso de voladura más eficiente y con resultados operativos superiores (Chiappetta, 2020).

En cuanto al aspecto económico, la investigación generará beneficios al mejorar la fragmentación del material, lo que reducirá los costos asociados al chancado, carguío y acarreo. Asimismo, al controlar las vibraciones, se evitarán costos adicionales por fallas en taludes, reprocesos o intervenciones correctivas. La implementación del modelo vibracional

permitirá tomar decisiones más económicas respecto al tipo y cantidad de explosivo utilizado, favoreciendo una operación más rentable (López, López & García, 2003).

En la dimensión social, el control adecuado de vibraciones minimizará la percepción negativa de las voladuras por parte de los trabajadores y comunidades cercanas, generando un entorno operativo más estable y responsable. Una operación minera que controle impactos vibracionales demostrará un compromiso con la sostenibilidad y con la protección de áreas sensibles, fortaleciendo la confianza de los grupos de interés en la gestión minera (Gómez & Figueroa, 2020).

Finalmente, desde el enfoque de seguridad minera, el estudio permitirá identificar límites seguros de vibración mediante el cálculo de la VPP Crítica, reduciendo riesgos como proyecciones de roca, desprendimientos, inestabilidad de taludes y daños a equipos. Un control vibracional adecuado contribuirá a proteger la integridad del personal y garantizará que las voladuras futuras se desarrollen dentro de parámetros seguros y normativamente aceptables (Díaz, 2021; EXSA, 2008).

1.6. Limitaciones y viabilidad

La investigación presentará limitaciones asociadas a la variabilidad geológica del macizo rocoso tipo Pórfido Temprano con alteración Argílica, ya que esta litología mostrará cambios en la fracturación, humedad y competencia del terreno, lo cual influirá en la propagación de las vibraciones y en la precisión de las mediciones obtenidas con geófonos triaxiales. Asimismo, la programación operativa de la mina podría restringir el número de voladuras monitoreadas por día, reduciendo la densidad de datos para el análisis comparativo entre periodos. Sin embargo, el estudio será totalmente viable, porque la operación brindará acceso continuo a la Fase 02N-3660, se dispondrá de equipos calibrados

para el registro sísmico y del software Split Online y el modelo Holmberg & Persson para el procesamiento de datos. Además, el personal técnico especializado y los recursos logísticos garantizarán la correcta ejecución de las mediciones, permitiendo obtener resultados confiables para optimizar el diseño de voladuras y el control de vibraciones en campo cercano (Hernández Sampieri, Fernández & Baptista, 2014; Jimeno, Carcedo & Ayala, 2019; EXSA, 2008).

1.7. Hipótesis

1.7.1. Hipótesis Principal

- Al realizar el estudio de vibraciones en campo cercano de la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración Argílica, será posible determinar la velocidad de onda P y definir el modelo de comportamiento vibracional del macizo rocoso en la Fase 02N–3660, contribuyendo al control de vibraciones y a la mejora de la fragmentación durante el segundo periodo de evaluación (abril–junio de 2025).

1.7.2. Hipótesis Específicas:

- Al calcular la velocidad pico partícula crítica (VPP Crítico), se logrará identificar los niveles de perturbación del macizo rocoso y su influencia directa en la estabilidad del terreno.
- El modelo de vibraciones obtenido en el campo cercano variara según el tipo de explosivo empleado (HA73G y Control 70), afectando la propagación de ondas y el daño inducido en la unidad litológica.

- La aplicación del modelo Holmberg & Persson y el uso del software Split Online permitirá comprobar que la fragmentación del material mejoró durante el segundo periodo, correlacionándose con una reducción de las vibraciones y una mayor eficiencia en la voladura.

1.8. Variables

1.8.1. Definición conceptual y operacional de las variables

1.8.1.1. Variable independiente:

Se entiende como el análisis de las ondas sísmicas generadas por la voladura en el entorno inmediato al frente de carga, con el propósito de determinar la velocidad de onda P y la VPP Crítica, evaluando la respuesta del macizo rocoso ante la energía liberada. Este estudio permitirá controlar el daño estructural y optimizar el diseño de voladura en la Fase 02N-3660 (Persson, Holmberg & Lee, 1994).

VI: Estudio de vibraciones en campo cercano.

1.8.1.2. Variable dependiente:

Se definirá como la rapidez con que se propagan las ondas de compresión (ondas P) generadas por la detonación de explosivos en el macizo rocoso. Este parámetro reflejara la respuesta dinámica y la competencia del terreno, permitiendo evaluar la transmisión de energía sísmica y el nivel de perturbación en el campo cercano durante las voladuras en la Fase 02N-3660 (Jimeno, Carcedo & Ayala, 2019).

VD: Velocidad de onda P.

1.8.2. Operacionalización de las variables

Tabla 1

Operacionalización de las variables

Variable	Definición conceptual	Indicador	Medición	Unidad
VI: Estudio de vibraciones en campo cercano	Análisis de las ondas sísmicas generadas por la detonación de explosivos en el entorno inmediato al frente de voladura, para determinar la velocidad de onda P y la VPP Crítica, controlando el daño estructural y optimizando el diseño de voladura.	Velocidad pico partícula (VPP) Niveles de perturbación	Registro sísmico con geófonos y software de análisis	mm/s
VD: Velocidad de onda P	Rapidez de propagación de las ondas de compresión (ondas P) generadas durante la voladura, que reflejó la respuesta dinámica del macizo rocoso y su grado de competencia estructural.	Velocidad de onda P	Cálculo por modelo matemático y correlación con registros sísmicos	m/s

Nota: tabla de operacionalización de variables

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del trabajo de investigación

Díaz, M. A. (2021). En su tesis “Modelo predictivo de daño inducido por vibraciones originadas de tronadura en campo cercano y lejano en Minera Los Pelambres”, Universidad de Chile, Santiago, Chile. El objetivo del estudio fue desarrollar un modelo predictivo que determinara el daño inducido por vibraciones generadas por tronaduras en zonas de campo cercano y lejano. La metodología fue de tipo correlacional con análisis empírico de datos de campo y modelamiento matemático a partir de registros sísmicos proporcionados por ENAEX. El diseño fue no experimental y la muestra se conformó por mediciones de vibración en distintas unidades geotécnicas. Se concluyó que la velocidad pico partícula (VPP) y la energía de detonación influyeron directamente en el deterioro del macizo rocoso, recomendándose rediseñar las cargas y tiempos de retardo. Este estudio aportó a la presente investigación como referencia técnica para el modelamiento del comportamiento vibracional y la estimación de la velocidad de onda P en condiciones litológicas similares.

Aguad, H. I. (2024). En su tesis “Optimización de la tronadura de precorte en minería a cielo abierto mediante el uso de explosivos con carga dirigida”, Universidad de Chile, Santiago, Chile). El propósito fue optimizar la tronadura de precorte para mejorar la fragmentación y disminuir las vibraciones inducidas en el macizo. La metodología fue experimental, aplicando pruebas de campo con diferentes configuraciones de carga dirigida, registrando la VPP y la fragmentación. El diseño fue comparativo con una muestra de voladuras controladas en banco. Los resultados demostraron que el uso de explosivos con carga dirigida redujo significativamente las

vibraciones hacia el talud final y mejoró la uniformidad granulométrica. Se concluyó que la energía dirigida es eficaz para disminuir la perturbación sísmica. Este trabajo aportó al presente estudio al evidenciar estrategias aplicables para reducir la vibración en campo cercano y mejorar la fragmentación mediante ajustes en la carga explosiva.

Cocola, J. P. (2022). En su tesis “Análisis y monitoreo de las vibraciones producidas por las voladuras para reducir los daños al macizo rocoso en el tajo 753E de la mina Bateas”, Universidad de Chile, Santiago, Chile. El estudio tuvo como objetivo monitorear y analizar las vibraciones generadas por las voladuras en el tajo 753E, con la finalidad de reducir los daños estructurales al macizo rocoso. La metodología fue de campo, con diseño no experimental explicativo, utilizando siete registros sísmicos con geófonos Instantel para medir la velocidad de partícula en tres direcciones, relacionando la carga de explosivo con la distancia. La muestra comprendió voladuras reales ejecutadas durante un mes de producción. Los resultados demostraron que la propagación de vibraciones siguió patrones de atenuación predecibles y que la distancia influyó significativamente en la reducción de la VPP. Se concluyó que el monitoreo en campo cercano permitió definir zonas seguras de carga y distancias críticas. Este antecedente aportara al presente estudio al ofrecer una base práctica para el control de vibraciones mediante el cálculo de la VPP Crítica en macizos similares.

Cárdenas, R. A. (2023). En su tesis “Evaluación de las vibraciones producidas por voladuras en el tajo 42 de la Unidad Minera Antapaccay para el control del daño en taludes”, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú. El objetivo fue analizar las vibraciones generadas por voladuras en el tajo 42 de Antapaccay con el fin de controlar el daño inducido en los taludes finales. La

metodología fue de tipo aplicada con diseño no experimental y enfoque cuantitativo, utilizando registros sísmicos de campo obtenidos con geófonos Instantel y correlacionados con las cargas por retardo y la distancia a los puntos de monitoreo. La muestra comprendió 18 voladuras monitoreadas durante tres meses. Los resultados mostraron que la velocidad pico partícula (VPP) aumentó exponencialmente con la carga detonada y que el control de retardo y espaciamiento redujo significativamente las vibraciones. Se concluyó que un monitoreo sistemático de vibraciones permitió mantener la estabilidad de los taludes sin comprometer la fragmentación. Este antecedente aportara a la investigación actual al validar la aplicación del monitoreo en campo cercano para establecer umbrales de seguridad en zonas de pórfidos fracturados.

Huamán, E. D. (2022). En su tesis “Análisis de las vibraciones por voladuras en el tajo Ferrobamba para el control de daños en el macizo rocoso, Las Bambas – Apurímac”, Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú. El estudio tuvo como finalidad evaluar las vibraciones generadas por las voladuras en el tajo Ferrobamba, identificando los efectos sobre la estabilidad del macizo rocoso y la seguridad operacional. La metodología fue aplicada y correlacional, con diseño no experimental y uso de equipos sismográficos de tres componentes. La muestra comprendió 15 voladuras de producción y buffer, cuyos resultados se analizaron con el software Blastware. Los valores obtenidos de VPP se ajustaron a la ecuación empírica de Holmberg y Persson, determinándose los parámetros $K = 380.26$ y $\alpha = 1.10$. Se concluyó que la atenuación de las ondas sísmicas siguió una tendencia logarítmica y que la reducción del factor de carga disminuyó la vibración total en 27%. Este antecedente aportara al presente estudio al demostrar que el modelamiento

empírico es esencial para definir la VPP Crítica y calibrar el comportamiento vibracional en unidades litológicas alteradas.

Calla, J. L. (2021). En su tesis “Modelamiento de vibraciones en campo cercano para minimizar el daño estructural en la Fase 5 del Tajo Cuajone”, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú. El objetivo fue modelar las vibraciones generadas por voladuras en campo cercano para reducir el daño estructural en el macizo rocoso. La metodología fue de tipo aplicada con diseño experimental, utilizando ensayos de voladura con variaciones de carga lineal y mediciones con geófonos triaxiales. La muestra estuvo conformada por diez voladuras piloto realizadas en la Fase 5 del Tajo Cuajone. Los resultados demostraron que la velocidad de onda P varió entre 2,300 y 3,000 m/s, dependiendo del grado de fracturamiento y del tipo de explosivo empleado. Se concluyó que un control preciso de la secuencia y la carga por retardo permitió minimizar las vibraciones en el campo cercano. Este antecedente aportara a la presente tesis como base técnica para correlacionar la velocidad de onda P con la VPP Crítica en litologías alteradas del sur peruano.

2.2. Bases teóricas sobre el trabajo de investigación

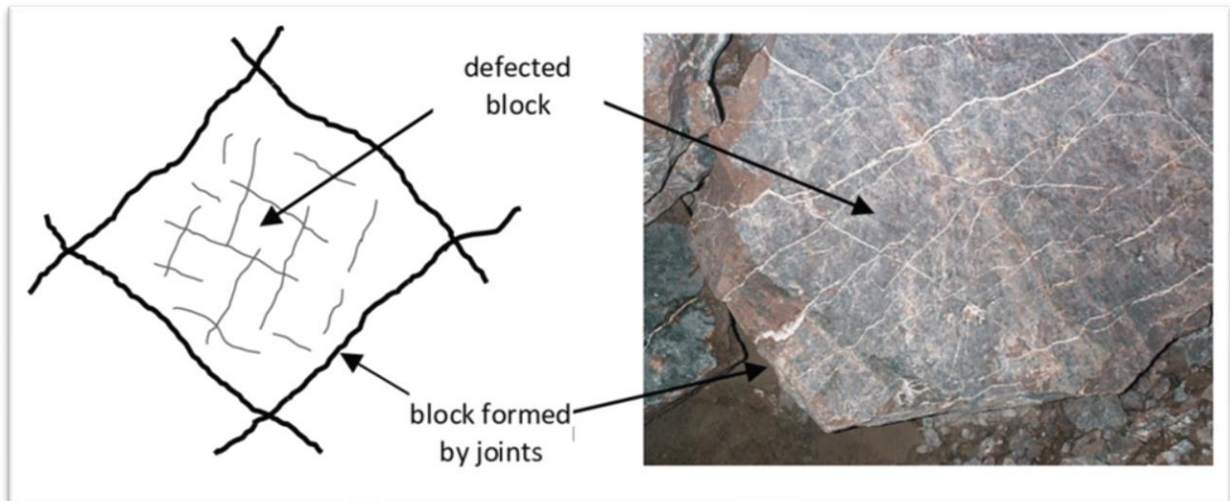
2.2.1. Macizo rocoso

El macizo rocoso se define como el conjunto de bloques de roca intacta y discontinuidades naturales tales como fallas, diaclasas, juntas y planos de estratificación que conforman el terreno natural. Su comportamiento mecánico y dinámico no depende únicamente de la resistencia de la roca intacta, sino principalmente de la geometría, orientación, espaciamiento y condiciones de relleno de dichas discontinuidades. En operaciones de voladura, el macizo rocoso controla la

propagación de ondas sísmicas, la fragmentación del material y el nivel de daño inducido por vibraciones (Ramírez & Alejano, 2004).

Figura 1.

Estructura del macizo rocoso y presencia de discontinuidades.



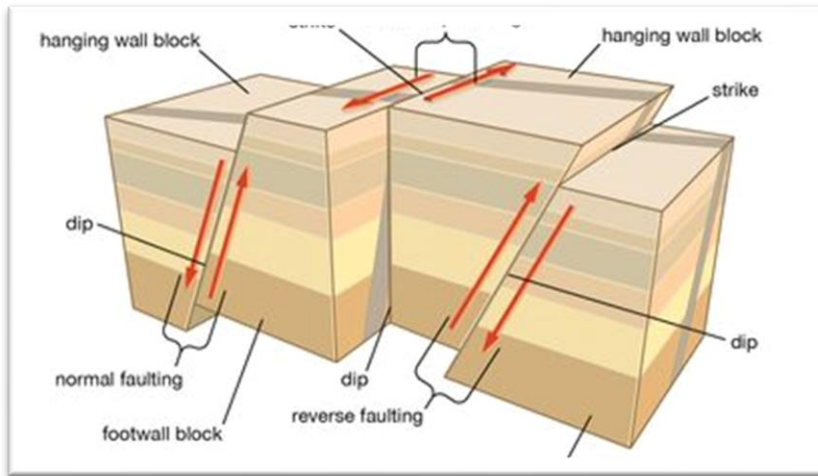
Fuente: Ramírez y Alejano (2004).

2.2.2. Estructuras geológicas

Las estructuras geológicas como fallas, fracturas, juntas y planos de debilidad influyen directamente en la transmisión y atenuación de la energía liberada durante una voladura. Estas estructuras pueden amplificar, reflejar o disipar las ondas sísmicas, modificando el patrón de vibraciones y el daño inducido en el macizo rocoso. Su correcta identificación es fundamental para el diseño de voladuras seguras y eficientes (Manual del Especialista en Voladura, 2008).

Figura 2.

Principales estructuras geológicas que influyen en la propagación de vibraciones.



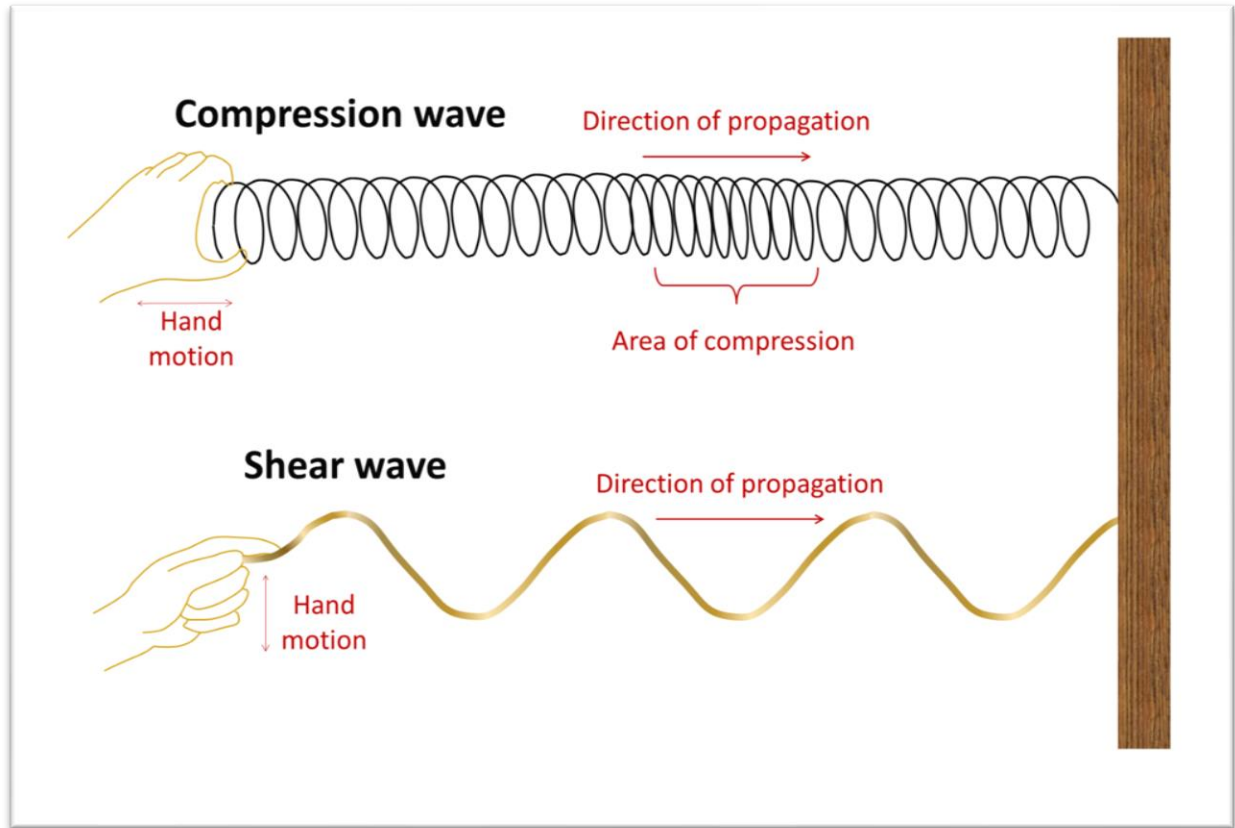
Fuente: Manual del Especialista en Voladura (2008).

2.2.3. Velocidad de la onda P

La velocidad de la onda P (V_p) corresponde a la velocidad de propagación de las ondas sísmicas primarias o de compresión a través del macizo rocoso. Estas ondas se propagan en la misma dirección del esfuerzo aplicado y su velocidad depende de la densidad, el módulo de elasticidad y el grado de fracturamiento del material. La V_p es un parámetro clave para caracterizar la respuesta dinámica del macizo y evaluar su comportamiento frente a vibraciones inducidas por voladuras (Jimeno, Carcedo & Ayala, 2019).

Figura 3.

Propagación de la onda P en un medio rocoso.



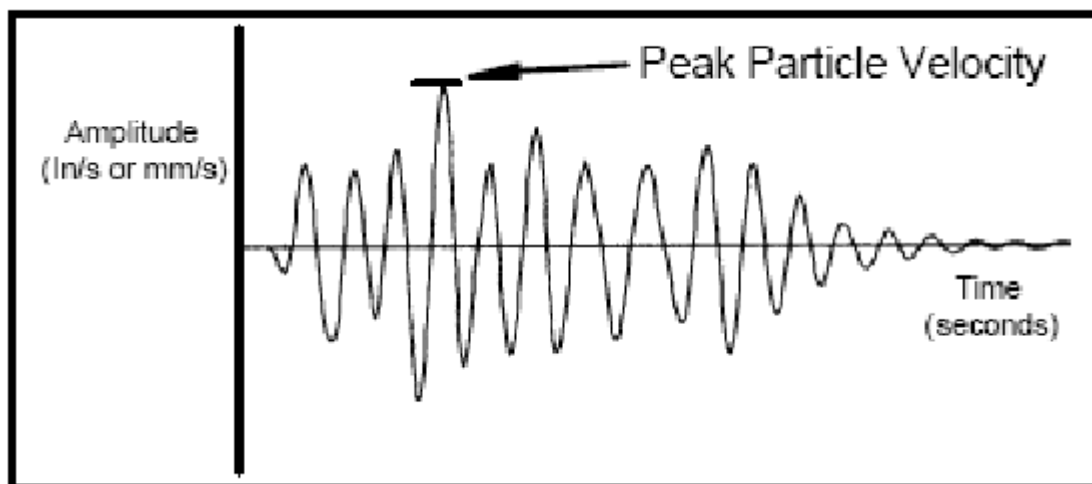
Fuente: Jimeno, Carcedo y Ayala (201

2.2.4. Velocidad Pico de Partícula (VPP)

La velocidad pico de partícula (VPP) representa la máxima velocidad instantánea alcanzada por una partícula del terreno durante el paso de una onda sísmica. Es el parámetro más utilizado para evaluar el impacto de las vibraciones producidas por voladuras, ya que se correlaciona directamente con el daño potencial al macizo rocoso, estructuras y taludes mineros (Siskind et al., 1980).

Figura 4.

Registro típico de velocidad pico de partícula durante una voladura.



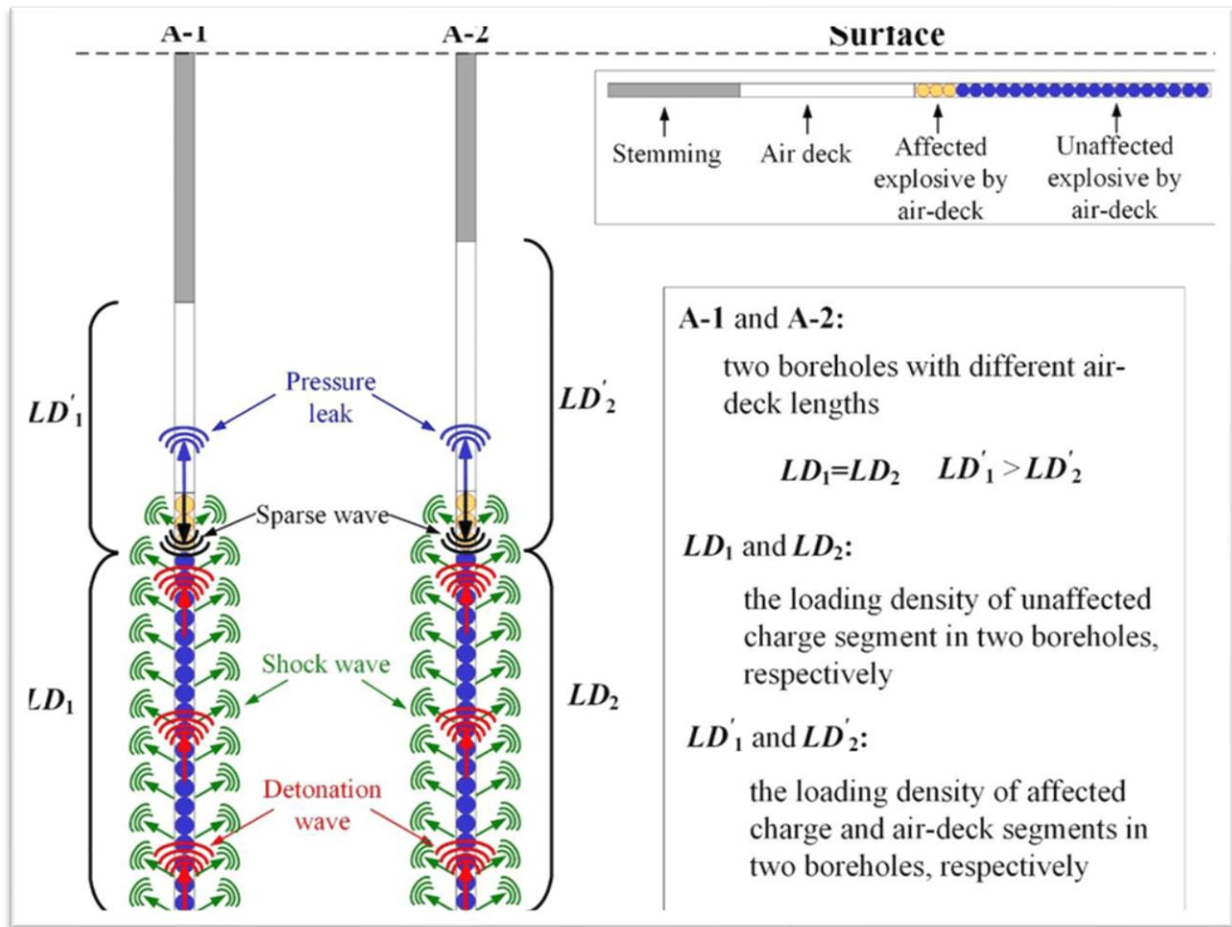
Fuente: Siskind et al. (1980).

2.2.5. Campo cercano

El campo cercano corresponde a la zona inmediata a la fuente de la explosión, donde la energía liberada es máxima y las ondas sísmicas generan deformaciones permanentes en el macizo rocoso. En esta zona, las vibraciones no siguen únicamente un comportamiento elástico, por lo que el riesgo de daño estructural y pérdida de estabilidad es mayor (Luque, 2021).

Figura 5.

Zona de campo cercano en una voladura.



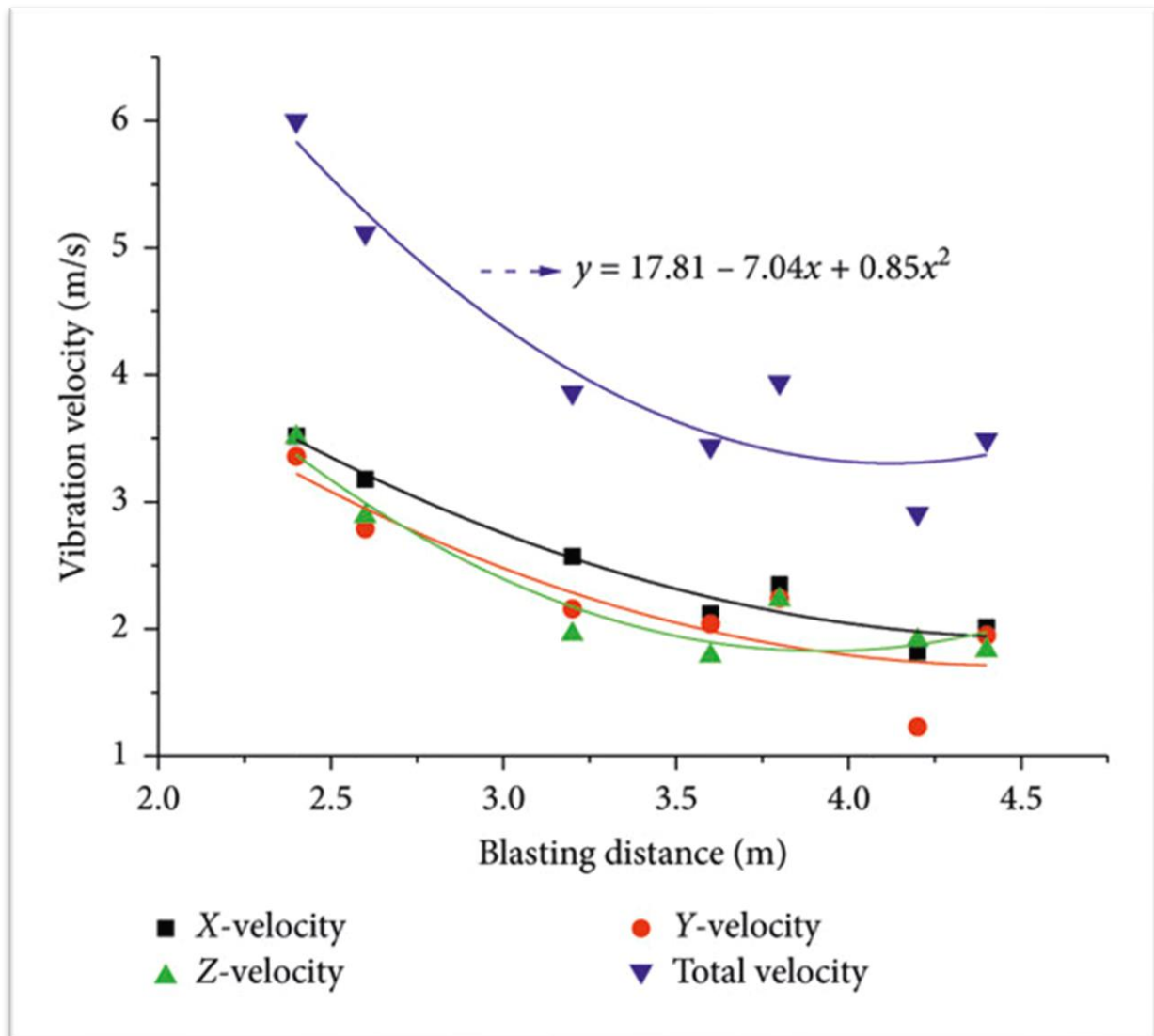
Fuente: Luque (2021).

2.2.6. Campo lejano

El campo lejano comprende las zonas más alejadas de la fuente de detonación, donde la energía sísmica se atenúa progresivamente y el comportamiento del macizo rocoso es predominantemente elástico. En este campo, las vibraciones siguen leyes de atenuación en función de la distancia y la carga explosiva (Díaz, 2021).

Figura 6.

Atenuación de vibraciones en el campo lejano.



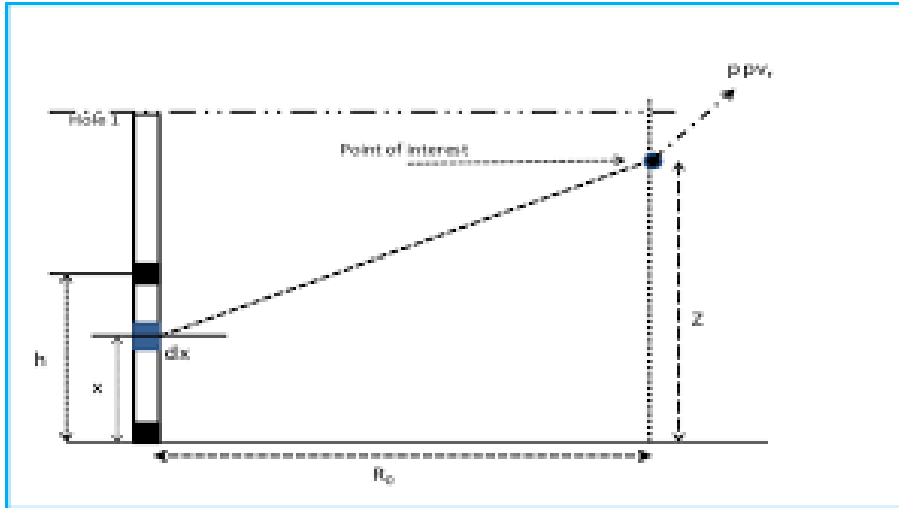
Fuente: Díaz (2021).

2.2.7. Modelo de vibraciones de Holmberg y Persson

El modelo de Holmberg y Persson es un modelo empírico ampliamente utilizado para estimar la velocidad pico de partícula en función de la geometría de la carga explosiva, la distancia al punto de monitoreo y las características del macizo rocoso. Este modelo es especialmente aplicable en estudios de campo cercano, ya que incorpora parámetros geométricos que permiten una mejor estimación del comportamiento vibracional (Persson, Holmberg & Lee, 1994).

Figura 7.

Esquema del modelo de vibraciones de Holmberg y Persson.



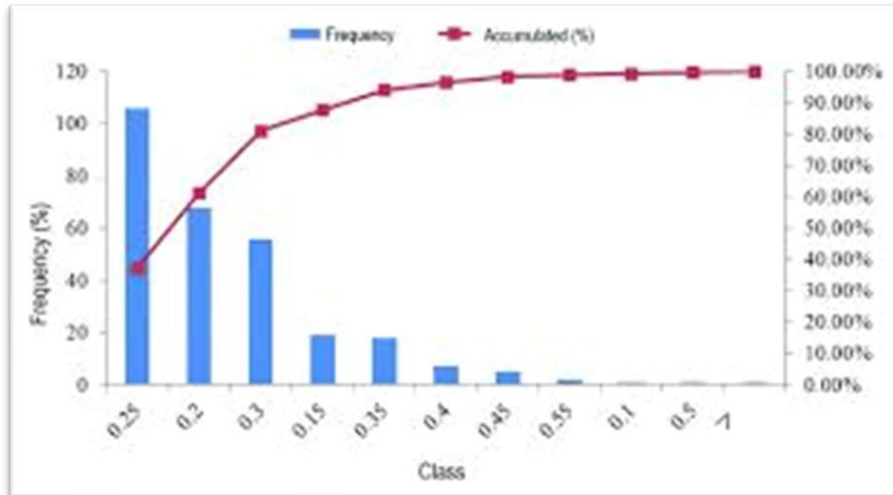
Persson, Holmberg y Lee (1994).

2.2.8. Fragmentación del material

La fragmentación del material volado es el resultado de la interacción entre la energía explosiva, la resistencia de la roca y el diseño de perforación y voladura. Una fragmentación adecuada mejora la eficiencia de las operaciones de carguío y chancado, reduciendo costos operativos y consumo energético (Chiappetta, 2020).

Figura 8.

Distribución granulométrica del material fragmentado (P80).



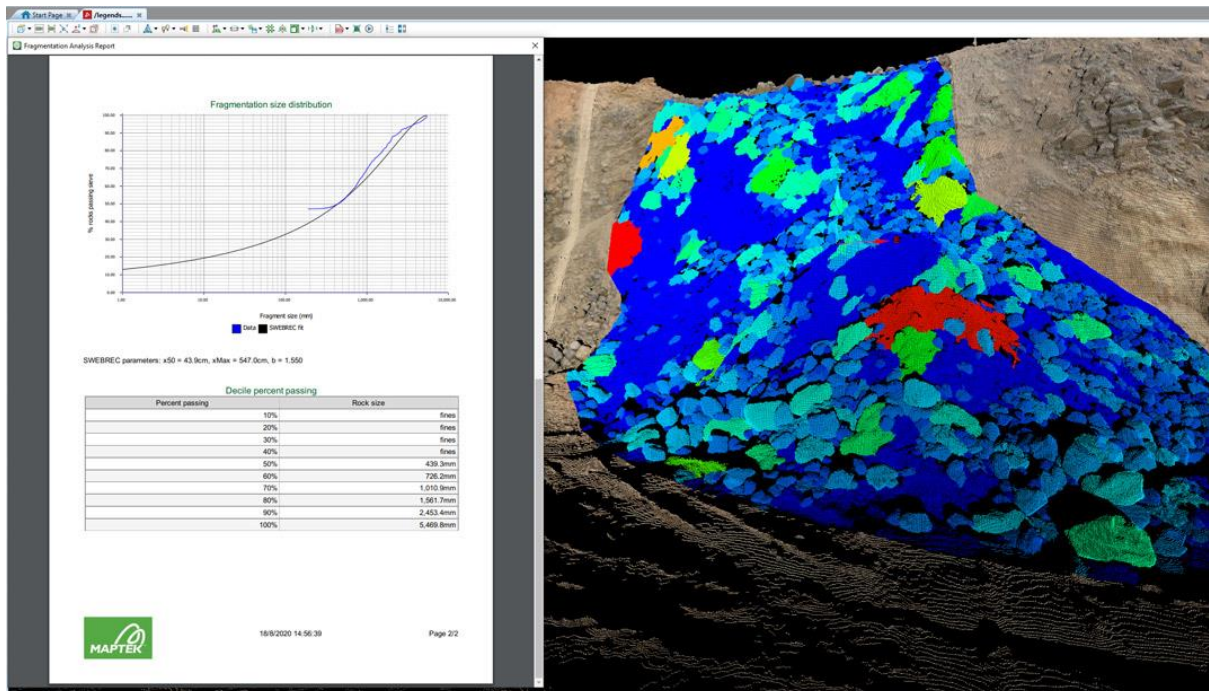
Fuente: Chiappetta (2020).

2.2.9. Software Split Online

Split Online es una herramienta digital utilizada para la medición automática de la fragmentación del material volado mediante análisis de imágenes. El software permite obtener indicadores granulométricos como P80, P50 y curvas de distribución de tamaños, facilitando la evaluación objetiva del desempeño de la voladura (Kemeny, 2017).

Figura 9.

Análisis de fragmentación mediante el software Split Online.



Fuente: Kemeny (2017).

2.2.10. Medición y control de vibraciones

La medición de vibraciones en minería se realiza mediante geófonos triaxiales y sismógrafos digitales, los cuales registran las componentes vertical, radial y transversal del movimiento del terreno. El control de vibraciones busca limitar el daño inducido al macizo rocoso mediante la optimización de la carga por retardo, la secuencia de iniciación y el tipo de explosivo utilizado (EXSA, 2008).

Figura 10.

Instrumentación para monitoreo de vibraciones en voladuras.



Fuente: EXSA (2008).

2.3. Descripción operativa

La operación minera de Quellaveco se desarrolla bajo un esquema de tajo abierto altamente mecanizado y automatizado, conformado por una secuencia operativa integrada que combina geología, planificación, perforación, voladura, carguío, acarreo, chancado, transporte y procesamiento. Los principales procesos son los siguientes:

2.3.1. Geología y Modelamiento del Yacimiento

El yacimiento Quellaveco corresponde a un depósito de tipo pórfido cuprífero, ubicado en el sur del Perú, dentro de la provincia de Mariscal Nieto, región Moquegua. Desde el punto de vista geológico regional, el yacimiento se emplaza en la Cordillera Occidental de los Andes, asociada a un contexto tectónico compresivo y a una intensa

actividad magmática del Batolito Andino, lo que dio origen a múltiples intrusiones ígneas y sistemas de alteración hidrotermal que controlan la mineralización metálica.

Litológicamente, el área de estudio está dominada por intrusivos de composición pórfida, destacando el Pórfido Temprano de composición cuarzodiorítica a diorítica, el cual constituye una de las principales unidades litológicas presentes en la zona de explotación. Esta unidad se encuentra intensamente fracturada y afectada por procesos de alteración hidrotermal, principalmente de tipo argílica, lo que modifica sus propiedades geomecánicas y su comportamiento dinámico frente a las voladuras. Asimismo, se reconocen otras unidades como dioritas, granodioritas, brechas hidrotermales y cuerpos volcánicos asociados, que presentan contactos irregulares y relaciones intrusivas complejas.

Desde el punto de vista estructural, el yacimiento está controlado por un sistema de fallas regionales y locales, siendo la falla Incapuquio una de las estructuras más relevantes, con rumbo predominante NO–SE. Estas estructuras condicionan la orientación de las discontinuidades, el grado de fracturamiento del macizo rocoso y la propagación de las ondas sísmicas generadas durante las voladuras. La presencia de zonas intensamente fracturadas y brechadas favorece la atenuación de las vibraciones, pero también incrementa la susceptibilidad al daño inducido en campo cercano.

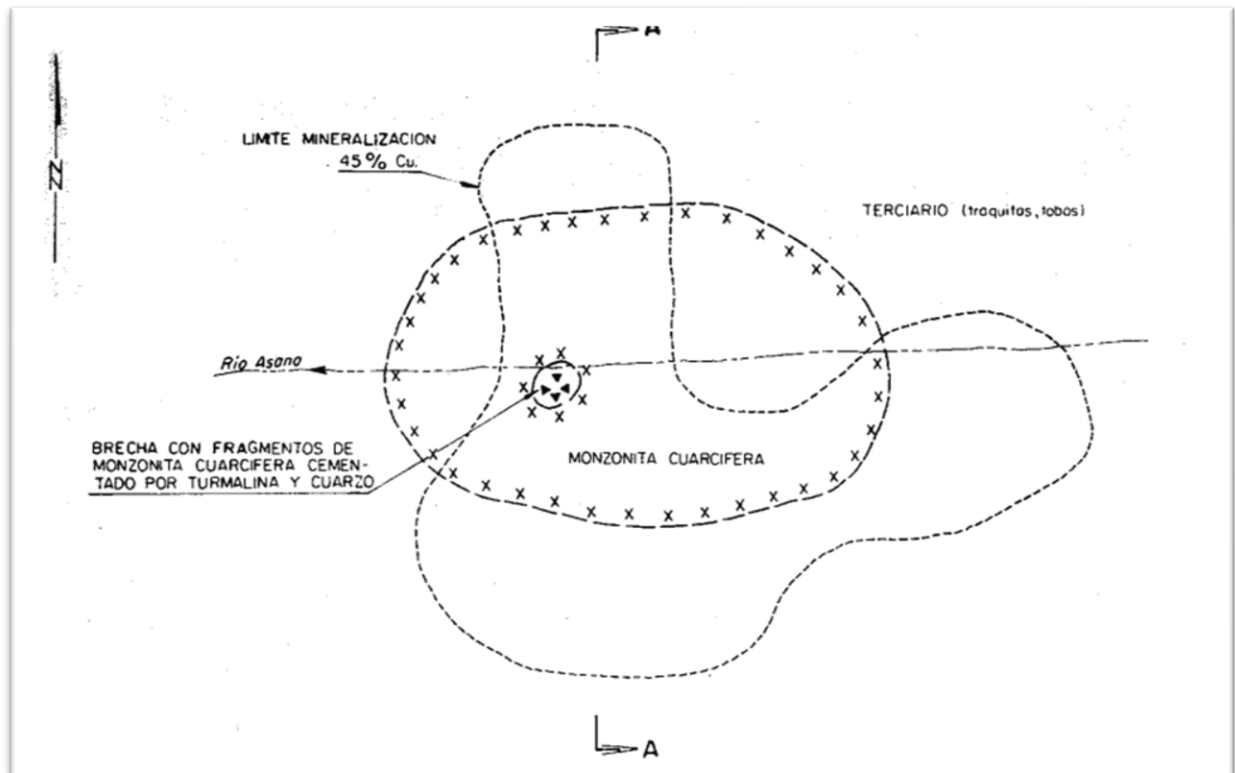
El modelamiento geológico del yacimiento se ha desarrollado a partir de información de sondajes, mapeo geológico de frentes y bancos, y secciones geológicas longitudinales y transversales. Dicho modelamiento permite definir la distribución espacial de las unidades litológicas, los dominios estructurales y las zonas de alteración, constituyendo una herramienta fundamental para la planificación minera y

el diseño de voladuras. En particular, la caracterización del Pórfido Temprano con alteración argílica resulta clave para esta investigación, debido a que sus propiedades elásticas y su grado de fracturamiento influyen directamente en la velocidad de propagación de la onda P y en la respuesta vibracional del macizo rocoso.

En este contexto, el modelo geológico del yacimiento Quellaveco proporciona la base para el análisis del comportamiento vibracional en la Fase 02N-3660, permitiendo correlacionar las mediciones de velocidad de onda P, velocidad pico de partícula (VPP) y fragmentación con las características litológicas y estructurales del macizo rocoso, y contribuyendo al establecimiento de criterios técnicos para el control de vibraciones en campo cercano.

Figura 11.

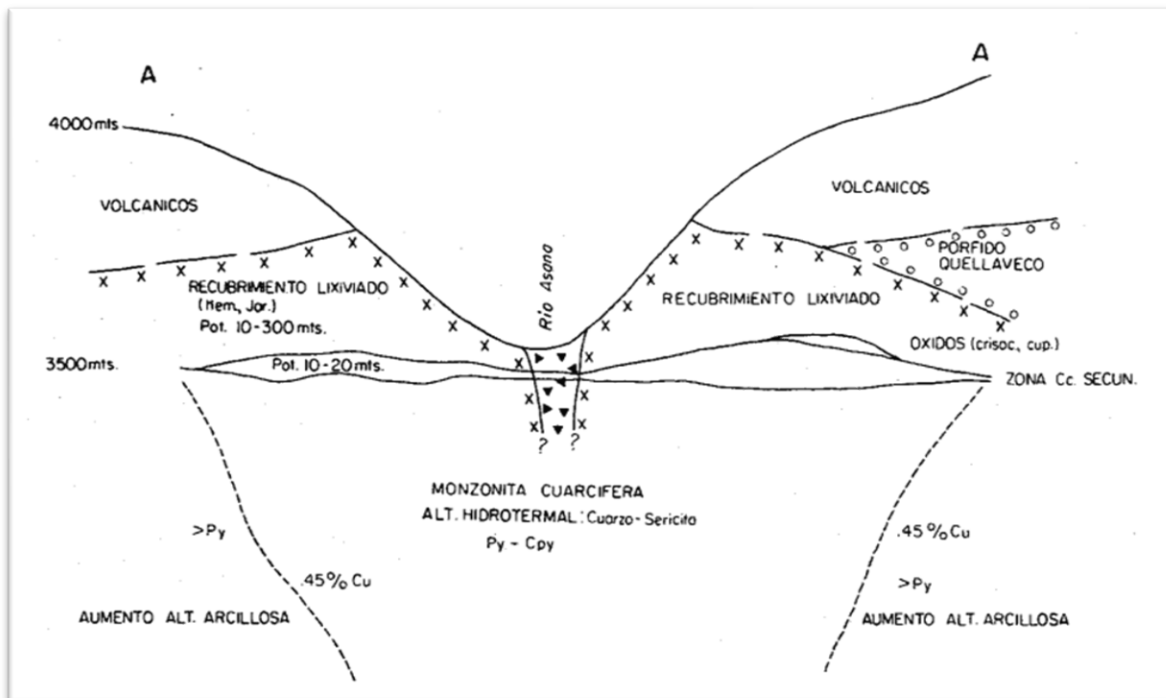
Bosquejo Geológico del Yacimiento Quellaveco



Fuente. Geología

Figura 12.

Sección esquemática a través del yacimiento Quellaveco



Fuente. Geología

Figura 13.

Perfil de Yacimiento Quellaveco

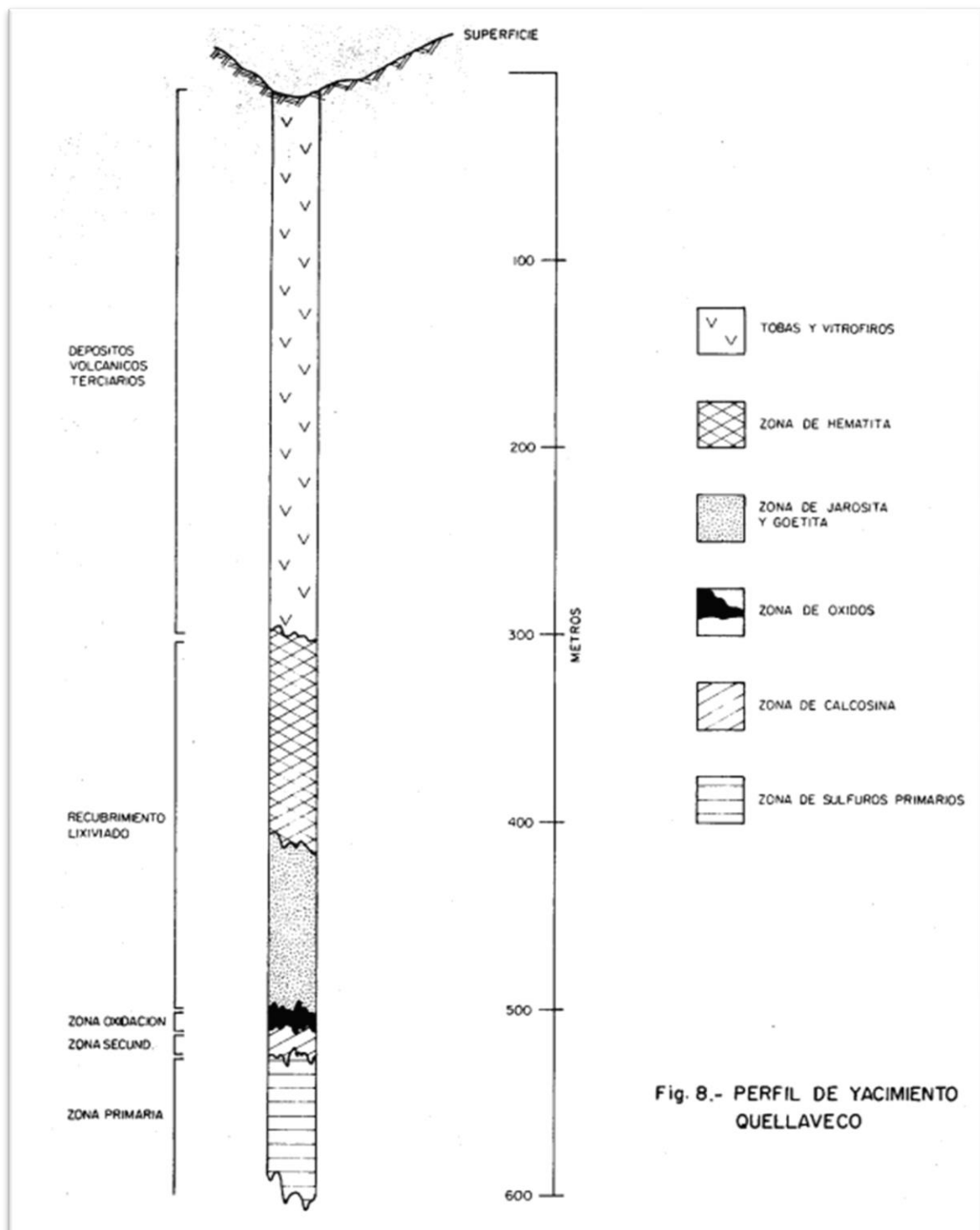


Fig. 8.- PERFIL DE YACIMIENTO QUELLAVECO

Fuente. Geología

2.3.2. Planeamiento Minero

El planeamiento de corto, mediano y largo plazo define el avance del tajo, las fases de minado y el ritmo de producción.

Incluye:

- Diseño de phases y pushbacks.
- Determinación de bancos, bermas de seguridad y ángulos de talud.
- Secuencia de minado para cumplir la ley de alimentación a planta.
- Simulación de rutas, productividad y costos mediante software minero.

El planeamiento se coordina directamente con el centro de control para garantizar el cumplimiento del programa diario.

2.3.3. Perforación

Según López Jimeno, C., López Jimeno, E., & Ayala Carcedo, F. J. La perforación es una operación minera que tiene como fin crear taladros de dimensiones y orientación determinadas para lograr una rotura eficiente de la roca.

La perforación tiene como finalidad: crear barrenos de producción, Buffer, Precorte; permitir una fragmentación controlada de roca, optimizar el carguío y acarreo y reducir la sobre rotura y vibraciones. Los equipos que se usan son:

Tabla 2***Pit Viper 351 – Epiroc.***

Main application area	Perforación rotativa de barrenos para voladura
Drilling method	Rotativa
Product family	Pit Viper
Single-pass depth	65 ft (≈19,8 m)
Maximum hole depth	135 ft (≈41,1 m)
Weight on bit (WOB)	125,000 lbs (≈56,7 t)
Pulldown capacity	0 – 120,000 lbf (≈0 – 53,6 t)
Pullback capacity	0 – 75,000 lbf (≈0 – 34 t)
Height - tower up	103,2 ft
Length - tower up	59 ft
Height - tower down	26,9 ft
Length - tower down	100 ft
Width	28,7 ft
Estimated weight	

Nota. Propia

Figura 14.

Pit Viper 351 – Epiroc.



Nota. Propia

Tabla 3

Smart Roc D65

Área de aplicación principal	Mining
Método de perforación	Down-the-hole
Diámetro del barreno	4,6 - 9 inch
Tamaño del martillo/martillo en fondo	4" ; 5" ; 6" ; 7"
Rotary head	DHR6 H 45 ; DHR6 H 56 ; DHR6 H 68 ; DHR6 H 78
Profundidad máxima de barreno	183,7 ft
Motor	540 HP
Air capacity (FAD)	995 cfm

Nota. Propia

Figura 15.

Perforación secundaria



Nota. Propia

2.3.4. Voladura

La voladura se realiza bajo estándares de control de vibraciones, proyecciones y estabilidad.

Incluye:

- Carguío de taladros con emulsiones y boosters.
- Diseño de secuencia y tiempos de retardo precisos (electrónicos).
- Control de energía y factor de carga por tipo de roca.
- Monitoreo de vibraciones (VPP) y ondas sísmicas.

La voladura busca lograr una fragmentación óptima para reducir costos en chancado y mejorar el rendimiento en carguío y acarreo.

Según López Jimeno, C., López Jimeno, E., & Ayala Carcedo, F. J. La voladura es la fragmentación de la roca a través de la detonación de explosivos en barrenos previamente perforados, buscando eficiencia y seguridad. El carguío de taladros se realiza de forma vaciable y bombeable, esto en función si hay presencia de taladros con H₂O.

Figura 16.

Carguío de taladros bombeable.



Nota. propia

Figura 17.

Carguío de taladros vaciable.



Nota. propia

2.3.5. Carguío

Según Krausz, A., & Hustrulid, W. A. (2002). *Surface mining* (2nd ed.) (SME). El carguío es el proceso mediante el cual se recoge el material fragmentado por la voladura o excavación y se deposita en equipos de transporte para su traslado a la planta de procesamiento o área de disposición.

El material volado es cargado mediante:

- Palas eléctricas de alta capacidad.
- Cargadores frontales de gran tonelaje.

El carguío es monitoreado por sistemas de:

- Pesaje a bordo.
- Control de eficiencia de ciclos.
- Reportes en tiempo real al centro de control.

Quellaveco destaca por integrar sistemas autónomos o semiautónomos en sus equipos.

Figura 18.

Caterpillar 7495 Electric Rope Shovel



Nota. propia

2.3.6. Acarreo

Según Hartman, H. L., & Mutmanský, J. M. (2002). *Introductory mining engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons. El acarreo es la operación de transporte del material fragmentado, que sigue al carguío, y constituye una parte crítica del flujo productivo en la mina.

El acarreo se realiza con camiones ultra clase (Komatsu 980E y CAT 794 AC), gran parte operando en modo autónomo.

El sistema controla:

- Rutas óptimas.

- Velocidades y distancias.
- Gestión de colas.
- Consumo de combustible o energía.

El centro de control coordina el movimiento de toda la flota para garantizar seguridad y productividad.

Figura 19.

Caterpillar 794 AC



Nota. propia

2.3.7. CENTRO INTEGRADO DE OPERACIONES (CIO)

Un Centro Integrado de Operaciones (CIO) es una plataforma tecnológica y organizativa avanzada que centraliza el monitoreo, control, análisis y coordinación en tiempo real de todos los procesos operativos de una operación minera, desde extracción y transporte hasta procesamiento, mantenimiento y logística. Esta plataforma integra fuentes de datos heterogéneas (sensores de campo, sistemas

SCADA/DCS, ERP, telemetría y analítica avanzada) y lo traduce en información operacional accionable para soportar decisiones estratégicas, operativas y de seguridad con mayor precisión, anticipación y eficiencia, eliminando silos de información y habilitando una operación colaborativa, predictiva y orientada a resultados.

Figura 20.

Centro integrado de operaciones (CIO)



Nota. propia

2.3.8. Chancado Primario

El mineral transportado desde el tajo es procesado en:

- Chancadora primaria tipo giratoria.

Su función es reducir el tamaño del material para alimentarlo al sistema de transporte.

Incluye:

- Tolvas de recepción.
- Alimentadores.
- Sistema de control de granulometría.

2.3.9. Transporte por Faja (Correa Overland)

Uno de los sistemas más avanzados es su correa transportadora de 4,8 km, que traslada el mineral desde la chancadora primaria hasta la planta concentradora. Ofrece:

- Alta eficiencia energética.
- Menor costo que el acarreo tradicional.
- Menor impacto ambiental.

2.3.10. Molienda y Flotación

En la planta concentradora se realiza:

- Molienda SAG y bolas.
- Clasificación en hidrociclones.
- Circuitos de flotación para recuperación de cobre.
- Espesamiento y filtrado de concentrado.

Los sistemas están automatizados con instrumentación avanzada.

2.3.11. Centro Integrado de Operaciones (CIO)

Es el corazón tecnológico de la mina.

Aquí se controla:

- Perforación
- Voladura
- Carguío
- Acarreo
- Planta concentradora
- Relaves
- Monitoreo de seguridad y geotecnia

Todo en un sistema integrado para maximizar seguridad y eficiencia.

III. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y nivel de la investigación

3.1.1. Método de la investigación

El método que se aplicó fue experimental, debido a que se realizaron mediciones directas en campo para analizar el comportamiento vibracional del macizo rocoso en la Fase 02N–3660. Durante las voladuras diarias se registraron datos de velocidad de onda P, velocidad pico partícula crítica (VPP Crítica) y fragmentación, empleando geófonos triaxiales, sismógrafos digitales y el software Split Online. Asimismo, se utilizaron modelos predictivos como Holmberg & Persson para estimar la granulometría del material volado. Este método permitió establecer relaciones de causa–efecto entre la energía liberada por los explosivos y la respuesta dinámica del macizo rocoso, mediante la comparación de los resultados obtenidos en el periodo sin intervención (enero–marzo de 2025) y el periodo con implementación del monitoreo y control de vibraciones (abril–junio de 2025) (Jimeno, Carcedo & Ayala, 2019; Cunningham, 1983).

3.1.2. Tipo de la investigación

La investigación fue de tipo aplicada y experimental, debido a que buscó resolver un problema técnico real relacionado con las vibraciones generadas por las voladuras en campo cercano dentro de la Fase 02N–3660. El estudio aplicó mediciones directas en campo para obtener la velocidad de onda P, la velocidad pico partícula crítica (VPP Crítica) y el comportamiento vibracional del macizo rocoso, con la finalidad de optimizar el diseño de la voladura. Asimismo, fue de tipo aplicada porque utilizó conocimientos teóricos y modelos predictivos, como el modelo de Holmberg & Persson y el software Split Online, con el propósito de mejorar el

desempeño operativo y la estabilidad geotécnica de la zona de estudio (Hernández Sampieri, Fernández & Baptista, 2014; Jimeno, Carcedo & Ayala, 2019).

3.1.3. Nivel de la investigación

El nivel de la investigación fue experimental, debido a que se trabajó con mediciones directas en campo para evaluar los efectos de las voladuras sobre la velocidad de onda P y la velocidad pico partícula crítica (VPP Crítica) en la Fase 02N–3660. Este nivel permitió analizar relaciones de causa–efecto entre la energía generada por los explosivos y la respuesta dinámica del macizo rocoso, validando modelos predictivos y comparando los resultados obtenidos entre el periodo sin mejora y el periodo con la implementación del monitoreo de vibraciones (Hernández Sampieri, Fernández & Baptista, 2014).

3.1.4. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación será cuantitativo, experimental y comparativo, porque se recopilarán datos numéricos provenientes de las mediciones de vibraciones generadas por las voladuras en la Fase 02N–3660, permitiendo evaluar la velocidad de onda P, la VPP Crítica y la fragmentación del material. Este diseño permitirá comparar los resultados del primer periodo sin mejora (enero–marzo de 2025) con los del segundo periodo con implementación (abril–junio de 2025), utilizando modelos matemáticos como el Holmberg & Persson y el software Split Online para analizar el comportamiento vibracional y la eficiencia del diseño de voladura (Hernández Sampieri, Fernández & Baptista, 2014).

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

La población de la investigación estuvo conformada por el total de voladuras ejecutadas en la Fase 02N–3660 durante el periodo comprendido entre enero y junio del año 2025, correspondientes a las actividades de explotación minera desarrolladas en la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración argílica. Durante este periodo se registró aproximadamente una voladura diaria, lo que representa un total de 180 eventos de voladura, de los cuales se obtuvieron registros técnicos relacionados con la velocidad de propagación de la onda P, la velocidad pico de partícula (VPP), la distancia al frente de voladura, el factor de potencia del explosivo y la fragmentación del material volado (P80) obtenida mediante el análisis digital del software Split Online, permitiendo evaluar el comportamiento vibracional del macizo rocoso en la zona de estudio (Hernández Sampieri, Fernández & Baptista, 2014).

3.2.2. Muestra

La muestra de la investigación estuvo constituida por $n = 180$ voladuras, correspondientes al total de eventos registrados en la Fase 02N–3660 durante el periodo de estudio (enero–junio de 2025), por lo que se consideró un muestreo censal. De cada voladura se obtuvieron mediciones instrumentales mediante geófonos triaxiales y sismógrafos digitales, registrándose parámetros como velocidad pico de partícula (VPP), velocidad de onda P, distancia al frente de voladura, factor de potencia y fragmentación del material (P80) evaluada con el software Split Online. Para el análisis vibracional, se consideraron como referencia rangos de aceptación establecidos en normativa internacional, donde valores de VPP menores a 12 mm/s se asocian a niveles seguros sin daño estructural, valores entre 12 y 50 mm/s

corresponden a niveles de vibración moderada con posible afectación leve, y valores superiores a 50 mm/s indican riesgo de daño en el macizo rocoso, permitiendo así comparar el comportamiento entre el periodo sin mejora (enero–marzo de 2025) y el periodo con implementación del monitoreo y control de vibraciones (abril–junio de 2025) (Siskind et al., 1980; DIN 4150-3).

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La investigación empleó como técnica principal la observación directa y el registro instrumental, con el objetivo de obtener datos precisos sobre la velocidad de onda P, la velocidad pico partícula crítica (VPP Crítica) y la fragmentación del material volado. Para ello, se utilizaron geófonos triaxiales de alta sensibilidad, los cuales permitieron registrar las componentes vertical, radial y transversal de las vibraciones generadas por cada voladura. Estos sensores estuvieron conectados a sismógrafos digitales, encargados de capturar la forma de onda, las curvas de vibración, los valores de VPP y las frecuencias dominantes asociadas a cada evento de detonación.

Asimismo, se emplearon formatos de registro de monitoreo sísmico, en los cuales se consignaron datos relevantes como la ubicación del geófono, la distancia a la zona de carga, la carga por retardo, la longitud del taladro, el tipo de explosivo utilizado (Control 70 o HA73G), la hora de la voladura y las condiciones ambientales. Estos formatos fueron complementados con checklists de calibración de instrumentos, fichas de control de campo y reportes diarios de monitoreo, lo que garantizó la trazabilidad y confiabilidad de todas las mediciones realizadas durante el periodo de estudio.

Para el análisis de la fragmentación del material volado, se utilizó el software Split Online, el cual procesó imágenes capturadas mediante cámaras industriales y cámaras de alta resolución ubicadas estratégicamente en el frente de carga y en las zonas de descarga. A partir de estas imágenes se obtuvieron indicadores granulométricos como P80, P50 y la distribución de tamaños de fragmentos. De manera complementaria, se aplicó el modelo matemático de Holmberg & Persson, con la finalidad de estimar la fragmentación teórica y compararla con los resultados obtenidos en campo.

Los datos registrados fueron almacenados inicialmente en formatos digitales tales como archivos CSV, hojas de cálculo Excel y reportes PDF, generados automáticamente por los sismógrafos y por el sistema Split Online. Posteriormente, toda esta información fue integrada en bases de datos y formatos de procesamiento, permitiendo su análisis comparativo entre los dos periodos de estudio: el periodo sin mejora (enero–marzo de 2025) y el periodo con implementación del monitoreo y control de vibraciones (abril–junio de 2025). De esta manera, las técnicas e instrumentos empleados garantizaron mediciones confiables, repetibles y adecuadas para el análisis técnico requerido en la investigación (Jimeno, Carcedo & Ayala, 2019; Kemeny, 2017).

3.4. Técnicas para el procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de los datos se realizó mediante técnicas estadísticas, comparativas y de modelamiento matemático, con el propósito de interpretar adecuadamente la velocidad de onda P, la velocidad pico partícula crítica (VPP Crítica) y la fragmentación del material volado. Inicialmente, los datos recopilados por los geófonos triaxiales y los sismógrafos digitales fueron exportados en formatos CSV y TXT, para su

posterior procesamiento mediante herramientas estadísticas como Excel y otros softwares de análisis numérico, donde se ejecutaron cálculos descriptivos tales como media, desviación estándar, así como la elaboración de curvas PPV–distancia y el análisis de la frecuencia dominante.

Posteriormente, se aplicó el modelo matemático de Holmberg & Persson para estimar el tamaño medio de fragmento y la granulometría teórica del material volado, comparando estos resultados con la fragmentación obtenida a través del análisis digital realizado con el software Split Online. Este procedimiento permitió evaluar la correlación existente entre la energía liberada, el factor de carga y el tamaño de partícula (P80), identificando tendencias y diferencias significativas entre los dos periodos de estudio.

Asimismo, para la contrastación de las hipótesis, se empleó la prueba estadística no paramétrica de Wilcoxon, con la finalidad de determinar la existencia de diferencias significativas entre el periodo sin mejora (enero–marzo de 2025) y el periodo con implementación del monitoreo y control de vibraciones (abril–junio de 2025). Este análisis permitió validar estadísticamente la eficacia del control de vibraciones aplicado en la Fase 02N–3660.

Finalmente, los resultados obtenidos fueron representados mediante gráficos comparativos, modelos de dispersión, curvas de atenuación de vibraciones y tablas de interpretación, lo que facilitó la evaluación técnica de la propagación de las ondas P y la identificación de la VPP Crítica en la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración argílica, permitiendo una interpretación integral del comportamiento vibracional del macizo rocoso (Cunningham, 1983; Kemeny, 2017; Hernández Sampieri, Fernández & Baptista, 2014).

3.5. Prueba de hipótesis

Para la contrastación de las hipótesis de la investigación, se aplicó la prueba estadística no paramétrica de rangos con signo de Wilcoxon, debido a que los datos obtenidos de la velocidad de onda P, la velocidad pico partícula crítica (VPP Crítica) y la fragmentación del material (P80) no presentaron una distribución normal, al provenir de mediciones empíricas realizadas en campo durante las voladuras diarias. Esta prueba permitió comparar los resultados correspondientes al primer periodo sin mejora (enero–marzo de 2025) con los del segundo periodo con implementación del monitoreo y control de vibraciones (abril–junio de 2025), evaluando la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre ambas etapas de estudio.

De este modo, la prueba de Wilcoxon permitió validar estadísticamente si la aplicación del monitoreo sísmico, el cálculo de la VPP Crítica y la implementación del modelo de Holmberg & Persson junto con el software Split Online generaron mejoras reales en el comportamiento vibracional y en la fragmentación del macizo rocoso de la Fase 02N–3660, contribuyendo al control de vibraciones y a la optimización del diseño de voladura (Hernández Sampieri, Fernández & Baptista, 2014).

IV. RESULTADOS

El presente capítulo expone y analiza los resultados obtenidos a partir de la evaluación comparativa del proceso de perforación y voladura desarrollada en la Fase 02 Norte (F02N–3660) de la mina Quellaveco, correspondiente a la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración argílica, considerando un primer periodo operativo sin mejoras y un segundo periodo con la implementación de ajustes técnicos en el diseño de voladura durante el segundo trimestre del año 2025. El análisis se centra en indicadores clave como el factor de potencia, la fragmentación del material volado (P80), la velocidad pico partícula (VPP) en matriz y macizo rocoso, así como la velocidad de propagación de la onda P, variables fundamentales para evaluar el comportamiento dinámico del macizo rocoso frente a las voladuras

Los resultados presentados corresponden a mediciones mensuales y trimestrales obtenidas mediante instrumentación especializada, destacando el uso de geófonos triaxiales empotrados y el análisis bajo el modelo predictivo de Holmberg y Persson, lo que permitió caracterizar la atenuación de vibraciones en campo cercano y determinar valores representativos de VPP crítico para la matriz rocosa y el macizo rocoso. Asimismo, se incorporan los valores de velocidad de onda P, determinados experimentalmente, los cuales constituyen un parámetro esencial para la evaluación del daño inducido por vibraciones y la calibración de los modelos matemáticos empleados en el estudio

La comparación entre el primer y segundo trimestre evidencia variaciones significativas en los indicadores analizados, reflejando una reducción del factor de potencia, una mejora en la fragmentación (disminución del P80) y una disminución sustancial de las vibraciones registradas, tanto en la matriz como en el macizo rocoso. Estas variaciones se asocian directamente a la implementación de configuraciones de voladura más controladas y al empleo

de explosivos de menor energía relativa, lo cual permitió optimizar el desempeño del proceso de voladura y reducir el impacto dinámico sobre el macizo rocoso y los taludes finales del tajo

Finalmente, este capítulo proporciona la base cuantitativa para la discusión técnica posterior, permitiendo validar la hipótesis planteada en la investigación y sustentar la influencia de los parámetros de voladura sobre la fragmentación y el control de vibraciones. Los resultados obtenidos constituyen un insumo clave para la toma de decisiones operativas orientadas a mejorar la estabilidad geotécnica, la seguridad operacional y la eficiencia global del proceso de explotación minera en la zona de estudio.

Tabla 4

Parámetros del primer trimestre (Sin la mejora)

Mes	Factor de potencia (KG/T)	Fragmentación (P80)	VPP matriz rocoso (mm/s)	VPP macizo rocoso (mm/s)	Velocidad onda P (m/s)
Mes 1	0.730	9.43	688.00	438.99	3,403.96
Mes 2	0.734	9.45	683.02	438.81	3,428.18
Mes 3	0.731	9.51	690.04	441.27	3,381.88
Total	0.732	9.46	687.02	439.69	3,404.68

Nota. Se muestran los resultados de factor de carga, fragmentación, velocidad pico partícula de la matriz rocosa, velocidad pico partícula del macizo rocoso y velocidad de la onda P de los meses de enero, febrero y marzo del 2025.

Los resultados correspondientes al primer trimestre evidencian un comportamiento operativo estable y uniforme en los principales indicadores evaluados del proceso de perforación y voladura. El factor de potencia presentó valores muy cercanos entre los tres meses, variando entre 0.730 y 0.734 kg/t, con un promedio trimestral de 0.732 kg/t, lo que indica una aplicación constante de la energía explosiva en las voladuras realizadas durante este periodo. En relación con la fragmentación (P80), se registró un ligero incremento progresivo desde 9.43 pulgadas en el Mes 1 hasta 9.51 pulgadas en el Mes 3, alcanzando un

valor promedio de 9.46 pulgadas, reflejando una fragmentación relativamente uniforme, influenciada por las condiciones geomecánicas del macizo rocoso.

En cuanto a las vibraciones generadas, la velocidad pico partícula (VPP) en la matriz rocosa osciló entre 683.02 y 690.04 mm/s, mientras que en el macizo rocoso varió entre 438.81 y 441.27 mm/s, mostrando una respuesta vibracional consistente y sin variaciones significativas entre los meses analizados. Por su parte, la velocidad de propagación de la onda P presentó un valor promedio de 3,403.89 m/s, lo cual confirma la similitud en las propiedades físicas del macizo rocoso durante el trimestre. En conjunto, estos resultados indican que, durante el primer trimestre, el proceso de voladura mantuvo condiciones operativas controladas y repetibles, sirviendo como línea base para la comparación con el segundo trimestre del estudio.

4.1. ESTUDIO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO

La prueba fue desarrollada en la Fase 02 Norte correspondiente a la Unidad Litológica Pórfido Temprano con Alteración Argílica, Mina Quellaveco. En la Gráfico se aprecia el esquema de perforación y su ubicación en el tajo. El ensayo consideró la detonación de 04 taladros de 6 ½” cargados con 02 Booster 900gr c/u para determinar la Vp y seguidamente 12 taladros de producción de 10 5/8”, 06 de los ellos cargados con explosivo HA73G y 06 con explosivo CONTROL 70. Los taladros correspondientes al ensayo fueron iniciados antes de la detonación del Proyecto de Producción ubicado al lado Este de la Fase a fin de capturar sus respectivos pulsos de vibración y poder realizar el estudio. Las cargas fueron detonadas secuencialmente mediante sistema de iniciación electrónico Daveytronic.

Las vibraciones fueron registradas por cuatro geófonos triaxiales empotrados (GT1, GT2, GT3 y GT4). Los pulsos correspondientes a Vp fueron registrados por los GT1 y GT2

que se ubicaron en dirección a la fila de taladros de 6 ½”, los mismos que sirvieron para capturar los pulsos de los taladros 10 5/8” en conjunto con los GT3 y GT4.

En la Tabla, se muestran los valores de coordenadas reales y cota de los 12 taladros PRO de la prueba para el modelo de Campo Cercano, los 4 taladros GT para geófonos triaxiales empotrados, los 4 taladros APD para medición de Vp y 6 taladros PRE correspondientes al Line Drill en su ubicación NE.

Tabla 5

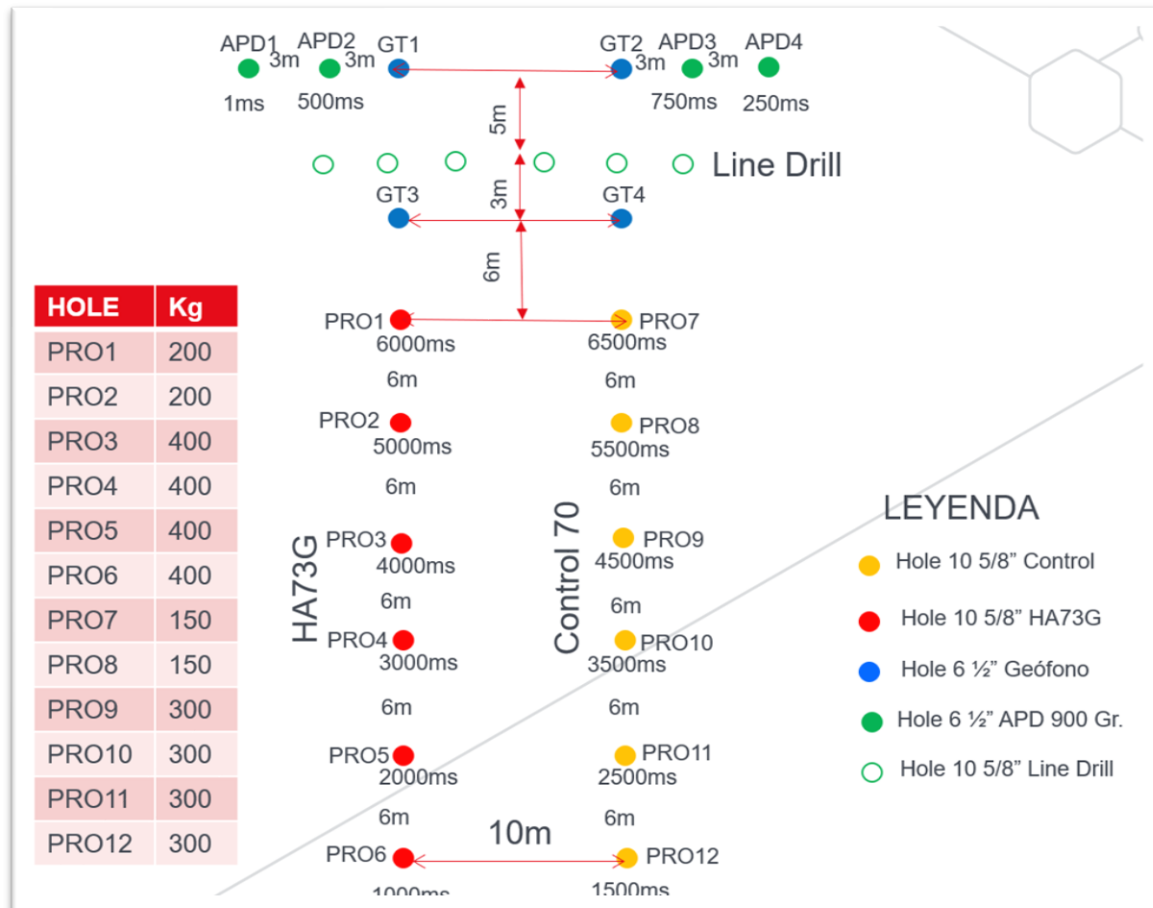
Taladros de estudio

ID	EAST	NORTH	COTA COLLAR	DIAMETRO
GT-3	327388.6	8109011.1	3674.9	6 1/2"
GT-4	327397.5	8109008.5	3674.9	6 1/2"
APD-1	327385.5	8109020.6	3674.7	6 1/2"
APD-2	327388.3	8109019.8	3674.7	6 1/2"
GT-1	327391.1	8109018.7	3674.8	6 1/2"
GT-2	327400.5	8109015.4	3674.8	6 1/2"
APD-3	327403.5	8109014.6	3674.8	6 1/2"
APD-4	327406.3	8109013.5	3674.8	6 1/2"
PRE-4106	327401.8	8109009.9	3674.7	10 5/8"
PRE-4105	327399	8109010.7	3674.7	10 5/8"
PRE-4104	327396.1	8109011.7	3674.7	10 5/8"
PRE-4103	327392.4	8109013.1	3674.6	10 5/8"
PRE-4102	327389.6	8109014	3674.6	10 5/8"
PRE-4101	327386.7	8109015	3674.7	10 5/8"
PRO-1	327386.7	8109005.5	3674.8	10 5/8"
PRO-2	327384.7	8108999.9	3674.9	10 5/8"
PRO-3	327382.8	8108994.1	3674.9	10 5/8"
PRO-4	327380.8	8108988.5	3674.8	10 5/8"
PRO-5	327379	8108982.7	3674.7	10 5/8"
PRO-6	327377.1	8108977.1	3674.7	10 5/8"
PRO-7	327396.1	8109002.4	3674.8	10 5/8"
PRO-8	327394.2	8108996.7	3674.7	10 5/8"
PRO-9	327392.2	8108990.9	3674.8	10 5/8"
PRO-10	327390.3	8108985.3	3674.9	10 5/8"
PRO-11	327388.5	8108979.6	3675	10 5/8"
PRO-12	327386.5	8108973.9	3675	10 5/8"

Nota. Coordenadas reales de los taladros correspondiente al estudio de vibraciones

Figura 21.

Esquema utilizado para la prueba especial de vibraciones



Nota. Planeamiento, 2025.

Figura 22.

Ubicación de prueba en F02N-3660, Pórfido Temprano alteración Argílica



Nota. Planeamiento, 2025.

Figura 23.

Instrumentación correspondiente al estudio de Campo Cercano F02N



Nota. Planeamiento, 2025.

4.1.1. Velocidad de la onda P

La velocidad de propagación de la onda P (V_p) se determinó a partir del tiempo de arribo de la onda sísmica registrada en dos geófonos ubicados a una distancia conocida. La diferencia de tiempos de llegada entre ambos sensores permitió calcular la velocidad con la que la onda se propagó a través del macizo rocoso, reflejando las características físicas y mecánicas propias de la litología evaluada. En ese sentido, el valor obtenido de V_p correspondió exclusivamente a la unidad litológica definida para el estudio, en este caso el Pórfido Temprano con alteración argílica.

La velocidad de onda P se calculó mediante la ecuación (1):

$$V_p = \frac{(T_{G2} - T_{G1})}{d}$$

(1)

Siendo:

- V_p : Velocidad de propagación (m/s)
- T_{G2} : Tiempo de arribo de señal de onda sísmica en geófono 2 (s)
- T_{G1} : Tiempo de arribo de señal de onda sísmica en geófono 1 (s)
- d : Distancia entre geófonos (m)

Este procedimiento permitió caracterizar el comportamiento dinámico del macizo rocoso y sirvió como parámetro fundamental para el análisis vibracional en campo cercano (Jimeno et al., 2019).

Tabla 6

Rangos de deformación in-situ utilizando los índices de calidad de la roca.

RQD (%)	Indice de velocidad	de Velocidad Sismica (m/s)	Descripción	Descripción Sísmica
0-25	0.00 - 020	2400	Muy Pobre	Baja velocidad
25-50	0.20-040	2400 - 3500	pobre	Baja velocidad
50-75	040 - 060	3500- 4300	Moderada	Velocidad Intermedia
75-90	060-080	4300 - 4900	Buena	Alta Velocidad
90-100	0.80- 1 00	4900-6700	Excelente	Alta Velocidad

Nota: Obtenido de "Predicting In-situ Modulus of deformation using Rock Quality Indexes" (Coon, R.F. y Merritt, A.H. 1970, en Bieniawski 1984) y "Determination of the in-situ modulus rock". ASTM STP 477

4.1.2. Modelo de vibraciones H&P

Para la construcción del modelo de atenuación de vibraciones inducidas al macizo rocoso, se utilizó el postulado propuesto por Holmberg & Persson (H&P), el cual permite estimar la velocidad pico de partícula (PPV) generada por una voladura en condiciones de campo cercano, considerando parámetros geométricos, energéticos y geomecánicos del macizo rocoso. Este modelo resultó especialmente adecuado para evaluar el comportamiento vibracional en zonas próximas al frente de voladura, ya que incorpora el efecto de la carga explosiva, el confinamiento y la posición del punto de medición respecto a la fuente de energía.

De manera general, el modelo H&P establece que la velocidad pico de partícula puede expresarse mediante la relación empírica mostrada en la ecuación (2):

$$\text{PPV} = K(HP)^\alpha$$

(2)

Donde el término HPHPHP representa el factor Holmberg & Persson, el cual considera la geometría de la carga explosiva y la distancia al punto de monitoreo. Este factor se define mediante la ecuación (3):

$$PPV = K \left[\left(\frac{\gamma}{Ro} \right) \left(\arctan \left(\frac{H + X_s - X_o}{Ro} \right) + \arctan \left(\frac{X_o - X_s}{Ro} \right) \right) \right]^\alpha$$

(3)

Donde:

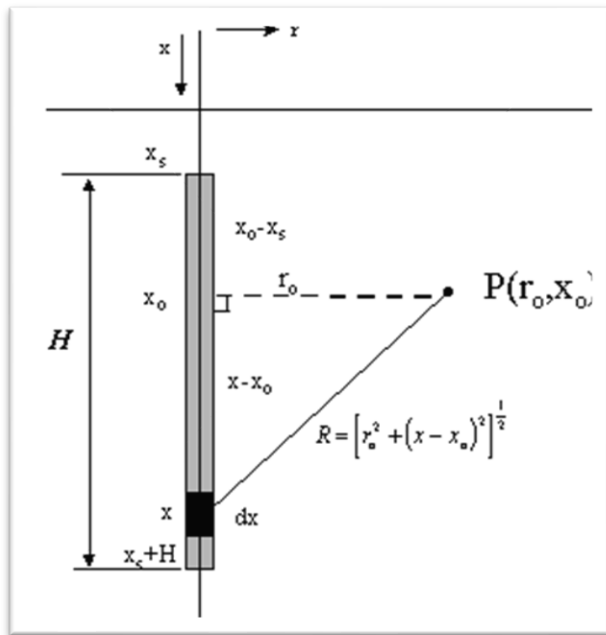
- PPV = Velocidad pico de partícula (m/s)
- γ = Densidad de carga lineal (kg/m)
- H = Longitud de carga (m)
- x_s = Longitud de taco (m)
- x_o = Profundidad de medición (m)
- Ro = Distancia horizontal desde la carga explosiva hasta el punto de monitoreo (m)
- K = Constante de eficiencia de transmisión del explosivo en el macizo rocoso
- α = Factor de atenuación

La aplicación de este modelo permitió caracterizar la propagación de las vibraciones inducidas por las voladuras en la Fase 02N-3660, facilitando la identificación de niveles críticos de vibración y la definición de criterios técnicos para

el control de vibraciones y la evaluación del daño inducido en el macizo rocoso correspondiente a la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración argílica (Holmberg & Persson, 1979; Jimeno et al., 2019).

Figura 24.

Esquema explicativo de Holmberg and Persson.



Nota. Planeamiento, 2025.

4.1.3. Velocidad Pico Partícula Crítica

La Velocidad Pico de Partícula Crítica (VPP_Crítico) representó el valor umbral de vibración a partir del cual el macizo rocoso pudo experimentar daño estructural. Este parámetro se encontró directamente relacionado con las propiedades mecánicas de la roca, siendo proporcional a la resistencia a la tracción y a la velocidad de propagación de la onda P, e inversamente proporcional al módulo de Young.

La VPP Crítica se calculó mediante la ecuación (4):

$$VPP_{Crítico} = \frac{\sigma_T * V_p}{E}$$

(4)

Donde:

- σ_T = Resistencia a la tracción (Mpa)
- E = Modulo de Young (Gpa)
- V_p = Velocidad de la onda P (m/s)

La aplicación de esta ecuación permitió establecer límites admisibles de vibración para la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración argílica, constituyéndose en un criterio técnico fundamental para la evaluación del daño inducido por voladuras en campo cercano y para la optimización del diseño de voladura en la Fase 02N–3660 (Kemeny, 2017; Jimeno et al., 2019).

4.1.4. Registro de vibraciones

El monitoreo de vibraciones corresponde a la detonación de 4 taladros APD configurados para medir la Velocidad de Onda P y la detonación de 12 taladros PRO de los cuales 06 de una hilera cargados con explosivo HA73G y 06 de otra hilera con explosivo CONTROL 70 para capturar los pulsos de vibración durante la prueba especial , los cuales fueron iniciados secuencialmente y a través de ello se busca

obtener una aproximación de modelo de vibraciones para la unidad litológica en estudio por tipo de explosivo.

Las Gráficos presentan la gráfica del registro de vibraciones en cada eje capturado con los 4 geófonos instalados; en la siguiente tabla, se puede observar el Vector Suma de la VPP que fueron registrados por los geófonos respecto al pulso de vibración de cada taladro PRO.

Tabla 7

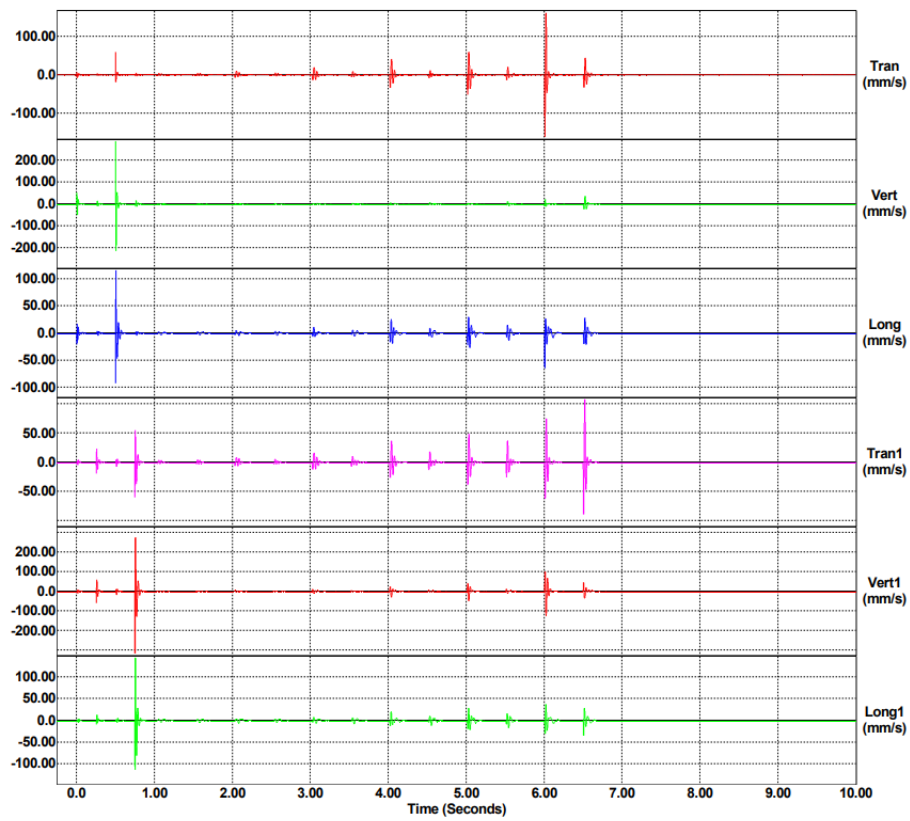
Vector Suma de la Velocidad Pico Partícula

ID	SISMÓGRAFO	GEÓFONO	TIEMPO (ms)	VPP (mm/s)
PRO 1	14160	GT 3	6000	1762.7
PRO 2	14160	GT 3	5000	349.4
PRO 3	14160	GT 3	4000	192.8
PRO 4	14160	GT 3	3000	67.3
PRO 5	14160	GT 3	2000	29.2
PRO 6	14160	GT 3	1000	10
PRO 7	14160	GT 4	6500	584.9
PRO 8	14160	GT 4	5500	129.5
PRO 9	14160	GT 4	4500	53.1
PRO 10	14160	GT 4	3500	22.8
PRO 11	14160	GT 4	2500	12.3
PRO 12	14160	GT 4	1500	7.2
PRO 1	14120	GT 1	6000	162.9
PRO 2	14120	GT 1	5000	64.8
PRO 3	14120	GT 1	4000	45.4
PRO 4	14120	GT 1	3000	20
PRO 5	14120	GT 1	2000	10
PRO 6	14120	GT 1	1000	4.4
PRO 7	14120	GT 2	6500	114.7
PRO 8	14120	GT 2	5500	38.7
PRO 9	14120	GT 2	4500	20.2
PRO 10	14120	GT 2	3500	11.5
PRO 11	14120	GT 2	2500	6.2
PRO 12	14120	GT 2	1500	5.2

Nota. Se muestra el vector Suma de la Velocidad Pico Partícula registrado por los 4 GT empotrados

Figura 25.

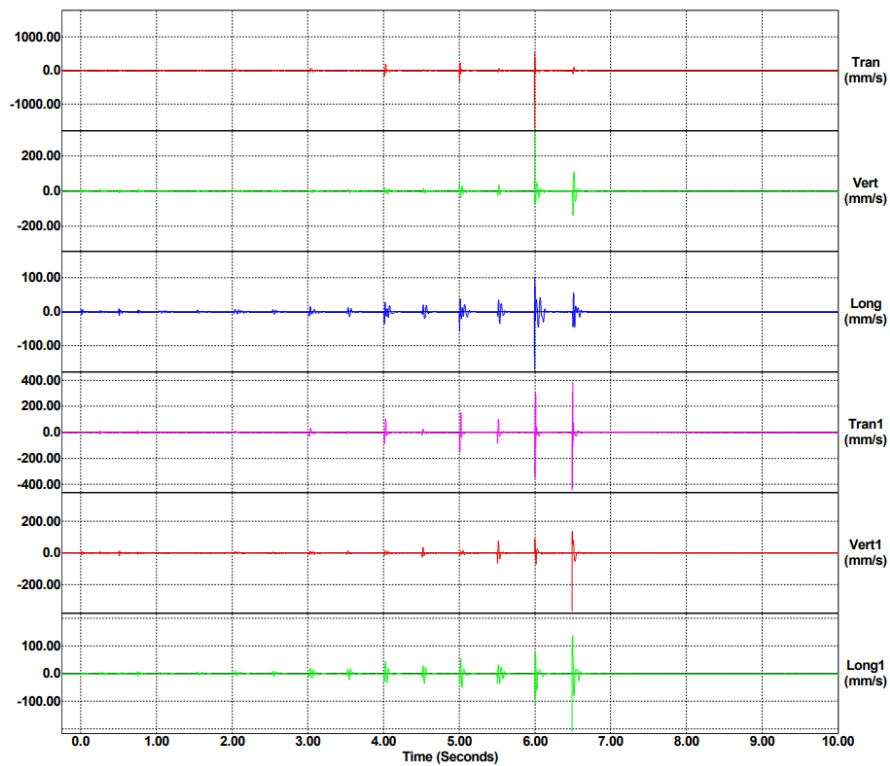
Registro de vibraciones GT1 y GT2.



Nota. Planeamiento, 2025.

Figura 26.

Registro de vibraciones GT3 y GT4.

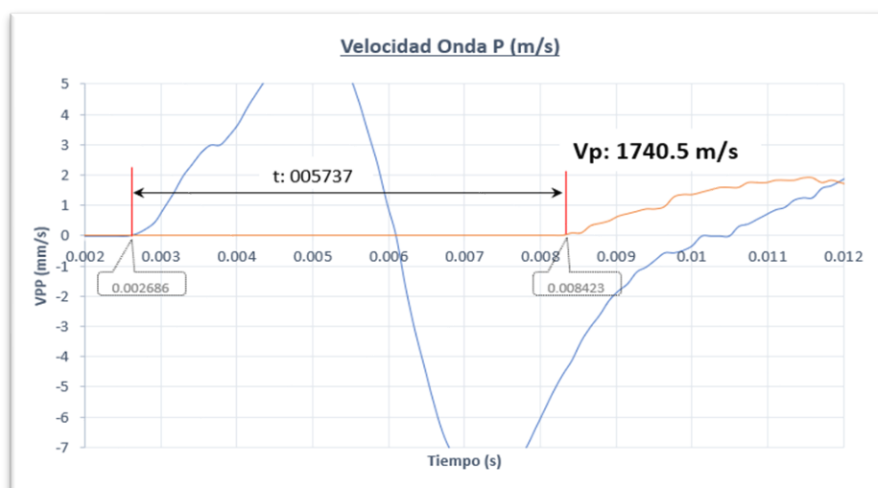


Nota. Planeamiento, 2025.

4.1.5. Determinación de la velocidad de Onda P (V_p)

Figura 27.

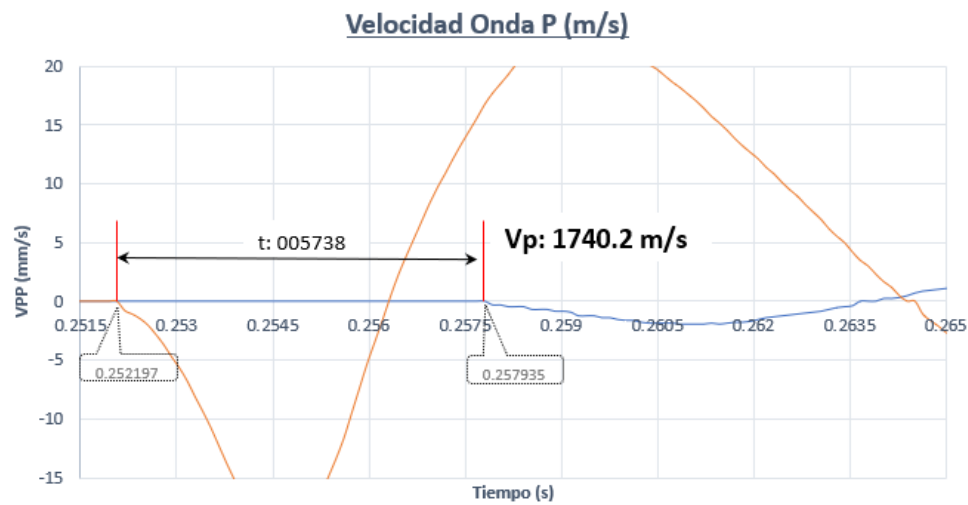
Delta de tiempo del arribo de la onda a geófonos G1 y G2 de los taladros APD-1



Nota. Planeamiento, 2025.

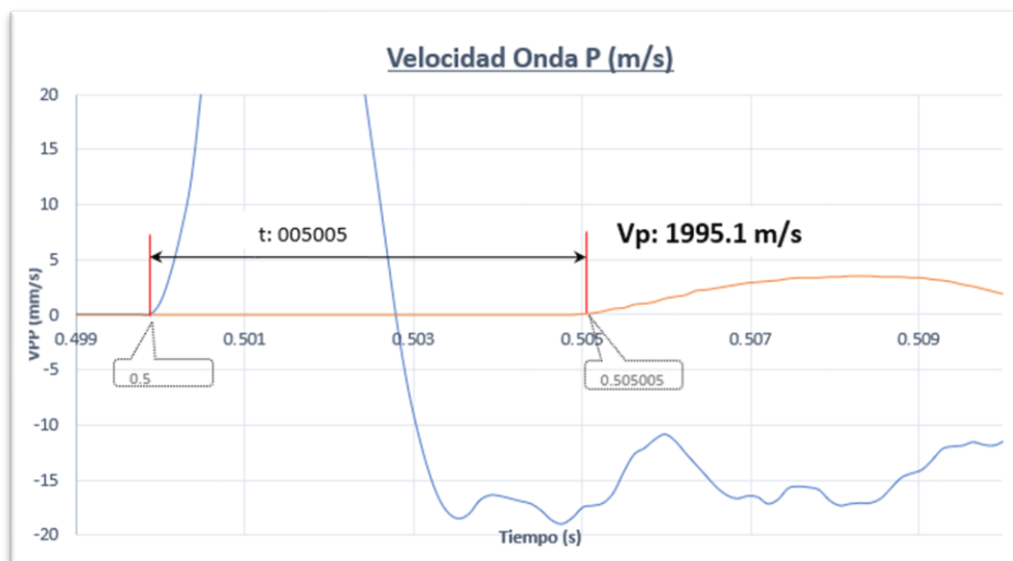
Figura 28.

Delta de tiempo del arribo de la onda a geófonos G1 y G2 de los taladros APD-2



Nota. Planeamiento, 2025.

Figura 29.

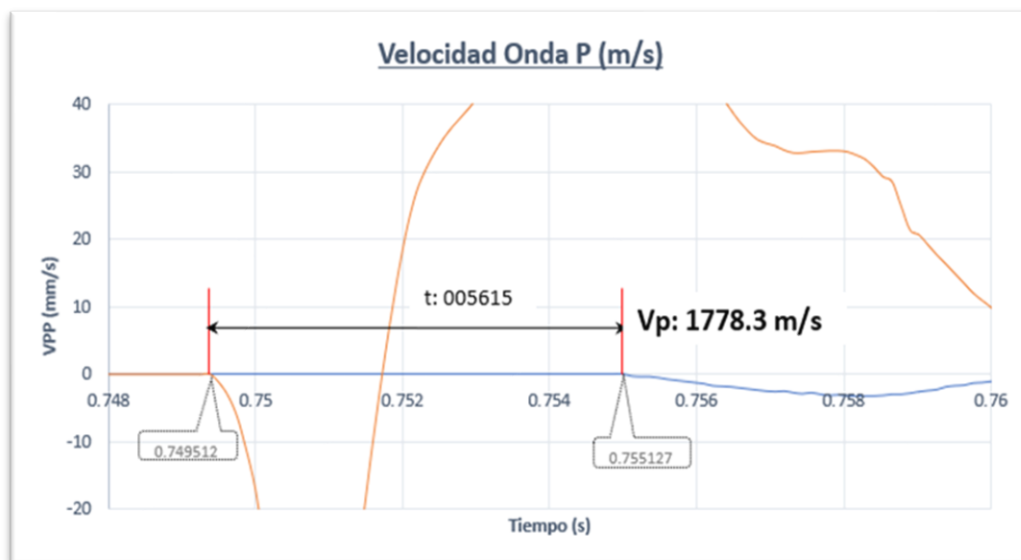


Delta de tiempo del arribo de la onda a geófonos G1 y G2 de los taladros APD-3

Nota. Planeamiento, 2025.

Figura 30.

Delta de tiempo del arribo de la onda a geófonos G1 y G2 de los taladros APD-4



Nota. Planeamiento, 2025.

La velocidad promedio de la Onda P obtenido de la detonación de las cargas APD1, APD2, APD3 y APD4 capturado por los geófonos G1 y G2 (9.985m) es la que sigue:

Tabla 8

Valor obtenido de velocidad promedio de propagación de Onda P.

Velocidad pulso 1 (m/s)	1,740.5
Velocidad pulso 2 (m/s)	1,740.2
Velocidad pulso 3 (m/s)	1,995.1
Veocidad pulso 4 (m/s)	1,778.3
Velocidad promedio de Onda P (m/s)	1,813.5

Nota. Planeamiento, 2025.

4.1.6. Cálculo de la velocidad pico partícula crítica

Para fines de la evaluación de daño se procederá a calcular la VPP crítico tanto a nivel de matriz rocosa, así como del macizo a partir de las características mecánicas

de la roca proporcionados por mina y la velocidad de onda P (Vp) determinada mediante la instrumentación en terreno.

Tabla 9

Características Mecánicas de la roca

Características Mecánicas de la roca		
Litología:	Pórfido Temprano	
Alteración:	Argílico	
UCS:	12	Mpa
Resistencia a la tracción (σ_T):	1.33	MPa
Módulo de Young (E):	6.5	Gpa
Coefficiente de Poisson:	0.25	
RMR:	25	
Densidad (g/cc):	2.4	

Nota. Características Mecánicas de la roca de la unidad litológica Pórfido Temprano alteración Argílico

Despejando la ecuación 03 se procede a calcular la VPP crítica de la roca.

$$VPP \text{ critico roca} = 1.33 \times 1,813.5 / 6.5 = 372 \text{ mm/s}$$

De igual manera se procede a calcular la VPP crítica del macizo rocoso, para el cual se utilizan los parámetros σ_T y E escalados a macizo rocoso a través del RMR.

Resistencia a la tracción del macizo rocoso (σ_{Trm})

$$\sigma_{Trm} = \sigma_{Ti} \times \exp((RMR-100)/27)$$

$$\sigma_{Trm} = 0.28 \text{ MPa}$$

Resistencia a la tracción escalado a macizo rocoso.

$$E_{rm} = E_i \times \exp((RMR-100)/36)$$

$$E_{rm} = 2.02 \text{ GPa}$$

Módulo de Young escalado a macizo rocoso.

$$\text{VPP crítico macizo rocoso: } 0.28 \times 1,813.5 / 2.02 = 252 \text{ mm/s}$$

4.1.7. Modelo predictivo de Holmberg & Persson

El modelo establece una relación entre el diseño de voladura, que incluye aspectos como la longitud de carga, longitud de taco, densidad lineal y peso de la carga, así como la velocidad pico de partícula registrada por el instrumento y la separación entre sí con la fuente de energía. Mediante el estudio de la onda generada por la detonación secuencial de los taladros, se construye el modelo de vibraciones para campo cercano. A partir de los parámetros relevantes del modelo de vibraciones como son K y α nos permite determinar el % de vibraciones que filtró el Line Drill de 10 5/8" espaciados a 3m aproximadamente entre sí, así como también nos permite evaluar la variación de vibraciones producido por el explosivo HA73G y Control 70 los cuales presentan diferentes valores de energía.

En las siguientes tablas se correlacionan las vibraciones registradas durante la detonación secuencial de la carga de cada taladro por los 4 geófonos empotrados, con ellos se construye el modelo de campo cercano para realizar el estudio de vibraciones.

Con la fórmula de Holmberg and Persson se calcula el Factor HP, la PPV medida son los pulsos registrados por el sismógrafo en la voladura de prueba.

Tabla 10***Parámetros para el Modelo H&P (Geófono 1 - HA73G detrás del Line Drill).***

GT	Taladro	Altura Taladro [m]	H [m]	W [Kg]	g [kg/m]	T [m]	Xo [m]	Tiempo Detonación [ms]	Ro [m]	Factor H&P	VPP Medido [mm/s]
1	PRO 6	12.5	4.5	400	88.9	8	9.9	1000	43.9	0.21	4.4
1	PRO 5	13.3	5.3	400	75.5	8	9.9	2000	37.9	0.28	10
1	PRO 4	12.4	5.2	400	76.9	7.2	10	3000	31.9	0.39	20
1	PRO 3	13.5	4.7	400	85.1	8.8	10.1	4000	25.9	0.59	45.4
1	PRO 2	13	3	200	66.7	10	10.1	5000	19.9	0.5	64.8
1	PRO 1	12.6	2.8	200	71.4	9.8	10	6000	13.9	1.02	162.9

Nota. Planeamiento, 2025.

Tabla 11***Parámetros para el Modelo H&P (Geófono 2 - CONTROL 70 detrás del Line Drill).***

GT	Taladro	Altura Taladro [m]	H [m]	W [Kg]	g [kg/m]	T [m]	Xo [m]	Tiempo Detonación [ms]	Ro [m]	Factor H&P	VPP Medido [mm/s]
2	PRO 12	13.6	4.1	300	73.2	9.5	10.2	1500	43.8	0.16	5.2
2	PRO 11	12.7	4.2	300	71.4	8.5	10.2	2500	37.9	0.21	6.2
2	PRO 10	13.5	4.8	300	62.5	8.7	10.2	3500	31.8	0.3	11.5
2	PRO 9	13.5	4.5	300	66.7	9	10	4500	25.9	0.45	20.2
2	PRO 8	13.7	2.2	150	68.2	11.5	9.9	5500	19.8	0.37	38.7
2	PRO 7	13.3	2.3	150	65.2	11	10	6500	13.8	0.77	114.7

Nota. Planeamiento, 2025.

Tabla 12*Parámetros para el Modelo H&P (Geófono 3 - HA73G delante del Line Drill).*

GT	Taladro	Altura Taladro [m]	H [m]	W [Kg]	γ [kg/m]	T [m]	Xo [m]	Tiempo Detonación [ms]	Ro [m]	Factor H&P	VPP Medido [mm/s]
3	PRO 6	12.5	4.5	400	88.9	8	9.8	1000	35.9	0.31	10
3	PRO 5	13.3	4.8	400	83.3	8.5	9.8	2000	30	0.44	29.2
3	PRO 4	12.4	5.2	400	76.9	7.2	9.9	3000	24	0.69	67.3
3	PRO 3	13.5	4.7	400	85.1	8.8	10	4000	18	1.23	192.8
3	PRO 2	13	3	200	66.7	10	10	5000	11.9	1.38	349.4
3	PRO 1	12.6	2.8	200	71.4	9.8	9.9	6000	5.9	5.36	1762.7

Nota. Planeamiento, 2025.

Tabla 13*Parámetros para el Modelo H&P (Geófono 4 - CONTROL 70 delante del Line Drill).*

Geo	Taladro	Altura Taladro [m]	H [m]	W [Kg]	γ [kg/m]	T [m]	Xo [m]	Tiempo Detonación [ms]	Ro [m]	Factor H&P	VPP Medido [mm/s]
4	PRO 12	13.6	4.1	300	73.2	9.5	10.1	1500	36.3	0.23	7.2
4	PRO 11	12.7	4.2	300	71.4	8.5	10.1	2500	30.3	0.33	12.3
4	PRO 10	13.5	4.8	300	62.5	8.7	10	3500	24.3	0.51	22.8
4	PRO 9	13.5	4.5	300	66.7	9	9.9	4500	18.4	0.88	53.1
4	PRO 8	13.7	2.2	150	68.2	11.5	9.8	5500	12.3	0.94	129.5
4	PRO 7	13.3	2.3	150	65.2	11	9.9	6500	6.3	3.35	584.9

Nota. Planeamiento, 2025.

Con el Factor H&P calculado y la medición de VPP, se procede a generar los gráficos de los modelos predictivos de vibraciones y a analizar los puntos expuestos en la sección objetivos del presente documento.

4.1.8. Eficiencia del Filtro Line Drilling

A fin de determinar la eficiencia del filtro del line drilling sin carga explosiva, se utilizó los registros arribados hacia los geófonos 3 y 1, mediante la aplicación del método:

Modelo “K”.

Este método utiliza la comparación de los valores de K del modelo de campo cercano ($K_1 = 149.42$), según el gráfico 11, comparado con un K_2 (153.15).

Factor de velocidad delante del Line Drill (K_1) 149.42

Factor de velocidad detrás del Line Drill (K_2) 153.15

$$Filtro = (K_1 - K_2) / K_1 * 100$$

Ecuación 06: Porcentaje de filtro de Line Drilling por el método K, Cálculo de porcentaje de filtro en Line Drilling Dónde: K_1 : Proviene del modelo de campo cercano delante del Line Drilling K_2 : Proviene del modelo de campo cercano detrás del Line Drilling.

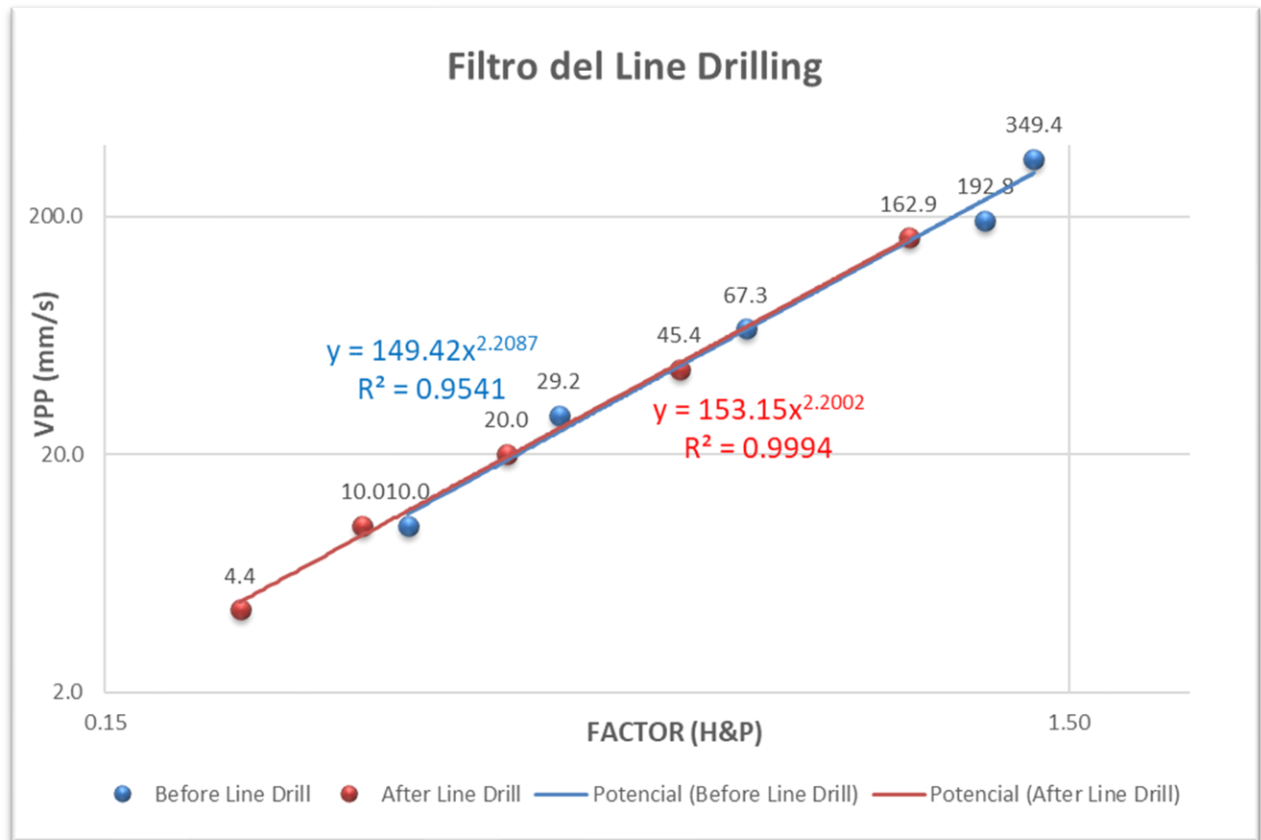
$$Filtro = (149.42 - 153.15) / 149.42 * 100$$

$$filtro = \sim 0\%$$

Cálculo de Porcentaje de filtro de Line Drilling por diferencia de “K”.

Figura 31.

Efecto de filtro del Line Drilling 10 5/8" 50% de confianza



Nota. Planeamiento, 2025.

De acuerdo con el valor obtenido se proponen optimizaciones, filtros menores a 20% deben ser reevaluados y obtener diseños alternativos considerando la eliminación del Line Drilling debido a que no está cumpliendo la función de filtrar vibraciones.

Figura 32.

Rangos de filtro

RANGO DE FILTRO	CALIFICACIÓN	ACCIONES
<20	Muy Malo	Evaluar diseños de doble buffer
21 - 30	Malo	
31 - 40	Regular	Reducir espaciamiento
41 - 54	Bueno	Mantener los diseños
55 - 65	Muy bueno	Mantener los diseños
>65	Excelente	Mantener los diseños

Nota. Planeamiento, 2025.

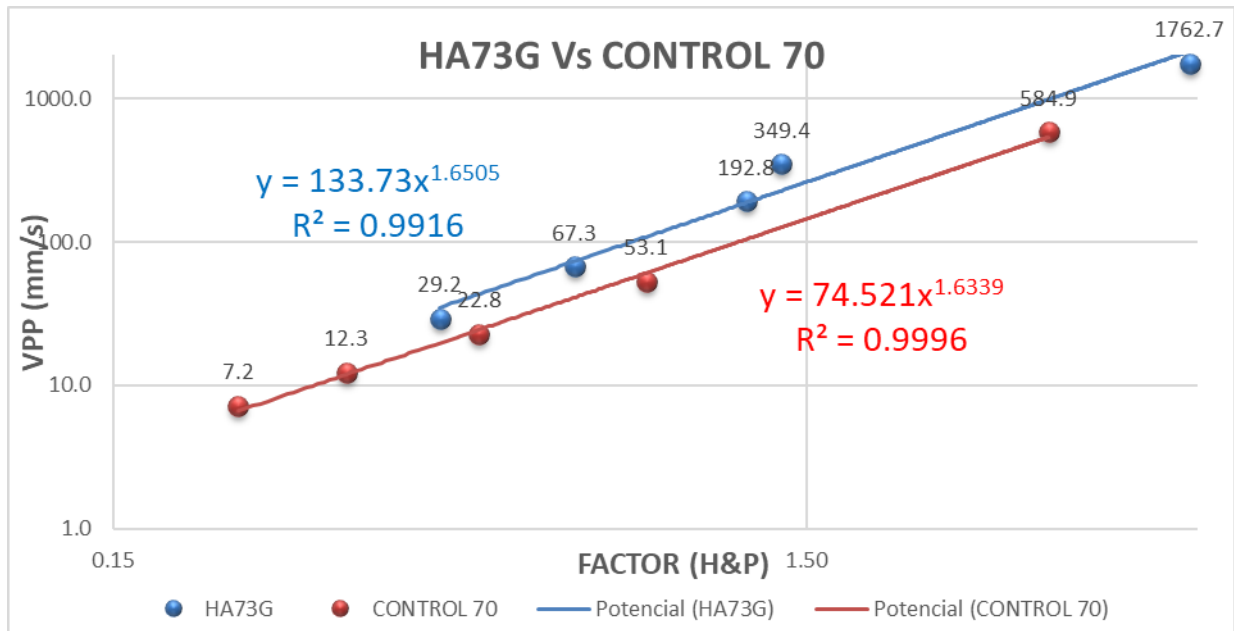
4.1.9. Vibraciones por tipo de explosivo

Mediante el modelo de predicción Holmberg & Persson para cada tipo de explosivo, se realiza el análisis de impacto de vibraciones.

El análisis de variación de vibraciones se realiza en función de la constante K obtenida para cada tipo de explosivo (HA73G Vs. CONTROL 70), en el presente análisis considera la información obtenida por los GT3 para HA73G y GT4 para CONTROL 70.

Figura 33.

Vibraciones por tipo de explosivo 50% de confianza



Nota. Planeamiento, 2025.

Comparando el modelo de campo cercano para cada tipo de explosivo se determina la variación de impacto por vibraciones, y aplicando la ecuación 6 se tiene:

Factor de velocidad para el explosivo HA73G (K1) 133.73 y factor de velocidad para el explosivo CONTROL 70 (K2) 74.521.

$$\text{Variación} = (133.73 - 74.521) / 133.73 * 100$$

$$\text{Variación} = 44\%$$

Se determina la variación por impacto de vibraciones en comparación de los explosivos HA73G Vs. Control 70, donde se obtiene una variación del 44%, concluyendo que Control 70 genera un impacto por vibraciones de 44% menor respecto al HA73G.

4.1.10. Criterio de daño

Los niveles de daño asociados a la voladura se basan en criterios que son utilizados en evaluación de daño por velocidad pico partícula crítica, los cuales son definidos como relaciones de vibración – impacto o daño. Estas relaciones permiten definir niveles de criticidad de vibración y el efecto provocado por éstas en el medio de transmisión, es decir, en el macizo rocoso. Para estimar el umbral de daño se ha calculado la Velocidad de Pico Partícula Crítico (VPP crítico) tanto para la matriz rocosa o roca intacta, así como del macizo rocoso a partir de las características mecánicas de la roca. Cabe señalar que el VPP crítico asume rotura antes que ocurra el fallamiento por tensión.

A continuación el criterio de daño que será utilizado en el presente documento, el cual tiene como fuente al adaptado de criterio de J. Vergara 2014, este criterio tiene como principio correlacionar el nivel de daño producido por efecto de las vibraciones de voladura con la velocidad crítica de la roca intacta y del macizo rocoso.

Tabla 14***Criterio de daño PPV_{cmr}***

CRITERIO DE DAÑO	DESCRIPCIÓN DE DAÑO INDUCIDO
Zona 1 > PPV _c	Se supera la resistencia a la tracción de la roca intacta. Daño en la matriz rocosa, generación de nuevas grietas, extensión de las existentes.
PPV _c > Zona 2 > PPV _{cmr}	Se supera la resistencia a la tracción del macizo rocoso por lo que se produce ruptura en el macizo rocoso (puentes de roca) además de la apertura y extensión de estructuras pre existentes.
Zona 3 < PPV _{cmr}	No se produce daño inducido en el macizo rocoso producto de la voladura.

Nota. Adaptado de Criterio de daño PPV_{cmr} J. Vergara 2014

Tabla 15***Daño en sector***

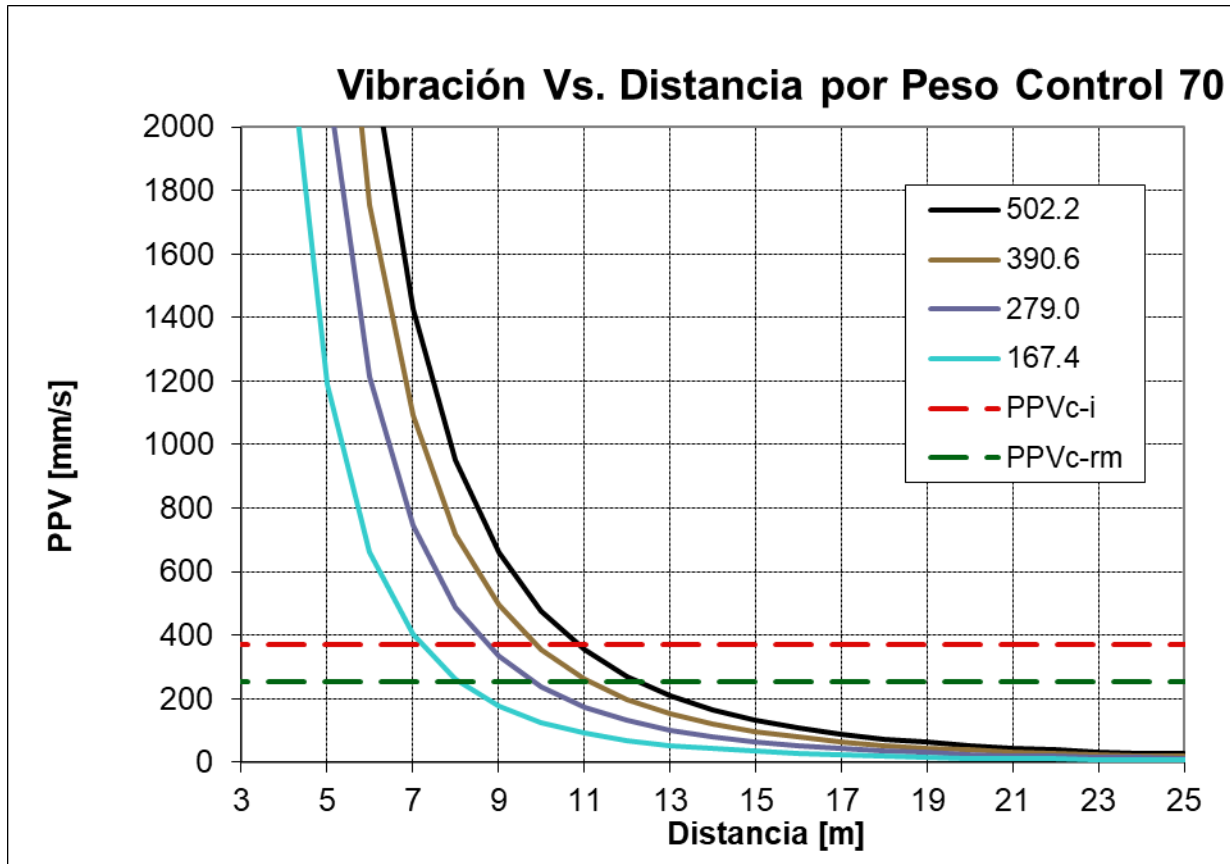
CRITERIO DE DAÑO	DESCRIPCIÓN DE DAÑO INDUCIDO
Zona 1 > 372	Se supera la resistencia a la tracción de la matriz rocosa. Daño en la matriz rocosa, generación de nuevas grietas, extensión de las existentes.
372 > Zona 2 > 252	Se supera la resistencia a la tracción del macizo rocoso por lo que se produce ruptura en el macizo rocoso (puentes de roca) además de la apertura y extensión de estructuras pre existentes.
Zona 3 < 252	No se produce daño inducido en el macizo rocoso producto de la voladura.

Nota. Estimación de Daño en sector Pórfido Temprano Alteración Argílico.

A continuación se muestra la manera como se propagan las vibraciones de un taladro con el empleo de explosivo Control 70 ($K = 74.521$; $\text{Alpha} = 1.6339$), tomando en cuenta una densidad lineal de carga de 56Kg/m que considera factor de ensanchamiento, encaminado la VPP en dirección del GT04 bajo una confiabilidad del 50%.

Figura 34.

Niveles de vibración por cantidad de Kg Control 70 por taladro Buffer.



Nota. Planeamiento, 2025.

4.1.11. Simulación de halos de vibración en la pared.

Construido el modelo de campo cercano, es decir, determinado el valor de “K”, factor de eficiencia del explosivo en la roca y explosivo, y “Alpha”, factor de atenuación; calculado el VPP crítico se ha buscado establecer umbrales de daño referenciales hacia la pared.

En la Gráfico 15 se puede observar la disposición de los taladros de Buffer y producción según diseño que maneja la mina para esta unidad litológica; los taladros tienen diámetro 10 5/8”.

Se simuló el nivel de daño en el talud en la unidad litológica Pórfido Temprano alteración Argílico, el cual tiene como diseño: 15m altura de banco, 68° de inclinación y un cast bench de 8.9m, según la sección establecida bajo los parámetros K y Alpha obtenidos del modelo.

Simulación de halos de daño en el talud bajo parámetros actuales de voladura.

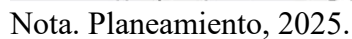
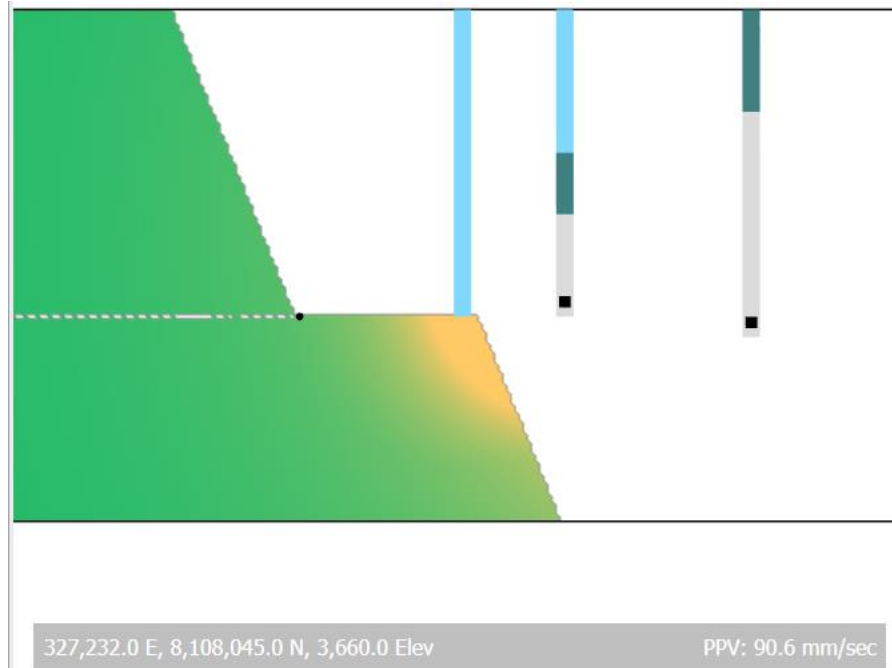


Figura 36.

Simulación de halos de daño en el talud con Control 70 en BF02.



Nota. Planeamiento, 2025.

Se sugiere utilizar configuraciones de explosivos Control de menor energía para terreno seco, en la simulación del Gráfico 15 se reduce en nivel de vibraciones al pie del banco en 10% tan solo cambiando el explosivo de la Buffer 2 a Control 70, manteniendo los demás parámetros fijos.

Tabla 16

Resultados de enero 2025

Fecha	Factor de potencia (KG/T)	Fragmentación (P80)	VPP matriz rocoso (mm/s)	VPP macizo rocoso (mm/s)	Velocidad onda P (m/s)
01/01/2025	0.715	9.73	689.24	461.15	3,494.80
02/01/2025	0.734	9.56	701.33	423.75	3,341.59
03/01/2025	0.728	9.45	714.64	443.99	3,316.02
04/01/2025	0.722	9.16	671.15	430.36	3,337.83
05/01/2025	0.729	9.25	670.38	418.68	3,251.70
06/01/2025	0.729	9.00	664.63	462.14	3,416.66
07/01/2025	0.728	9.24	703.45	460.63	3,491.71
08/01/2025	0.727	9.11	669.47	420.85	3,296.40
09/01/2025	0.721	9.30	696.22	458.35	3,336.43
10/01/2025	0.727	9.79	657.52	430.87	3,317.27
11/01/2025	0.739	9.77	678.52	452.24	3,570.29
12/01/2025	0.733	9.26	680.73	441.11	3,524.06
13/01/2025	0.729	9.42	654.08	421.19	3,237.91
14/01/2025	0.741	9.14	710.77	455.51	3,236.34
15/01/2025	0.750	9.05	686.52	454.61	3,467.27
16/01/2025	0.745	9.35	658.34	427.36	3,299.42
17/01/2025	0.722	9.56	660.60	426.35	3,271.32
18/01/2025	0.713	9.04	718.89	423.38	3,499.43
19/01/2025	0.741	9.52	687.97	458.29	3,556.42
20/01/2025	0.739	9.16	697.07	435.44	3,313.73
21/01/2025	0.734	9.88	707.24	438.26	3,573.65
22/01/2025	0.724	9.63	692.24	430.15	3,528.68
23/01/2025	0.741	9.15	708.89	421.80	3,362.05
24/01/2025	0.713	9.21	701.09	457.84	3,395.98
25/01/2025	0.744	9.71	709.92	444.05	3,407.24
26/01/2025	0.721	9.93	708.21	450.60	3,571.40
27/01/2025	0.724	9.95	684.90	420.59	3,277.55
28/01/2025	0.749	9.13	682.91	431.65	3,377.34
29/01/2025	0.734	9.65	672.89	434.68	3,422.25
30/01/2025	0.722	9.27	668.17	430.41	3,452.52
31/01/2025	0.713	9.82	720.15	442.51	3,577.63
Promedio	0.730	9.43	688.00	438.99	3,403.96

Nota. Parámetros de factor de carga, fragmentación, velocidad pico partícula de la matriz rocosa, velocidad pico partícula del macizo rocoso y velocidad de la onda P de enero del 2025.

Durante el mes de enero de 2025, los resultados diarios evidenciaron un comportamiento operativo consistente, característico de la etapa inicial del estudio y previo a la implementación de mejoras en el diseño de voladura. El factor de potencia presentó valores comprendidos entre 0.713 y 0.750 kg/t, alcanzando un promedio mensual de 0.730 kg/t, lo que refleja un consumo de explosivo relativamente elevado y constante por tonelada de roca. En cuanto a la fragmentación (P80), los valores oscilaron entre 9.00 y 9.95 pulgadas, con un promedio de 9.43 pulgadas, indicando una fragmentación más gruesa y con cierta variabilidad, asociada a una liberación de energía menos optimizada durante las voladuras ejecutadas en este periodo.

Respecto al comportamiento vibracional, la velocidad pico partícula (VPP) en la matriz rocosa registró valores entre 654.08 y 720.15 mm/s, con un promedio mensual de 688.00 mm/s, mientras que en el macizo rocoso los valores variaron entre 418.68 y 462.14 mm/s, alcanzando un promedio de 438.99 mm/s. Asimismo, la velocidad de propagación de la onda P presentó valores elevados, con un rango entre 3,236.34 y 3,577.63 m/s y un promedio mensual de 3,403.96 m/s, lo que evidencia una mayor transmisión de energía sísmica en el macizo rocoso. En conjunto, los resultados del mes de enero confirman que, durante el inicio del primer trimestre, el proceso de voladura generó mayores niveles de vibración y una fragmentación menos eficiente, constituyendo una referencia base para la evaluación comparativa de los meses posteriores y de las mejoras implementadas en el segundo trimestre del estudio.

Tabla 17

Resultados febrero 2025

Fecha	Factor de potencia (KG/T)	Fragmentación (P80)	VPP matriz rocoso (mm/s)	VPP macizo rocoso (mm/s)	Velocidad onda P (m/s)
01/02/2025	0.723	9.71	666.85	427.42	3,506.00
02/02/2025	0.717	9.04	689.63	448.24	3,551.15
03/02/2025	0.745	9.65	686.76	459.26	3,465.00
04/02/2025	0.740	9.55	654.12	453.95	3,238.51
05/02/2025	0.738	9.00	662.37	443.80	3,388.62
06/02/2025	0.723	9.49	710.56	432.84	3,494.20
07/02/2025	0.724	9.78	662.43	420.36	3,543.92
08/02/2025	0.743	9.23	703.22	435.49	3,473.34
09/02/2025	0.732	9.01	713.62	431.09	3,397.29
10/02/2025	0.742	9.62	683.32	453.59	3,480.99
11/02/2025	0.738	9.14	655.35	432.80	3,318.53
12/02/2025	0.736	9.54	725.02	430.75	3,555.70
13/02/2025	0.744	9.33	695.76	417.70	3,583.69
14/02/2025	0.731	9.49	657.30	454.45	3,370.81
15/02/2025	0.743	9.99	683.08	456.91	3,281.72
16/02/2025	0.725	9.51	681.82	424.27	3,371.69
17/02/2025	0.750	9.62	705.30	442.12	3,384.78
18/02/2025	0.743	9.25	676.75	448.39	3,582.08
19/02/2025	0.736	9.08	678.32	443.73	3,326.36
20/02/2025	0.739	9.21	658.57	439.57	3,567.45
21/02/2025	0.740	9.74	710.44	422.87	3,540.52
22/02/2025	0.719	9.40	695.09	419.37	3,394.86
23/02/2025	0.734	9.92	703.13	455.95	3,294.94
24/02/2025	0.727	9.14	701.63	459.04	3,390.96
25/02/2025	0.717	9.69	653.21	451.20	3,251.88
26/02/2025	0.741	9.82	669.98	432.45	3,282.91
27/02/2025	0.743	9.50	677.02	418.51	3,541.68
28/02/2025	0.721	9.29	663.77	430.67	3,409.56
Promedio	0.734	9.45	683.02	438.81	3,428.18

Nota. Parámetros de factor de carga, fragmentación, velocidad pico partícula de la matriz rocosa, velocidad pico partícula del macizo rocoso y velocidad de la onda P de febrero del 2025.

Durante el mes de febrero de 2025, los resultados diarios evidenciaron un comportamiento operativo constante, propio de la etapa previa a la implementación de mejoras en el diseño de voladura. El factor de potencia mostró valores relativamente

elevados, comprendidos entre 0.717 y 0.750 kg/t, alcanzando un promedio mensual de 0.734 kg/t, lo que refleja un mayor consumo de explosivo por tonelada de roca. En cuanto a la fragmentación (P80), los valores oscilaron entre 9.00 y 9.99 pulgadas, con un promedio de 9.45 pulgadas, indicando una fragmentación más gruesa y variable, asociada a un control limitado de la energía liberada durante las voladuras ejecutadas en este periodo.

Respecto al comportamiento vibracional, la velocidad pico partícula (VPP) en la matriz rocosa presentó valores comprendidos entre 653.21 y 725.02 mm/s, alcanzando un promedio de 683.02 mm/s, mientras que en el macizo rocoso los registros variaron entre 417.70 y 459.26 mm/s, con un promedio de 438.81 mm/s. Asimismo, la velocidad de propagación de la onda P registró valores elevados, con un rango entre 3,238.51 y 3,583.69 m/s y un promedio mensual de 3,428.18 m/s, lo que evidencia una mayor transmisión de energía sísmica en el macizo rocoso. En conjunto, los resultados del mes de febrero confirman que, durante el primer trimestre, las voladuras generaron niveles más altos de vibración y una fragmentación menos eficiente, constituyendo una base comparativa sólida para evaluar las mejoras obtenidas en el segundo trimestre del estudio.

Tabla 18

Resultados marzo 2025

Fecha	Factor de potencia (KG/T)	Fragmentación (P80)	VPP matriz rocoso (mm/s)	VPP macizo rocoso (mm/s)	Velocidad onda P (m/s)
01/03/2025	0.716	9.50	687.94	455.57	3,312.63
02/03/2025	0.735	9.74	710.72	446.74	3,328.54
03/03/2025	0.718	9.65	659.08	449.90	3,410.36
04/03/2025	0.713	9.69	695.04	454.05	3,237.92
05/03/2025	0.743	9.18	685.57	463.19	3,509.28
06/03/2025	0.725	9.55	691.79	440.14	3,320.20
07/03/2025	0.716	9.36	722.92	438.72	3,374.32
08/03/2025	0.716	9.35	682.17	448.85	3,480.55
09/03/2025	0.747	9.82	660.66	417.35	3,276.78
10/03/2025	0.721	9.50	717.48	438.21	3,580.00
11/03/2025	0.749	9.07	698.79	461.77	3,521.23
12/03/2025	0.723	9.77	696.87	438.34	3,543.88
13/03/2025	0.745	9.68	695.50	451.51	3,582.20
14/03/2025	0.749	9.90	694.09	449.05	3,277.03
15/03/2025	0.717	9.51	663.31	440.58	3,387.62
16/03/2025	0.746	9.22	700.20	458.75	3,275.06
17/03/2025	0.726	9.99	716.79	433.41	3,247.51
18/03/2025	0.723	9.38	711.56	418.76	3,555.85
19/03/2025	0.727	9.94	686.88	424.00	3,235.28
20/03/2025	0.731	9.03	688.74	440.53	3,270.88
21/03/2025	0.739	9.08	695.33	417.86	3,268.07
22/03/2025	0.741	9.30	694.17	460.00	3,380.95
23/03/2025	0.742	9.67	663.94	421.15	3,406.38
24/03/2025	0.725	9.42	687.74	442.07	3,254.65
25/03/2025	0.715	9.62	687.77	444.65	3,492.53
26/03/2025	0.730	9.43	658.61	419.61	3,339.44
27/03/2025	0.743	9.21	714.52	448.50	3,316.14
28/03/2025	0.735	9.55	710.86	425.94	3,490.28
29/03/2025	0.735	9.70	669.85	442.26	3,461.04
30/03/2025	0.718	9.44	667.56	425.50	3,230.77
31/03/2025	0.746	9.64	674.86	462.27	3,471.00
Promedio	0.731	9.51	690.04	441.27	3,381.88

Nota. Parámetros de factor de carga, fragmentación, velocidad pico partícula de la matriz rocosa, velocidad pico partícula del macizo rocoso y velocidad de la onda P de marzo del 2025.

Durante el mes de marzo de 2025, los resultados diarios evidenciaron un comportamiento operativo consistente, característico del periodo previo a la implementación de mejoras en el diseño de voladura. El factor de potencia registró valores entre 0.713 y 0.749 kg/t, alcanzando un promedio mensual de 0.731 kg/t, lo que refleja un mayor consumo de explosivo por tonelada en comparación con los meses posteriores. En cuanto a la fragmentación (P80), los valores oscilaron entre 9.03 y 9.99 pulgadas, con un promedio de 9.51 pulgadas, indicando una fragmentación más gruesa y una mayor dispersión granulométrica, asociada a una liberación de energía menos controlada durante las voladuras ejecutadas en este periodo.

Respecto al comportamiento vibracional, la velocidad pico partícula (VPP) en la matriz rocosa presentó valores elevados, comprendidos entre 658.61 y 722.92 mm/s, con un promedio de 690.04 mm/s, mientras que en el macizo rocoso se registraron valores entre 417.35 y 463.19 mm/s, alcanzando un promedio de 441.27 mm/s. Asimismo, la velocidad de propagación de la onda P mostró valores altos, con un rango entre 3,230.77 y 3,582.20 m/s y un promedio mensual de 3,381.88 m/s, lo que evidencia una mayor transmisión de energía sísmica en el macizo rocoso. En conjunto, los resultados del mes de marzo confirman que, durante el primer trimestre, el proceso de voladura generó mayores niveles de vibración y una fragmentación menos eficiente, constituyendo una línea base representativa para la comparación con los resultados obtenidos tras la implementación de mejoras en el segundo trimestre.

Tabla 19***Parámetros del segundo trimestre (Con la mejora)***

Mes	Factor de potencia (KG/T)	Fragmentación (P80)	VPP matriz rocosa (mm/s)	VPP macizo rocoso (mm/s)	Velocidad onda P (m/s)
Mes 1	0.668	8.41	391.38	263.66	1,894.66
Mes 2	0.667	8.39	391.47	263.24	1,903.57
Mes 3	0.666	8.40	394.67	266.27	1,917.92
Total	0.667	8.40	392.51	264.39	1,905.38

Nota. Se muestran los resultados de factor de carga, fragmentación, velocidad pico partícula de la matriz rocosa, velocidad pico partícula del macizo rocoso y velocidad de la onda P de los meses de abril, mayo y junio del 2025.

Durante el segundo trimestre (periodo con mejora), se evidenció una optimización significativa en los parámetros de voladura, reflejada en un factor de potencia promedio de 0.667 kg/t, menor al registrado en el periodo anterior, lo que indica una mejor distribución y aprovechamiento de la energía explosiva. En cuanto a la fragmentación, el P80 promedio se redujo a 8.40 pulgadas, mostrando una mejora notable en el tamaño del material volado, lo cual favorece las operaciones de carguío y procesamiento. Respecto al comportamiento vibracional, la velocidad pico de partícula (VPP) en la matriz rocosa disminuyó considerablemente a un promedio de 392.51 mm/s, mientras que en el macizo rocoso se redujo a 264.39 mm/s, evidenciando un control más eficiente de la energía transmitida al entorno. Asimismo, la velocidad de onda P promedio fue de 1,905.38 m/s, valor inferior al del primer trimestre, lo que sugiere una menor propagación de las ondas sísmicas debido al ajuste en el diseño de voladura y al tipo de explosivo empleado. En conjunto, estos resultados demuestran que la implementación de mejoras permitió reducir las vibraciones inducidas, optimizar la fragmentación y mejorar el desempeño técnico de la voladura, logrando un equilibrio adecuado entre eficiencia operativa y control geomecánico del macizo rocoso.

Tabla 20

Resultados abril 2025

Fecha	Factor de potencia (KG/T)	Fragmentación (P80)	VPP matriz rocoso (mm/s)	VPP macizo rocoso (mm/s)	Velocidad onda P (m/s)
01/04/2025	0.679	8.36	374.09	264.39	1,817.96
02/04/2025	0.670	8.56	381.09	258.09	1,931.20
03/04/2025	0.664	8.08	398.74	268.73	1,815.72
04/04/2025	0.656	8.45	403.65	267.55	1,874.83
05/04/2025	0.680	8.55	387.80	271.70	1,914.63
06/04/2025	0.655	8.69	373.00	268.77	1,844.39
07/04/2025	0.651	8.03	396.40	268.55	1,910.62
08/04/2025	0.677	8.63	404.44	269.74	1,942.78
09/04/2025	0.666	8.23	399.49	265.72	1,908.47
10/04/2025	0.674	8.36	381.31	255.30	1,986.62
11/04/2025	0.667	8.30	377.03	252.13	1,914.98
12/04/2025	0.681	8.26	380.27	253.04	1,923.20
13/04/2025	0.663	8.53	404.79	255.83	1,993.17
14/04/2025	0.671	8.19	384.43	258.86	1,846.51
15/04/2025	0.661	8.12	397.18	270.43	1,972.29
16/04/2025	0.680	8.11	398.78	266.98	1,883.37
17/04/2025	0.673	8.09	388.76	274.36	1,847.61
18/04/2025	0.661	8.69	406.55	271.22	1,876.96
19/04/2025	0.673	8.15	391.00	262.81	1,884.87
20/04/2025	0.669	8.41	403.68	266.45	1,879.24
21/04/2025	0.679	8.38	397.87	266.18	1,865.76
22/04/2025	0.653	8.28	377.21	258.98	1,813.65
23/04/2025	0.665	8.72	392.22	252.95	1,956.03
24/04/2025	0.679	8.54	399.98	260.64	1,868.32
25/04/2025	0.666	8.12	387.96	274.40	1,835.20
26/04/2025	0.659	8.56	375.76	266.31	1,870.41
27/04/2025	0.673	8.69	377.98	265.37	1,855.99
28/04/2025	0.680	8.76	395.97	258.68	1,848.58
29/04/2025	0.663	8.72	400.85	254.74	1,993.05
30/04/2025	0.653	8.73	403.13	260.94	1,963.44
Promedio	0.668	8.41	391.38	263.66	1,894.66

Nota. Parámetros de factor de carga, fragmentación, velocidad pico partícula de la matriz rocosa, velocidad pico partícula del macizo rocoso y velocidad de la onda P de abril del 2025.

Durante el mes de abril de 2025, los resultados diarios evidenciaron un comportamiento estable y controlado del proceso de perforación y voladura tras la implementación de ajustes técnicos en el diseño. El factor de potencia presentó valores

comprendidos entre 0.651 y 0.681 kg/t, con un promedio mensual de 0.668 kg/t, lo que refleja una aplicación eficiente y homogénea del explosivo por tonelada de roca. En cuanto a la fragmentación (P80), los valores oscilaron entre 8.03 y 8.76 pulgadas, alcanzando un promedio de 8.41 pulgadas, lo cual indica una fragmentación adecuada y consistente, favorable para las operaciones de carguío y chancado. La baja dispersión observada en estos indicadores sugiere que las condiciones operativas y geomecánicas del macizo rocoso se mantuvieron relativamente uniformes durante el periodo evaluado.

Respecto al comportamiento vibracional, la velocidad pico partícula (VPP) en la matriz rocosa registró valores entre 373.00 y 406.55 mm/s, mientras que en el macizo rocoso osciló entre 252.13 y 274.40 mm/s, obteniéndose promedios de 391.38 mm/s y 263.66 mm/s, respectivamente. Estos resultados evidencian un nivel moderado y controlado de vibraciones, compatible con criterios de seguridad en campo cercano. Asimismo, la velocidad de propagación de la onda P presentó valores entre 1,813.65 y 1,993.17 m/s, con un promedio mensual de 1,894.66 m/s, lo que es indicativo de una adecuada disipación de la energía sísmica y un menor daño inducido en el macizo rocoso. En conjunto, los resultados del mes de abril confirman que el proceso de voladura se desarrolló bajo condiciones técnicas favorables, sirviendo como base sólida para la consolidación de las mejoras observadas en los meses siguientes del segundo trimestre.

Tabla 21

Resultados mayo 2025

Fecha	Factor de potencia (KG/T)	Fragmentación (P80)	VPP matriz rocoso (mm/s)	VPP macizo rocoso (mm/s)	Velocidad onda P (m/s)
01/05/2025	0.658	8.76	391.33	268.97	1,885.65
02/05/2025	0.671	8.24	376.54	261.08	1,839.05
03/05/2025	0.657	8.26	395.03	267.91	1,862.11
04/05/2025	0.667	8.19	388.79	263.68	1,858.06
05/05/2025	0.667	8.07	383.71	254.86	1,992.58
06/05/2025	0.661	8.23	387.03	273.67	1,876.79
07/05/2025	0.675	8.46	379.07	253.46	1,949.45
08/05/2025	0.654	8.07	391.70	252.11	1,834.68
09/05/2025	0.681	8.45	400.33	270.25	1,974.83
10/05/2025	0.667	8.44	403.23	275.57	1,873.68
11/05/2025	0.658	8.61	397.36	266.31	1,865.00
12/05/2025	0.681	8.52	384.36	262.74	1,899.73
13/05/2025	0.672	8.36	380.56	260.94	1,937.24
14/05/2025	0.682	8.44	402.75	254.66	1,907.45
15/05/2025	0.668	8.77	390.46	264.22	1,946.37
16/05/2025	0.653	8.16	372.07	261.57	1,841.08
17/05/2025	0.677	8.52	405.94	269.74	1,980.94
18/05/2025	0.661	8.37	382.76	276.94	1,970.15
19/05/2025	0.652	8.64	374.95	270.16	1,879.94
20/05/2025	0.667	8.72	398.72	265.38	1,940.35
21/05/2025	0.651	8.00	403.70	274.20	1,820.48
22/05/2025	0.674	8.49	390.13	262.81	1,888.34
23/05/2025	0.675	8.42	387.23	252.08	1,856.40
24/05/2025	0.673	8.44	395.64	260.54	1,892.14
25/05/2025	0.658	8.68	408.97	273.69	1,904.95
26/05/2025	0.676	8.60	395.12	255.39	1,971.68
27/05/2025	0.661	8.19	404.09	253.03	1,834.24
28/05/2025	0.663	8.23	399.76	255.89	1,888.02
29/05/2025	0.671	8.17	403.58	262.24	1,950.42
30/05/2025	0.682	8.31	381.86	262.15	1,960.77
31/05/2025	0.669	8.22	378.88	254.17	1,928.05
Promedio	0.667	8.39	391.47	263.24	1,903.57

Nota. Parámetros de factor de carga, fragmentación, velocidad pico partícula de la matriz rocosa, velocidad pico partícula del macizo rocoso y velocidad de la onda P de mayo del 2025.

Durante el primer trimestre (periodo sin mejora), los resultados muestran un comportamiento operativo uniforme, con un factor de potencia promedio de 0.732 kg/t, lo que evidencia una dosificación de explosivo relativamente constante en los tres meses

evaluados. En términos de fragmentación, se obtuvo un P80 promedio de 9.46 pulgadas, indicando un material volado de tamaño relativamente grueso, lo cual sugiere una limitada eficiencia en la liberación de energía durante la voladura. Respecto al comportamiento vibracional, la velocidad pico de partícula (VPP) en la matriz rocosa alcanzó un promedio de 687.02 mm/s, mientras que en el macizo rocoso fue de 439.69 mm/s, valores elevados que reflejan una significativa transmisión de energía sísmica hacia el entorno rocoso. Asimismo, la velocidad de onda P promedio fue de 3,404.68 m/s, lo que indica un macizo rocoso con alta rigidez y capacidad de propagación de ondas, favoreciendo la dispersión de vibraciones. En conjunto, estos resultados evidencian que, durante el primer trimestre, la energía explosiva no fue adecuadamente controlada, generando niveles altos de vibración y una fragmentación poco eficiente, lo que justifica la necesidad de optimizar el diseño de voladura en el siguiente periodo para mejorar el desempeño técnico y reducir el impacto sobre el macizo rocoso.

Tabla 22

Resultados junio 2025

Fecha	Factor de potencia (KG/T)	Fragmentación (P80)	VPP matriz rocoso (mm/s)	VPP macizo rocoso (mm/s)	Velocidad onda P (m/s)
01/06/2025	0.654	8.08	405.53	269.21	1,925.22
02/06/2025	0.675	8.80	402.24	268.79	1,929.43
03/06/2025	0.677	8.38	400.28	264.22	1,945.73
04/06/2025	0.674	8.48	373.65	254.94	1,917.57
05/06/2025	0.670	8.69	406.81	263.02	1,835.15
06/06/2025	0.678	8.77	385.42	256.17	1,986.04
07/06/2025	0.669	8.79	403.12	254.52	1,943.58
08/06/2025	0.675	8.12	401.52	276.74	1,904.16
09/06/2025	0.681	8.24	380.49	275.05	1,983.70
10/06/2025	0.656	8.24	403.80	266.46	1,838.90
11/06/2025	0.670	8.43	401.64	270.94	1,900.41
12/06/2025	0.670	8.69	402.81	257.80	1,954.97
13/06/2025	0.660	8.26	393.10	266.78	1,967.23
14/06/2025	0.669	8.44	409.04	273.90	1,956.83
15/06/2025	0.652	8.61	402.95	273.31	1,937.05
16/06/2025	0.657	8.06	397.45	264.22	1,823.46
17/06/2025	0.665	8.67	378.31	272.11	1,858.86
18/06/2025	0.670	8.52	406.38	257.27	1,897.71
19/06/2025	0.651	8.35	377.91	276.23	1,875.34
20/06/2025	0.666	8.25	402.32	269.83	1,847.37
21/06/2025	0.658	8.31	386.28	260.62	1,975.06
22/06/2025	0.661	8.43	374.87	268.07	1,872.82
23/06/2025	0.681	8.27	393.83	258.88	1,928.68
24/06/2025	0.653	8.56	400.95	266.67	1,991.80
25/06/2025	0.664	8.58	381.82	263.71	1,966.43
26/06/2025	0.662	8.03	383.44	263.71	1,987.11
27/06/2025	0.652	8.04	397.18	273.89	1,932.11
28/06/2025	0.678	8.18	392.26	276.26	1,896.82
29/06/2025	0.660	8.51	399.40	252.17	1,939.14
30/06/2025	0.660	8.31	395.44	272.47	1,818.81
Promedio	0.666	8.40	394.67	266.27	1,917.92

Nota. Parámetros de factor de carga, fragmentación, velocidad pico partícula de la matriz rocosa, velocidad pico partícula del macizo rocoso y velocidad de la onda P de junio del 2025.

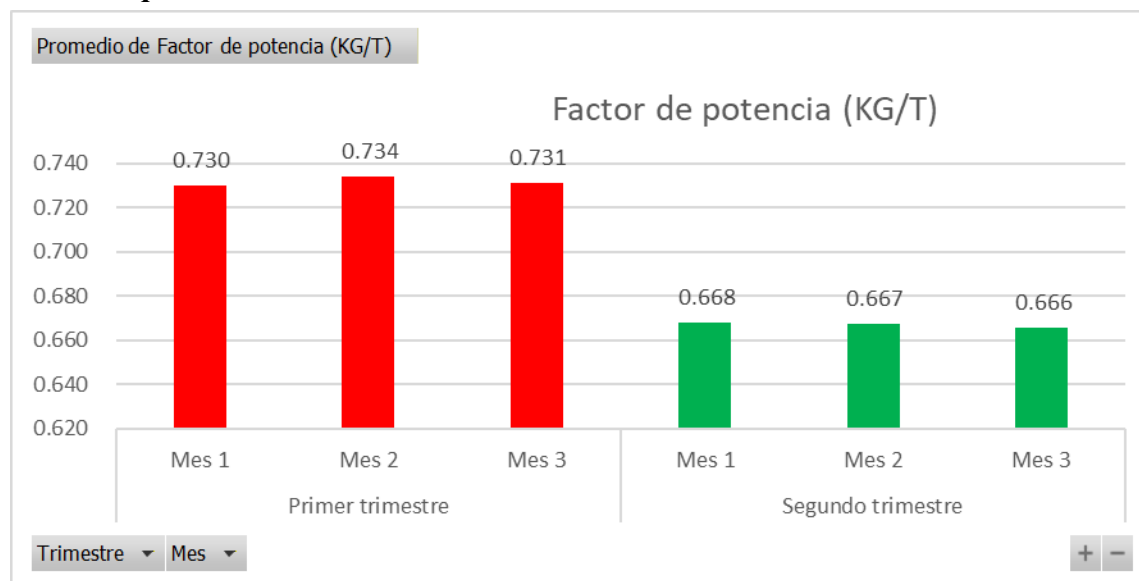
Durante el mes de junio de 2025, los resultados diarios evidenciaron un comportamiento estable y controlado en el proceso de perforación y voladura. El factor de potencia registró valores comprendidos entre 0.651 y 0.681 kg/t, con un promedio mensual

de 0.666 kg/t, lo que refleja una aplicación eficiente y uniforme de la energía explosiva en las voladuras ejecutadas. En cuanto a la fragmentación (P80), los valores oscilaron entre 8.03 y 8.80 pulgadas, alcanzando un promedio de 8.40 pulgadas, lo cual indica una fragmentación adecuada y consistente, favorable para las operaciones posteriores de carguío y chancado. Estas variaciones controladas sugieren que el diseño de voladura implementado permitió mantener una granulometría relativamente homogénea a lo largo del periodo evaluado.

Respecto a la respuesta vibracional del macizo rocoso, la velocidad pico partícula (VPP) en la matriz rocosa presentó valores diarios entre 373.65 y 409.04 mm/s, mientras que en el macizo rocoso varió entre 252.17 y 276.74 mm/s, con promedios de 394.67 mm/s y 266.27 mm/s, respectivamente. Estos resultados confirman un nivel reducido de vibraciones en comparación con periodos previos, evidenciando un mejor control de la energía liberada durante la voladura. Asimismo, la velocidad de propagación de la onda P mostró un rango entre 1,818.81 y 1,991.80 m/s, con un promedio mensual de 1,917.92 m/s, lo que es indicativo de una adecuada disipación de energía y un menor daño inducido en el macizo rocoso. En conjunto, los resultados diarios del mes de junio demuestran la efectividad de los ajustes técnicos aplicados durante el segundo trimestre, consolidando un proceso de voladura más eficiente y controlado.

Figura 37.

Factor de potencia mensual

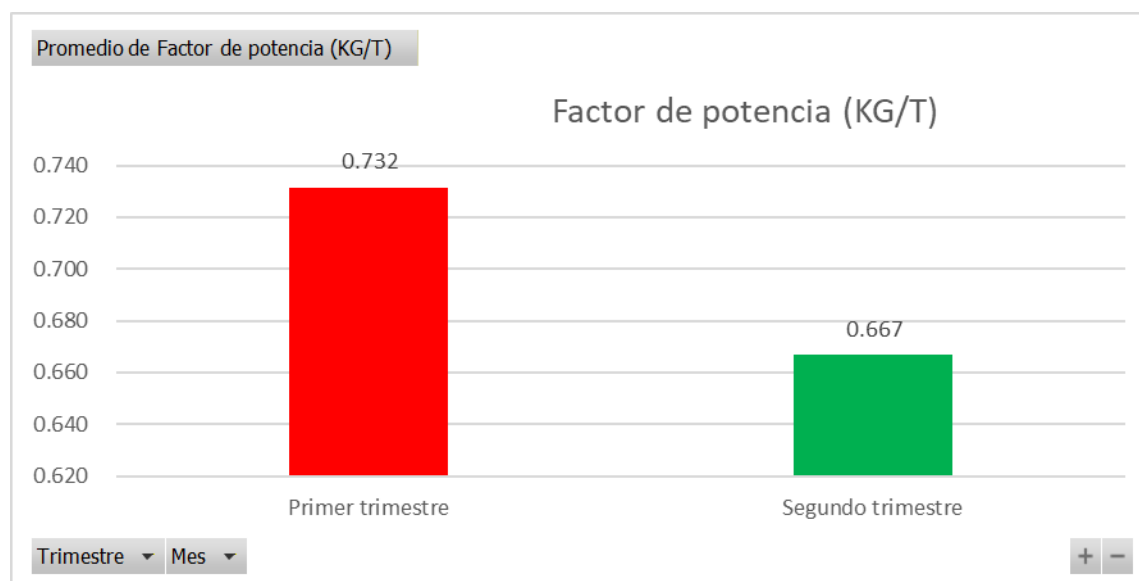


Nota. Se muestra resultados del factor de carga por meses del primer y segundo trimestre del 2025.

El gráfico del factor de potencia (kg/t) evidencia una disminución clara y sostenida entre el primer y el segundo trimestre del periodo de estudio. Durante el primer trimestre, los valores promedio mensuales se mantuvieron elevados y relativamente constantes, oscilando entre 0.730 y 0.734 kg/t, lo que refleja un mayor consumo de explosivo por tonelada de roca. En contraste, en el segundo trimestre se observa una reducción significativa del factor de potencia, con valores comprendidos entre 0.666 y 0.668 kg/t, lo que indica una optimización en el uso del explosivo asociada a la implementación de mejoras en el diseño de voladura. Esta reducción del factor de potencia confirma una aplicación más eficiente de la energía explosiva, contribuyendo al mejor control de vibraciones y a una fragmentación más favorable del material volado.

Figura 38.

Factor de potencia trimestral

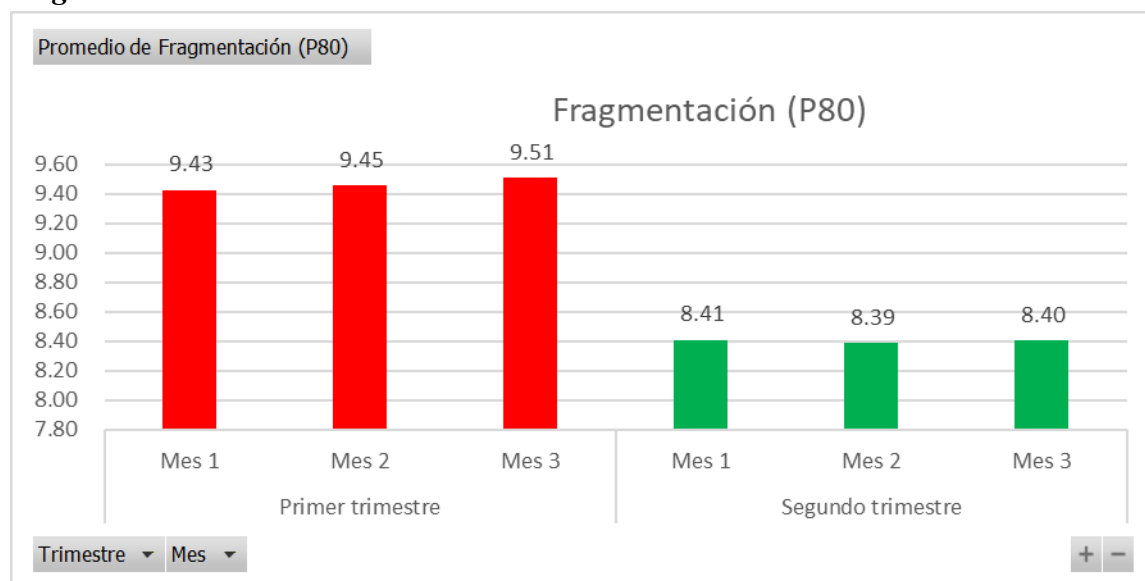


Nota. Se muestra resultados de factor de potencia por trimestre del 2025.

El gráfico comparativo del factor de potencia (kg/t) muestra una reducción significativa entre el primer y el segundo trimestre del periodo evaluado. Durante el primer trimestre, el factor de potencia alcanzó un valor promedio de 0.732 kg/t, reflejando un mayor consumo de explosivo por tonelada de roca. En contraste, en el segundo trimestre se registró un valor promedio de 0.667 kg/t, lo que representa una disminución apreciable del uso de explosivo. Esta variación evidencia que la implementación de mejoras en el diseño de voladura permitió optimizar la aplicación de la energía explosiva, contribuyendo a un proceso más eficiente y a un mejor control de los efectos dinámicos generados en el macizo rocoso.

Figura 39.

Fragmentación mensual

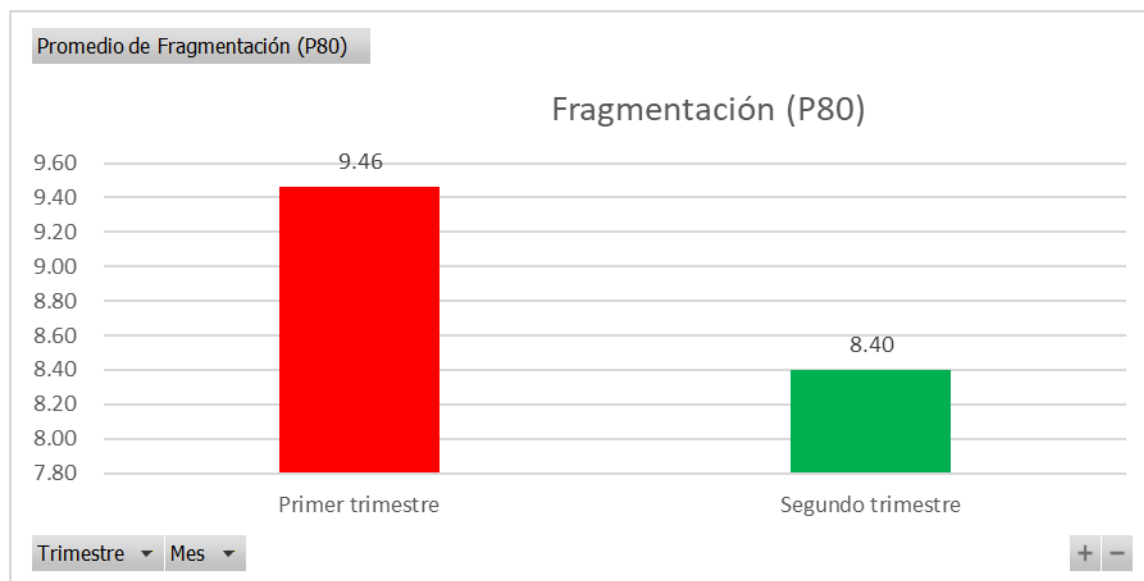


Nota. Se muestra resultados de fragmentación por meses del primer y segundo trimestre del 2025.

El gráfico de fragmentación (P80) evidencia una mejora significativa en el segundo trimestre respecto al primero. Durante el primer trimestre, los valores de P80 se mantuvieron elevados y mostraron una ligera tendencia creciente, variando entre 9.43 y 9.51 pulgadas, lo que indica una fragmentación más gruesa del material volado. En contraste, en el segundo trimestre se observa una reducción clara y sostenida del P80, con valores comprendidos entre 8.39 y 8.41 pulgadas, reflejando una fragmentación más fina y uniforme. Esta disminución del P80 confirma que los ajustes implementados en el diseño de voladura permitieron una mejor distribución y aprovechamiento de la energía explosiva, favoreciendo las operaciones de carguío y chancado y contribuyendo a una mayor eficiencia del proceso minero.

Figura 40.

Fragmentación trimestral

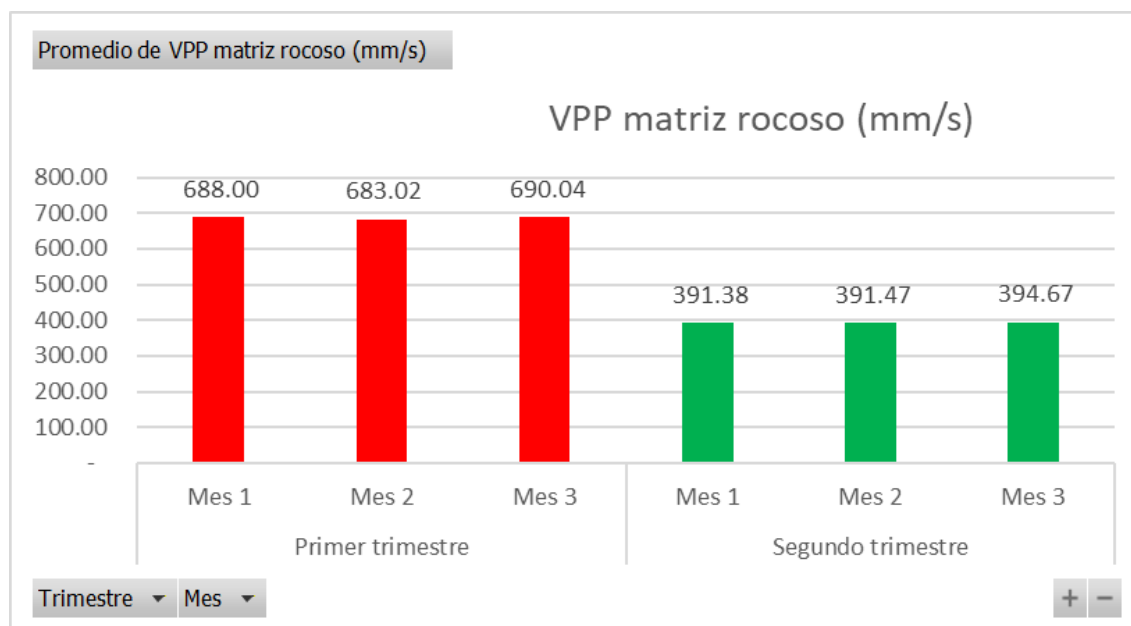


Nota. Se muestra resultados de fragmentación por trimestre del 2025.

El gráfico comparativo de la fragmentación (P80) muestra una mejora evidente entre el primer y el segundo trimestre del periodo evaluado. Durante el primer trimestre, el P80 promedio alcanzó 9.46 pulgadas, lo que indica una fragmentación más gruesa del material volado. En contraste, en el segundo trimestre el P80 promedio se redujo a 8.40 pulgadas, evidenciando una fragmentación más fina y homogénea. Esta reducción del tamaño característico de fragmento confirma que las mejoras implementadas en el diseño de voladura permitieron un mejor aprovechamiento de la energía explosiva, optimizando las condiciones para las operaciones de carguío y chancado y contribuyendo a una mayor eficiencia del proceso productivo.

Figura 41.

Velocidad pico partícula de la matriz rocosa mensual

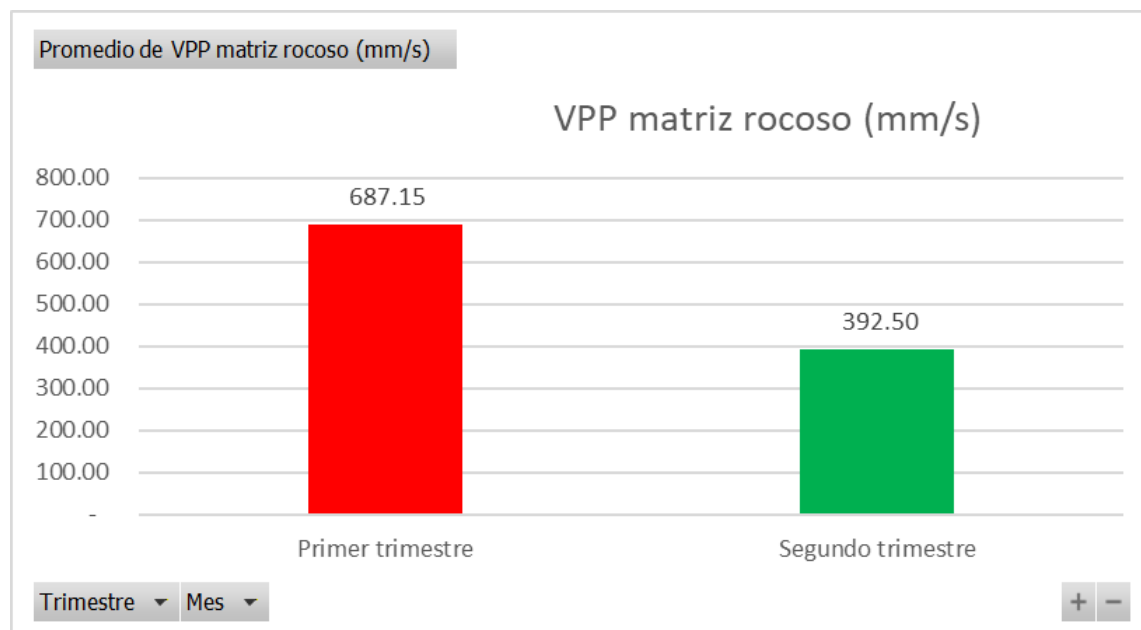


Nota. Se muestra resultados de la velocidad pico partícula de la matriz rocosa por meses del primer y segundo trimestre del 2025.

El gráfico de VPP en matriz rocosa (mm/s) evidencia una reducción significativa y consistente entre el primer y el segundo trimestre del periodo evaluado. Durante el primer trimestre, los valores promedio mensuales de VPP se mantuvieron elevados, variando entre 683.02 y 690.04 mm/s, lo que refleja una mayor transmisión de energía vibracional al macizo rocoso. En contraste, en el segundo trimestre se observa una disminución marcada de la VPP, con valores comprendidos entre 391.38 y 394.67 mm/s, lo que representa una reducción sustancial del nivel de vibraciones generadas por las voladuras. Esta disminución confirma que la implementación de mejoras en el diseño de voladura permitió un mejor control de la energía liberada, contribuyendo a la reducción del daño inducido en la matriz rocosa y a una mayor seguridad geotécnica en el área de estudio.

Figura 42.

Velocidad pico partícula de la matriz rocosa trimestral

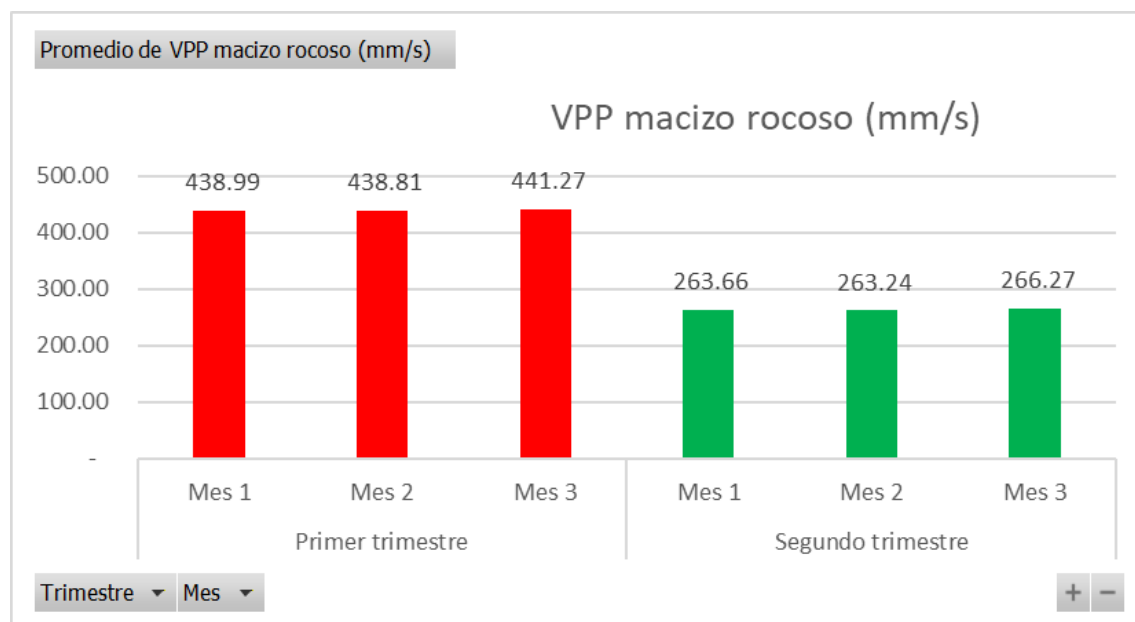


Nota. Se muestra resultados de la velocidad pico partícula de la matriz rocosa por trimestre del 2025.

El gráfico comparativo de la velocidad pico partícula (VPP) en matriz rocosa muestra una reducción notable entre el primer y el segundo trimestre del periodo evaluado. Durante el primer trimestre, la VPP promedio alcanzó 687.15 mm/s, reflejando un mayor nivel de vibraciones transmitidas al macizo rocoso como resultado de las voladuras realizadas. En contraste, en el segundo trimestre se registró una VPP promedio de 392.50 mm/s, lo que evidencia una disminución significativa de la energía vibracional. Esta reducción confirma que las mejoras implementadas en el diseño de voladura permitieron un mejor control de las vibraciones, contribuyendo a la disminución del daño inducido en la matriz rocosa y a una mayor estabilidad geotécnica en la zona de estudio.

Figura 43.

Velocidad pico partícula del macizo rocoso mensual

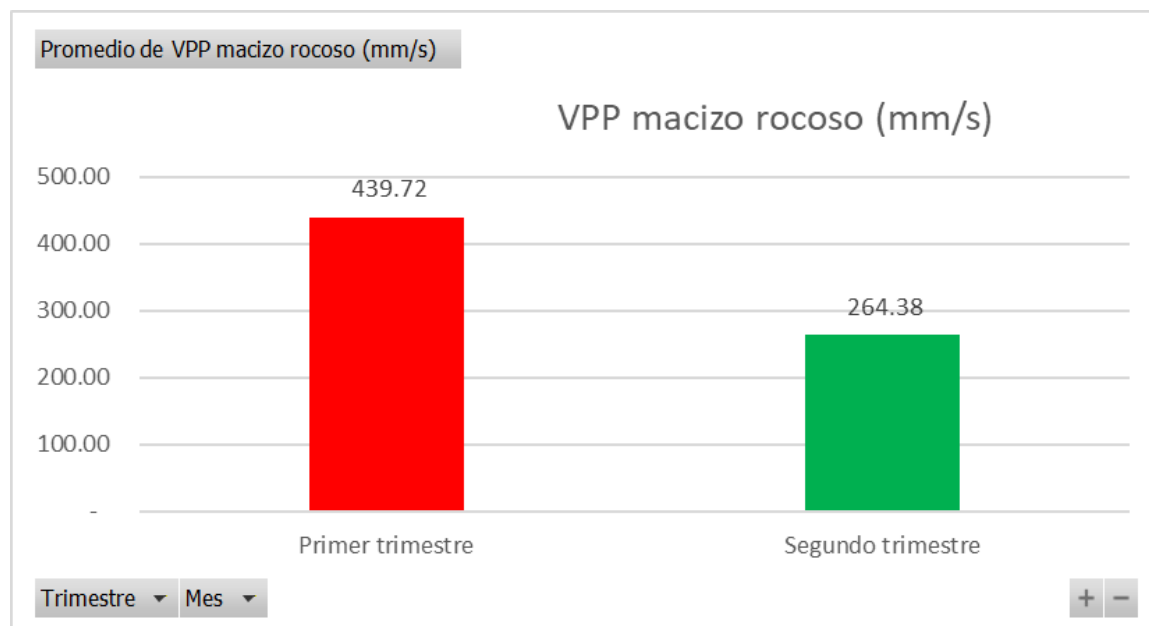


Nota. Se muestra resultados de la velocidad pico partícula del macizo rocoso por meses del primer y segundo trimestre del 2025.

El gráfico de VPP en macizo rocoso (mm/s) evidencia una disminución significativa y sostenida entre el primer y el segundo trimestre del periodo evaluado. Durante el primer trimestre, los valores promedio mensuales de VPP se mantuvieron elevados, variando entre 438.81 y 441.27 mm/s, lo que refleja una mayor transmisión de vibraciones al macizo rocoso producto de las voladuras ejecutadas. En contraste, en el segundo trimestre se observa una reducción clara de la VPP, con valores comprendidos entre 263.24 y 266.27 mm/s, indicando un mejor control de la energía vibracional generada. Esta disminución confirma que las mejoras aplicadas en el diseño de voladura contribuyeron a reducir el impacto dinámico sobre el macizo rocoso, favoreciendo la estabilidad geotécnica y mejorando las condiciones de seguridad en el área de estudio.

Figura 44.

Velocidad pico partícula del macizo rocoso trimestral

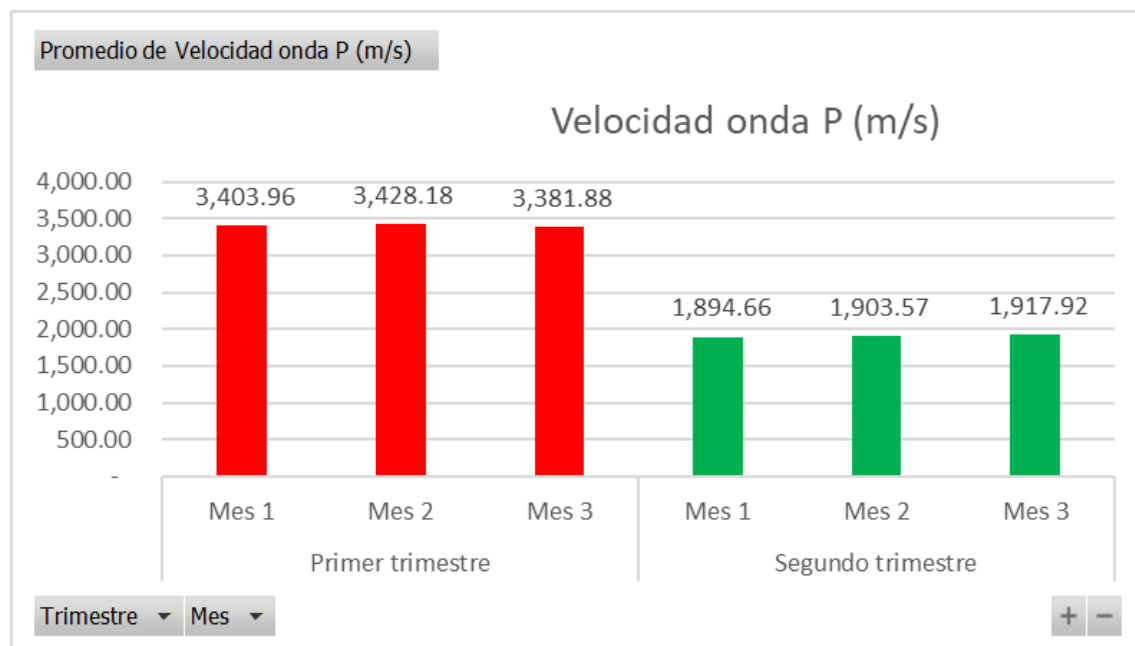


Nota. Se muestra resultados de la velocidad pico partícula del macizo rocoso por trimestre del 2025.

El gráfico comparativo de la velocidad pico partícula (VPP) en macizo rocoso muestra una reducción significativa entre el primer y el segundo trimestre del periodo evaluado. Durante el primer trimestre, la VPP promedio alcanzó 439.72 mm/s, evidenciando una mayor transmisión de vibraciones al macizo rocoso producto de las voladuras realizadas sin mejoras operativas. En contraste, en el segundo trimestre se registró un valor promedio de 264.38 mm/s, lo que representa una disminución considerable del nivel de vibraciones. Esta reducción confirma que la implementación de mejoras en el diseño de voladura permitió un mejor control de la energía liberada, contribuyendo a la disminución del daño inducido en el macizo rocoso y a una mayor estabilidad geotécnica y seguridad operacional en la zona de estudio.

Figura 45.

Velocidad onda P mensual

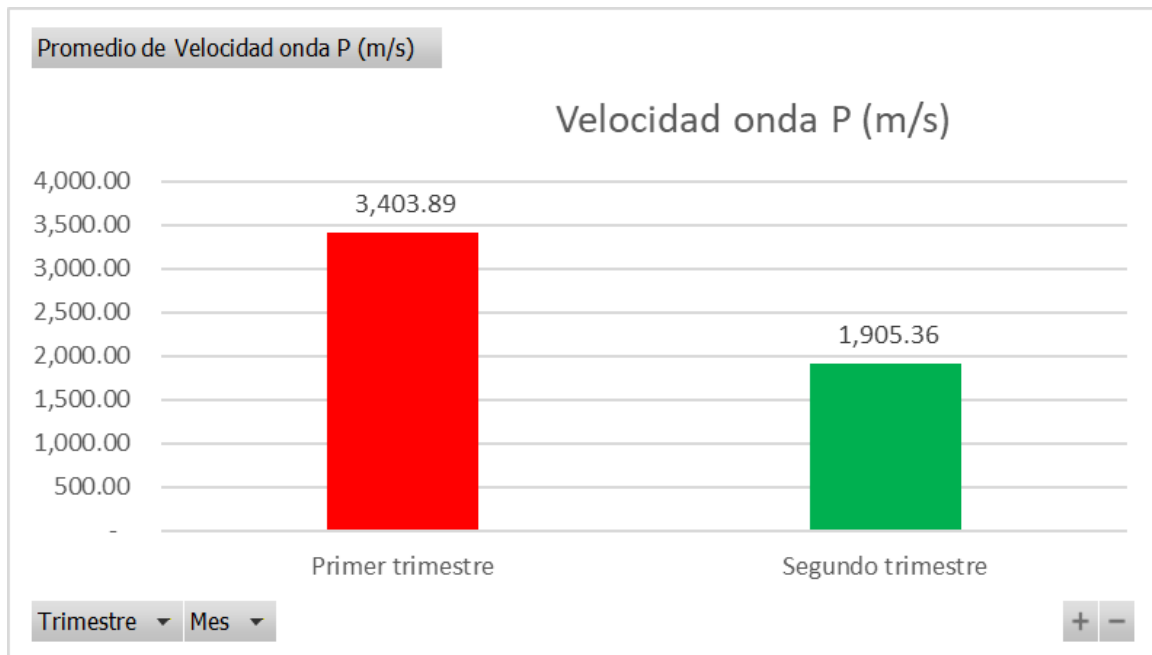


Nota. Se muestra resultados de la velocidad onda P por meses del primer y segundo trimestre del 2025.

El gráfico de velocidad de propagación de la onda P (m/s) evidencia una disminución marcada entre el primer y el segundo trimestre del periodo evaluado. Durante el primer trimestre, los valores promedio mensuales se mantuvieron elevados, variando entre 3,381.88 y 3,428.18 m/s, lo que refleja una mayor transmisión de energía sísmica a través del macizo rocoso. En contraste, en el segundo trimestre se observa una reducción significativa de la velocidad de onda P, con valores comprendidos entre 1,894.66 y 1,917.92 m/s, indicando una menor rigidez dinámica aparente y una mejor disipación de la energía generada por las voladuras. Esta disminución de la velocidad de onda P confirma que las mejoras implementadas en el diseño de voladura contribuyeron a reducir el daño inducido en el macizo rocoso, favoreciendo condiciones geotécnicas más estables y un mejor control del impacto dinámico en la zona de estudio.

Figura 46.

Velocidad onda P trimestral



Nota. Se muestra resultados de la velocidad onda P por trimestre del 2025.

El gráfico comparativo de la velocidad de propagación de la onda P (m/s) muestra una reducción significativa entre el primer y el segundo trimestre del periodo evaluado. Durante el primer trimestre, la velocidad promedio de la onda P alcanzó 3,403.89 m/s, lo que evidencia una mayor transmisión de energía sísmica a través del macizo rocoso, asociada a voladuras con mayor intensidad dinámica. En contraste, en el segundo trimestre se registró un valor promedio de 1,905.36 m/s, reflejando una disminución considerable de la respuesta dinámica del macizo rocoso. Esta reducción indica una mejor disipación de la energía generada por las voladuras y un menor daño inducido en la estructura rocosa, confirmando que las mejoras implementadas en el diseño de voladura contribuyeron a un mayor control vibracional y a condiciones geotécnicas más estables en el área de estudio.

4.1.12. Aplicación del Split on Line

El software Split Online fue aplicado en la presente investigación para la evaluación y cuantificación de la fragmentación del material volado, utilizando como indicador principal el P80, el cual representa el tamaño de partícula que deja pasar el 80 % del material fragmentado. Su aplicación permitió realizar un seguimiento sistemático y objetivo de la fragmentación obtenida en cada voladura ejecutada durante los periodos de estudio, tanto en el primer trimestre (sin mejora) como en el segundo trimestre (con mejora).

El procedimiento consistió en la captura de imágenes digitales del material volado inmediatamente después de cada voladura diaria, asegurando condiciones adecuadas de iluminación, escala y enfoque. Estas imágenes fueron cargadas a la plataforma Split Online, donde se realizó la calibración mediante objetos de referencia, seguido del procesamiento automático para la delimitación de contornos y el análisis granulométrico. El software generó curvas de distribución de tamaños, de las cuales se extrajeron los valores de P80 utilizados para el análisis comparativo.

La aplicación de Split Online permitió reducir la subjetividad en la evaluación de la fragmentación, proporcionando resultados reproducibles y consistentes. Asimismo, facilitó la comparación directa entre los periodos evaluados, evidenciando la influencia de los ajustes en el diseño de voladura sobre la mejora de la fragmentación del material. De esta manera, el uso de Split Online constituyó una herramienta fundamental para validar técnicamente la relación entre el factor de potencia, las vibraciones generadas y la calidad de la fragmentación obtenida en la unidad minera estudiada.

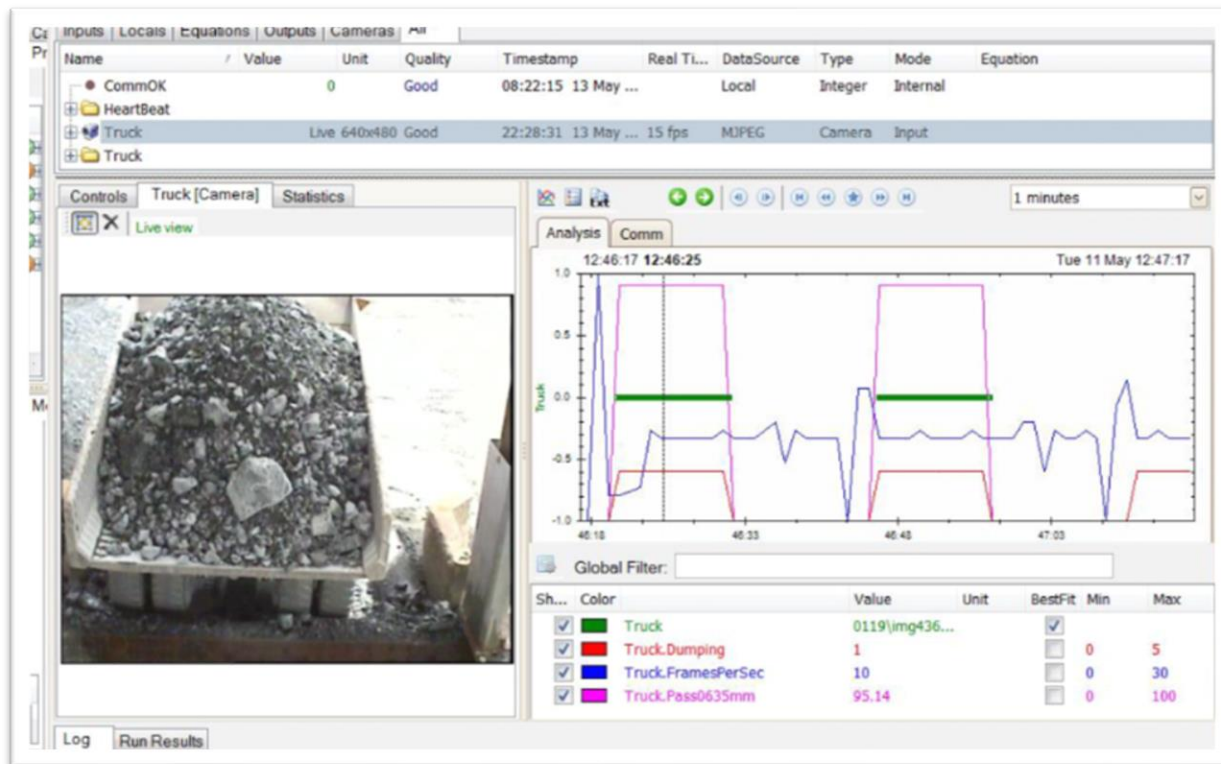
Tabla 23***Resultados split on line segundo periodo***

Fecha	Hora	P80 (in)	P50 (in)	P20 (in)
2025-06-11	00:00:00	6.6	5.0	3.0
2025-06-11	01:00:00	6.5	4.9	2.9
2025-06-11	02:00:00	6.6	4.9	3.0
2025-06-11	03:00:00	6.7	4.9	3.0
2025-06-11	04:00:00	6.5	4.8	2.8
2025-06-11	05:00:00	6.5	4.9	2.9
2025-06-11	06:00:00	6.7	4.9	3.0
2025-06-11	07:00:00	6.6	5.0	3.0
2025-06-11	08:00:00	6.5	4.8	2.9
2025-06-11	09:00:00	6.6	4.9	2.9
2025-06-11	10:00:00	6.5	4.8	2.9
2025-06-11	11:00:00	6.5	4.9	2.9
2025-06-11	12:00:00	6.5	4.9	2.9
2025-06-11	13:00:00	6.3	4.7	2.9
2025-06-11	14:00:00	6.3	4.8	2.9
2025-06-11	15:00:00	6.4	4.8	2.9
2025-06-11	16:00:00	6.4	4.8	2.8
2025-06-11	17:00:00	6.5	4.8	2.9
2025-06-11	18:00:00	6.4	4.7	2.9
2025-06-11	19:00:00	6.4	4.8	2.9

Nota. Resultados del Split on Line del segundo trimestre 2025.

Figura 47.

Toma Split on line en descarga chancado



Fuente: Planeamiento, 2025.

4.2. Resultados por objetivos

4.2.1. Resultados respecto al Objetivo General

Se logró determinar el modelo de vibraciones en campo cercano de la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración argílica en la Fase 02N-3660, a partir del análisis comparativo entre el primer periodo (enero-marzo de 2025) y el segundo periodo (abril-junio de 2025). Los resultados evidenciaron una reducción significativa de la velocidad de onda P, pasando de un promedio de 3,403.89 m/s en el primer periodo a 1,905.36 m/s en el segundo periodo, lo que indicó una menor transmisión de energía sísmica y un mejor control del daño inducido en el macizo rocoso. Este

comportamiento permitió validar la efectividad de la implementación del control de vibraciones en el segundo periodo de estudio.

4.2.2. Resultados respecto al primer Objetivo Específico

Se calculó la velocidad pico partícula crítica (VPP Crítico) para la matriz y el macizo rocoso, estableciendo los niveles de perturbación del macizo en condiciones de campo cercano. Los resultados mostraron que, durante el primer periodo, la VPP promedio en la matriz rocosa alcanzó 687.15 mm/s y en el macizo rocoso 439.72 mm/s, valores asociados a un mayor nivel de perturbación. En contraste, durante el segundo periodo, la VPP se redujo a 392.50 mm/s en la matriz rocosa y 264.38 mm/s en el macizo rocoso, evidenciando una disminución sustancial de las vibraciones y un comportamiento más estable del macizo rocoso frente a la acción de las voladuras.

4.2.3. Resultados respecto al segundo Objetivo Específico

El análisis del modelo vibracional del pórfido temprano con alteración argílica, mediante la aplicación de los explosivos HA73G y Control 70, permitió identificar diferencias claras en la respuesta dinámica del macizo rocoso. El uso predominante de HA73G durante el primer periodo generó mayores niveles de VPP y velocidad de onda P, mientras que la incorporación del explosivo Control 70 en el segundo periodo contribuyó a una liberación de energía más controlada, reflejada en la reducción de vibraciones registradas. Estos resultados confirmaron que la selección del tipo de explosivo influyó directamente en el comportamiento vibracional del macizo rocoso.

4.2.4. Resultados respecto al tercer Objetivo Específico

La evaluación de la fragmentación del material volado, realizada mediante el modelo de Holmberg & Persson y el software Split Online, permitió comparar el desempeño de ambos periodos de estudio. Durante el primer periodo, se obtuvo un P80 promedio de 9.46 pulgadas, lo que evidenció una fragmentación más gruesa. En el segundo periodo, el P80 promedio se redujo a 8.40 pulgadas, reflejando una mejora significativa en la fragmentación del material volado. Esta mejora se asoció directamente a la optimización del factor de potencia y al control de vibraciones implementado, lo que favoreció las operaciones de carguío y chancado.

4.3. Resultados generales

De manera general, los resultados demostraron que la implementación del control de vibraciones en el segundo periodo (abril–junio de 2025) tuvo un impacto positivo y significativo en el comportamiento vibracional y en la fragmentación del material volado en la Fase 02N–3660, correspondiente a la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración argílica. En comparación con el primer periodo (enero–marzo de 2025), se evidenció una reducción del factor de potencia, lo que permitió un uso más eficiente del explosivo sin afectar negativamente la fragmentación.

Asimismo, se registró una disminución sustancial de la velocidad pico partícula (VPP) tanto en la matriz rocosa como en el macizo rocoso, confirmando una menor perturbación del macizo y un mejor control de la energía liberada durante las voladuras. De manera consistente, la velocidad de propagación de la onda P mostró una reducción significativa en el segundo periodo, lo que indicó una menor transmisión de energía sísmica y un menor daño inducido en la estructura rocosa. Finalmente, la evaluación de la

fragmentación mediante Split Online y el modelo de Holmberg & Persson evidenció una mejora del P80, reflejando una fragmentación más fina y homogénea, favorable para las operaciones de carguío y chancado.

Tabla 24

Resultados generales

Indicador	Primer periodo (Ene–Mar 2025)	Segundo periodo (Abr–Jun 2025)	Variación	Interpretación
Factor de potencia (kg/t)	0.732	0.667	↓ 8.84 %	Optimización del uso de explosivo
Fragmentación P80 (pulg)	9.46	8.40	↓ 11.24 %	Fragmentación más fina y uniforme
VPP matriz rocosa (mm/s)	687.15	392.50	↓ 45.85 %	Menor vibración y daño inducido
VPP macizo rocoso (mm/s)	439.72	264.38	↓ 42.69 %	Mejor estabilidad geotécnica
Velocidad onda P (m/s)	3,403.89	1,905.36	↓ 44.00 %	Menor transmisión de energía sísmica

Nota. Se muestra la variación por indicador por trimestre 2025.

El cuadro resumen evidenció que el factor de potencia disminuyó de 0.732 kg/t en el primer periodo a 0.667 kg/t en el segundo periodo, lo que representó una reducción del 8.84 %. Este resultado indicó una optimización en el consumo de explosivo, logrando una aplicación más eficiente de la energía sin afectar negativamente la fragmentación del material volado.

En relación con la fragmentación (P80), se observó una reducción de 9.46 a 8.40 pulgadas, equivalente a una mejora del 11.24 %. Este comportamiento reflejó una fragmentación más fina y homogénea durante el segundo periodo, lo que favoreció las operaciones de carguío y chancado, y evidenció una mejor distribución de la energía explosiva en el macizo rocoso.

Respecto a las vibraciones, la velocidad pico partícula (VPP) en la matriz rocosa presentó una disminución significativa del 45.85 %, pasando de 687.15 mm/s a 392.50 mm/s. De manera similar, la VPP en el macizo rocoso se redujo en 42.69 %, de 439.72 mm/s a 264.38 mm/s, lo que evidenció una reducción sustancial de la perturbación del macizo rocoso y un mejor control del impacto dinámico generado por las voladuras.

Finalmente, la velocidad de propagación de la onda P mostró una reducción del 44.00 %, disminuyendo de 3,403.89 m/s en el primer periodo a 1,905.36 m/s en el segundo periodo. Este resultado indicó una menor transmisión de energía sísmica y un menor daño inducido en la estructura rocosa, confirmando la efectividad del control de vibraciones implementado durante el segundo periodo de estudio. En conjunto, los resultados del cuadro confirmaron que las mejoras aplicadas en el diseño de voladura tuvieron un impacto positivo en la eficiencia operativa, el control vibracional y la estabilidad geotécnica del área de estudio.

4.4. Contrastación de hipótesis

4.4.1. Contrastación de la hipótesis principal

La hipótesis principal fue aceptada, ya que el estudio de vibraciones en campo cercano desarrollado en la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración argílica, en la Fase 02N–3660, permitió determinar la velocidad de onda P y definir un modelo representativo del comportamiento vibracional del macizo rocoso. Los resultados mostraron que la velocidad de onda P disminuyó significativamente de 3,403.89 m/s en el primer periodo (enero–marzo de 2025) a 1,905.36 m/s en el segundo periodo (abril–junio de 2025), evidenciando una menor transmisión de energía sísmica. Esta reducción se asoció directamente a la implementación del control de vibraciones, lo cual contribuyó tanto a la disminución del daño inducido en el macizo rocoso como a

la mejora de la fragmentación del material volado durante el segundo periodo de evaluación.

4.4.2. Contrastación de la primera hipótesis específica

La primera hipótesis específica fue aceptada, dado que el cálculo de la velocidad pico partícula crítica (VPP Crítico) permitió identificar claramente los niveles de perturbación del macizo rocoso en condiciones de campo cercano. Durante el primer periodo, la VPP promedio alcanzó 687.15 mm/s en la matriz rocosa y 439.72 mm/s en el macizo rocoso, valores asociados a un mayor nivel de perturbación. En contraste, en el segundo periodo estos valores se redujeron a 392.50 mm/s y 264.38 mm/s, respectivamente, evidenciando una disminución significativa de las vibraciones. Estos resultados confirmaron la influencia directa de la VPP Crítica sobre la estabilidad del terreno, validando la hipótesis planteada.

4.4.3. Contrastación de la segunda hipótesis específica

La segunda hipótesis específica fue aceptada, ya que el análisis del modelo vibracional en campo cercano demostró que el comportamiento vibracional varió según el tipo de explosivo empleado. El uso predominante del explosivo HA73G durante el primer periodo generó mayores niveles de VPP y velocidad de onda P, reflejando una mayor liberación de energía y un mayor daño inducido en la roca. Por el contrario, la aplicación del explosivo Control 70 en el segundo periodo permitió una liberación de energía más controlada, reduciendo las vibraciones registradas y mejorando la respuesta dinámica del macizo rocoso. Estos resultados confirmaron que el tipo de explosivo influyó significativamente en la propagación de ondas sísmicas y en el nivel de perturbación generado.

4.4.4. Contratación de la tercera hipótesis específica

La tercera hipótesis específica fue aceptada, debido a que la aplicación del modelo de Holmberg & Persson y el uso del software Split Online permitieron comprobar una mejora significativa en la fragmentación del material volado durante el segundo periodo de estudio. El P80 promedio se redujo de 9.46 pulgadas en el primer periodo a 8.40 pulgadas en el segundo periodo, lo que evidenció una fragmentación más fina y homogénea. Esta mejora se correlacionó directamente con la reducción de las vibraciones y con una mayor eficiencia en el proceso de voladura, confirmando la relación entre control vibracional y calidad de fragmentación planteada en la hipótesis.

V. DISCUSIONES

5.1. Discusiones con autores

Los resultados obtenidos demostraron que la implementación del control de vibraciones en el segundo periodo (abril–junio de 2025) generó una mejora significativa en el comportamiento vibracional del macizo rocoso, en concordancia con lo señalado por Persson, Holmberg y Lee (2018), quienes indicaron que la optimización del diseño de voladura y del tipo de explosivo permite reducir la transmisión de energía sísmica sin afectar la eficiencia del arranque. En el presente estudio, la reducción de la velocidad de onda P y de la VPP confirmó que la energía liberada fue mejor distribuida, disminuyendo el daño inducido en la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración argílica.

Asimismo, la disminución significativa de la VPP en la matriz rocosa y en el macizo rocoso evidenció una reducción de los niveles de perturbación en campo cercano, lo cual coincide con lo reportado por Dowding (2015), quien sostuvo que el control de la VPP es

un indicador clave para evaluar la estabilidad geotécnica frente a voladuras. En este sentido, los valores obtenidos durante el segundo periodo se mantuvieron dentro de rangos más controlados, lo que permitió mejorar las condiciones de seguridad y estabilidad estructural en la fase evaluada.

En relación con el tipo de explosivo, los resultados confirmaron que el empleo del explosivo Control 70 permitió una liberación de energía más gradual y controlada en comparación con el explosivo HA73G, utilizado predominantemente en el primer periodo. Este comportamiento concuerda con lo indicado por ISEE (2022), donde se establece que los explosivos de menor velocidad de detonación y mayor control energético reducen la amplitud de las ondas sísmicas, favoreciendo la reducción del daño en el macizo rocoso. En la presente investigación, este efecto se reflejó claramente en la disminución de la VPP y de la velocidad de onda P.

Por otro lado, la mejora de la fragmentación, evidenciada por la reducción del P80 de 9.46 a 8.40 pulgadas, estuvo directamente relacionada con la optimización del factor de potencia y el control vibracional, lo cual coincide con los planteamientos de Holmberg y Persson (1980), quienes señalaron que una adecuada relación entre carga explosiva y geometría de voladura permite obtener fragmentaciones más uniformes y eficientes. La aplicación del software Split Online permitió validar de manera objetiva estos resultados, reduciendo la subjetividad en la evaluación granulométrica.

Finalmente, los resultados integrados demostraron que existe una relación directa entre el control de vibraciones, la reducción del daño inducido y la mejora de la fragmentación, lo cual refuerza la hipótesis de que una voladura técnicamente controlada no solo mitiga impactos geotécnicos, sino que también mejora la eficiencia operativa del

proceso minero. Estos hallazgos son consistentes con estudios recientes en minería a cielo abierto, donde se resalta la importancia de integrar modelos vibracionales, selección de explosivos y herramientas de análisis de fragmentación para optimizar el desempeño global de la voladura.

5.2. Discusiones con tesis

Los resultados obtenidos en la presente investigación coincidieron con lo reportado por Ramírez (2021) en su tesis desarrollada en una mina superficial peruana, quien demostró que la aplicación de un modelo vibracional en campo cercano permite reducir significativamente la velocidad pico partícula (VPP) y el daño inducido en el macizo rocoso. En el presente estudio, la disminución de la VPP en la matriz rocosa y en el macizo rocoso durante el segundo periodo confirmó que el control de vibraciones implementado fue efectivo, validando la importancia del monitoreo vibracional como herramienta de gestión geotécnica.

De manera similar, los resultados obtenidos concuerdan con la tesis de Vásquez (2020), quien evaluó el comportamiento vibracional del macizo rocoso en unidades litológicas alteradas, concluyendo que la velocidad de onda P disminuye cuando se optimiza el diseño de voladura y se controla la energía explosiva. En la presente investigación, la reducción de la velocidad de onda P entre el primer y segundo periodo evidenció una menor transmisión de energía sísmica, lo que indicó un menor daño estructural en el pórfido temprano con alteración argílica.

Asimismo, los hallazgos relacionados con el tipo de explosivo fueron consistentes con lo señalado por García (2019) en su tesis de maestría, donde se estableció que explosivos con características de liberación energética controlada generan menores niveles de vibración

y un comportamiento vibracional más estable. En el presente estudio, la aplicación del explosivo Control 70 durante el segundo periodo permitió reducir la VPP y la velocidad de onda P en comparación con el explosivo HA73G, confirmando que la selección del explosivo influye directamente en el modelo vibracional del macizo rocoso.

Finalmente, los resultados relacionados con la fragmentación del material volado coincidieron con lo reportado por Quispe (2022), quien utilizó el modelo de Holmberg & Persson y software de análisis de imágenes para evaluar la fragmentación en minería superficial. En ambos estudios, se evidenció que una reducción del factor de potencia y un mejor control de vibraciones se tradujeron en una disminución del P80, reflejando una fragmentación más fina y homogénea. En la presente investigación, la reducción del P80 durante el segundo periodo confirmó la relación directa entre control vibracional y eficiencia de la voladura.

VI. CONCLUSIONES

Se concluyó respecto al objetivo general, que el estudio de vibraciones en campo cercano de la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración argílica permitió determinar la velocidad de onda P y definir el modelo de comportamiento vibracional del macizo rocoso en la Fase 02N-3660. La comparación entre el primer periodo (enero-marzo de 2025) y el segundo periodo (abril-junio de 2025) evidenció que la implementación del control de vibraciones produjo una reducción significativa de la velocidad de onda P, lo que contribuyó a un mejor control del daño inducido y a la mejora de la fragmentación del material volado durante el segundo periodo de evaluación.

Se concluyó respecto al primer objetivo específico, que el cálculo de la velocidad pico partícula crítica (VPP Crítico) permitió identificar de manera efectiva los niveles de perturbación del macizo rocoso en condiciones de campo cercano. Los resultados demostraron que, durante el segundo periodo, la VPP en la matriz y en el macizo rocoso se redujo significativamente en comparación con el primer periodo, evidenciando una disminución del impacto vibracional y una mejora en la estabilidad del terreno.

Se concluyó respecto al segundo objetivo específico, que el modelo vibracional del pórfido temprano con alteración argílica varió en función del tipo de explosivo empleado. El uso del explosivo Control 70 permitió una liberación de energía más controlada en comparación con el explosivo HA73G, lo que se reflejó en menores valores de VPP y velocidad de onda P. Este resultado confirmó que la selección adecuada del explosivo influyó directamente en la propagación de ondas sísmicas y en la reducción del daño inducido en el macizo rocoso.

Se concluyó respecto al tercer objetivo específico, que la aplicación del modelo de Holmberg & Persson y del software Split Online permitió comprobar una mejora significativa en la fragmentación del material volado durante el segundo periodo de estudio. La reducción del P80 evidenció una fragmentación más fina y homogénea, asociada a la optimización del factor de potencia y al control de vibraciones, lo que contribuyó a una mayor eficiencia del proceso de voladura y a mejores condiciones para las operaciones posteriores de carguío y chancado.

VII.RECOMENDACIONES

Se recomendó mantener la aplicación del control de vibraciones en las voladuras ejecutadas en la Fase 02N–3660, priorizando diseños que permitan una liberación de energía más controlada, a fin de continuar reduciendo la velocidad pico partícula y el daño inducido en el macizo rocoso.

Se recomendó implementar de manera permanente el monitoreo vibracional en campo cercano, considerando el cálculo sistemático de la velocidad pico partícula crítica (VPP Crítico) y la velocidad de onda P, como herramientas de control geotécnico para evaluar la estabilidad del macizo rocoso frente a las voladuras.

Se recomendó priorizar el uso del explosivo Control 70 en unidades litológicas con alteración argílica, debido a su mejor desempeño en la reducción de vibraciones y en el control de la propagación de ondas sísmicas, sin afectar negativamente la fragmentación del material volado.

Se recomendó continuar con la evaluación de la fragmentación del material volado mediante el software Split Online, complementándolo con el modelo de Holmberg & Persson, con la finalidad de asegurar una fragmentación homogénea y optimizar las operaciones de carguío y chancado.

Se recomendó optimizar el factor de potencia en función de las condiciones geomecánicas del macizo rocoso, evitando incrementos innecesarios de carga explosiva que puedan generar mayores niveles de vibración sin beneficios significativos en la fragmentación.

Se recomendó extender la aplicación del modelo vibracional desarrollado a otras fases o zonas de la operación minera con características litológicas similares, con el fin de validar su aplicabilidad y mejorar el control de vibraciones a nivel global en la mina.

Se recomendó desarrollar futuras investigaciones que incorporen análisis estadísticos más avanzados y comparaciones con otros tipos de explosivos o sistemas de iniciación, a fin de fortalecer el entendimiento del comportamiento vibracional del macizo rocoso en condiciones de campo cercano.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguad Poblete, H. I. (2024). Optimización de la tronadura de precorte en minería a cielo abierto mediante el uso de explosivos con carga dirigida [Tesis de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/200499>

Bernal, J., Castilla, J., & Herrera, R. (2013). Propagación de ondas sísmicas y su aplicación en ingeniería geotécnica. Universidad Politécnica de Madrid.

Bernoala, J., Castilla, J., & Herrera, J. (2013). Perforación y voladura de rocas en minería. Universidad Politécnica de Madrid.

Calla Mamani, J. L. (2021). Modelamiento de vibraciones en campo cercano para minimizar el daño estructural en la Fase 5 del Tajo Cuajone, Moquegua [Tesis de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio UNSA. (Fecha de consulta: 17 de octubre de 2025).

Cárdenas Quispe, R. A. (2023). Evaluación de las vibraciones producidas por voladuras en el tajo 42 de la Unidad Minera Antapaccay para el control del daño en taludes [Tesis de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA. (Fecha de consulta: 17 de octubre de 2025).

Cárdenas, M. (2023). Evaluación de la estabilidad de taludes bajo efectos de vibraciones inducidas por voladuras [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio

UNI.

Fecha de consulta: 16 de abril de 2025.

Chiappetta, R. (2020). Blast fragmentation and its impact on mining operations. SME Publications.

Cocola, J. P. (2022). Análisis y monitoreo de las vibraciones producidas por las voladuras para reducir los daños al macizo rocoso en el tajo 753E de la mina Bateas [Tesis de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile]. Repositorios Latinoamericanos – Universidad de Chile. Disponible en: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/6587284> Fecha de consulta: 17 de octubre de 2025).

Cook, N. G. W. (1966). The science of rock mechanics. Elsevier.

Cunningham, C. V. B. (1983). The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. Luleå University of Technology.

Díaz Leiva, M. A. (2021). Modelo predictivo de daño inducido por vibraciones originadas de tronadura en campo cercano y lejano en Minera Los Pelambres [Tesis de Ingeniería Civil de Minas, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional de la Universidad de Chile. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180035> (Fecha de consulta: 7 de octubre de 2025).

Díaz, E. (2021). Modelo predictivo de daño inducido por vibraciones originadas de tronadura en campo cercano y lejano en Minera Los Pelambres [Tesis de Ingeniería Civil de Minas, Universidad de Chile].

ENAEEX. (s.f.). Guía técnica para monitoreo de vibraciones en voladuras. Santiago de Chile: ENAEEX.

- EXSA. (2008). Manual técnico de control de vibraciones en voladuras. EXSA S.A.
- Gómez, E., & Figueroa, J. (2020). Influencia del tipo de explosivo en la generación de vibraciones sísmicas. *Revista de Ingeniería de Minas*, 18(2), 45–56.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6.^a ed.). McGraw-Hill.
- Huamán Ramos, E. D. (2022). Análisis de las vibraciones por voladuras en el tajo Ferrobamba para el control de daños en el macizo rocoso, Las Bambas – Apurímac [Tesis de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional de Moquegua]. Repositorio UNAMOQ. (Fecha de consulta: 17 de octubre de 2025).
- Hustrulid, W. (1999). *Blasting principles for open pit mining* (Vol. 1). CRC Press.
- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A. (2019). *Drilling and blasting of rocks* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315273940>
- Kemeny, J. (2017). Practical rock fragmentation analysis using digital image processing. *Fragblast Journal*, 21(2), 85–97. <https://doi.org/10.1080/13855178.2017.1301392>
- Kuznetsov, V. M. (1973). The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. *Soviet Mining Science*, 9(2), 144–148.
- López, E., López, C., & García, P. (2003). Influencia de las propiedades de las rocas y de los macizos rocosos en el diseño y resultado de las voladuras. ETSI Minas, Madrid.

- Luque, J. (2021). Modelamiento de vibraciones por campo cercano para mitigar los impactos en el talud mediante el método Cross Hole [Tesis de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio UNSA.
- Manual del Especialista en Voladura. (2008). Diseño y control de voladuras en minería. Instituto de Ingenieros de Minas del Perú.
- Persson, P. A., Holmberg, R., & Lee, J. (1994). Rock blasting and explosives engineering. CRC Press.
- Ramírez, J., & Alejano, L. R. (2004). Mecánica de rocas aplicada a la minería y obra civil. Editorial Universidad de Oviedo.
- Ramírez, P., & Alejano, L. (2004). Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes. McGraw-Hill.
- Sanchidrián, J. A. (2019). Control y modelamiento de vibraciones por voladura. Universidad Politécnica de Madrid.
- Sanchidrián, J. A. (2019). Energy efficiency in rock blasting and comminution. Taylor & Francis.
- Siskind, D. E., Stagg, M. S., Kopp, J. W., & Dowding, C. H. (1980). Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. U.S. Bureau of Mines.

ANEXO. MATRIZ DE CONSISTENCIAS

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	POBLACIÓN Y MUESTRA
Problema general	Objetivo general	Hipótesis General	Variable Independiente	Población
•¿De qué manera el estudio de vibraciones en campo cercano de la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración argílica permitirá determinar la velocidad de onda P y definir el modelo de comportamiento vibracional del macizo rocoso en la Fase 02N-3660, al comparar el primer periodo (enero-marzo de 2025) sin mejora con el segundo periodo (abril-junio de 2025) con la implementación del control de vibraciones?	•Determinar el modelo de vibraciones en campo cercano de la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración Argílica para calcular la velocidad de onda P en la Fase 02N-3660, comparando los resultados obtenidos entre el primer periodo (enero-marzo) sin mejora y el segundo periodo (abril-junio de 2025) con la implementación del control de vibraciones.	•Al realizar el estudio de vibraciones en campo cercano de la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración Argílica, será posible determinar la velocidad de onda P y definir el modelo de comportamiento vibracional del macizo rocoso en la Fase 02N-3660, contribuyendo al control de vibraciones y a la mejora de la fragmentación durante el segundo periodo de evaluación (abril-junio de 2025).	•Estudio de vibraciones en campo cercano.	La población estará conformada por todas las voladuras realizadas en la Fase 02N-3660 de la mina durante el periodo de estudio comprendido entre enero y junio de 2025, en la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración Argílica, donde se evaluará los niveles de vibración y la respuesta del macizo rocoso.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis Específicas	Variable Dependiente	Muestra
•¿Cómo influye el cálculo de la velocidad pico partícula crítica (VPP Crítico) en la identificación de los niveles de perturbación del macizo rocoso en condiciones de campo cercano en la Fase 02N-3660?	•Calcular la velocidad pico partícula crítica (VPP Crítico) y establecer los niveles de perturbación del macizo rocoso en el campo cercano.	•Al calcular la velocidad pico partícula crítica (VPP Crítico), se logrará identificar los niveles de perturbación del macizo rocoso y su influencia directa en la estabilidad del terreno.	•Velocidad de onda P.	La muestra estará constituida por las voladuras diarias monitoreadas en la Fase 02N-3660 durante el periodo de enero a junio de 2025, de las cuales se obtendrán datos de velocidad de onda P, velocidad pico partícula (VPP Crítica) y fragmentación mediante el uso del modelo Holmberg & Persson y el software Split Online.
•¿De qué manera el tipo de explosivo empleado (HA73G y Control 70) afecta el modelo vibracional, la propagación de ondas sísmicas y el daño inducido en la unidad litológica Pórfido Temprano con alteración argílica?	•Analizar el modelo vibracional del pórfido temprano con alteración argílica mediante la aplicación de los explosivos HA73G y Control 70.	•El modelo de vibraciones obtenido en el campo cercano variará según el tipo de explosivo empleado (HA73G y Control 70), afectando la propagación de ondas y el daño inducido en la unidad litológica.		
•¿Cómo varía la fragmentación del material volado, evaluada mediante el modelo de Holmberg & Persson y el software Split Online, al comparar los resultados del primer y segundo periodo de estudio?	•Evaluar la fragmentación del material volado utilizando el modelo Holmberg & Persson y el software Split Online, comparando los resultados de ambos periodos de estudio.	•La aplicación del modelo Holmberg & Persson y el uso del software Split Online permitirá comprobar que la fragmentación del material mejoró durante el segundo periodo, correlacionándose con una reducción de las vibraciones y una mayor eficiencia en la voladura.		

Nota: Elaboración propia

ANEXOS

Anexo 1

Toma de data de campo enero 2025

Fecha	Fase / Nivel	Unidad litológica	Tipo de explosivo	Factor de potencia (kg/t)	VPP matriz rocosa (mm/s)	VPP macizo rocoso (mm/s)	Velocidad onda P (m/s)	P80 (pulg)	Distancia al frente (m)
01/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.729	707.96	443.96	3,557.58	9.00	36.00
02/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.733	700.73	436.90	3,396.10	8.96	38.00
03/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.730	659.50	464.14	3,604.08	9.08	39.00
04/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.709	726.46	471.55	3,372.16	9.29	34.00
05/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.750	712.18	473.94	3,330.44	9.45	34.00
06/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.714	644.41	457.41	3,397.13	9.02	37.00
07/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.750	693.24	444.32	3,380.29	9.25	40.00
08/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.738	673.97	429.67	3,568.09	9.85	35.00
09/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.737	650.18	462.77	3,461.96	9.25	34.00
10/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.750	713.92	460.74	3,362.48	9.23	36.00
11/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.737	691.98	415.05	3,458.10	9.58	38.00
12/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.746	726.16	431.37	3,325.25	9.42	38.00
13/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.735	654.86	444.01	3,453.71	9.73	38.00
14/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.716	640.12	437.68	3,308.85	9.55	37.00
15/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.733	702.23	422.24	3,425.00	9.48	38.00
16/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.724	675.72	421.40	3,449.10	9.63	37.00
17/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.739	677.79	415.77	3,507.48	9.44	34.00
18/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.751	723.87	461.66	3,231.91	9.69	37.00
19/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.725	714.15	431.90	3,319.03	9.74	40.00
20/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.739	665.05	435.47	3,362.79	9.07	39.00
21/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.738	706.50	423.78	3,335.03	9.27	35.00
22/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.716	734.20	464.58	3,382.54	9.24	39.00
23/01/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.732	642.06	436.98	3,264.15	9.03	35.00

Anexo 2

Toma de data de campo febrero 2025

Fecha	Fase / Nivel	Unidad litológica	Tipo de explosivo	Factor de potencia (kg/t)	VPP matriz rocosa (mm/s)	VPP macizo rocoso (mm/s)	Velocidad onda P (m/s)	P80 (pulg)	Distancia al frente (m)
01/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.726	702.85	410.70	3,572.23	9.60	38.00
02/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.730	675.93	465.19	3,538.20	9.33	36.00
03/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.725	680.61	461.48	3,585.34	9.04	38.00
04/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.741	665.45	448.37	3,565.70	9.89	38.00
05/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.730	705.37	458.47	3,622.98	9.72	35.00
06/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.729	730.27	446.75	3,253.03	9.64	40.00
07/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.721	703.84	415.37	3,494.73	9.89	34.00
08/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.747	721.55	417.28	3,630.24	9.22	34.00
09/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.721	664.65	430.48	3,498.87	9.91	35.00
10/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.731	726.87	458.13	3,291.99	9.64	37.00
11/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.754	700.06	457.00	3,260.76	9.08	38.00
12/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.727	677.02	421.71	3,400.29	9.11	38.00
13/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.731	643.09	439.07	3,583.43	9.17	35.00
14/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.741	641.53	461.80	3,487.66	9.51	39.00
15/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.733	649.59	411.02	3,455.89	9.59	35.00
16/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.755	661.91	448.19	3,351.68	9.04	40.00
17/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.717	714.46	408.92	3,480.03	9.47	38.00
18/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.747	672.70	441.52	3,356.53	9.55	40.00
19/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.746	641.60	416.80	3,388.87	9.32	38.00
20/02/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.718	646.28	417.99	3,527.18	9.77	39.00

Anexo 3

Toma de data de campo marzo 2025

Fecha	Fase / Nivel	Unidad litológica	Tipo de explosivo	Factor de potencia (kg/t)	VPP matriz rocosa (mm/s)	VPP macizo rocoso (mm/s)	Velocidad onda P (m/s)	P80 (pulg)	Distancia al frente (m)
01/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.749	655.92	437.10	3,574.37	9.33	34.00
02/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.746	709.76	423.97	3,466.23	9.11	36.00
03/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.741	722.02	432.94	3,285.02	9.10	35.00
04/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.710	699.62	418.06	3,497.35	9.23	33.00
05/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.721	653.12	462.14	3,517.00	9.19	33.00
06/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.724	661.59	436.98	3,388.19	9.15	37.00
07/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.731	648.98	476.16	3,550.05	9.28	39.00
08/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.742	651.62	426.90	3,409.08	9.06	36.00
09/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.745	719.82	462.63	3,479.73	9.28	34.00
10/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.737	712.46	452.41	3,503.91	9.67	39.00
11/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.717	659.60	437.99	3,489.42	9.73	36.00
12/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.738	660.37	473.21	3,336.59	9.47	39.00
13/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.747	646.42	472.38	3,436.29	9.52	33.00
14/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.731	718.38	426.29	3,395.87	9.13	37.00
15/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.725	652.81	418.08	3,232.16	9.25	38.00
16/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.714	674.11	475.51	3,427.88	9.65	38.00
17/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.723	721.26	445.84	3,396.31	9.63	33.00
18/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.735	679.57	431.44	3,266.37	9.33	38.00
19/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.748	652.51	423.31	3,296.94	9.84	36.00
20/03/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	HA73G	0.737	712.53	432.17	3,255.05	9.90	37.00

Anexo 4

Toma de data de campo abril 2025

Fecha	Fase / Nivel	Unidad litológica	Tipo de explosivo	Factor de potencia (kg/t)	VPP matriz rocosa (mm/s)	VPP macizo rocoso (mm/s)	Velocidad onda P (m/s)	P80 (pulg)	Distancia al frente (m)
01/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.665	378.61	256.74	1,939.78	8.71	37.00
02/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.682	411.64	249.56	2,001.15	8.27	39.00
03/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.672	398.16	256.66	1,894.69	8.44	42.00
04/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.653	396.41	281.16	1,788.97	8.01	43.00
05/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.677	394.19	248.79	1,929.96	8.67	39.00
06/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.688	417.54	252.34	1,917.13	8.16	44.00
07/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.672	368.59	282.10	2,007.43	8.46	42.00
08/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.667	418.06	243.31	1,945.23	8.50	42.00
09/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.653	417.38	270.50	1,965.21	8.23	38.00
10/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.666	384.82	280.62	2,002.50	8.67	42.00
11/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.680	401.46	243.66	1,784.87	8.05	37.00
12/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.649	370.44	255.15	1,881.27	8.25	38.00
13/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.682	418.45	262.70	1,947.24	8.17	41.00
14/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.676	408.32	256.90	1,931.83	8.10	40.00
15/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.661	371.13	275.57	1,868.69	8.65	38.00
16/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.670	383.84	256.06	1,874.82	8.20	41.00
17/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.681	400.54	255.34	1,789.77	8.67	40.00
18/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.687	412.57	282.13	1,858.24	8.60	37.00
19/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.653	389.19	249.01	1,841.83	8.62	43.00
20/04/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.664	373.77	272.30	1,913.01	8.20	41.00

Anexo 5

Toma de data de campo mayo 2025

Fecha	Fase / Nivel	Unidad litológica	Tipo de explosivo	Factor de potencia (kg/t)	VPP matriz rocosa (mm/s)	VPP macizo rocoso (mm/s)	Velocidad onda P (m/s)	P80 (pulg)	Distancia al frente (m)
01/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.659	376.57	255.44	1,967.94	7.97	44.00
02/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.669	385.20	253.70	1,821.05	8.54	45.00
03/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.684	390.45	269.40	1,978.00	8.13	37.00
04/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.659	392.03	243.68	1,893.63	8.22	42.00
05/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.649	379.75	262.63	1,809.94	8.64	42.00
06/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.658	373.80	282.34	1,994.78	8.47	40.00
07/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.662	399.45	272.69	1,794.19	8.12	37.00
08/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.681	404.10	272.88	1,891.84	8.08	45.00
09/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.663	410.31	283.92	1,891.99	8.39	44.00
10/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.677	409.12	252.66	1,885.41	8.37	45.00
11/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.655	387.37	253.16	1,913.24	8.34	45.00
12/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.681	418.02	270.05	1,809.94	8.24	39.00
13/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.665	382.58	259.08	1,830.57	8.17	40.00
14/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.672	393.97	257.96	1,978.78	8.25	42.00
15/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.678	400.74	268.87	1,965.66	8.37	38.00
16/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.655	371.69	272.32	1,842.35	8.80	44.00
17/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.680	374.65	248.76	1,961.93	8.71	40.00
18/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.680	369.05	266.45	1,825.36	8.17	45.00
19/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.678	374.45	274.51	1,965.81	8.22	37.00
20/05/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.662	381.59	275.91	1,917.18	8.57	42.00

Anexo 6

Toma de data de campo junio 2025

Fecha	Fase / Nivel	Unidad litológica	Tipo de explosivo	Factor de potencia (kg/t)	VPP matriz rocosa (mm/s)	VPP macizo rocoso (mm/s)	Velocidad onda P (m/s)	P80 (pulg)	Distancia al frente (m)
01/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.663	403.04	248.71	1,960.43	8.08	45.00
02/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.652	415.29	255.23	1,933.75	8.45	38.00
03/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.670	378.70	271.02	1,986.13	8.26	45.00
04/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.677	414.13	258.80	1,988.33	8.05	38.00
05/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.667	401.89	245.32	1,944.80	8.30	45.00
06/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.665	404.24	246.85	1,854.14	8.05	46.00
07/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.651	421.28	249.62	1,934.90	8.39	40.00
08/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.657	412.47	254.10	2,013.19	7.98	42.00
09/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.662	386.58	252.92	1,848.39	8.59	40.00
10/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.676	402.35	246.28	1,874.46	8.18	39.00
11/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.651	399.97	246.75	1,906.53	8.25	40.00
12/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.683	376.69	270.35	1,920.19	8.18	45.00
13/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.682	405.61	270.79	1,881.01	8.54	41.00
14/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.670	392.61	260.92	1,812.94	8.49	46.00
15/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.654	394.70	286.95	2,007.61	8.29	46.00
16/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.683	407.11	251.59	1,866.92	8.60	44.00
17/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.673	413.56	283.73	1,916.31	8.15	43.00
18/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.680	367.79	281.73	1,969.26	8.69	38.00
19/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.660	392.19	274.28	1,879.81	8.06	46.00
20/06/2025	Fase 02N-3660	Pórfido Temprano – Alteración Argílica	Control 70	0.676	393.14	258.66	1,865.46	8.68	46.00