

ARTÍCULOS

Velocidad de detonación del explosivo, vibración y ruido en pequeña minería subterránea, Zaruma – Ecuador

Explosive detonation speed, vibration and noise in small underground mining, Zaruma – Ecuador



Zúñiga-Arrobo, Cristian Andrés; Rojas-Villacís, Cynthia Analí; Rosero-Padilla, Cecilia Dayana; Fernández-Suárez, Luis Guillermo; Idrovo-Palomeque, Juan Pablo

Cristian Andrés Zúñiga Arrobo



cristian.zuniga@geoenergia.gob.ec
Instituto de Investigación Geológico y Energético. Quito, Ecuador.

Cynthia Analí Rojas Villacís



cynthia.rojas@geoenergia.gob.ec
Instituto de Investigación Geológico y Energético. Quito, Ecuador.

Cecilia Dayana Rosero Padilla



cecilia.rosero@geoenergia.gob.ec
Instituto de Investigación Geológico y Energético. Quito, Ecuador.

Luis Guillermo Fernández Suárez



luis.fernandez@ambiente.gob.ec
Instituto de Investigación Geológico y Energético. Quito, Ecuador.

Juan Pablo Idrovo Palomeque



asistenciatecnica6@explocen.com.ec
Explocen C.A. Explosivos para minería. Portovelo, Ecuador.

FIGEMPA: Investigación y Desarrollo

Universidad Central del Ecuador, Ecuador

ISSN-e: 2602-8484

Periodicidad: Semestral

vol. 17, núm. 1, 2024

revista.figempa@uce.edu.ec

Recepción: 07 junio 2023

Aprobación: 26 enero 2024

DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v17i1.4634>

RESUMEN

El presente artículo analiza la relación entre la Velocidad de Detonación del Explosivo (VOD), la vibración y el ruido generados en 16 ensayos de perforación y voladura en dos galerías horizontales abovedadas ubicadas a diferentes altitudes con respecto a la ciudad de Zaruma, que se encuentra a una altitud de 1.194 m s.n.m. Se realizaron 9 ensayos en el frente de trabajo denominado "Apófisis", ubicado a una altitud de 1.155 m s.n.m y a una distancia horizontal de 1.650 m del centro de la ciudad de Zaruma. Los siguientes 7 ensayos se llevaron a cabo en el Frente "Matamoros", ubicado a una altitud de 1.116 m s.n.m y a una distancia horizontal de 1.389 m del centro de la ciudad de Zaruma. En el Frente "Apófisis", se utilizaron dos sistemas de iniciación de explosivos: el convencional, con fulminante y mecha lenta, y el ensamblado, con mecha rápida de ignición, conectores, mecha lenta y fulminantes. En el Frente "Matamoros", también se utilizaron estos dos sistemas de iniciación de explosivos. Los barrenos perforados tenían un diámetro de 38 mm y profundidades de 1,10 m y 1,50 m. Se utilizaron tanto ANFO como Nitrato de Amonio Agrícola como explosivos, colocados bajo presión de aire comprimido utilizando un cargador neumático tipo "pistola". Los datos registrados incluyen una VOD mínima de 3.950 m/s hasta una VOD máxima de 5.310 m/s, una vibración resultante mínima de 2,17 mm/s y una vibración resultante máxima de 11,5 mm/s, y niveles de ruido mínimos de 164 dB hasta un máximo de 195 dB. Estos niveles de vibración y ruido se compararon con la normativa nacional vigente en Ecuador y la normativa internacional de Estados Unidos. El análisis indica que la influencia de la explosión de las voladuras en términos de VOD, vibración y ruido se encuentra en un rango de 60 m a 80 m alrededor de la explosión, lo que no afecta a la infraestructura más cercana propia de la labor minera y no se propaga hasta llegar a la ciudad de Zaruma. Es importante destacar que los ensayos con ANFO como carga de fondo y de columna presentaron menores vibraciones, menor velocidad de detonación (VOD) y menor ruido en comparación con el uso de Emulsiones y Nitrato de Amonio Agrícola.

Palabras claves: pequeña minería; zaruma; minería subterránea; explosivos; vibración; ruido.

Financiamiento

Fuente de financiación: Proyecto de inversión del IIGE – “Estudio de implementación de una propuesta de mejora técnica en las operaciones de perforación y voladura en la minería artesanal y pequeña escala (MAPE), en el distrito minero Zaruma - Portovelo, provincia de El Oro”.

Agradecimiento

Agradecimiento al Instituto Geológico y Energético (IIGE) y a Explocen C.A. Explosivos para minería – Ecuador.

Autor de correspondencia:

cristian.zuniga@geoenergia.gob.ec



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

Cómo citar: Zúñiga-Arrobo, C. A., Rojas-Villacís, C. A., Rosero-Padilla, C. D., Fernández-Suárez, L. G. & Idrovo-Palomeque, J. P. (2024). Velocidad de detonación del explosivo, vibración y ruido en pequeña minería subterránea, Zaruma–Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 17(1), 26-42. <https://doi.org/10.29166/revfig.v17i1.4634>

ABSTRACT

The present article analyzes the relationship between Explosive Detonation Velocity (VOD), vibration, and noise generated in 16 drilling and blasting tests in two arched horizontal galleries located at different altitudes with respect to the city of Zaruma, which is situated at an altitude of 1,194 meters above sea level. Nine tests were conducted in the working face called “Apófisis,” located at an altitude of 1,155 meters above sea level and 1,650 meters horizontally from the center of Zaruma. The following seven tests were carried out in the “Matamoros” face, located at an altitude of 1,116 meters above sea level and 1,389 meters horizontally from the center of Zaruma. In the “Apófisis” face, two explosive initiation systems were used: the conventional system with detonators and slow fuse, and the assembled system with quick ignition fuse, connectors, slow fuse, and detonators. The same two explosive initiation systems were also used in the “Matamoros” face. The drilled holes had a diameter of 38 mm and depths of 1.10 m and 1.50 m, aiming to maintain the horizontal shape of the gallery and parallelism between each hole (with some cases having angles of deviation ranging from 23 to 26 degrees). Both ANFO and Agricultural Ammonium Nitrate explosives were used, placed under compressed air pressure using a “gun” type pneumatic loader. The recorded data includes a minimum VOD of 3,950 m/s, a maximum VOD of 5,310 m/s, a minimum resultant vibration of 2.17 mm/s, a maximum resultant vibration of 11.5 mm/s, and minimum noise levels of 164 dB up to a maximum of 195 dB. These vibration and noise levels were compared with the current national regulations in Ecuador and international regulations in the United States. The analysis indicates that the influence of the blast in terms of VOD, vibration, and noise is within a range of 60 m to 80 m around the explosion, which does not affect the nearest infrastructure related to mining operations (offices and camps) and does not propagate to the city of Zaruma. It is important to highlight that tests using ANFO as a bottom and column charge showed lower vibrations, lower detonation velocity (VOD), and lower noise compared to the use of emulsions and agricultural ammonium nitrate.

Keywords: small-scale mining; zaruma; underground mining; explosives; vibration; noise.

INTRODUCCIÓN

En la provincia de El Oro, en el Distrito Minero de Zaruma – Portovelo, cerca y debajo de la ciudad de Zaruma se desarrolla actividad minera subterránea de extracción mineral, en la cual se utiliza maquinaria, equipos mineros mencionados por Vásquez Carrasco & Torres León (2018), explosivos y accesorios de voladura para arrancar la roca creando galerías de conexión, niveles y subniveles a fin de aprovechar los depósitos vetiformes que contienen minerales de interés económico como oro (Au), plata (Ag) y cobre (Cu), y demás minerales polimetálicos.

La extracción de material sigue la dirección de las vetas mineralizadas, creando cavidades o galerías subterráneas y pilares de sostenimiento de roca, actividad que debe cumplir con varias consideraciones técnicas de seguridad (Zúñiga Arrobo, 2022) parte de estos espacios o galerías quedan abandonados momentáneamente por la empresa minera hasta que se generen condiciones técnicas y económicas adecuadas para continuar extrayendo mineral (Zúñiga Arrobo & Rojas Villacís, 2020). Es aquí donde personas de forma clandestina ingresan a dichas labores y utilizando la fuerza manual (Rojas Villacís & Zúñiga Arrobo, 2022), equipos eléctricos y explosivos, comienzan a romper pilares de roca, carcomer paredes y techos siguiendo las huellas del mineral oro, dirigiéndose desde niveles inferiores hacia la parte superficial.

Es por ello que se han generado socavones que han afectado los cimientos de la infraestructura civil (casas, escuelas, negocios, calles, iglesias, hospitales, entre otras) de la ciudad de Zaruma. Es por ello que desde el año 2013 se declara el casco urbano de Zaruma como zona de exclusión minera, misma que se ha ido ampliando en el transcurso del tiempo, hasta el actual Acuerdo Ministerial Nro. MERNNR-MERNNR-2022-0001-AM publicado en el Registro Oficial el 31 de enero de 2022 (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2022).

En los últimos 10 años en el Distrito Minero de Zaruma - Portovelo se ha incrementado la extracción de material rocoso que contiene minerales de interés económico como el oro y la plata, extracción realizada tanto por empresas regularizadas; quienes deben respetar los límites planteados en la **Zona de Exclusión** (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2022), además existe personal que extrae material de forma clandestina, quienes van socavando la roca sin ningún método técnico que garantice la seguridad física del personal, tampoco cuidan los avances en roca que garanticen el sostenimiento de la misma, el problema grave es que los avances que realizan llegan muy cerca de los asentamientos de viviendas, vías e infraestructura de la ciudad de Zaruma, causado asentamientos, hundimientos, y caída de infraestructura de la ciudad. Como ejemplo de una de las afectaciones se muestra el caso analizado por Burbano Morillo *et al.* (2021).

Debido a estos y otros precedentes suscitados en la ciudad de Zaruma, se genera varios inconvenientes sobre el estado de ánimo y paz en la población, quienes perciben riesgos constantes de inseguridad, sienten y escuchan constantemente a diferentes horas del día vibraciones, ruido de maquinaria y detonaciones de explosivos de voladura utilizados para extraer material de roca. Sumado a estos factores el desconocimiento de la población sobre el desarrollo técnico que demanda la actividad minera les hace pensar que tanto las empresas legalmente constituidas como las personas que realizan actividades de forma clandestina conocimos como “ilegales” ambas son causantes de las afectaciones a la población y ciudad de Zaruma.

El estudio fue realizado en una labor minera legalmente constituida que se encuentra relativamente cerca de la ciudad de Zaruma; en la cual se analizara los radios de influencia de las explosiones producto de las voladuras, comparando y relacionando la velocidad de detonación de los explosivos (VOD), la vibración y ruido en 16 ensayos de perforación y voladura subterránea; considerando criterios técnicos como los descritos por Pinto Morales y Fuentes Fuentes (2021).

Las pruebas de voladura se realizaron en dos frentes diferentes de trabajo: el primer frente “Apófisis” corresponde a una galería de sección abovedada de dimensiones 1,8 m x 2,2 m (ancho por alto), ubicado aproximadamente a unos 800 metros de la galería principal desde la bocamina, el macizo rocoso es cohesionado, de resistencia media a alta de 70 – 100 MPa, fracturado (RQD estimado 60-70%), en roca fresca y seca. El segundo frente “Matamoros” corresponde a una galería de sección abovedada de dimensiones 1,8 m x 2,2 m (ancho por alto), ubicado a 45 metros bajo el nivel de la galería principal de acceso y a unos 400 metros del denominado “Pique #5”, la roca en este sector es cohesionada, de resistencia alta de 100 - 120 MPa, poco fracturado (RQD estimado >80%), en roca fresca

De los 16 ensayos de medición de VOD realizados en la empresa minera, 8 fueron realizados por el “método continuo”, y 8 fueron realizados con el “método punto a punto”. Los barrenos ensayados tienen diámetro de 38 mm (1 ½” pulgadas), y longitud de perforación de 1,10 m y 1,50 m, perforados de forma horizontal y tratando de conservar el paralelismo entre ellos; se presentaron barrenos con desviaciones medidas de 23 al 26 grado; sin embargo, para el análisis del presente estudio no presentan un factor considerable; Sargentón Romero (2008) analiza voladuras experimentales y establece consideraciones técnicas para el diseño y cálculo de la malla de perforación en barrenos.

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LA ROCA

Para determinar la compresión uniaxial, se empleó el martillo de rebote Schmidt o esclerómetro (Ver tabla 1):

TABLA 1
 Datos del esclerómetro empleado para el cálculo de la resistencia a la compresión simple uniaxial

CARACTERÍSTICAS	DETALLE
Esclerómetro Digital Para Roca	20-150 MPa
Marca	ROCKCHMIDT
Modelo	TYPE N
Serie N°	SHO1-011-0215

Fuente: Proceq S.A. (2016)

De acuerdo a la ficha técnica del martillo Schmidt (Proceq S.A., 2016) se debe contar con un mínimo de 10 impactos o lecturas en concordancia con el método ASTM D 5873, de los cuales se calcula una media. Acorde al método ISRM se requiere 20 lecturas sin eliminación de los valores anormales o 10 lecturas consecutivas cuando la medición diverge en ± 2 (dos) unidades de dureza.

Con los datos del índice de rebote (R) obtenidos con el martillo Schmidt, el peso específico teórico de la roca tipo andesita presente en las labores mineras ensayadas ubicadas en Zaruma y utilizando las interpretaciones del ábaco de Miller; descrita por Ramírez Oyanguren y Alejano Monge (2004) que relaciona los valores del índice de rebote con respecto a la orientación del martillo sobre el plano de roca ensayada (Figura 1), da como resultado la resistencia a la compresión simple uniaxial (MPa).

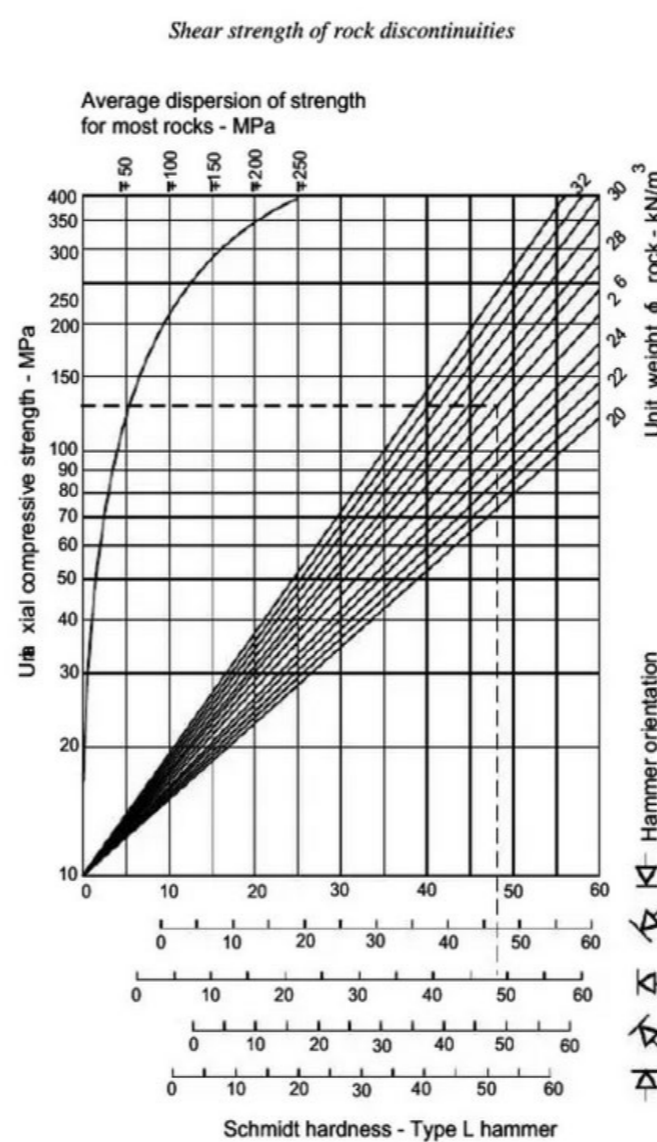


FIGURA 1
 Ábaco de Miller:
 relación peso específico, dirección e índice de rebote del martillo Schmidt y compresión simple sobre la roca.

Fuente: Ramírez Oyanguren y Alejano Monge (2004)

Luego de este cálculo, aplicando la tabla 2 (Hoek & Brown, 1997) se determinó la estimación en terreno de la resistencia en compresión uniaxial (ver tabla 3).

TABLA 2
Estimación en terreno de la resistencia en compresión uniaxial

CLASE	CLASIFICACIÓN DE LA ROCA SEGÚN SU RESISTENCIA	RESISTENCIA UNIAXIAL (MPa)	ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL (MPa)	ESTIMACIÓN EN TERRENO DE LA RESISTENCIA
R5	Muy resistente	100 - 250	4 - 10	Un trozo de roca requiere varios golpes de martillo geológico para fracturarse
R4	Resistente	50 - 100	2 - 4	Un trozo de roca requiere más de un golpe con el martillo geológico para fracturarse.

Fuente: Hoek & Brown (1997)

Carga explosiva utilizada

TABLA 3
Carga explosiva utilizada en los ensayos de perforación y voladura

CEBO INICIADOR	CARGA DE FONDO Y/O CARGA DE COLUMNA	ACCESORIOS DE VOLADURA	
Emulsiones: 5000 X 1 1/8" x 6" y 5000 X 1 1/8" x 7" (pulgadas).	- ANFO normal. - Nitrato de Amonio Agrícola. Cargador neumático tipo "pistola", para ingresarlos a presión, aumentando su concentración de carga (Ortega Ramos, Jaramillo Gil & Molina Escobar, 2016) .	Estopines conformados entre 1,6 y 1,8 metros de mecha lenta, unida de un extremo a un fulminante # 8 y en el otro extremo a un conector de mecha rápida.	Mecha rápida para conexión entre barrenos y secuenciar los disparos.

METODOLOGÍA

Linares Carrasco (2013) describe tres métodos "punto a punto" con tres equipos de medición, e indica "métodos de medición continua" con cinco equipos de medición.

Para la medición de VOD se realizó: Medición Continua y Medición Punto a Punto.

Los equipos utilizados en este estudio para la medición de VOD fueron considerados los disponibles y calibrados.

Medición Continua

Medición continua a lo largo de una columna explosiva, permite evaluar las consideraciones técnicas tales como efecto del cebo, los efectos de los materiales contaminantes y la propagación de detonación. Considerar el equipo para esta medición (ver tabla 4).

TABLA 4
Equipo de medición de VOD de forma continua.

CARACTERÍSTICAS	DETALLE
Marca	MREL
Modelo	MICRO TRAP
Serie	7145
Accesorios	Probecable Green (10,2 ohm/m). Cable coaxial.

Fuente: MREL Group of Companies Limited (2023)

- Ratio de grabación de 1 MHz a 2 MHz, con un tiempo de registro de 2 a 4 segundos, es incapaz de grabar a intensidades menores a 50 mA.

El procedimiento de ensayo es:

- Tomar el cable de medición "Probecable" que tiene resistencia específica (10.2 ohm/metro), colocar en circuito y aislar en uno de sus extremos, en ese mismo lado se prepara un "Cebo falso" (solo cable) de aproximadamente 5 m. para asegurar que la medición no sobrepase el umbral de medición del equipo (50 mA). Este cable se introduce al fondo dentro del barreno a medir.
- Cargar el barreno de acuerdo al Patrón de carga: Cebo, Carga de Fondo y Carga de Columna establecido en el diseño o plan de voladura.
- Asegurar que la longitud del "Probecable" usado para la medición al menos un par de metros más larga que la longitud del barreno a medir.
- El extremo del "Probecable" que queda fuera es empatado con un cable coaxial que se extiende y se conecta hasta el equipo de medición, el cual se ubica a una distancia que se considera segura para realizar la medición.
- Encender el equipo de medición, se revisa niveles de batería, disponibilidad de memoria y se activa el equipo para medición.
- Una vez se produce la detonación, el equipo registra la variación de la resistividad del conjunto cable coaxial - "Probecable" en función del tiempo, obteniéndose un perfil de VOD a lo largo de la columna registrada.

Medición Punto a Punto

Medición discontinua basada en el empleo un material (fibra óptica, cable eléctrico u otro material conductor) que sirve como sensor y es colocado dentro del cartucho explosivo o columna explosiva, este método tiene capacidad de medir VOD con una exactitud mínima de 100 m/s. Considerar el equipo para esta medición (ver tabla 5).

TABLA 5
Equipo de medición de VOD punto a punto

CARACTERÍSTICAS	DETALLE
Marca	Uttam Blastech
Modelo	V.O.D Meter
Accesorios	Cable de fibra óptica.

Fuente: Uttam Blastech Private Limited (2023)

- Los cables de fibra óptica van dentro del cartucho explosivo en el cual se realizará la medida, colocados con una separación de 10 cm (100 mm) entre sí.
- Se obtiene el tiempo de detonación y la longitud detonada (100 mm) que por relación o ecuación física se puede calcular la VOD.

El procedimiento de ensayo:

- Tomar los dos extremos del cable de fibra óptica y pelarlos hasta dejar descubierto su núcleo en una longitud aproximada de 1" (pulgada).
- En el cartucho objeto de medición se realiza dos incisiones con separación de 100 mm. y se introduce los extremos del cable de fibra óptica pelados.
- Colocar el cronógrafo a una distancia segura del sitio de detonación y se conectan los otros extremos de la fibra al Cronógrafo.
- Encender y programar el Cronógrafo introduciendo los datos del ensayo (fecha, distancia entre cable, número de fibras conectadas).
- Iniciar el cronógrafo hasta que quede listo para la medición.
- Alejarse del sitio de detonación, detonar el explosivo objeto de medición.

Medición de VOD

Independientemente del patrón de carga, la distribución de la carga en el barreno se detalla en la figura 2:

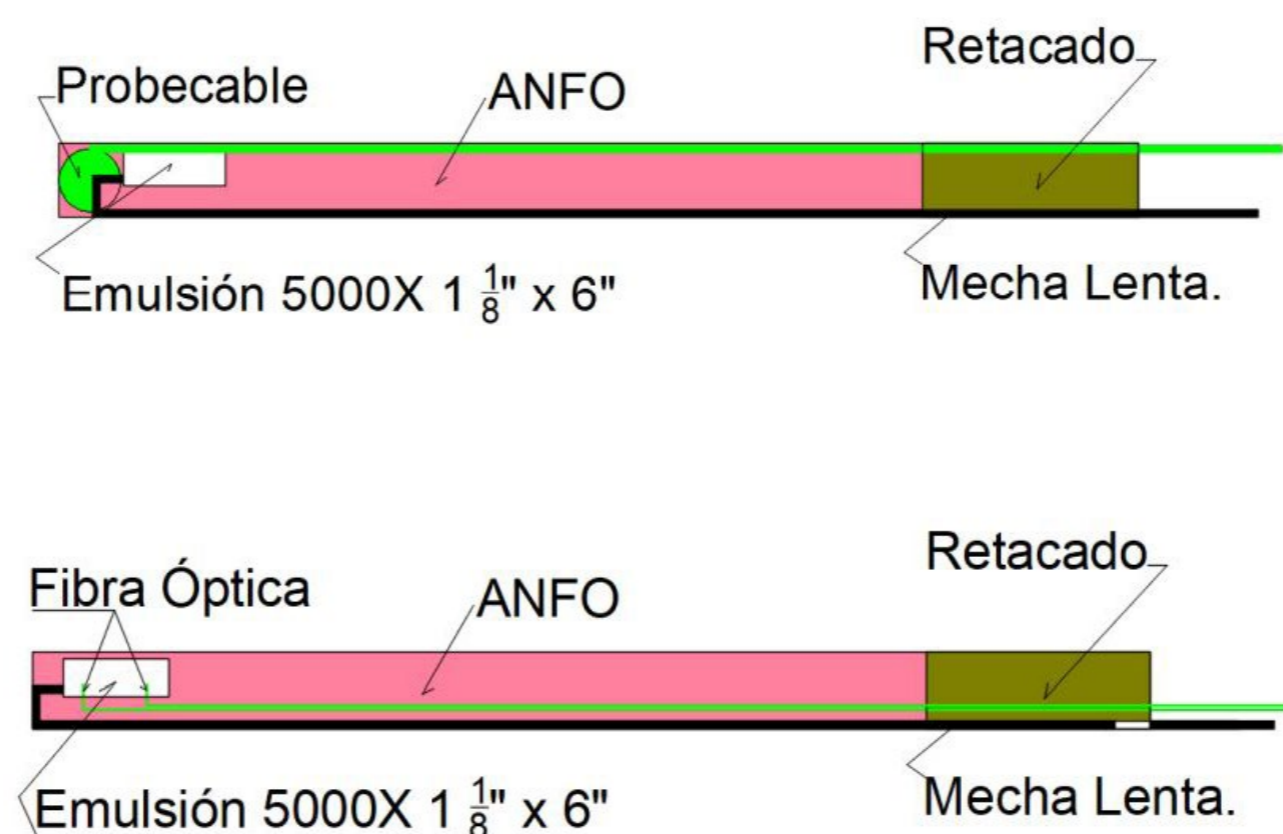


FIGURA 2

Distribución de la carga en el barreno

(superior) Esquema de ubicación de cargas para ensayo, método continuo
(inferior) Ensayo por el método punto a punto y carga de barreno.

Metodología del monitoreo de vibración y ruido

Pérez Cosío (2019) describe la influencia de las vibraciones del explosivo considerando el tipo de explosivo y las características geológicas, propiedades, medición, predicción de vibraciones, daños a roca y a estructuras. La magnitud de vibración es definida en función de:

- **Desplazamiento de partícula.** Distancia a la que se mueve la partícula antes de retornar a su posición original, medida en milímetros (mm).
- **Velocidad de partícula.** Valoración a la cual cambia el desplazamiento de la partícula, medida en milímetros por segundo (mm/s)
- **Aceleración de la partícula.** Valoración de cambio de la velocidad de partícula, medido en milímetros por segundo al cuadrado (mm/s^2) o en términos de la aceleración debida a la gravedad de la tierra (g).
- **Frecuencia.** Número de oscilaciones por segundo al cual una partícula está sometida, medido en Hertz (Hz).

Vibraciones

Movimiento percibido en superficie debido a las ondas elásticas emanadas por un evento (en este caso voladura), su unidad de medida es en pulgadas por segundo de la velocidad de la partícula. La velocidad de la partícula es la medida de la velocidad del movimiento de las partículas de la tierra mientras ésta se mueve por efecto de la energía de onda.

En todas las normas el parámetro preferido de medición es la velocidad de partícula pico (PPV). La medición de las consideraciones técnicas de partícula al paso de ondas normalmente se realiza en tres direcciones mutuamente perpendiculares, y las partículas oscilaran en estas tres dimensiones:

- **Longitudinal.** También llamada radial, las partículas se mueven hacia adelante y atrás en la misma dirección que viaja la onda vibratoria.
- **Vertical.** Movimiento hacia arriba y abajo perpendicular a la dirección en que la onda está viajando.
- **Transversal.** Movimiento de la partícula a la derecha e izquierda y perpendicular a la dirección en que la onda está viajando.

Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert (2013) y el Instituto Geológico y Minero de España (1987), (s.f.) mencionan algunas definiciones y consideraciones técnicas para la medición de vibraciones, equipos de medición e interpretación.

Comparación de vibración y ruido con normas técnicas

Los equipos utilizados se encuentran calibrados para el cumplimiento de las normas (ver tablas 6 y 7): a) EEUU – OSM 817.67 y b) EEUU - USBM R18507, información utilizada y analizada por Benjumea Cadavid (2003); Ruiz Valencia, Otálora Sánchez y Rodríguez Ordóñez (2007), entre otros autores.

TABLA 6
Criterio de evaluación de la medición de vibración

RANGO DE CRITERIOS RESIDENCIALES COMUNES Y SUS EFECTOS	
0.5 pulgadas por segundo (12.7 mm/s)	Pautas recomendadas por el Buró de Minería para evitar alcanzar el umbral de daños en construcciones con acabados de yeso, cerca de minas de superficie (operaciones de voladura a gran escala, de largo plazo) (RI 8507).
0.75 pulgadas por segundo (19.1 mm/s)	Pautas recomendadas por el Buró de Minería para evitar alcanzar el umbral de daños en construcciones a base de tabiques cerca de minas de superficie (RI 8507).
1.0 pulgadas por segundo (25.4 mm/s)	Límites regulatorios de la OSM para viviendas cercanas a operaciones de minería de superficie a distancias de 91-152 metros (operaciones de voladura a gran escala, de largo plazo).
2.0 pulgadas por segundo (50.8 mm/s)	Límite ampliamente aceptado para viviendas cerca a voladuras de construcción y cantera (Boletín del Buró de Minería 656, RI 8507, códigos, especificaciones y reglamentos varios). La OSM también lo permite para frecuencias por arriba de los 30 Hz.
5.4 pulgadas por segundo (137 mm/s)	Daños menores a una vivienda promedio sujeta a las vibraciones de las voladuras de una cantera (Boletín del Buró de Minería 656).
9 pulgadas por segundo (229 mm/s)	Aproximadamente 90% de probabilidades de daños menores provenientes de voladuras de construcción o de cantera. Daños estructurales en algunas casas. Depende de la fuente de vibración, el carácter de las vibraciones y la vivienda.
20 pulgadas por segundo (508 mm/s)	Para voladuras de construcción cercana, daños menores en casi todas las casas, y estructurales en algunas. Para las vibraciones de baja frecuencia, los daños estructurales se dan en la mayoría de las viviendas.

Nota: Los criterios arriba descritos se aplican sólo a viviendas, mas no a otras instalaciones o materiales.

TABLA 7
Criterio de evaluación de la medición de sobrepresión

CRITERIOS TÍPICOS PARA LA SOBREPRESIÓN	
3.0 psi (180 dB)	Posibilidad de ciertos daños estructurales
1.0 psi (171dB)	Rotura general de ventanas
0.1 psi (151 dB)	Rotura ocasional de ventanas
0.029 psi (140 dB)	Amplia experiencia en la aplicación de este criterio como una especificación segura para proyectos
0.0145 psi (134 dB)	Recomendaciones del Buró de Minería para las operaciones de voladura de minería superficial de gran escala.

En la legislación Ecuatoriana el Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica (2017), Libro VI Anexo 5, presenta la Tabla 8.

TABLA 8
Límites de presión sonora permisibles en Ecuador acorde a horarios y tipo de zona según el uso de suelo.

Tipo de zona según uso de suelo	Límites de presión sonora equivalente NPS eq dB(A)	
	De 06h00 a 20h00	De 20h00 a 06h00
Zona hospitalaria y educativa	55	45
Zona residencial	60	50
Zona residencial mixta	65	55
Zona comercial	65	55
Zona comercial mixta	70	60
Zona industrial	75	65
Zona de preservación de hábitat	60	50

Instrumento para monitoreo de vibración y ruido

El equipo utilizado es el sismógrafo detallado en la tabla 9:

TABLA 9
Sismógrafo para monitoreo de vibración y ruido

CARACTERÍSTICAS	DETALLE
Marca	INSTANTEL
Modelo	BLASTMATE III
Serie	BA9240 V
Accesorios	Geófono y Micrófono con cable de conexión

Fuente: InstanTEL (2023)

Para realizar los monitoreos en cada frente se seleccionaron dos sitios específicos para la instalación del equipo de medición (uno por frente), que se detalla en ubicación a distancia estimada (ver tabla 10).

Para realizar los monitoreos en cada frente se seleccionaron dos sitios específicos para la instalación del equipo de medición (uno por frente), que se detalla en ubicación a distancia estimada (ver tabla 10).

TABLA 10
Distancia y sitio de ubicación del sismógrafo

FRENTE DE TRABAJO	DISTANCIA APROXIMADA (m)	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA UBICACIÓN DEL EQUIPO
Apófisis	80	Intersección entre la galería de acceso principal y la galería de Exploración "Apófisis"
Matamoros	60	Intersección entre la galería de acceso principal y la Galería de Exploración "Matamoros"

Sistema de Iniciación de Explosivos

Se utilizó el sistema de iniciación de explosivos descritos en el "Manual práctico de voladura - Edición especial" de EXSA S.A. (Firma Peruana de Explosivos, 2020); se aplicó el sistema **Mecha y Fulminante**: Fulminante simple y mecha lenta de pólvora (llamada mecha de seguridad) Cap and fuse:

a) CONVENCIONAL: Con fulminante y mecha.

b) ENSAMBLADO: Con mecha rápida de ignición (Igniter cord), más conectores, mecha lenta y fulminante.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Resultados del VOD

En "monitoreo continuo", los datos obtenidos por el equipo son cargados y graficados en el software Microtrap, el cual presenta una gráfica de longitud en función del tiempo, en donde la pendiente de la curva viene a ser la VOD (Velocidad de Detonación), tal como se muestra en la figura 3:

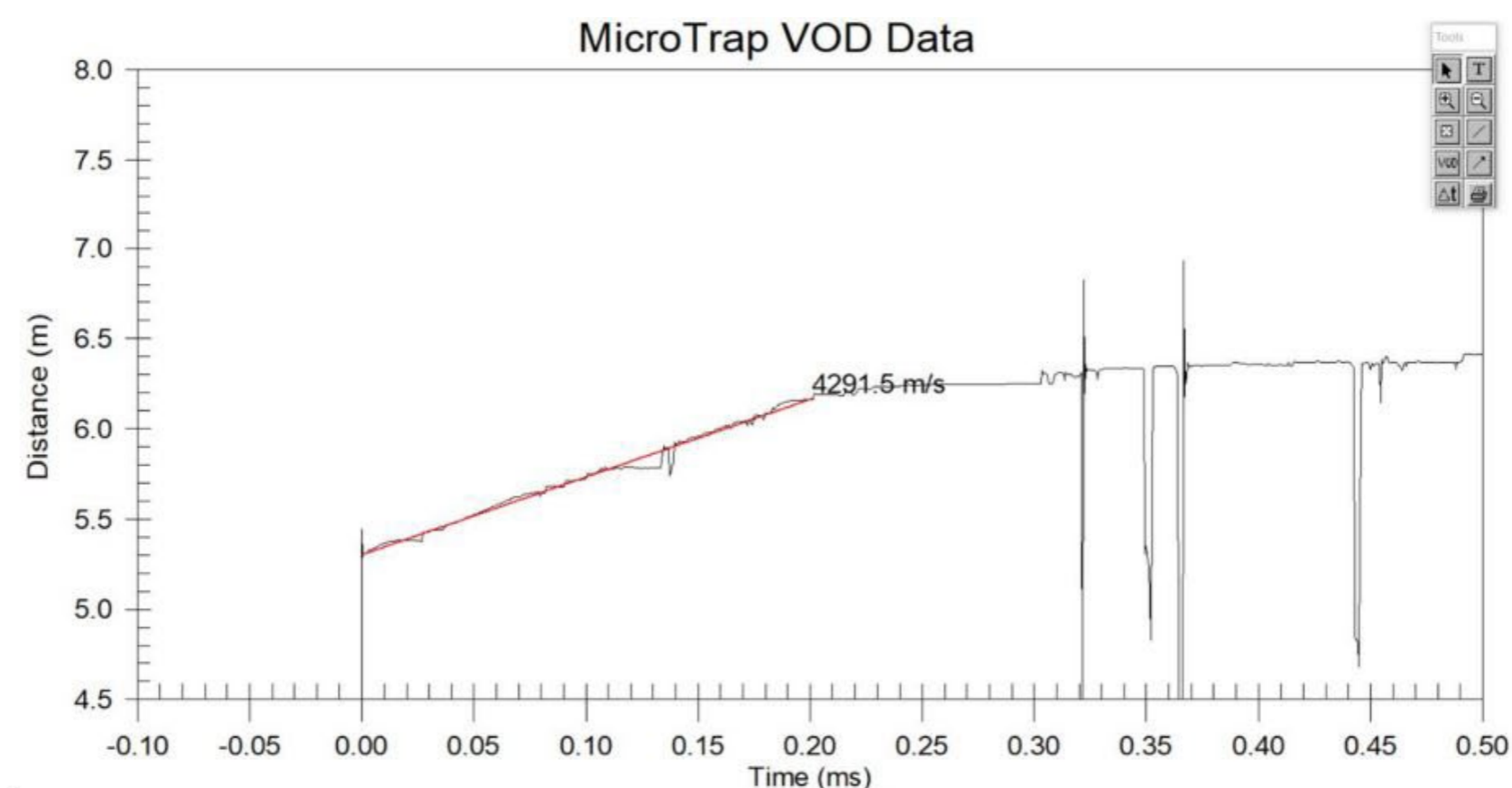


FIGURA 3
Representación de Desplazamiento = f (tiempo) registrada en un ensayo de VOD por el método continuo

En "monitoreo punto a punto" los datos obtenidos del Cronógrafo digital son procesados automáticamente por el equipo obteniéndose directamente el valor del VOD, en la memoria del equipo se presenta un archivo con indicaciones de la fecha, longitud ensayada, tiempo de detonación y finalmente la VOD, tal y como se muestra en la figura 4:



FIGURA 4
Archivo resultante donde se registra la VOD usando el equipo

Resultados de vibración y ruido

En “Apófisis” se realizaron 9 ensayos de perforación y voladura; los primeros 6 ensayos con el sistema de iniciación de explosivos del tipo mecha y fulminante convencional y la metodología de análisis del VOD por método continuo; los siguientes 3 ensayos con el sistema de iniciación de explosivos tipo mecha y fulminante ensamblado. Este frente se ubica a 39 m de diferencia en cota y a 1.650 m en distancia horizontal con respecto al centro poblado de la ciudad de Zaruma (cota 1.194 m s.n.m.).

En “Matamoros” se realizaron 7 ensayos de perforación y voladura; los primeros 3 ensayos con el sistema de iniciación de explosivos del tipo mecha y fulminante convencional y la metodología de análisis del VOD por método continuo; los siguientes 4 ensayos con el sistema de iniciación de explosivos tipo mecha y fulminante ensamblado. Este frente se ubica a 78 m de diferencia en cota y a 1.389 m en distancia horizontal con respecto al centro poblado de la ciudad de Zaruma (cota 1.194 m s.n.m.).

Valores mínimos de vibración y ruido obtenido en el ensayo Nro. 4 (Figura 5):

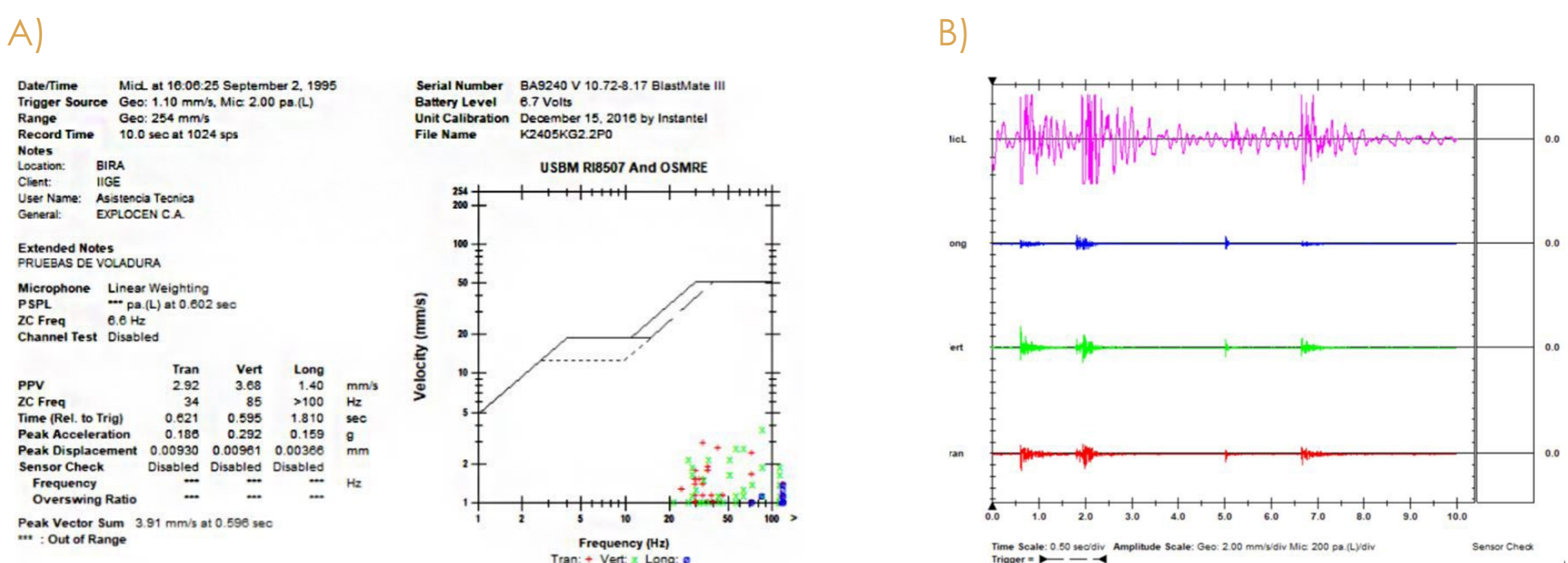


FIGURA 5
a y b: Monitoreo de vibración y ruido mínimo, ensayo de Voladura N° 4

Los valores máximos de vibración y ruido obtenidos en el ensayo N° 10 se visualizan en la figura 6:

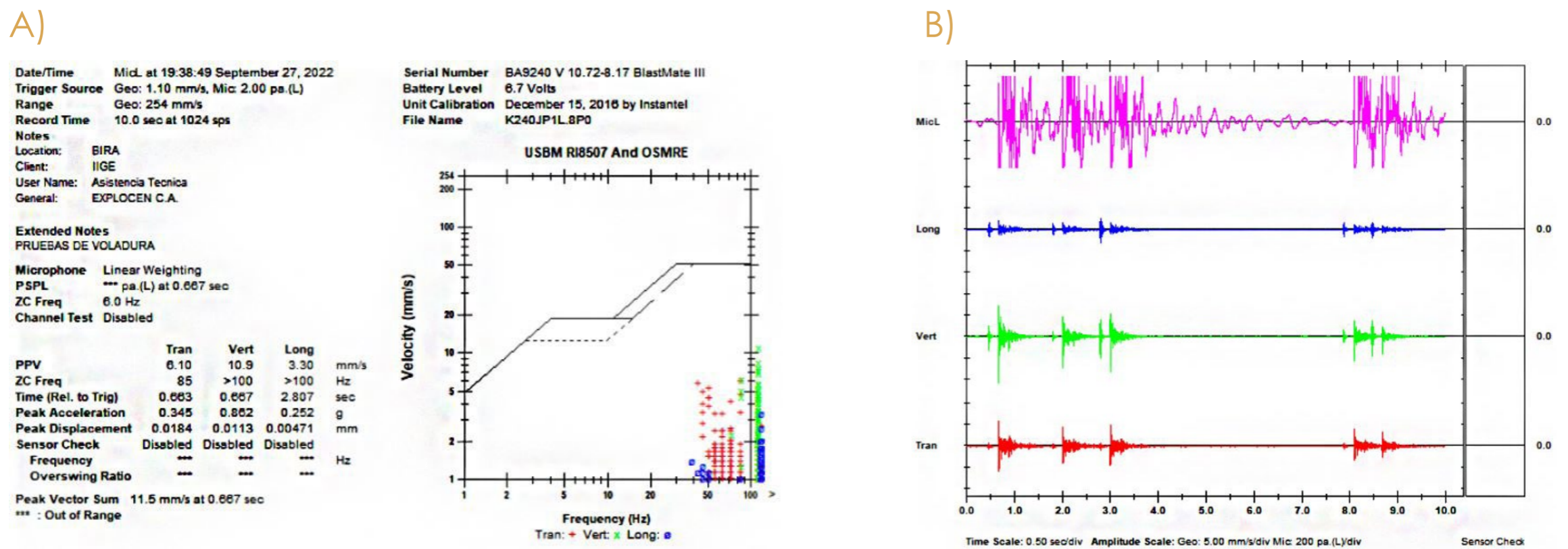


FIGURA 6
a y b: Monitoreo de vibración y ruido máximo, ensayo de Voladura N° 10.

TABLA 11
Monitoreo de VOD, vibración y ruido en el frente “Apófisis”, medido a una distancia de 80 metros

N° de ensayo	Fecha de monitoreo	PATRÓN DE CARGA			VOD (m/s)	Cantidad de explosivo utilizado (kg)			Kg explosivo /barreo (m)	Vibraciones (mm/s)					
		CEBO: Emulsión	Carga de Fondo	Carga de Columna		Cantidad de barrenos (unidades)	Cebo	Carga de Columna		Total	Longitud	Vertical	Transversal	Resultante	Ruido (dB)
1	15/09/2022	5000 X 1 1/8" X 7"	ANFO	ANFO	4150	32	4	25	29	0,906	2,29	7,87	4,57	8,26	180
2	17/09/2022	5000 X 1 1/8" X 6"	ANFO	ANFO	4032	32	3,48	32	35,48	1,109	1,4	7,37	4,32	7,66	176
3	20/09/2022	5000 X 1 1/8" X 6"	ANFO	ANFO	3950	28	3,04	25	28,04	1,001	1,52	5,21	2,05	5,51	170
5	22/09/2022	5000 X 1 1/8" X 6"	5000 X 1 1/8" X 6"	Nitrato de Amonio Agrícola	N / R	28	3,04	5,87	8,91	0,318	1,4	1,27	1,9	2,17	164
7	24/09/2022	5000 X 1 1/8" X 6"	5000 X 1 1/8" X 6"	5000 X 1 1/8" X 6"	4050	28	3,04	8,91	11,95	0,427	2,03	2,41	3,05	3,92	165
9	27/09/2022	5000 X 1 1/8" X 6"	ANFO	ANFO	4075	26	3,63	25	28,63	1,101	2,54	9,78	5,33	10,1	193
10 (*)	28/09/2022	5000 X 1 1/8" X 6"	ANFO	ANFO	4850	29	2,93	28	30,93	1,067	3,3	10,9	6,1	11,5	195
13(*)	01/10/2022	5000 X 1 1/8" X 7"	ANFO	ANFO	4860	26	1,52	30,13	31,65	1,217	3,43	7,37	3,43	7,53	186
15(*)	04/10/2022	5000 X 1 1/8" X 7"	Nitrato de Amonio Agrícola	Nitrato de Amonio Agrícola	5310	26	4,13	28	32,13	1,236	3,68	3,3	3,43	5,82	172

- Vibración mínima
- Vibración máxima
- Ahorro de barrenos (ensayo 1 versus ensayo 13)

N / R: No se registra dato de VOD debido a que el Nitrato de Amonio Agrícola no detona, al parecer solo deflagra.
(*) Pruebas realizadas con el “método punto a punto”, la medición se hace en el cartucho “Cebo”.

TABLA 12
 Monitoreo de VOD, vibración y ruido en el frente
 “Matamoros”, medido a una distancia de 60 metros

N° de ensayo	Fecha de monitoreo	PATRÓN DE CARGA			VOD (m/s)	Cantidad de explosivo utilizado (kg)			Kg explosivo /barreo (m)	Vibraciones (mm/s)				Ruido (dB)	
		CEBO: Emulsión	Carga de Fondo	Carga de Columna		Cantidad de barrenos (unidades)	Cebo	Carga de Columna		Total	Longitud	Vertical	Transversal		Resultante
4	21/09/2022	5000 X 1 1/8" X 6"	5000 X 1 1/8" X 6"	5000 X 1 1/8" X 6"	4120	27	2,93	6,52	9,45	0,350	1,4	3,68	2,92	3,91	170
6	23/09/2022	5000 X 1 1/8" X 6"	5000 X 1 1/8" X 6"	5000 X 1 1/8" X 6"	4000	28	3,04	7,28	10,32	0,369	6,98	4,7	6,1	9,44	187
8	26/09/2022	5000 X 1 1/8" X 6"	5000 X 1 1/8" X 6"	5000 X 1 1/8" X 6"	3986	27	2,93	4,67	7,6	0,281	1,52	6,35	1,52	6,36	185
11(*)	29/09/2022	5000 X 1 1/8" X 6"	5000 X 1 1/8" X 6"	Nitrato de Amonio Agrícola	4980	26	3,15	7,72	10,87	0,418	2,41	4,44	3,3	4,79	175
12(*)	30/09/2022	5000 X 1 1/8" X 6"	5000 X 1 1/8" X 6"	5000 X 1 1/8" X 6"	5120	26	2	29,78	31,78	1,222	2,16	7,37	3,81	7,69	177
14(*)	03/10/2022	5000 X 1 1/8" X 6"	ANFO	ANFO	4980	26	4,87	21	25,87	0,995	1,78	4,19	3,94	5,12	175
16(*)	05/10/2022	5000 X 1 1/8" X 7"	ANFO	ANFO	5220	24	4,38	23,96	28,34	1,181	3,17	2,16	3,17	4,77	180

Fuente: EXPLOCEN C.A. (Explosivos, Accesorios y Servicios de Voladura, 2022)

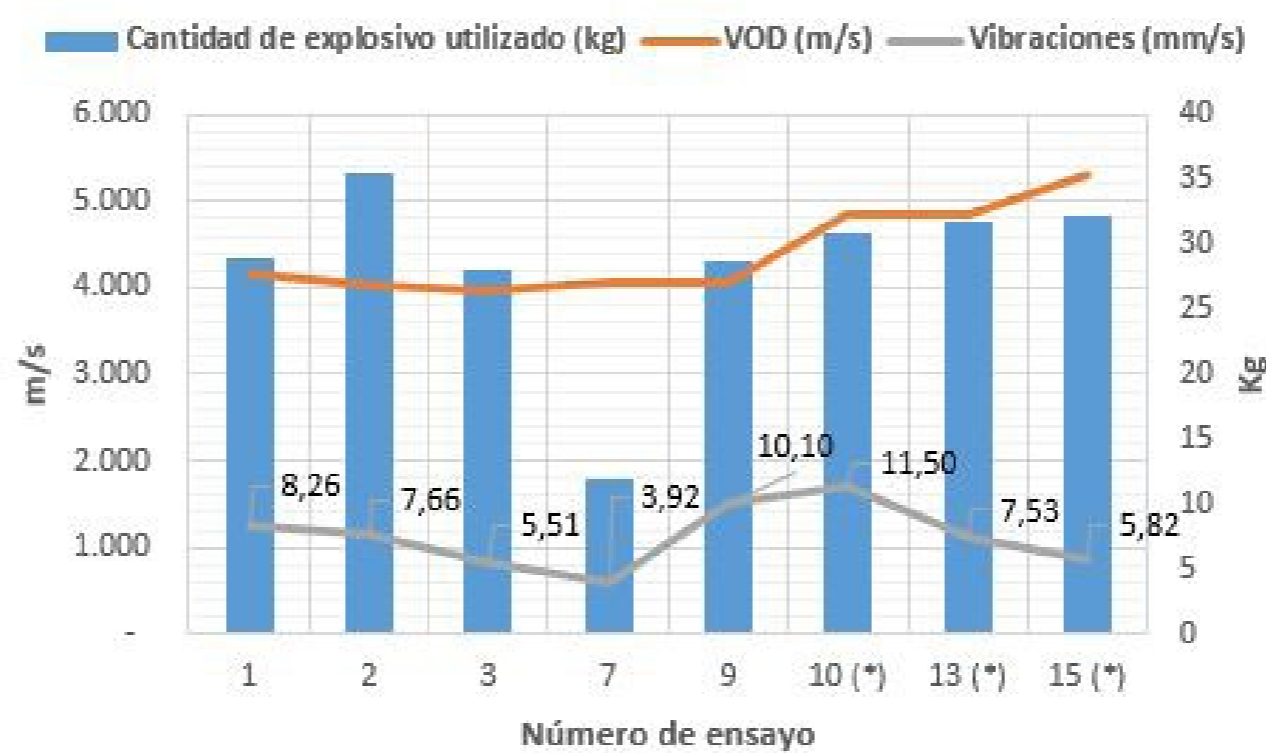


FIGURA 7

Relación carga explosiva, vibración y VOD, Frente de trabajo: Apósis

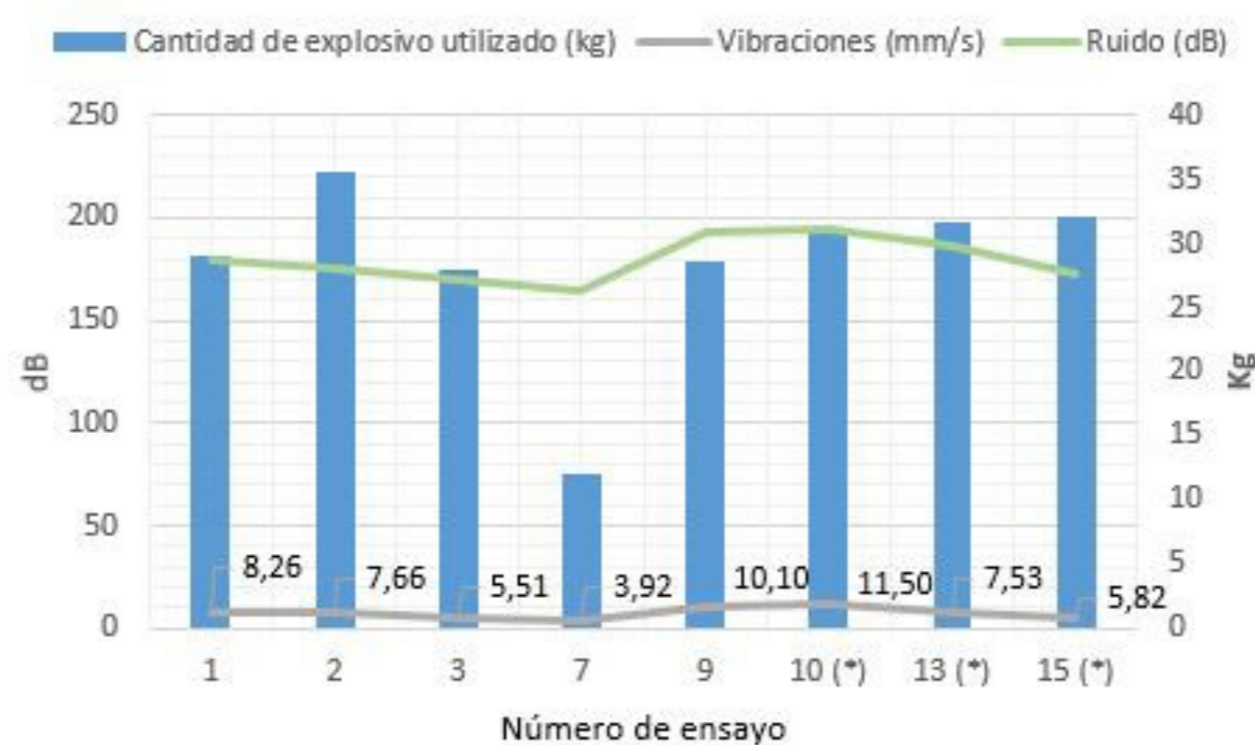


FIGURA 8

Relación carga explosiva, vibración y VOD, Frente de trabajo: Apósis

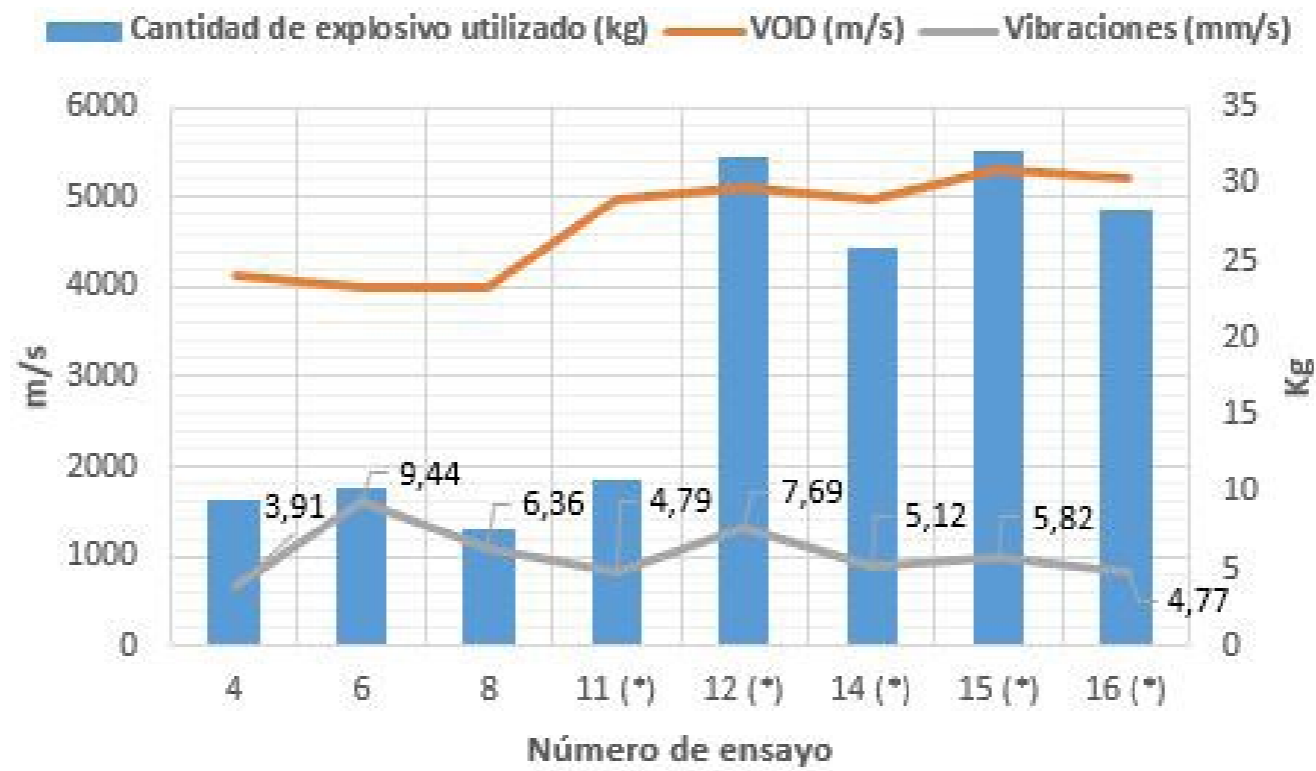


FIGURA 9

Relación carga explosiva, vibración y VOD, Frente de trabajo: Matamoros

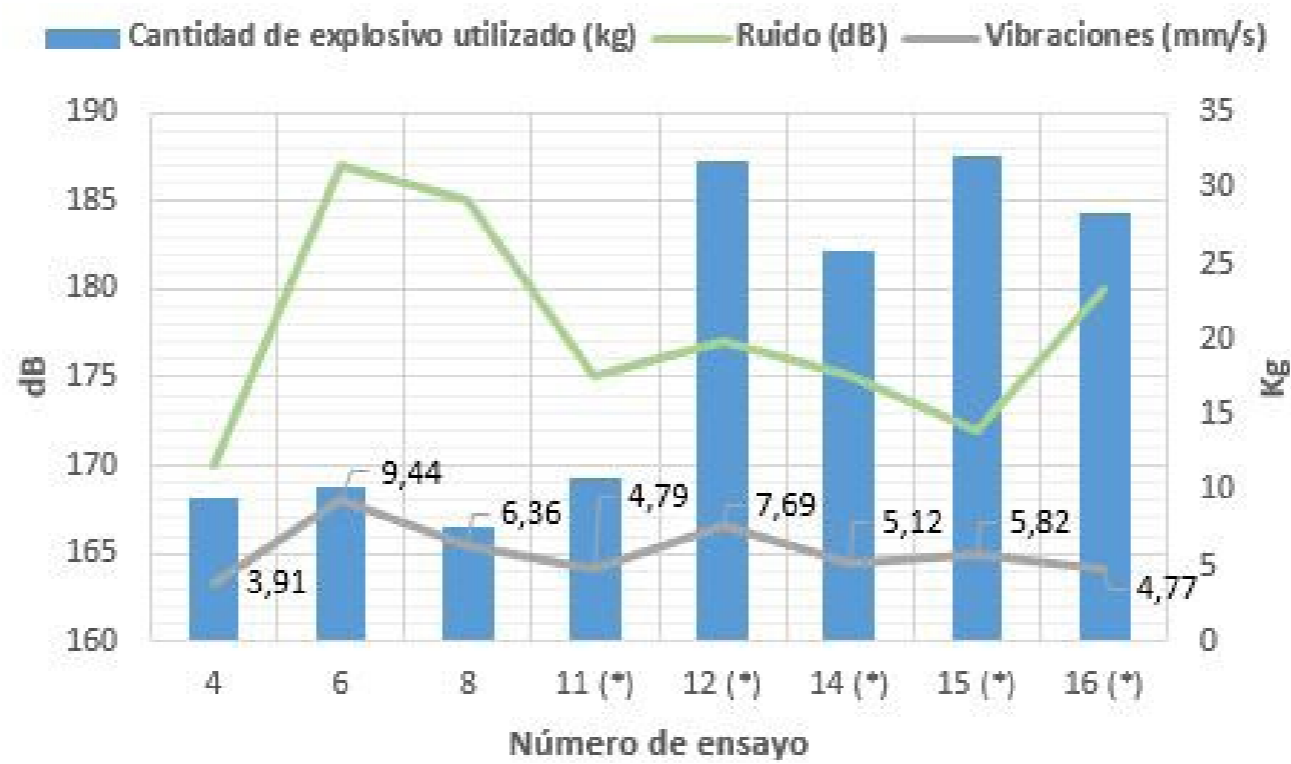


FIGURA 10

Relación carga explosiva, vibración y ruido, Frente de trabajo: Matamoros

Los datos registrados del VOD mínimo son de 3.950 (m/s) hasta VOD máximo de 5.310 (m/s), vibración resultante mínima de 2,17 (mm/s) y resultante máxima de 11,5 (mm/s), niveles de ruido mínimos de 164 (dB) al máximo de 195 (dB); generados por concentraciones de explosivo por voladura de 7,6 kg hasta 35,49 kg.

Los niveles de vibración y ruido resultantes comparados con información normativa nacional vigente (Ecuador) e internacional (EE. UU) indica que en los ensayos donde se utilizó ANFO colocado como carga de fondo y de columna, presenta menores vibraciones, menor velocidad de detonación (VOD) y menor ruido en comparación con el uso de Emulsiones y Nitrato de Amonio Agrícola. El análisis indica que la influencia de la explosión de las voladuras comparando VOD, vibración y ruido, se encuentran en un rango de 60 m (Ver Tabla 12, Figuras 9 y 10) a 80 m (Ver Tabla 11, Figuras 7 y 8) alrededor de la explosión; lo que no afecta a la infraestructura más cercana propia de la labor minera (oficinas y campamentos) y no se propaga hasta llegar a la ciudad de Zaruma.

CONCLUSIONES

La vibración mínima registrada es de 2,17 (mm/s) con un nivel de ruido de 164 dB en la voladura N° 5; en esta voladura no se cuenta con registro del VOD posiblemente a que en este ensayo se produjo una deflagración del explosivo que es una reacción más lenta que la detonación, lo que no permite relacionar la información de los tres criterios técnicos. Por lo que se considera el siguiente valor mínimo de vibración que es de 3,91 (mm/s) con un nivel de ruido de 170 dB, en una carga explosiva de 9,45 Kg dando como resultado un VOD de 4.120 (m/s), correspondiente a la voladura N° 4, en el Frente "Matamoros". La relación VOD, vibración y ruido podría romper ventanas en construcciones que se encuentren cerca de 60 m alrededor de la voladura.

La vibración máxima registrada es de 11.5 (mm/s) con un nivel de ruido de 195 dB, en una carga explosiva de 30.95 Kg dando como resultado un VOD de 4.850 (m/s), correspondiente a la voladura N° 10 en el Frente "Apófisis". La relación VOD, vibración y ruido podría romper ventanas y causar pequeños daños en construcciones simples que tengan acabados de yeso y que se encuentren cerca de 80 m alrededor de la voladura.

La Emulsión 5000 X 1 1/8" X 7" influye en el ANFO y en el Nitrato de Amonio, aumentándoles la fuerza explosiva en forma proporcional; sin embargo, el ANFO presenta menor vibración en comparación con el Nitrato Agrícola.

El uso de Emulsión 5000 X 1 1/8" X 6" en remplazo de la Emulsión 5000 X 1 1/8" X 7", en combinación con ANFO o Nitrato Agrícola, reduce la VOD, vibración y ruido.

El ANFO al ser compactado ocupa mayor kilogramo de explosivo por barreno; aumenta la VOD y el ruido, sin embargo, disminuye su poder de vibración.

Si reemplazamos la combinación de Emulsión 5000 X 1 1/8" X 6" como carga de fondo y de columna; por el uso combinado de Emulsión 5000 X 1 1/8" X 6" como carga de fondo y ANFO como carga de columna disminuye el VOD, vibración y ruido.

El uso de ANFO como carga de columna además de presentar buen poder de rotura en rocas de resistencia medias a altas, presenta niveles de vibración menores en comparación con el uso de Emulsiones 5000 X 1 1/8" X 6", y Nitrato de Amonio Agrícola de igual forma como carga de columna.

Los radios de influencia de las explosiones producto de la voladura probados en 16 ensayos, en una mina legalmente constituida cerca de la ciudad de Zaruma, son 60 m de influencia en el caso del frente de trabajo "Matamoros" y 80 m en frente de trabajo "Apófisis", que si se los compara con la distancia al centro poblado de la ciudad de Zaruma, no llegan a ocasionar percepción o daño.

REFERENCIAS

- Benjumea Cadavid, J. M. (2003) *Vibraciones causadas por actividad humana: caracterización, efectos y manejo en la Ingeniería Civil*. Recuperado el 18 de Enero de 2023, de https://www.osso.org.co/docu/tesis/2003/vibracion/Benjumea2003_Vibraciones.pdf
- Bernaola Alonso, J., Castilla Gómez, J., & Herrera Herbert, J. (2013) *Manual de Perforación y Voladura de rocas en minería*. Madrid, España. Recuperado el 18 de Enero de 2023, de https://oa.upm.es/21848/8/20131007_PERFORACION_Y_VOLADURA.pdf
- Burbano Morillo, D. S., Rivadeneira Gallardo, A. M., Cerón Uquillas, A. A., & García Fonseca, T. E. (2021) Análisis tenso deformacional de las obras de remediación implementadas para estabilizar la subsidencia minera bajo la Escuela La Inmaculada, Zaruma Ecuador. *FIGEMPA Investigación y Desarrollo*, 12(2), 1-14. Recuperado el 06 de Marzo de 2023, de <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/view/3054/4262>
- EXPLOCEN C.A. Explosivos, Accesorios y Servicios de Voladura (2022) *Ficha Técnica: Emulsiones 5000X / ANFO / Estopin / Mecha lenta / Fulminante Nro. 8 / Cordón detonante*. Recuperado el 20 de Enero de 2023 de <https://www.explocen.com.ec/>
- EXSA S.A. Firma Peruana de Explosivos (2020) *Manual Práctico de Voladura (Edición Especial)* Perú. Recuperado el 18 de 12 de 2023.
- Hoek, E., & Brown, T. (1997) Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165-1186. Recuperado el 24 de Marzo de 2023, de <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/1997-Practical-Estimates-of-Rock-Mass-Strength.pdf>
- Instantel (2023) *Blastmate III*. Recuperado el 10 de Febrero de 2023, de <https://www.instantel.com/resource/blastmate-iii>
- Instituto Geológico y Minero de España (1987) *Manual de perforación y voladura de rocas* (Segunda ed.) Madrid, España. Recuperado el 14 de Febrero de 2023

- Instituto Geológico y Minero de España. (s.f.) *Investigación de problemas geomecánicos en el arranque: vibraciones producidas por voladuras y precorte*. Memoria. Recuperado el 15 de Febrero de 2023, de http://info.igme.es/SidPDF%5C000000%5C48%5CMemoria%5C48_0003.pdf
- Linares Carrasco, N. S. (2013) *Estudio sobre la medida de la velocidad de detonación*. Recuperado el 18 de Enero de 2023, de https://oa.upm.es/21540/1/PFC_Nadia_Sira_Linares_Carrasco.pdf
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables (2022) *Expedir la delimitación de la Zona de Control Especial Minero*. Quito, Ecuador: Registro Oficial. Recuperado el 06 de Marzo de 2023, de <http://www.edicioneslegales-informacionadicional.com/webmaster/directorio/3SU629.pdf>
- Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica (2017) *Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA)* Recuperado el 9 de Febrero de 2023, de <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu112184.pdf>
- MREL Group of Companies Limited (2023) *MICROTrap VOD/DATA RECORDER*. Recuperado el 10 de Febrero de 2023. https://mrel.com/blasting_instrumentation/microtrap-specs.html
- Ortega Ramos, C. A., Jaramillo Gil, A. F., & Molina Escobar, J. M. (2016) *Drilling grid blasting upgrading based on Geological Strength Index*. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 33-34. Recuperado el 18 de Enero de 2023. <http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n40/n40a04.pdf>
- Pérez Cosío, J. (2019) *Utilización de la medida de vibraciones en voladuras para el conocimiento de los daños al macizo de roca ornamental*. Cartagena. Universidad Politécnica de Cartagena. <https://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/7809/jcpc.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Pinto Morales, L. H., & Fuentes Fuentes, M. (2021) *Efecto de las voladuras sobre el comportamiento estructural de viviendas cercanas a sitios de explotación minera en Colombia*. *Minería y Geología Revista Digital Científico - Tecnológica*, 61, 63, 66, 67, 69, 70, 71. ISSN 1993-8012
- Ramírez Oyanguren, P., & Alejano Monge, L. (2004) *Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Recuperado el 05 de Abril de 2023 https://oa.upm.es/14183/1/MECANICA_DE_ROCAS_1.pdf
- Rojas Villacís, C. A., & Zúñiga Arrobo, C. A. (2022) *Análisis de la actividad de carguío y transporte en minería artesanal en El Guayabo Ecuador*. *FIGEMPA Investigación y Desarrollo*, 14(2), 1-12. <https://doi.org/10.29166/revfig.v14i2.3854>
- Ruiz Valencia, D., Otálora Sánchez, C., & Rodríguez Ordóñez, J. A. (2007) *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 7, 259-272. Recuperado el 14 de Febrero de 2023 <https://core.ac.uk/download/pdf/296525986.pdf>
- Sargentón Romero, G. (2008) *Criterios para el diseño de voladuras en el laboreo de excavaciones subterráneas*. Moa, Cuba. Recuperado el 20 de Enero de 2023 <https://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1425/Sargenton.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Uttam Blastech Private Limited (2023) *Digital Vod Meter*. Recuperado el 10 de Febrero de 2023 https://uttamblastech.com/wp-content/uploads/2021/04/VOD-Brochure_22-3-21.pdf
- Vásconez Carrasco, M., & Torres León, L. (2018) *Minería en el Ecuador: sostenibilidad y licitud*. *Estudios del Desarrollo Social: Cuba y América Latina*, 6 (2), 87 - 90. Recuperado el 08 de Marzo de 2023 <http://scielo.sld.cu/pdf/reds/v6n2/reds06218.pdf>
- Zúñiga Arrobo, C. A. (2022) *Propuesta de mejora de la gestión de la seguridad y salud ocupacional en una organización del sector minero, Condominio Minero Caizan, Tumbaco, Quito - Ecuador*. *Repositorio Escuela de Posgrado Newman*, 16-17. Recuperado el 10 de Marzo de 2023 https://repositorio.epneumann.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12892/401/TRABAJO_DE_INV_MGM_ZUNIGA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Zúñiga Arrobo, C. A., & Rojas Villacís, C. A. (2020) *Análisis de costos operativos en pequeña minería y minería artesanal en Namibia*. *FIGEMPA Investigación y Desarrollo*, 10(2), 50-60. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.2568>