

ARTÍCULOS

Comportamiento de VOD, vibración y ruido al duplicar la sección de perforación en Pequeña Minería

VOD, vibration, and noise behavior when doubling the drilling section in small-scale mining



Cristian Andrés Zúñiga Arrobo¹, Cynthia Analí Rojas Villacís², Cecilia Dayana Rosero Padilla³, Luis Guillermo Fernández Suárez⁴, Juan Pablo Idrovo Palomeque⁵



cristian.zuniga@geoenergia.gob.ec

¹ Instituto de Investigación Geológico y Energético. Dirección de Formación y Difusión Científica. De Las Malvas E15-142 y De Los Perales. Quito, Ecuador.



cynthia.rojas@geoenergia.gob.ec

² Instituto de Investigación Geológico y Energético. Dirección de Formación y Difusión Científica. De Las Malvas E15-142 y De Los Perales. Quito, Ecuador.



cecilia.rosero@geoenergia.gob.ec

³ Instituto de Investigación Geológico y Energético. Dirección de Formación y Difusión Científica. De Las Malvas E15-142 y De Los Perales. Quito, Ecuador.



luis.fernandez@ambiente.gob.ec

⁴ Instituto de Investigación Geológico y Energético. Dirección de Formación y Difusión Científica. De Las Malvas E15-142 y De Los Perales. Quito, Ecuador.



asistenciatecnica6@explocen.com.ec

⁵ Explocen C.A. Explosivos para minería – Ecuador. Asistencia Técnica 6. Barrio San Antonio de Padua, Avenida Welmer Quezada Neira. Portovelo, Ecuador

FIGEMPA: Investigación y Desarrollo

Universidad Central del Ecuador, Ecuador

ISSN-e: 2602-8484

Periodicidad: Semestral

Modalidad: Continua

vol. 20, núm. 2, 2025

revista.figempa@uce.edu.ec

Recepción: 10 enero 2025

Aprobación: 21 noviembre 2025

DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v20i2.7714>

Autor de correspondencia:

cristian.zuniga@geoenergia.gob.ec

RESUMEN

Se determinó el comportamiento de explosivos comparando VOD, vibración y ruido en 16 ensayos de perforación y voladura en secciones mineras subterráneas en avances horizontales de 4,84 m² comparando con secciones de 10,25 m², el tipo de roca caracterizado es roca resistente R4 a muy resistente R5, ubicado en el sector minero de Zaruma-Malvas. Se empleó métodos de encendido convencional en los ensayos Nro. 01 al 12 y método ensamblado en ensayos Nro. 13 al 16, donde se identificó 4 combinaciones de explosivos entre ANFO, Emulsiones (6" y 7" pulgadas) y Nitrato de amonio agrícola como parte de cebo, carga de fondo y carga de columna. Se realizó un análisis comparativo entre los sistemas de iniciación de explosivo entre convencional y ensamblado, revelando diferencias en el desempeño de las voladuras según el tamaño de la sección. En las secciones pequeñas (4,84 m²), el sistema ensamblado reduce las vibraciones en 24,58% y el ruido en 3,93%, pero disminuye la velocidad de detonación (VOD) en 2,53%. En las secciones grandes (10,25 m²), este sistema logra una reducción de vibraciones (47,11%), pero incrementa el ruido (4,31%) y eleva la VOD marginalmente (0,04%). Por otro lado, el sistema convencional demuestra mayor estabilidad, mejorando la VOD (+1,71%) y controlando mejor las vibraciones (-5,37%) en secciones grandes, lo que lo hace adecuado para entornos sensibles. Respecto al patrón de carga, el ANFO destaca en secciones pequeñas, reduciendo vibraciones (92,9%) y el ruido (88,59%) frente a emulsiones, aunque su eficacia varía según las combinaciones. Sin embargo, al duplicar la sección a (10,25 m²), el sistema ensamblado presenta un incremento en vibraciones (+55,13%) y ruido (+4,47%), limitando su aplicabilidad. Estos resultados sugieren que, mientras el sistema ensamblado puede optimizar la fragmentación en grandes voladuras, el convencional ofrece un balance superior entre rendimiento y control de impactos ambientales, especialmente en áreas con restricciones de vibración y ruido.

Palabras claves: Zaruma; pequeña minería; voladura; vibración; ruido.

ABSTRACT

The behavior of explosives was determined by comparing VOD, vibration and noise in 16 drilling and blasting tests in underground mining sections in horizontal advances of 4,84 m² compared to sections of 10,25 m², the type of rock characterized is resistant rock R4 to very resistant R5, located in the Zaruma-Malvas mining sector. Conventional ignition methods were used in tests No. 01 to 12 and assembled method in tests No. 13 to 16, where 4 combinations of explosives were identified between ANFO, Emulsions (6 "and 7" inches) and Agricultural Ammonium Nitrate as part of bait, bottom charge and column charge. A comparative analysis was carried out between the explosive initiation systems between conventional and assembled, revealing differences in blasting performance depending on the size of the section. In small sections (4,84 m²), the assembled system reduces vibration by 24,58% and noise by 3,93%, but decreases the velocity of detonation (VOD) by 2,53%. In large sections (10,25 m²), this system achieves a vibration reduction (47,11%), but increases noise (4,31%) and marginally increases VOD (0,04%). On the other hand, the conventional system demonstrates greater stability, improving VOD (+1,71%) and better controlling vibrations (-5,37%) in large sections,



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

making it suitable for sensitive environments. Regarding the loading pattern, ANFO excels in small sections, reducing vibrations (92,9%) and noise (88,59%) compared to emulsions, although its effectiveness varies depending on the combination. However, when the section is doubled (10,25 m²), the assembled system shows an increase in vibrations (+55,13%) and noise (+4,47%), limiting its applicability. These results suggest that, while the assembled system can optimize fragmentation in large blasting operations, the conventional system offers a superior balance between performance and environmental impact control, especially in areas with vibration and noise restrictions.

Keywords: Zaruma; small-scale mining; blasting; vibration; noise.

Cómo citar:

Zúñiga-Arrobo, C.A., Rojas-Villacis, C.A., Rosero-Padilla, C.D., Fernández-Suárez L.G., & Idrovo-Palomeque, J.P. (2025). Comportamiento de VOD, vibración y ruido al duplicar la sección de perforación en Pequeña Minería. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 20(2), e7714. <https://doi.org/10.29166/revfig.v20i2.7714>

INTRODUCCIÓN

Un ciclo minero de trabajo que comprende: perforación, voladura (Couceiro y López Cano, 2018), ventilación, saneamiento, fortificación, carguío y transporte. De estas operaciones, la perforación y voladura constituye la segunda y tercera actividad respectivamente, que mayor costo horario demanda (Zúñiga Arrobo y Rojas Villacís, 2020). A fin de determinar modificaciones técnicas, optimización del proceso de perforación y voladura (Poma *et al.*, 2020), se analiza las mallas tradicionales empleadas bajo la experiencia del perforista y posterior se propone modificaciones al diseño de mallas, número de barrenos perforados y tipo de explosivos a utilizar con relación a la dureza de la roca (Mejía Flores *et al.*, 2021, pp. 207-226) y (Correa Arroyave y Rueda Fonseca, 2023, pp. 41-50).

La pequeña minería y minería artesanal desarrollada en el Distrito Minero de Zaruma y Portovelo, generalmente emplea Emulsiones 5.000 x 1 1/8" x 6" y 5.000 x 1 1/8" x 7" (pulgadas), ANFO, y Nitrato de amonio agrícola. Estas sustancias explosivas, según la cantidad y su combinación, generan diferentes resultados de *velocidad de detonación (VOD)*, *vibraciones* y *ruido*, que se pueden asociar a eventos de hundimientos o colapsos de viviendas y obras de infraestructura de importancia en la ciudad de Zaruma mencionado por (Burbano Morillo *et al.*, 2021); eventos que han alterado la tranquilidad y seguridad de la población quienes perciben que el ruido y vibración son fuertes.

Por lo anterior, el alcance del estudio es determinar el comportamiento del explosivo al duplicar la sección de perforación al emplear diferentes tipos y combinaciones de explosivos comúnmente utilizados, cantidad de sustancia explosiva (Kg por barreno); y su relación con la *velocidad de detonación del explosivo (VOD)*, *la vibración y ruido*; identificando que combinaciones de explosivos generan mayor o menor vibración y ruido.

MATERIALES Y MÉTODOS

Determinación de la dureza de la roca:

Zavala Serrano (2014), menciona que las rocas *andesitas* de Zaruma tienen un peso específico 2,65 y 2,69 (g/cm³) o 25,99 kN/m³ y 26,34 kN/m³. (Cardu y Seccatore, 2016, pp. 178-182) mediante análisis estadísticos, cuantifican y clasifican la dificultad de la construcción de túneles y labores mineras mediante la perforación y voladura, considerando cortes de pozo paralelos y cortes de pozo inclinados. Carrión Mero *et al.* (2019) indican que, las rocas del sector de Zaruma son *rocas andesitas con inclusiones duras* que presentan resistencias de 30 a 65 (MPa).

(Adeoluwa Olajesu *et al.*, 2017, pp. 464-476), caracterizaron estructuralmente el macizo rocoso de la mina subterránea Oro Descanso (Cuba) mediante métodos empíricos (RQD, RMR e índice Q), identificando tres zonas de calidad diferenciada: buena (RQD 73-81%, RMR 53-56), regular (RQD 29-59%, RMR 37-45) y mala (RQD 23-35%, RMR 44-59).

Burbano Morillo *et al.* (2021) indican que, en el sector de Zaruma existe rocas andesitas/tobas con resistencias de 60,08 (MPa) y peso específico de 27,08 kN/m³.

(Akbay y Erkinçioğlu, 2023, pp. 719-728), correlacionan los valores de dureza de rebote obtenidos con **martillos Schmidt tipo N** (impacto 0,735 Nm) y **tipo L** (impacto 2,207 Nm), analizando 195 datos de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. El estudio introduce coeficientes de conversión (K) específicos por tipo de roca (ej. K=1,1428 para ígneas, K=1,173 para metamórficas), con errores porcentuales absolutos medios (MAPE) inferiores al 8,7%, superando la precisión de modelos de regresión tradicionales. Estos coeficientes permiten estandarizar datos históricos obtenidos con distintos martillos y optimizar el uso del ábaco de Miller para estimar resistencia a compresión uniaxial (UCS) a partir de valores convertidos.

Con relación a los autores anteriores, para el presente estudio se utilizó el peso específico promedio de 26,47 kN/m³, información reforzada con la utilización en campo del **martillo Schmidt tipo N** conjuntamente con la interpretación del **Ábaco de Miller**, referido en la Tabla 1:

TABLA 1
Características de los frentes de explotación ensayados

Frente de trabajo	Índice de rebote (R)	Peso específico (kN/m³)	Resistividad a la compresión Simple RCS (MPa)	ISRM 89 *	Tipo de roca	Sección de galería promedio (ancho por alto)
Cortavetas	43 a 59	26,47	80 - 180	R4 a R5	Resistente a muy resistente	2,2 m x 2,2 m
Evelyn Norte	43 a 59		80 - 180			3,2 m x 3,2 m

Bieniawski (1989)

Comportamiento de los explosivos (VOD, vibración y ruido):

(Muñoz Beroiza, 2019), mencionan las características técnicas e importancia de los explosivos utilizados en avance de galerías mineras subterráneas, así como la Velocidad de Detonación (VOD).

Widodo *et al.* (2019), evaluaron el desempeño del ANFO y emulsión en voladuras de túneles, analizando VOD, vibraciones y sobre-rotura/sub-rotura. El ANFO generó mayor sobre-rotura (hasta 9,03 m² vs. 5,49 m² de emulsión) debido a su menor densidad y falta de resistencia al agua, incrementando vibraciones y daños geotécnicos, mientras que la emulsión, con mayor VOD ajustable y capacidad hidrorresistente, redujo la sobre-rotura en un 40%, minimizando vibraciones y riesgos de fracturas excesivas, aunque presentó mayor sub-rotura que requirió rediseños de patrones de perforación. El ANFO dejó cordón detonante en perforaciones perimetrales, aumentando riesgos de explosiones secundarias, problema que la emulsión eliminó. Además, la emulsión optimizó el control de vibraciones y VOD.

(Silva *et al.*, 2019, pp. 379-385), integran modelos de Holmberg-Persson, Forsyth y Liu para predecir daños en rocas mediante el análisis de la velocidad de detonación (VOD), vibraciones (PPV) y propiedades dinámicas de la roca. La PPV emerge como indicador crítico, donde valores superiores a 16,65 m/s (basados en resistencia dinámica) predicen fracturas severas, mientras que la VOD y la presión de gases determinan la extensión del daño (trituration, fractura y fragmentación). Validado en voladuras con ANFO (barrenos de 165 mm), el modelo reduce el error de predicción del 204,4% (estático) al 46,5%, demostrando que mayores cargas explosivas (2,5 kg/m) amplían el daño hasta 1,37 m frente a 0,65 m (1,0 kg/m). Aunque se optimizan vibraciones y ruido mediante patrones de carga, el impacto acústico no se cuantifica directamente.

(Cardu *et al.*, 2022, pp. 822-833), mencionan que las voladuras de contorno o voladura controlada consideran los parámetros dureza de la roca, geometría (discontinuidades en roca y sus características geotécnicas), carga y agente explosivo son utilizadas en minería e ingeniería civil para mejorar el rendimiento, manteniendo la seguridad del personal al reducir la vibración.

Método de ensamblado de explosivos:

(Seccatore *et al.* 2020, pp. 387-394), ejecutaron ensayos de perforación y voladura en el sector Zaruma vía Malvas, en secciones de 4,60 m², utilizando método convencional y ensamblado; se empleó 3 tipos de casos: 1) por mineros locales con herramientas y explosivos (normalmente utilizados), 2) por una consultora utilizando las herramientas y agentes explosivo típicamente utilizados y 3) por la consultora aplicando métodos modernos adecuados y provistos por el fabricante.

El presente estudio replicó la metodología propuesta por Zúñiga Arrobo *et al.* (2024), a fin de determinar el comportamiento de la velocidad de detonación (VOD), vibración y ruido al duplicar la sección de perforación. Para lo cual se realizaron 7 ensayos en el frente “Evelyn Norte” que corresponde a 4,84 m² de sección donde se perforó de 24 a 32 barrenos y 9 ensayos en el frente “Cortavetas” de sección de 10,24 m² donde se perforó de 35 a 47 barrenos. Los barrenos tienen diámetro de 38 mm. (1 ½”) y de 1,10 m. a 1,50 m. de profundidad, tratando de conservar el paralelismo entre cada barreno, en la perforación de los barrenos superiores (destroza y hastiales) e inferiores (piso) se presentó ángulos de desviación entre barrenos de 23° a 26° (grados).

Combinaciones de explosivos identificados:

Se identificaron 4 variantes de patrón de carga (cebo, carga de fondo y carga de columna), se analizó el tipo de explosivo utilizado en combinaciones con ANFO, combinaciones con nitrato de amonio y combinaciones con emulsiones de 6" y 7" (pulgadas); acorde a la Tabla 2:

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. (2020), se aplicó el sistema Mecha y Fulminante: Fulminante simple y mecha lenta de pólvora (llamada mecha de seguridad) Cap and fuse. Se aplicó los subtipos:

- a) CONVENCIONAL: Con fulminante y mecha; aplicado en los ensayos del 01 al 12.
- b) ENSAMBLADO: Con mecha rápida de ignición (Igniter cord), más conectores, mecha lenta y fulminante; aplicado en los ensayos del 13 al 16 (**).

TABLA 2
Combinaciones de explosivos identificadas

Combinación	Cebo	Carga de fondo	Carga de columna
1	Emulsión (5000 X 1 1/8" X 6")	Emulsión (5000 X 1 1/8" X 6")	Nitrato de Amonio Agrícola
2	Emulsión (5000 X 1 1/8" X 7")	Emulsión (5000 X 1 1/8" X 7")	Nitrato de Amonio Agrícola
3	Emulsión (5000 X 1 1/8" X 6")	ANFO	Nitrato de Amonio Agrícola
4	Emulsión (5000 X 1 1/8" X 6")	Emulsión (5000 X 1 1/8" X 6")	ANFO

Consideraciones de seguridad y salud ocupacional:

(Monsalve *et al.*, 2020), mencionan que los accidentes geomecánicos (caídas de rocas, colapsos, derrumbes) son la principal causa de siniestralidad en la minería colombiana, representando el 34,7% de los accidentes y el 26,6% de las muertes registradas entre 2005 y 2020. (Ordoñez Guaycha *et al.*, 2023), revisaron 15 investigaciones (artículos y tesis) desde el año 2018 al 2023 cuyos resultados revelan que la exposición a ruido en la minería (generado por perforación, voladura, maquinaria pesada y molienda) frecuentemente supera los límites seguros establecidos por la OMS (75–80 dB), alcanzando niveles críticos de hasta 125 dB, lo que en tiempos prolongados puede afectar al personal operativo en pérdida auditiva (hipoacusia) en 40% de los casos, junto a efectos extra-auditivos como estrés, trastornos del sueño y problemas cardiovasculares, estudios de caso también mencionados por (Gamarra Castro y Romero Vásquez, 2024). A fin de minimizar estas consecuencias se debe considerar el cumplimiento del “Reglamento de Seguridad y Salud en el Trabajo en el Ámbito Minero” (ARCCENER, 2020) Capítulo III; Perforación y Voladura, Artículo 89, literal g).

A continuación, se presenta de manera integral la metodología experimental, los equipos utilizados y las condiciones de monitoreo para los 16 ensayos de perforación y voladura realizados en los frentes “Apófisis” y “Matamoros”, especificando los modelos y marcas de los equipos de medición, como el esclerómetro ROCKCHMIDT TYPE N para la caracterización de la roca, los sistemas MREL MICRO TRAP y Ultram Blastech V.O.D Meter para la velocidad de detonación (VOD), y el sismógrafo INSTANTEL BLASTMATE III para vibraciones y ruido. Además, se detalla las configuraciones de los explosivos, la ubicación de los sensores (a 60 m. y 80 m. del frente), el número total de réplicas por frente y por sistema de iniciación, y los rangos de las variables medidas (VOD: 3.950-5.310 m/s; Vibración: 2,17-11,5 mm/s; Ruido: 164-195 dB), referidos en la Tabla 3.

TABLA 3
Matriz de documentación experimental

Parámetro	Detalles Específicos y Condiciones
1. Equipos utilizados:	
Caracterización de la Roca	<ul style="list-style-type: none">• Esclerómetro (Martillo Schmidt): Marca ROCKCHMIDT, Modelo TYPE N, Serie SHO1-011-0215. Rango: 20-150 MPa.• Herramienta de Análisis: Ábaco de Miller (Ramírez Oyanguren y Alejano Monge, 2004).
Medición de VOD (Velocidad de Detonación)	<ul style="list-style-type: none">• Método Continuo: Equipo MICRO TRAP, Marca MREL, Serie 7145. Accesorio: “Probeccable” Green (10,2 ohm/m) y cable coaxial. Ratio de grabación: 1-2 MHz.• Método Punto a Punto: Equipo V.O.D Meter, Marca Ultram Blastech. Accesorio: Cable de fibra óptica (separación de 100 mm entre puntos).
Medición de Vibraciones y Ruido	<ul style="list-style-type: none">• Sismógrafo: Marca INSTANTEL, Modelo BLASTMATE III, Serie BA9240 V.• Accesorios: Geófono (3 componentes) y Micrófono.
Perforación	<ul style="list-style-type: none">• Diámetro de Broca: 38 mm (1 ½”).• Profundidad de Barrenos: 1,10 m y 1,50 m.
Explosivos e Iniciación	<ul style="list-style-type: none">• Explosivos: Emulsión 5000 (6” y 7”), ANFO normal, Nitrato de Amonio Agrícola.• Sistemas de Iniciación: Convencional (Fulminante #8 + Mecha lenta) y Ensamblado (Igniter Cord + Conectores + Mecha lenta + Fulminante).• Cargador: Cargador neumático tipo “pistola”.
2. Condiciones de monitoreo:	
Sitio de Estudio	<ul style="list-style-type: none">• Frentes Mineros: "Apófisis" y "Matamoros", Distrito Minero Zaruma-Portovelo, Ecuador.

Características del Macizo Rocoso	<ul style="list-style-type: none">• "Apófisis": Roca cohesiva, resistencia media-alta (70-100 MPa), fracturado (RQD 60-70%), fresco y seco.• "Matamoros": Roca cohesiva, resistencia alta (100-120 MPa), poco fracturado (RQD >80%), fresco.
Parámetro	Detalles Específicos y Condiciones
Configuración de la Voladura	<ul style="list-style-type: none">• Peso Específico Promedio (Andesita): 26,47 kN/m³ (valor de literatura para la zona).• Número de Barrenos: "Apófisis": 24-32; "Matamoros": 35-47.• Patrones de Carga: 4 combinaciones de cebo, carga de fondo y carga de columna.• Desviación Angular: 23° a 26° (en barrenos superiores e inferiores).
Ubicación de los Sensores	<ul style="list-style-type: none">• "Apófisis": 80 m desde el frente. Intersección entre galería principal y galería "Apófisis".• "Matamoros": 60 m desde el frente. Intersección entre galería principal y galería "Matamoros".
Variables Monitoreadas	<ul style="list-style-type: none">• VOD: Velocidad de Detonación (m/s).• Vibración: Velocidad de Partícula Pico - PPV (mm/s).• Ruido: Nivel de Presión Sonora (dB).
3. Réplicas y diseño experimental:	
Total de Ensayos	16 voladuras experimentales.
Réplicas por Frente	<ul style="list-style-type: none">• "Apófisis": 9 ensayos (6 con iniciación convencional, 3 con ensamblada).• "Matamoros": 7 ensayos (3 con iniciación convencional, 4 con ensamblada).
Réplicas por Método de Medición de VOD	<ul style="list-style-type: none">• Método Continuo (MREL): 8 ensayos.• Método Punto a Punto (Ultram Blastech): 8 ensayos.
Rango de Variables Medidas	<ul style="list-style-type: none">• VOD: 3.950 m/s – 5.310 m/s.• Vibración (PPV): 2,17 mm/s – 11,5 mm/s.• Ruido: 164 dB - 195 dB.• Carga Explosiva: 7,6 kg – 35,49 kg.
4. Normativa de comparación:	
<ul style="list-style-type: none">• Vibraciones: Normas USBM RI 8507 y OSM 817.67 (EE.UU.).• Ruido: Límites de presión sonora del Libro VI del TULSMA (Ecuador).	

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 4 indica que en el frente Cortavetas, se ha registrado dos ensayos con cargas entre 19,15 kg y 24,73 kg. La Velocidad de Detonación (VOD) supera los 4.900 m/s, indicando un buen desempeño energético, pero las vibraciones (10,40 mm/s en el primer ensayo) y el ruido (175 a 177 dB) están en rangos críticos, lo que sugiere la necesidad de ajustes en el diseño de voladura para reducir el impacto ambiental y cumplir normativas de seguridad.

TABLA 4
Resultados de la combinación de explosivos 1

Nro. ensayo	Combinación de explosivo	Fecha de monitoreo	Nombre del Frente de Trabajo	Cantidad de barrenos (unidades)	Kg explosivo /barreo	Cantidad Total de explosivo utilizado (kg)	Distancia de monitoreo (m)	VOD (m/s)	Vibraciones (mm/s) Resultante	Ruido (dB)
7	1	15/10/2022	Cortavetas	32	0,598	19,15	150	4.910	10,40	177
9	1	18/10/2022	Cortavetas	32	0,773	24,73	150	5.030	2,38	175

En la Tabla 5 Evelyn Norte registra las mayores vibraciones (31,60 mm/s) y ruido (186 dB), posiblemente por condiciones geomecánicas o diseño de carga. En cambio, Cortavetas muestra mayor consistencia en VOD (~5.000 a 5.300 m/s), pero con vibraciones aún elevadas (11,50 a 16,60 mm/s). Esto indica que la combinación de explosivo 2 requiere optimización, especialmente en Evelyn Norte, para mitigar riesgos operativos.

TABLA 5
Resultados de la combinación de explosivos 2

Nro. ensayo	Combinación de explosivo	Fecha de monitoreo	Nombre del Frente de Trabajo	Cantidad de barrenos (unidades)	Kg explosivo /barreo	Cantidad Total de explosivo utilizado (kg)	Distancia de monitoreo (m)	VOD (m/s)	Vibraciones (mm/s) Resultante	Ruido (dB)
1	2	08/10/2022	Cortavetas	47	0,664	31,20	150	5.150	12,30	140
2	2	10/10/2022	Evelyn Norte	34	0,756	25,70	120	4.900	31,60	186
3	2	11/10/2022	Cortavetas	41	0,533	21,87	150	5.320	16,60	169
4	2	12/10/2022	Cortavetas	46	0,664	30,54	150	5.270	11,50	175
5	2	13/10/2022	Cortavetas	38	0,666	25,31	150	5.020	11,80	180
6	2	14/10/2022	Evelyn Norte	31	0,651	20,19	120	5.080	12,90	182

La Tabla 6 contiene un único ensayo en Evelyn Norte, donde se observa una VOD de 5.110 m/s, similar a otros explosivos, pero con vibraciones significativamente menores (1,58 mm/s) y ruido reducido (163 dB). Esto sugiere que esta combinación podría ser más adecuada para minimizar impactos ambientales.

TABLA 6
Resultados de la combinación de explosivos 3

Nro. ensayo	Combinación de explosivo	Fecha de monitoreo	Nombre del Frente de Trabajo	Cantidad de barrenos (unidades)	Kg explosivo /barreo	Cantidad Total de explosivo utilizado (kg)	Distancia de monitoreo (m)	VOD (m/s)	Vibraciones (mm/s) Resultante	Ruido (dB)
8	3	17/10/2022	Evelyn Norte	31	0,665	20,61	120	5.110	1,58	163

La Tabla 7 muestra el sistema de iniciación ENSAMBLADO (mecha rápida + conectores) y VOD estables (~4.800 a 5.150 m/s) y vibraciones bajas (1,37 a 5,92 mm/s), destacando su eficacia en control de vibraciones. Sin embargo, el ruido sigue alto (168 a 185 dB), lo que requiere complementar con medidas de mitigación acústica. La consistencia en Evelyn Norte (ej. ensayo 10: 1,37 mm/s) respalda su uso en frentes sensibles a vibraciones.

TABLA 7
Resultados de la combinación de explosivos 8

Nro. ensayo	Combinación de explosivo	Fecha de monitoreo	Nombre del Frente de Trabajo	Cantidad de barrenos (unidades)	Kg explosivo /barreo	Cantidad Total de explosivo utilizado (kg)	Distancia de monitoreo (m)	VOD (m/s)	Vibraciones (mm/s) Resultante	Ruido (dB)
10	8	19/10/2022	Evelyn Norte	31	0,692	21,44	120	4.820	1,37	177
11	8	20/10/2022	Cortavetas	34	0,804	27,35	150	4.950	1,60	183
12	8	21/10/2022	Evelyn Norte	35	0,661	23,15	120	5.120	2,82	182
13 (**)	8	22/10/2022	Evelyn Norte	35	0,661	23,15	120	4.899	1,57	174
14 (**)	8	23/10/2022	Cortavetas	32	0,783	25,04	150	5.040	3,03	185
15 (**)	8	24/10/2022	Evelyn Norte	25	0,594	14,84	120	4.860	3,36	168
16 (**)	8	25/10/2022	Cortavetas	29	0,587	17,03	150	5.150	5,92	173

(**): Sistema de iniciación del explosivo tipo ENSAMBLADO que consiste en utilizar mecha rápida de ignición (Igniter cord), más conectores, mecha lenta y fulminante.

EXPLOCEN C.A. (2022)

La Figura 1, muestra que las configuraciones con sistema ensamblado Combinación 8 y Combinación 3 registran los mejores índices de desempeño (75-95%), caracterizándose por bajas vibraciones (1,37-5,92 mm/s) y VOD estables (4.820-5.150 m/s), mientras que la Combinación 2 con sistema convencional muestra el peor desempeño (25-65%) debido a vibraciones críticas de hasta 31,6 mm/s, identificando claramente las configuraciones óptimas para maximizar eficiencia y minimizar impactos operativos.

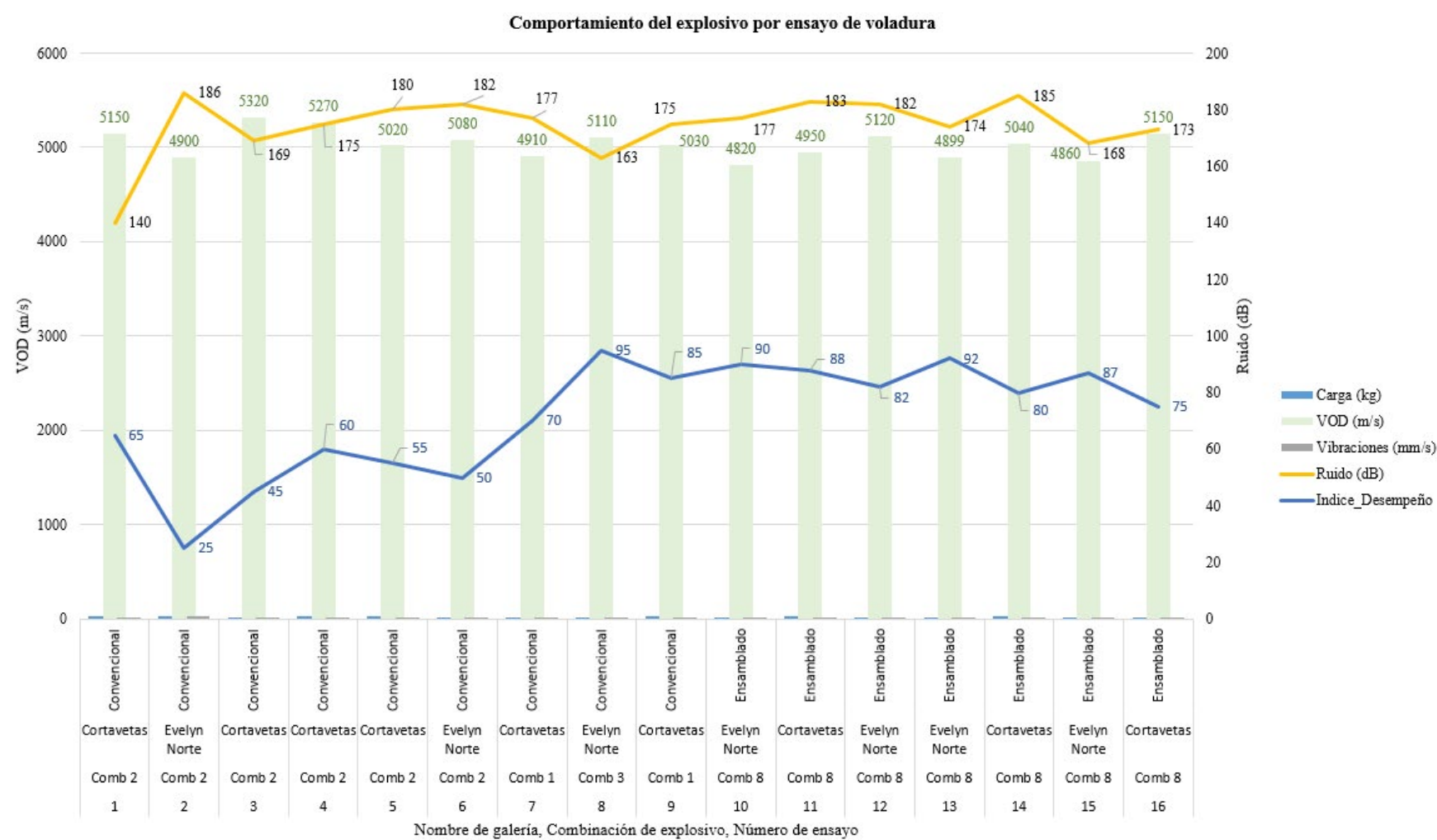


FIGURA 1
Comportamiento del explosivo por ensayo de voladura

DISCUSIÓN:

El análisis demuestra que la elección del sistema de iniciación y el patrón de carga del explosivo incide directamente en el desempeño de la voladura. El sistema ensamblado reduce vibraciones hasta en 47,11% en secciones grandes (10,25 m²), pero incrementa el ruido en 4,31%, mientras que el sistema convencional mejora la VOD en (+1,71%) y controla mejor las vibraciones (-5,37%) en estas áreas. El ANFO destaca en secciones pequeñas (4,84 m²), reduciendo vibraciones en 92,9% y ruido en 88,59% frente a las emulsiones, aunque su eficacia depende de la combinación con otros explosivos. Es decir, al duplicar la sección se mejora la VOD en ambos sistemas, pero el ensamblado eleva drásticamente las vibraciones (+55,13%), limitando su uso en entornos sensibles. A mayor detalle se tiene que:

1. Sistema de iniciación del explosivo:

- En la sección de 4,84 m², en el sistema ensamblado la VOD disminuye en 2,53%; el promedio de las vibraciones disminuye en 24,58% y el promedio del ruido se reduce en 3,93%.
- En la sección de 10,25 m², en el sistema ensamblado la VOD aumenta en 0,04%; el promedio de las vibraciones disminuye en 47,11% y el promedio del ruido aumenta en 4,31%.

2. Patrón de carga (cebo, carga de fondo y carga de columna):

- En la sección de 4,84 m², en el sistema convencional, al comparar la combinación 2 (emulsión 7" + nitrato) con la combinación 3 (ANFO + nitrato); el ANFO aumenta la VOD en 1,77%, disminuye la vibración en 92,90%, y disminuye el ruido en 88,59%.
- En la sección de 4,84 m², en el sistema convencional, al comparar la combinación 3 (ANFO + nitrato) con la combinación 4 (ANFO + emulsión 6"); el ANFO aumenta la VOD en 0,20%, aumenta la vibración en 24,58%, y aumenta el ruido en 9,19%.
- En la sección de 10,25 m², en el sistema convencional, al comparar la combinación 2 (emulsión 7" + nitrato) con la combinación 1 (emulsión 6" + nitrato); la emulsión 6" disminuye la VOD en 4,24%, disminuye la vibración en 48,97%, y aumenta el ruido en 5,68%.
- En la sección de 10,25 m², en el sistema convencional, al comparar la combinación 1 (emulsión 6" + nitrato) con la combinación 4 (emulsión 6" + ANFO); el ANFO disminuye la VOD en 0,40%, disminuye la vibración en 25,04%, y aumenta el ruido en 3,83%.

3. Análisis al duplicar la sección de perforación de 4,84 m² a 10,25 m²

- En la sección de 10,25 m² se utilizaron 37 barrenos en comparación con la sección de 4,84 m² con 32 barrenos; lo que representa un aumento del 13,51%.
- En el sistema de iniciación convencional, en la sección 10,25 m²: el promedio de VOD se incrementa en 1,71%, el promedio de la vibración disminuye en 5,37% y el promedio del ruido se reduce en 3,77%.
- En el sistema de iniciación ensamblado, en la sección 10,25 m²: el promedio de VOD se incrementa en 4,23%, el promedio de la vibración aumenta en 55,13% y el promedio del ruido incrementa en 4,47%.

Estos datos, se sustentan en los estudios realizados por los autores mencionados en el presente artículo, desde los literales *Introducción y Materiales y Métodos*, además por investigaciones como:

(Biagetti *et al.*, 2022), estudio relacionado a vibraciones y sistemas de iniciación, donde se utiliza redes neuronales para predecir vibraciones por voladuras, mostrando que sistemas secuenciales pueden reducir vibraciones hasta 48%. Incluye datos experimentales de minería subterránea.

(Hossain Khan *et al.*, 2025), indica que los sistemas de iniciación secuencial (25-75 ms) reducen vibraciones hasta 6,636 mm/s, confirmando tu observación del 47,11% de reducción con sistemas ensamblados. Los autores documentan que la combinación ANFO-emulsión genera vibraciones significativamente menores, sustentando tu hallazgo del 92,9% de reducción con ANFO. La investigación también corrobora el efecto de confinamiento geométrico que mencionas, mostrando que mayores secciones excavadas incrementan vibraciones por reducción de restricción lateral. Todos los valores medidos (0,315-6,636 mm/s) se mantienen dentro de los límites seguros de normas USBM y DIN 4150, demostrando la efectividad de diseños optimizados para minimizar impactos ambientales.

Además, los resultados de este estudio se contextualizan con los umbrales de seguridad de (Pinto Morales y Fuentes Fuentes, 2022, pp. 316-330), quienes establecieron valores de PPV críticos en 100 mm/s para revestimiento intacto y 25-50 mm/s para revestimiento agrietado, registrando 2.44 mm/s a 80 m de distancia. Mientras su investigación se centra en el control estructural, este estudio profundiza en las causas de la vibración, cuantificando el efecto de sistemas de iniciación (convencional vs. ensamblado) y tipos de explosivo sobre la PPV, VOD y ruido en secciones de 4,84 m² y 10,25 m². La integración de ambos enfoques control de daños y optimización operativa proporciona una visión holística para el diseño de voladuras subterráneas seguras y eficientes.

CONCLUSIONES

Utilizando el sistema de iniciación convencional se observa que en la sección 10,25 m²: La VOD aumenta en 1,71% indicando una ligera mejora en la propagación de la onda explosiva; las vibraciones disminuyen en 5,37% lo que sugiere una mayor eficiencia en el control de las vibraciones y el ruido se reduce en 3,77% mostrando un mejor control acústico.

Utilizando el sistema de iniciación ensamblado se observa que en la sección 10,25 m²: La VOD aumenta en 4,23%, lo que indica una mayor liberación de energía y posible mejora en la fragmentación de la roca; las vibraciones incrementan en 55,13% con posibles riesgos para la infraestructura cercana a la voladura y el ruido aumenta en 4,47% señalando un mayor impacto sonoro.

RECOMENDACIONES

El sistema convencional puede ser preferido para entornos donde el control de vibraciones y ruido es crítico.

El sistema ensamblado puede ser útil donde se necesita mayor eficiencia en la fragmentación, pero debe gestionarse cuidadosamente para reducir las vibraciones y el ruido.

Se requiere monitoreo continuo de las vibraciones y ruido para ajustar parámetros en tiempo real y minimizar impactos negativos.

Agradecimientos

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

Financiamiento

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”.

Contribuciones de los autores

Cristian Andrés Zúñiga Arrobo: conceptualización, investigación, metodología, redacción - borrador original.

Cynthia Analí Rojas Villacís: conceptualización, investigación, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.

Cecilia Dayana Rosero Padilla: investigación, redacción – borrador original.

Luis Guillermo Fernández Suárez: análisis formal, visualización.

Juan Pablo Idrovo Palomeque: metodología, recursos.

Cesión de derechos y declaración de conflicto de intereses

La revista FIGEMPA: Investigación y Desarrollo conserva los derechos patrimoniales (copyright) de la obra publicada, al mismo tiempo que promueve y permite su reutilización. La obra se publica en edición electrónica bajo la licencia Creative Commons CC-BY 4.0, que permite a los usuarios compartir, copiar y redistribuir el contenido, siempre que se dé el debido reconocimiento a los autores. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es_ES).

Los autores declaran haber respetado los principios éticos de investigación y estar libre de cualquier conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- Adeoluwa Olajesu, O., Noa Monjes, R. y Quevedo Sotolongo, G. (2017) "Caracterización estructural del macizo rocoso de la mina subterránea Oro Descanso", *Minería & Geología*, 33(4), pp. 464-476. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/mg/v33n4/mg07417.pdf>
- Akbay, D. y Erkinçioğlu, G. (2023) "Suggesting conversion factor coefficients for estimating different types of schmidt hammer rebound hardness values". *Journal of Engineering Sciences and Design*, 11(2), pp. 719-728. DOI: 10.21923/jesd.1177233
- ARCCENER (2020) *Reglamento de Seguridad y Salud en el Trabajo en el Ámbito Minero*. Quito: Directorio de la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables. Disponible en: <https://www.ambienteenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/10/4.-Resoluci%C3%B3n-Nro.-ARCERNR-013-2020-signed-signed.pdf>
- Biagetti S, Alcaina-Mateos J, Ruiz-Giralt A, Lancelotti C, Groenewald P, et al. (2022) "Correction: Identifying anthropogenic features at Seoke (Botswana) using pXRF: Expanding the record of southern African Stone Walled Sites", *PLOS ONE*, 17(5). DOI: 10.1371/journal.pone.0250776
- Bieniawski, Z. T. (1989) *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. USA: John Wiley & Sons. Disponible en: https://iem.ca/pdf/resources/Engineering%20Rock%20Mass%20Classifications_%20A%20Complete%20Manual%20for%20Engineers%20and%20Geologists%20in%20Mining,%20Civil,%20and%20Petroleum%20Engineering.pdf
- Burbano Morillo, D. S., Rivadeneira Gallardo, A. M., Cerón Uquillas, A. A. y 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), pp. 1-14. DOI: 10.29166/revfig.v12i2.3054
- Cardu, M., Godio, A., Oggeri, C. y Seccatore, J. (2022) "The influence of rock mass fracturing on splitting and contour blasts", *Geomechanics and Geoengineering*, 17(3), pp. 822-833. DOI: 10.1080/17486025.2021.1890234
- Cardu, M. y Seccatore, J. (2016) "Quantifying the difficulty of tunnelling by drilling and blasting", *Tunnelling and underground space technology*, 60, pp. 178-182. DOI: 10.1016/j.tust.2016.08.010
- Carrión Mero, P. et al. (2019) "Geomechanical Characterization and analysis of the effects of rock massif in Zaruma city, Ecuador", *Proceedings of the 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*. Montego Bay, 24-26 julio 2019. DOI: 10.18687/LACCEI2019.1.1.362
- Correa Arroyave, Á. y Rueda Fonseca, J. E. (2023) "RMR y tipo de explosivo: incidencia en las voladuras subterráneas", *BISTURA*, 19(1), pp. 41-50. DOI: 10.24054/bistura.v19i1.959
- Couceiro, P. y López Cano, M. (2018) "La Voladura como Estrategia de Optimización - Un Método Simplificado", *XIV Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales*. Sevilla, 10- 13 abril 2018. España. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/329896878_La_Voladura_como_Estrategia_de_Optimizacion_-_Un_Metodo_Simplificado
- EXPLOCEN C.A. (2022) *Ficha Técnica: Emulsiones 5000X / ANFO / Estopin / Mecha lenta / Fulminante Nro. 8 / Cordón detonante*. Disponible en: <https://www.explocen.com.ec/> [Consultado 20-01-2023].
- EXSA S.A. (2020) *Manual Practico de Voladura*. 5ª ed. Perú: EXSA. Disponible en: <https://online.fliphtml5.com/hqjn/rypz/#p=1>
- Gamarra Castro, L. C. y Romero Vásquez, M. C. (2024) "Pérdida auditiva en personal de trabajo en empresas contratistas de mineras peruanas. Años 2018 y 2019", *Revista cubana de salud y trabajo*, 25(2). Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rcst/v25n2/1991-9395-rcst-25-02-e405.pdf>
- Hossain Khan, M. et al. (2025) "Ground vibration effect evaluation due to blasting operations", *Heliyon*, 11(2). DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e41759
- Mejía Flores, M. A., Cuesta, G. y Cabrera Barrera, K. F. (2021) "Evaluación de las metodologías holmberg y konya en la mina grumintor de una malla de perforación y voladura", *Conciencia Digital*, 4(3.1), pp. 207-226. DOI: 10.33262/concienciadigital.v4i3.1.1824
- Monsalve, J. E., Cardona Arbeláez, G., Monsalve, J. J. y Georghe, G. C. (2020) *Decálogo para la Prevención de Accidentes por Causas Geomecánicas en Excavaciones Mineras*. Colombia: Asociación de Profesionales del Sector Minero de Colombia, Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia y Agencia Nacional de Minería. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/349942966_Decalogo_para_la_Prevencion_de_Accidentes_por_Causas_Geomecanicas_en_Excavaciones_Mineras
- Muñoz Beroiza, M. J. (2019) *Avance y Desarrollo de Galerías*. Tesis de pregrado. Universidad Andres Bello. Disponible en: <https://repositorio.unab.cl/server/api/core/bitstreams/6e19d373-bd1b-44e6-b63e-b7ce90dedc2e/content#page=54yzoom=100,109,94>
- Ordoñez Guaycha, C. A., Carranco López, J. A., Bustos Pulluquitin, S. P. y Toalombo Vargas, V. M. (2023) "Estudio sobre la afectación del ruido en la minería, una revisión sistemática de las principales afectaciones que presenta para la salud de los trabajadores", *Tesla*, 3(2), DOI: 10.55204/trc.v3i2.e251
- Pinto Morales, L. H. y Fuentes Fuentes, M. C. (2022) "Vibraciones generadas por voladuras en obras subterráneas. Casos de estudio en Colombia", *Minería y Geología*, 38(4), pp. 316-330. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/2235/223578232002/html/>
- Poma, M., Quispe, G., Mamani-Macedo, N., Zapata, G., Raymundo-Ibañez, C., Dominguez, F. (2020). "Drilling-and-Blasting Mesh Design for Underground Mining Using the Holmberg Method". En: Ahram, T., Taiar, R., Gremeaux-Bader, V., Aminian, K. (eds). *Human Interaction, Emerging Technologies and Future Applications II*. IHET 2020. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-44267-5_103

- Seccatore, J., Gonzalez, P. y Herrera, M. (2020) "Peculiarities of drilling and blasting in underground small-scale mines". *Revista Internacional de Ingeniería*, 73(3), pp. 387-394. DOI: 10.1590/0370-44672019730167
- Silva, J., Worsey, T. y Lusk, B. (2019) "Practical assessment of rock damage due to blasting", *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(3), pp. 379-385. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.11.003
- Widodo, S., Anwar, H. y Syafitri, N. A. (2019) "Comparative analysis of ANFO and emulsion application on overbreak and underbreak at blasting development activity in underground Deep Mill Level Zone (DMLZ) PT Freeport Indonesia", *The International Conference on Geoscience*. Makassar, 1-2 noviembre 2018. Indonesia: IOP. DOI: 10.1088/1755-1315/279/1/012001
- Zavala Serrano, C. J. (2014) *Diseño de excavación de la galería principal de acceso a la mina "Reina del Cisne"*. Trabajo de Grado. Universidad Central del Ecuador. Disponible en: <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/adb24714-82e0-45f4-b6d4-464c5645a14f>
- Zúñiga Arrobo, C. A. y Rojas Villacís, C. A. (2020) "Análisis de costos operativos en pequeña minería y minería artesanal en Nambija", *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 10(2), pp. 50-60. DOI: 10.29166/revfig.v1i2.2568
- Zúñiga Arrobo, C. A. et al. (2024) "Velocidad de detonación del explosivo, vibración y ruido en pequeña minería subterránea, Zaruma – Ecuador". *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 17(1). Disponible en: <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/view/4634/7383>