

**Cesar Alexander Guerra Vasco<sup>1</sup>, Hilder Manuel Altamirano Cueva<sup>2</sup>, Christian Villalobos Nuñez<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Panamerican Silver Perú, La Arena, Huamachuco, Perú ([cesar.guerra@panamericansilver.com](mailto:cesar.guerra@panamericansilver.com))

<sup>2</sup> Panamerican Silver Perú, La Arena, Huamachuco, Perú ([hilder.altamirano@panamericansilver.com](mailto:hilder.altamirano@panamericansilver.com))

<sup>3</sup> Panamerican Silver Perú, La Arena, Huamachuco, Perú ([cvillalobos@panamericansilver.com](mailto:cvillalobos@panamericansilver.com))

## RESUMEN

En un contexto geográfico de una operación minera que tiene a sus comunidades aledañas cercanas a la operación por lo que la percepción de nuestras operaciones unitarias toma un enfoque social significativo. En el proceso de voladura, las detonaciones de cargas explosivas liberan una gran cantidad de energía, en muchos casos, la cercanía de las poblaciones a las operaciones mineras origina problemas socio ambientales debido a posibles impactos negativos o de percepción humana, Los efectos negativos se manifiestan como resultado de algunos factores como: vibración excesiva del terreno, sobre presión de aire (onda aérea) y las proyecciones de roca es necesario encontrar un equilibrio que permita obtener una fragmentación adecuada para la operación, controlando el daño, efectos y malestar de las comunidades cercanas. Los diseños e implementación de las voladuras en campo deben enfocarse en utilizar la energía del explosivo en fragmentar y desplazar la masa rocosa, un diseño inadecuado produciría que parte de esa energía disponible genere impactos no deseados, para eso se han implementado diversas metodologías a fin de minimizar estos efectos producidos por las voladuras, implementar alternativas innovadoras dentro del proceso y elaborar modelos vibratoriales con respecto a las comunidades cercanas, teniendo como base los criterios de daño y percepción humana adoptados por la unidad, con un enfoque social y eficiencia operativa la metodología empleada para gestionar y minimizar los efectos producidos por las voladuras enfocados en la percepción humana es recopilar información para detectar los factores más significativos e implementar metodologías, alternativas y controles mediante modelos predictivos, así mismo contar con modelos predictivos de vibraciones en campo lejano, reducción de: nivel de vibraciones, polución, onda área y percepción humana, conllevan a un buen ambiente social y evita paralizaciones sociales en la unidad minera, entre el 2019 y 2022 no se tuvieron paralizaciones por reclamos por voladuras; teniendo el desarrollo de una operación sostenible y amigable con el medio ambiente.

## 1. Introducción

La minería en el Perú es una actividad fundamental para el desarrollo del país en diversos aspectos, durante varios años el Perú viene siendo un país atractivo para inversiones mineras de diversas escalas esto debido al potencial geológico existente y la estratégica ubicación geográfica del país (Castillo & Roa, 2021).

Siendo así que el sector minero peruano tiene un papel fundamental en el desarrollo económico y social de los pobladores, especialmente de las comunidades aledañas y zonas de influencia directa del desarrollo de los proyectos establecidos, puesto que las comunidades pueden beneficiarse directamente con oportunidades laborales, labores de desarrollo económico y social dado por los diversos convenios que se efectúan y acuerdan para poder ejecutar el desarrollo del mismo, sin embargo ante una ejecución inadecuada de los procesos de minado e incumplimiento de normativas como los límites máximos permisibles, el desarrollo propio de las actividades podrían fungir como un generador de impactos en agentes como el agua, el aire, el suelo o la flora y fauna de las poblaciones aledañas, dada esa consideración es que el desarrollo de cualquier proyecto minero centra una atención especial en diversos aspectos y parámetros que convergen desde las etapas iniciales de exploración hasta las etapas que permiten iniciar el proceso de explotación, puesto que la sostenibilidad se está convirtiendo en una dimensión central en el campo de los proyectos de gestión, aumentando su importancia en los últimos años (Kivila, Martinsuo, & Vuorinen, 2017; Yuan, 2017)

Uno de los aspectos fundamentales que permiten el desarrollo exitoso de un proyecto minero, es la relación que mantiene la empresa con las comunidades del área de influencia del proyecto minero, esta relación se define desde la etapa de concepción del proyecto, se debe fortalecer durante desarrollo de este y sostenerse hasta el cierre de la operación, la construcción de las buenas relaciones de empresa y comunidad, se enmarcan bajo el concepto de la responsabilidad social

empresarial, que se puede describir como los compromisos empresariales que contribuyen al desarrollo económico sostenible, con los colaboradores y sus familias, las comunidades locales y la sociedad en general (Rodríguez & Méndez 2018).

Sin embargo y con mayor presencia en los últimos años, se han tenido casos donde las relaciones de la empresa con las comunidades no vienen siendo las más óptimas, esto puede darse por la negativa de las comunidades para el desarrollo de algunos proyectos importantes de gran envergadura, oponiéndose así al inicio y ejecución de los mismos, pero por otro punto se tienen los casos que durante el desarrollo de los proyectos mineros, las comunidades de influencia presentan reclamos, efectúan bloqueos y hasta paralizaciones que generan conflictos sociales, los cuáles predominantemente son del tipo medioambiental relacionados al desarrollo de la actividad minera (Mendoza & Celestino, 2019), la presencia de estos conflictos han afectado del desarrollo normal de diversos proyectos mineros.

Es así que uno de los puntos clave que pueden generar reclamos sociales y/o desencadenar conflictos socioambientales, está dado por la percepción de las comunidades respecto al desarrollo de las actividades rutinarias de las empresas, siendo uno de los procesos que puede generar mayor impacto en la percepción de las comunidades, el proceso de voladura en minería superficial, esto debido a la alta cantidad de energía utilizada durante el proceso mismo, que a su vez durante cada evento realizado será un generador de polvo, vibraciones, sobrepresión de aire (ondas de aire), ruido y eyección de material.

Siendo así que el proceso de voladura se encuentra normado y regulado en diversas legislaciones y normativas nacionales, por lo que durante el desarrollo del proceso de voladura se deben tener consideraciones principales en el cumplimiento de los límites máximos permisibles que permiten desarrollar una adecuada disipación del polvo generado por el proceso, asimismo se deben considerar las normativas que regulan los límites vibracionales generados en campo lejano que aseguren evitar cualquier potencial de daño estructural en zonas cercanas a las operaciones mineras.

Por lo que las empresas deben dedicar esfuerzos considerables adicionales en desarrollo del proceso de voladura que permita la aceptación y confianza de las comunidades, puesto que si bien se pueden cumplir

con cada una de las normativas establecidas, esto no asegura que la percepción de las comunidades respecto al proceso sea la más óptima, siendo así que debemos enfocar una atención especial a los controles y el plan estratégico para el desarrollo de las voladuras de mayor criticidad que se ejecutan en los límites espaciales del tajo tanto en los niveles superiores como en las zonas más cercanas a las áreas que contengan estructuras pertenecientes a las comunidades.

## 2. Objetivos

- Gestionar la percepción de voladuras con enfoque social y su eficiencia operativa con las comunidades aledañas.
- Tener una continuidad operativa con enfoque social ambiental dentro de una operación minera.
- Mantener una buena armonía en las voladuras de una operación y sus comunidades.

## 3. Desarrollo

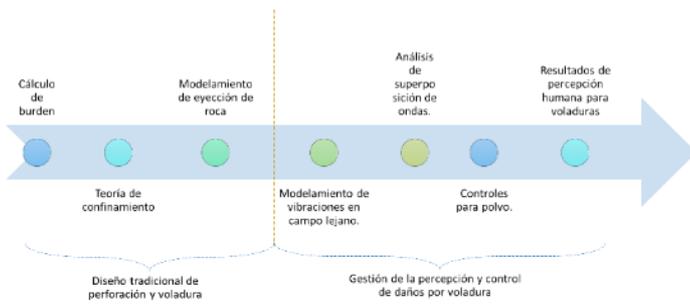
En mina La Arena se vienen desarrollando y ejecutando diferentes controles con el objetivo de mantener adecuadamente el equilibrio entre la percepción social y la continuidad de las labores de las comunidades del entorno con los resultados adecuados de voladura para la consecución de los objetivos operativos planteados.

Los principales factores de la voladura que generan un efecto en la población están relacionados a:

- Vibración del terreno.
- El efecto de la Onda de Sobrepresión (Onda Aérea).
- Proyección de rocas.
- Generación de polvo.
- Gases Nitrosos.

Los bancos en la mina La Arena están conformados por Areniscas silicificadas fracturadas e intercalaciones con limolitas (zona relativamente con una dureza suave a moderada), el rango aproximado en términos de dureza de la roca en promedio un R4 (roca buena) de 50 a 100 Mpa y como RMR 30 a 50.

**Gráfico 1:** Secuencia del diseño de parámetros de voladura.



Fuente: Elaboración propia del autor

A continuación, se describen los diferentes aspectos a considerar para nuestros diseños de voladuras:

### 3.1 Modelamiento de Vibraciones

El efecto de las vibraciones por voladura, desde el enfoque dado por la percepción de las personas o percepción humana, es un parámetro complejo de estimar o calcular, ya que la percepción de las personas no está sujeta netamente a las vibraciones generadas según parámetros resultantes de la onda. La sensación de alteración del confort puede percibirse a diferentes magnitudes o niveles, no obstante, existen criterios desarrollados en estudios de Percepción Humana que son utilizados para la evaluar la percepción de las personas a las vibraciones del terreno pueden usarse para evaluar las posibles respuestas de las personas a las vibraciones del terreno, entre los estudios más conocidos resaltan los desarrollados por USBM (Goldman) y el propuesto por Steffens (1974). Según Goldman los niveles de vibración detectables por el hombre, considerando la velocidad de la vibración y sus respectivas frecuencias, pueden clasificarse en tres niveles:

Perceptibles, Molesto o Incomodos y Peligrosos o Intolerables, la clasificación es para cada tipo de onda (longitudinal, vertical y transversal). Un procedimiento analítico de estimación de Percepción Humana es el desarrollado por Steffens, el cálculo se basa en la estimación del Parámetro K.

$$K = \frac{0.005 * A * f^2}{(100 + f^2)^{1/2}} = \frac{0.8 * v * f}{(100 + f^2)^{1/2}} = \frac{0.125 * a}{(100 + f^2)^{1/2}}$$

Donde: f: Frecuencia (Hz), A: Amplitud máxima (mm) v: Velocidad de Partícula (mm/s) a: Aceleración (mm/s<sup>2</sup>)

La tabla muestra los posibles valores de K y su asociación con los niveles de percepción.

**Cuadro 1.** Niveles de percepción humana desarrollado por Steffens.

Valor K	Niveles de Percepción Humana
---------	------------------------------

Menor a 0.1	Imperceptible
0.1	Comienza a percibirse
0.25	Escasamente perceptible
0.63	Perceptible
1.6	Fácilmente perceptible
4	Fuertemente perceptible
10	Muy fuertemente detectable

Fuente :

#### 3.1.1. Modelamiento de vibraciones

Existen varios modelos experimentales que representan la Velocidad Pico de Partícula, las variables que intervienen son: la carga media efectiva y la distancia a la cual se registra la voladura. Para el estudio de modelamiento de vibraciones utilizaron los modelos de Devine, Hendron y Langefors. El modelo final propuesto para el cálculo de la Velocidad Pico de Partícula es aquel que presenta mayor ajuste con los datos experimentales de campo.

MODELO DE DEVINE

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

MODELO DE HENDRON

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

MODELO DE LANGEFORS

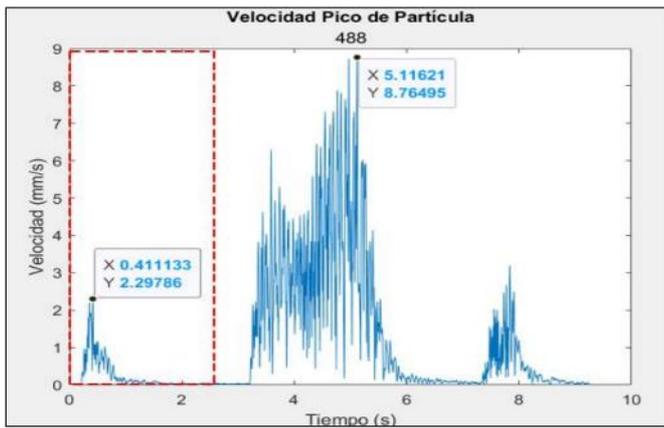
$$PPV = K \left( \frac{D^{2/3}}{Q_i} \right)^\alpha$$

Donde:

PPV es la velocidad pico de partícula (mm/s), D es la distancia horizontal (m), Qi es el peso de explosivo por retardo (Kg), K es el factor de velocidad y  $\alpha$  es el factor de decaimiento.

Actualmente se cuenta con el Estudio de modelamiento por Vibraciones y control de daño en comunidades cercanas realizado por empresa tercera especializada, el cual está orientado a minimizar el efecto producido por la sumatoria de ondas de voladura (vibraciones), permite determinar la carga máxima que debería tener un taladro al ser detonado (kilogramos), el tiempo adecuado de retardo (detonadores electrónicos).

**Gráfico 2.** Resultado de modelamiento de velocidad pico partícula – La Arena.



Fuente: Estudio de Modelamiento de vibraciones – Análisis de Onda Elemental (La Arena S.A.)

**Cuadro 2.** Modelo predictivo de vibraciones por área de influencia – La Arena

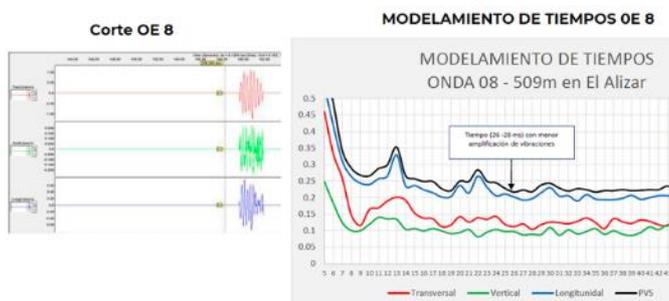
Zona	DS	k	$\alpha$	R2
La Ramada	$D^{2/3}/Q_i$	0.193	-2.34	89.50%
La Arena	$D^{2/3}/Q_i$	1.73	-1.06	93.10%
El Alizar	$D^{2/3}/Q_i$	0.255	-2.59	95.00%

Fuente: Estudio de modelamiento por vibraciones y control de daño en comunidades cercanas – La Arena S.A. (Miners, 2021).

### 3.2 Superposición de ondas

Para la reducción del nivel de vibraciones generado por las voladuras se tomó como línea base el trabajo de análisis de frecuencias realizado (onda elemental) para comunidades.

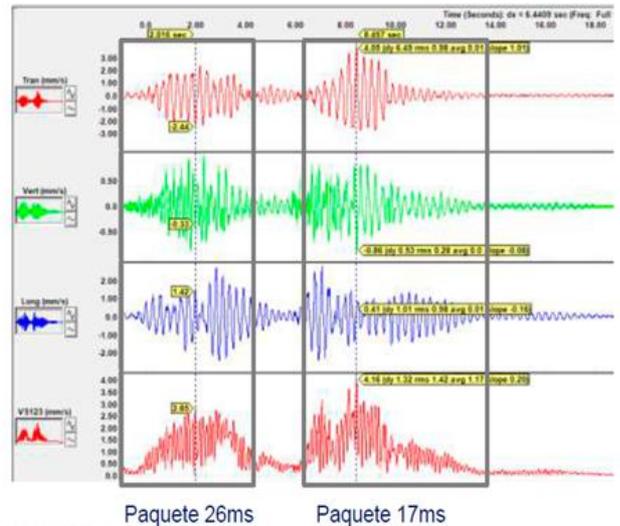
**Gráfico 3:** Secuencia del diseño de parámetros de voladura.



Fuente: Resultados de geófonos instalados en La Arena.

Con el análisis de frecuencias se logró reducir el nivel de vibraciones en 31.5 en los puntos de interés%.

**Gráfico 4:** Comparativo de vibraciones en función a los tiempos de retardo entre taladros



Fuente: Registros de geófonos – La Arena

### 3.3. Modelamiento de proyección de rocas

Los “flyrocks” son fragmentos de roca violentamente proyectados por la acción de gases que se generan después de detonar un explosivo confinado, en un cierto volumen de roca. Los “flyrocks” constituyen un riesgo totalmente inherente a la práctica de tronadura y representa un peligro muy significativo para la seguridad de las personas, como también para vehículos, equipos e instalaciones en general.

La teoría de confinamiento se baja en el concepto de la profundidad de entierro de una carga, se definió durante investigaciones del efecto cráter de las cargas de explosivo enterradas, como lo descrito por Chiappetta:

Los valores obtenidos en la Arena, se describen a continuación:

$$SD \text{ (rango optimo)} = 1.16 \frac{m}{Kg^{1/3}}$$

$$\text{Variación de Taco} = 2.20 \text{ m} - 3.70 \text{ m}$$

$$\text{Factor de potencia} = 0.211 - 0.273 \text{ kg/Ton}$$

$$SD = 1.80 \frac{m}{Kg^{1/3}}$$

$$\text{Burden} = 3.22 \text{ m}$$

$$\text{Espaciamiento} = 3.70 \text{ m}$$

$$\text{Altua de taco} = 5.00 \text{ m}$$

$$\text{Factor de carga Teorico} = 0.257 \text{ Kg/Ton}$$

Dentro de los parámetros principales establecidos de voladura, se debe tener en cuenta la calidad del material para utilizarse como taco con su respectiva homogeneidad con el fin de asegurar la adecuada retención de material y asimismo nos permitirá un adecuado modelamiento de la proyección de rocas.

El Taco es la longitud en la parte superior del taladro, rellena con material inerte y tiene por misión confinar y

“retener la energía” en el medio rocoso, para permitir que se desarrolle por completo el proceso de fragmentación de la roca.

Las características de la gravilla:

Tamaño: entre 1 a 2 Pulgadas – Chiapetta

Tamaño:  $\varnothing/10$  o  $\varnothing/15$  – McKenzie.

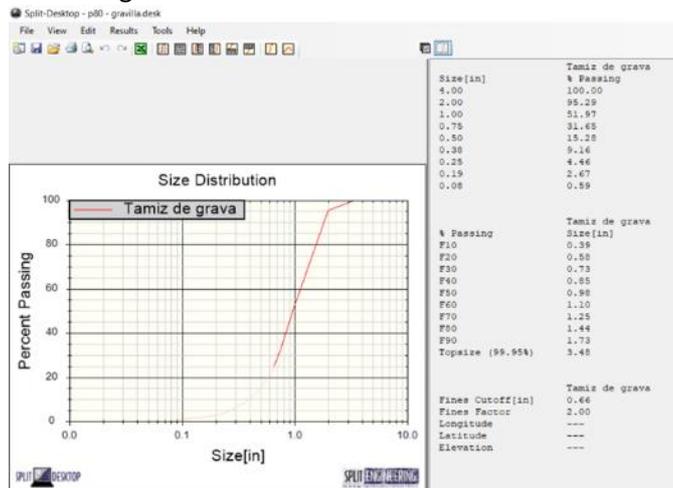
**Gráfico 5:** Pila de material zarandeado utilizado para grava.



Fuente: Unidad Minera La Arena S.A.

Dentro de la La Arena, se considera necesario el modelamiento y revisión de la pila de material de grava generado por el zarandeado y selectividad de material destinado al tapado de los taladros.

**Gráfico 6:** Evaluación de tamaño de distribución del tamiz de grava.



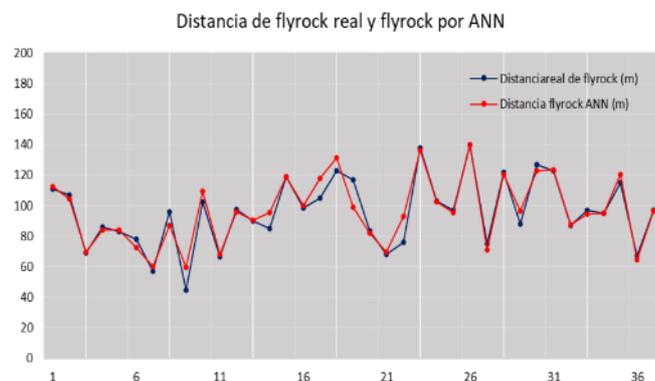
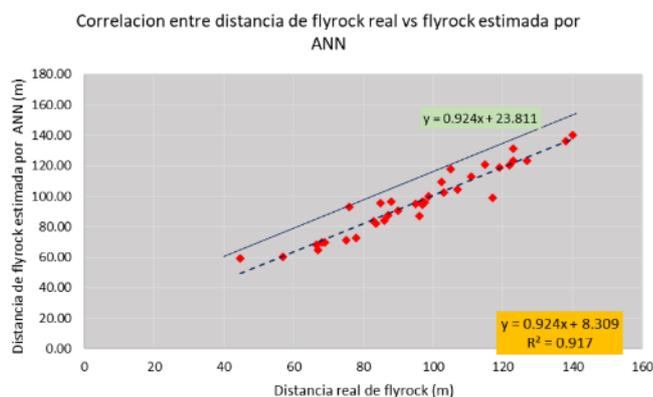
Fuente: Software Split Desktop

### 3.1.1 Modelamiento de proyección de rocas por redes neuronales

Para evaluar la distancia máxima de flyrock en la operación, se efectuaron diferentes pruebas con diversos modelos tradicionales en comparativo con los resultados evaluados en campo, los cuáles no mantenían una correlación según los modelos expresados en la bibliografía tradicional.

Por lo que se optó por desarrollar un modelo propio basado en el modelamiento por redes neuronales según los parámetros definidos como más relevantes que participan en la proyección de rocas.

**Gráfico 7:** Correlación de flyrock con modelo estimado por ANN.



Fuente: Elaboración propia del autor.

El modelo realizado permite estimar adecuadamente la proyección de flyrock según los parámetros seteados dentro de la Unidad con un factor de seguridad óptimo se definieron los radios de voladura a utilizar para los equipos mineros que son afectados por los eventos de voladura.

**Gráfico 8:** Ejemplo de estimación de proyección de flyrock.



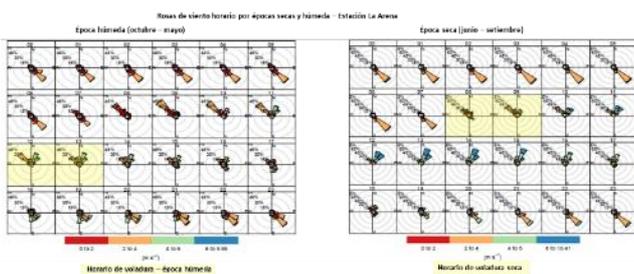
Fuente: Elaboración propia del autor

### 3.4. Control de polvo

La voladura es uno de los procesos más importantes dentro del desarrollo de las labores mineras, pero a su vez es una fuente importante de generación de polvo de manera puntual más no de forma continua, por lo que es necesario desarrollar estrategias que permitan ejecutar una eficiente mitigación de los efectos generados por el proceso mencionado, siendo así que uno de los aspectos más importantes para la toma de decisiones respecto a los controles a utilizar, es la ubicación espacial del proyecto de voladura a ser ejecutado teniendo en consideración la configuración del componente minero y la cercanía de las comunidades y agentes externos.

La voladura se adecúa de acuerdo a la temporada presente dentro de la unidad minera, las cuáles pueden claramente diferenciarse en 02; la época seca o húmeda para lo cual se tienen en cuenta las rosetas de viento dentro del componente minero, para la definición del horario de voladura a ejecutarse.

Gráfico 9: Rosetas de viento – Unidad Minera La Arena



Fuente: Estación de monitoreo – La Arena

Siendo La Arena, un proyecto minero que colinda con varias comunidades las cuáles se encuentran muy cercanas a la operación, y de igual forma con la carretera nacional panamericana lo que implica la interacción con varios agentes externos durante el desarrollo de este proceso lo que requiere una alta exigencia en los controles de voladura a implementar.

Gráfico 10. Plano de interacción de Unidad Minera La Arena y comunidades aledañas.



Fuente: Google Earth.

#### 3.4.1. Riego de mallas y taludes

Uno de los primeros controles que se efectúan dentro de la Unidad Minera es el regado de mallas y taludes de los proyectos de voladura a ejecutarse, este regado se efectúa con las cisternas de agua las cuales tienen implementadas un sistema hidrante a chorro que permite tener un mayor alcance a zonas de difícil acceso.

El riego de mallas y el talud de la cara libre del proyecto a volar, se efectúa mediante el cumplimiento de un procedimiento incorporado en la operación y la previa coordinación con el supervisor responsable de la malla de perforación y voladura.

**Gráfico 2.** Riego de mallas y taludes de cara libre efectuado por cisternas de agua.



Fuente: Unidad Minera La Arena S.A.

### 3.4.2. Uso de cañón nebulizador

El control adicional que se tiene es la utilización de cañones nebulizadores y aspersores de agua, los cuales permiten una mitigación eficiente del polvo generado, la ubicación de estos se da en zonas estratégicas considerando algunas variables relevantes como son la dimensión del proyecto volado, la distancia del proyecto volado hacia las zonas aledañas, la dirección y fuerza del viento.

La utilización de estos se da especialmente en los proyectos que se encuentran en los límites espaciales del tajo, asimismo el tiempo de acción estará condicionado por la dimensión del proyecto volado y los resultados generados post voladura.

**Gráfico 11.** Uso de cañón nebulizador para mitigación de polvo.



Fuente: Unidad Minera La Arena S.A.

### 3.4.3. Tapado de mallas

El tapado de los taladros de las mallas se da en voladuras que representan una criticidad alta por la zona en la cual se desarrolla, ya sea en voladuras que se desarrollen en los bancos superiores del tajo o en el caso de las zonas colindantes con las comunidades más cercanas.

Para el tapado de los taladros se utiliza como material principal la geomembrana que se define como un recubrimiento, membrana o barrera de muy baja permeabilidad usada con cualquier tipo de material relacionado cuya principal aplicación se da para controlar la migración de fluidos en cualquier proyecto, estructura o sistema realizado por el hombre<sup>2</sup>.

Las geo membranas por utilizarse son dispuestas encima de la malla de voladura ya cargada, posteriormente son recubiertas con costales de polietileno llenos del detritus generado en la perforación para poder generar la carga suficiente que efectúe como retenedor de energía, evitando así una alta generación de polvo en el aire, asimismo se evita flyrock.

Los costos requerimientos de geomembrana y necesidad por taladro según la configuración de malla en la Unidad Minera La Arena se da de la siguiente manera:

**Cuadro 3.** Detalle de costos asociados a uso de geomembrana.

Descripción	Cantidad	Und
Rollo	945	m2
Costo de rollo	2,850	US\$
Requerimiento por taladro	23.6	m2
Frecuencia de uso	5	veces
Costo real / m2	0.60	US\$/m2

Fuente: Elaboración propia del autor.

Asimismo, es importante considerar que por las características de un material como es la geomembrana, este permite ser recuperado en casi su totalidad después de la ejecución de cada voladura teniendo un promedio de uso estimado en 05 veces, lo que abarata el costo de esta.

Para la instalación del recubrimiento de geomembrana con la disposición de los sacos se requiere personal de piso para la constante disposición y rápida implementación del control, asimismo se tienen las elaboraciones de los documentos de seguridad como el PETS para la realización de la labor.

La disposición de la flexilona y/o geomembrana se da de la siguiente manera:

- Se debe desdoblar la flexilona en paño completo y ser extendida en una superficie homogénea fuera del proyecto de voladura, cada vértice será utilizado como punto de apoyo para el movimiento de la misma.
- El tendido de la flexilona en la malla de perforación se realizará únicamente cuando el supervisor de la empresa especializada del servicio de voladura autorice ingreso para dar inicio al tendido, esto una vez haya realizado el amarre y pruebas correspondientes en la malla de voladura.
- Para realizar el tendido del paño de flexilona el ingreso a la malla deberá ser por el espacio entre los taladros perforados y cargados (las filas no perforadas en la plataforma) evitando en todo momento pisar o dañar los conectores.
- En todo momento del tendido de la flexilona se debe mantener una distancia hacia la cresta mayor a 1.00 metro.
- La empresa especializada en todo momento deberá encontrarse en el proyecto monitoreando los detonares en caso se produzca algún corte o fuga con el equipo de escaneo correspondiente.
- Una vez culminado el tapado, se deberá colocar sacos con material en los vértices de los paños y en los traslapes de flexilona para evitar que esta se pueda volar con el viento.

Asimismo, para el retiro de la flexilona y/o geomembrana se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- En caso el proyecto de voladura haya esponjado dañando la flexilona o el terreno se encuentre irregular debido al esponjamiento del material volado, la flexilona no se retirará y se dejará en el proyecto.
- En caso se requiera retirar la flexilona no se realizará de forma manual se deberá solicitar al jefe de guardia de operaciones/técnico de operaciones (O2) un equipo para que pueda jalar los paños, esta coordinación la deberá realizar el supervisor de turno encargado.

Al ser una tarea que involucra la presencia de e interacción de varias personas debemos considerar las siguientes restricciones:

- No realizar la actividad si existe presencia de condiciones climatológicas adversas: tormenta eléctrica (alerta roja).
- No dar la espalda a la cresta durante el tendido.
- Mantenerse a una distancia hacia la cresta mayor a 1.00 metro.
- No realizar el tapado / retiro de flexilona si el terreno disparo a generado desniveles en el terreno.

**Gráfico 12.** Malla de voladura tapada con geomembrana y flexilona.



*Fuente: Unidad Minera La Arena S.A*

**Gráfico 13.** Resultados post voladura en malla con tapado de taladros por geomembrana y flexilona.



*Fuente: Unidad Minera La Arena S.A*

### **3.4.3. Gestión Operativa**

La implementación de controles puede ser múltiples tipos, pero debemos considerar que los mismos incurren en costos adicionales para la empresa, por lo que es necesario poder determinar de forma rápida que tipos de controles son los necesarios a utilizarse para la mitigación del polvo según las condiciones y parámetros del proyecto de voladura a ejecutarse, es por ello que dentro de la Unidad Minera La Arena, se elaboró una matriz de decisión que permite categorizar un nivel de atención en la voladura respecto al control de polvo, establecido por los criterios considerados más relevantes dentro de la Unidad con el fin de poder

categorizar el disparo dentro de niveles definidos según control a implementar.

Los proyectos de voladura son catalogados en 04 niveles dependiendo del potencial de generación de polvo perceptible hacia las comunidades y agentes externos, esta categorización está basada en 06 parámetros de diferente jerarquía y exigencia, asimismo los parámetros son diferenciados entre los que son; parámetros controlables directamente o son parámetros no controlables directamente, esto nos permiten definir con mayor claridad el control a implementar basado en la experiencia propia de la Unidad, lo cuál asegurará una correcta mitigación del polvo evitando, reduciendo así la posibilidad de eventos de voladura con un alto potencial de generación de polvo que podría repercutir en una percepción poco positiva por parte de las comunidades aledañas.

Los niveles de control y las implementaciones por nivel se definen de la siguiente manera:

**Cuadro 4.** Niveles de control de voladuras para la mitigación del polvo generado

Nivel	Tipo de Control
Nivel 0	No requiere controles adicionales
Nivel 1	Requiere riego de mallas y taludes
Nivel 2	Requiere uso de cañones nebulizadores
Nivel 3	Requiere tapado de malla

Fuente: Elaboración propia del autor.

Por otro punto los parámetros que son considerados los más relevantes dentro de la Operación para la categorización de la voladura dentro de un nivel de control para mitigación de polvo se muestran a continuación:

**Cuadro 5.** Parámetros preponderantes para categorización de proyecto de voladura como potencial generador de polvo perceptible.

Parámetro	Und	Descripción
Nivel de Banco	m.s.n.m	Nivel de banco dónde se efectuará el disparo de voladura.
Distancia hacia comunidades	km	Distancia desde el taladro más externo hacia la comunidad más cercana

Diseño de carga	kg/t	Cantidad de explosivo por tonelada volada
Tipo de iniciación	tipo	Tipo de iniciación utilizada (no eléctrica o electrónica)
Cantidad de Taladros	#	Número de taladros totales del proyecto de voladura
Presencia de Cara Libre	-	El proyecto cuenta o no con la presencia de cara libre.

Fuente: Elaboración propia del autor.

Para cada parámetro se definió un rango de acción que permite determinar el nivel asignado e implicancia del mismo dentro de la categorización de la criticidad de controles a implementar en la voladura evaluada.

Siendo así la convergencia y evaluación final de los parámetros en conjunto evaluados mediante una matriz de decisión orientada y adaptada a las condiciones reales de la Unidad Minera La Arena.

**Gráfico 14.** Matriz de decisión para definición de controles de mitigación de polvo generados por voladura.

	RIEGO DE MALLAS	USO DE NEBULIZADOR	TAPADO DE MALLAS
	Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2
Altura de Banco (m.s.n.m.)	>3248	3248 - 3308	3308 - 3398
Distancia a comunidades (km)	>10km	6 - 10 km	4 km - 6 km
Diseño de Carga (kg/t)	<0.300	0.300 - 0.350	0.350>0.500
Tipo de iniciación	Electrónica	Pirotécnica	
# Taladros	<200	200 - 300	>300
Cara libre	Con cara libre	Sin cara libre	

No controlable  
Controlable

Fuente: Elaboración propia del autor.

**Gráfico 15.** Tendencia de reclamos por voladuras de las comunidades aledañas a la operación de mina La Arena S.A. periodo 2018 – 2022.



Fuente: área de gestión social mina la Arena S.A.

Como se puede observar en el gráfico 15 los reclamos en el año 2018 son considerables debido a que no se

realizaba una gestión de las voladuras con un enfoque social y eficiencia operativa en La Arena.

#### 4. Conclusiones

- Una adecuada gestión de las voladuras con un enfoque social, hicieron que los reclamos por voladuras por las comunidades aledañas disminuyeran significativamente de tener 15 reclamos en 2018 a pasar a 01 reclamo durante el 2021.
- Se concluye si se tiene una buena gestión de distancia y ubicación de un proyecto de voladura considerando el monitoreo demuestra, con base a estudios de Percepción Humana de Goldman y Steffens, que los niveles alcanzados de vibración son de tipo: ligeramente perceptibles para una distancia de 777 metros en promedio, sin llegar a tener niveles que puedan considerarse molestos. Conociendo que las distancias a las que se encuentran las comunidades (1242 metros en promedio), el efecto de Percepción Humana debe disminuir significativamente ya que se consideró un buen control en la voladura.
- Los valores registrados de la Onda de Aérea a las diferentes distancias (588 metros en promedio), se encuentran por debajo de los niveles y estudios internacionales: Código de Regulaciones Federales USA 2005, ANZEC 1990, Resumen de Regulaciones de Australia (1997). Así mismo que no existe posibilidad de daños importantes en estructuras por este concepto considerando que los valores están por debajo del límite que propone la USBM de 136 dB.
- Mantener una buena armonía en las voladuras de una operación y sus comunidades, considera la utilización de detonadores electrónicos dada la cercanía a las comunidades que se puede encontrar, con la finalidad de evitar el incremento de la carga operante por acoples de taladros debido a la dispersión de los detonadores Pirotécnicos, la separación de proyectos disparados un mismo día no debe ser menor a tres segundos, tiempos menores incrementan la posibilidad de superposición de ondas con lo cual se superaría el límite de 3mm/s de acuerdo a la norma DIN 4150-03 y disparos menores a 700 metros de la vivienda cercana a la mina deben ser ejecutados con los tiempos sugeridos en el estudio, siendo 17 ms el recomendable.

#### Agradecimientos

Van a faltar páginas para agradecer a las personas que se han involucrado en la realización de este trabajo, Agradecimiento especial al equipo profesional y técnico de la U.M. La Arena que han sido un soporte fundamental en la preparación, puesta en marcha y cumplimiento de los objetivos de esta investigación.

#### Referencias

- Castillo, E. y Roa, C., (2021). Defining Geological Maturity: The Effect of Discoveries On Early-Stage Mineral Exploration. *Resources Policy*, 74, 102378.
- Cesar, Saenz, 2019. "Earning a social license to operate in mining: A case study from Peru," *Resources Policy*, Elsevier, vol. 64(C).
- Mendoza L., Celestino J. Determinantes económicos y sociopolíticos de los conflictos socioambientales en el Perú. *Rev. investig. Altoandin.* [online]. 2019, vol.21, n.2, pp.122-138. ISSN 2313-2957.
- Baba S., Mohammad S., Young C., (2021). Managing project sustainability in the extractive industries: Towards a reciprocity framework for community engagement, *International Journal of Project Management*, Volume 39, Issue 8.
- Rodrigues, M., & Mendes, L. (2018). Mapping of the literature on social responsibility in the mining industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 181, 88-101.
- Aenor (2006). En ISO 10318. Geosintéticos. Términos y definiciones
- U. Langefors, B. (1963). *Técnicas Modernas de voladura de rocas*.
- Richard A. Dick, L. R. (1983). *Explosives and Blasting Procedures Manual*. Bureau of Mines.
- Devine J., Richard H., Beek H., Meyer A., Duvall W. (1966). Effect of charge weight on vibration levels from quarry blasting. Report of investigation 6774.
- Ghasemi, E. Sari, M. Ataei, M. (2012). Development of an empirical model for predicting the effects of controllable blasting parameters on fly rock distance in surface mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Turkey
- Steyn, A. (2017). The Benefits of using electronic detonators in both opencast and undergrounds mines. En Pradeep, Singh, Singh, & K. & Roy, *NexGen Technologies for Mining and Fuel Industries (Volume I*

and II) (págs. 291-298). Johannesburg, South Africa: Allied Publishers.

Camargo, P., & Chiappetta, C. (2017). Information systems and sustainable supply chain management towards a more sustainable society: Where we are and where we are going. *International Journal of Information Management*, 241-249.

#### Perfil profesional

Ingeniero de minas titulado y colegiado, cuento con 09 años de experiencia en el área de perforación y voladura en minas metálicas a tajo abierto pertenecientes a gran minería, además cuento con conocimientos prácticos de software minero aplicados al corto y largo plazo. Mi experiencia está orientada hacia la seguridad, optimización de procesos, desarrollando e implementando procedimientos y estándares que permitan la mejora continua y con capacidad para liderar equipos multidisciplinarios, activo en la búsqueda de soluciones técnicas, creativas y productivas.

Nombre del autor: Cesar Alexander Guerra Vasco

Cargo: Ingeniero de Perforación y Voladura.

Empresa: Unidad Minera La Arena – Pan American Silver.

Correo electrónico: [guerravascesar@gmail.com](mailto:guerravascesar@gmail.com)

Teléfono / Celular: (51-1)618-9700/997025632

Dirección: Caserío La Arena, Huamachuco, La Libertad, Perú.

#### Perfil profesional

Profesional Titulado y Colegiado en ingeniería de minas y agroindustrial con más 10 años de experiencia en minería, con experiencia en Gestión de Operación, perforación y voladura a Tajo Abierto, Manejo de Costos, Proyectos de Mejora y Ejecución de Proyectos en el sector Minero, sólidos conocimientos de KPI's operativos en mina, plan de minado a corto y largo plazo, lean manufacturing, MineSight 3D, legislación de seguridad y salud ocupacional, Ambiental, con conocimiento y aplicación de indicadores de rendimiento y comprometido en el cumplimiento de los indicadores asignados y al mejoramiento continuo de los estándares de seguridad, producción y costos, activo en la búsqueda de soluciones técnicas, creativas y productivas.

Nombre del coautor (1) : Hilder Manuel Altamirano Cueva

Cargo: Ingeniero de Perforación y Voladura.

Empresa: Unidad Minera La Arena – Pan American Silver.

Correo electrónico: [manuel\\_cuevax@hotmail.com](mailto:manuel_cuevax@hotmail.com)

Teléfono / Celular: 966731666

Dirección: Caserío La Arena, Huamachuco, La Libertad, Perú.

#### Perfil profesional

Bachiller en Ingeniería de Minas, con experiencia en monitoreo, análisis y ejecución de estudios geotécnicos e hidrogeológicos en minería a cielo abierto.

Me he desempeñado como Ingeniero de Perforación, encargado de supervisar la perforación de pozos de producción de agua designados en el plan de desaguado del tajo. Previamente me he desempeñado como practicante profesional del área de geotecnia en Tahoe Perú La Arena, donde fui un soporte en el desarrollo de los trabajos geotécnicos y en la ejecución del plan de desaguado del tajo.

Soy un profesional destacado por su capacidad analítica, comunicación efectiva, dominio de software de manejo de información y diseño; habilidad de aprendizaje continuo, y competente en la optimización de operaciones mineras.

Nombre del coautor (2): Christian Villalobos Nuñez

Cargo: Asistente de Productividad.

Empresa: Unidad Minera La Arena – Pan American Silver.

Correo electrónico: [christianlvn13@gmail.com](mailto:christianlvn13@gmail.com)

Teléfono / Celular: 942231596

Dirección: Caserío La Arena, Huamachuco, La Libertad, Perú.