

**Universidad Nacional de Ingeniería**  
**Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica**



TESIS

**Diseño versus método empírico en voladura para obtener mejores  
resultados de producción en zanjas rocosas**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas.

Elaborado por

Christian Alexis Rosas Peláez

 [0009-0000-0263-489X](https://orcid.org/0009-0000-0263-489X)

Asesor

MBA. Eder León Salazar Dulanto

 [0000-0002-1400-3144](https://orcid.org/0000-0002-1400-3144)

LIMA – PERÚ

**2023**

---

Citar/How to cite	Rosas Peláez [1]
Referencia/Reference	[1] C. Rosas Peláez, “ <i>Diseño versus método empírico en voladura para obtener mejores resultados de producción en zanjas rocosas</i> ” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2023.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

---



---

Citar/How to cite	(Rosas, 2023)
Referencia/Reference	Rosas, C. (2023). <i>Diseño versus método empírico en voladura para obtener mejores resultados de producción en zanjas rocosas</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

---

### ***Dedicatoria***

*Dedicado a mi madre, Lida, por su amor incondicional y por siempre estar orgullosa de mí, aunque muchas veces no sentí ser lo suficiente; a mi padre, Gregorio, por levantarme cuando caí y por siempre darme ánimos en mis peores días; a mis hermanos, especialmente a Manuel, por su motivación constante y porque gracias a él este proyecto fue desarrollado.*

## **Agradecimientos**

Agradecido siempre con Dios, de quien puedo sentir su presencia en toda mi vida porque nunca me ha abandonado y porque quiero seguir de su mano en todo el camino que me falta por recorrer. A mis padres, Lida y Gregorio, por su amor, apoyo y motivaciones siempre. A mi hermano Manuel, quién me motivó a desarrollar este trabajo de investigación en el proyecto en el que estaba trabajando.

## Resumen

En algunos caseríos y/o sectores ya se contaba con servicio de agua entubada o potable y alcantarillado en otros sólo letrinas, sin embargo principalmente el sistema de agua potable era deficiente por carecer de fuentes de donde se pueda extraer este líquido y que garanticen la sostenibilidad de dicho servicio durante todas las épocas del año, para lo cual era urgente la necesidad de construir un sistema de Agua Potable y Saneamiento, esto se lograría en integrar dichos caseríos, centros poblados y sectores, implementar una fuente del líquido que garantice la demanda en épocas más críticas, sobre todo en épocas de estiaje, una línea de conducción, aducción, tratamiento de agua potable, y redes de distribución, así como la construcción de un nuevo sistema de alcantarillado, unidades de saneamiento básico y plantas de tratamiento de aguas residuales.

El trabajo dio inicio con su ejecución como estaba planeado e iba avanzando según las proyecciones que se habían hecho, hasta que el personal dio con roca solida en algunos tramos de la instalación de las líneas de agua, pero el trabajo continuó a pesar de eso, mas los costos operativos fueron incrementando y la obra retrasándose debido a que no se podía atacar otros frentes, ya que la maquinaria y el personal se encontraba atacando el frente rocoso.

Se optó entonces por el uso de explosivos para el avance de estos frentes, mas con el hecho de que no se contaba con personal con experiencia en el uso de estos, las voladuras se efectuaban mediante ensayo y error (empíricamente) de tal manera que este método resultaba poco efectivo. Se hizo necesario el ingreso de personal con conocimiento en métodos de voladura y sus análisis para obtener los resultados deseados y culminar la obra en el tiempo estimado.

Por ello, se requirió comparar el diseño versus método empírico en voladura para obtener mejores resultados de producción en zanjas rocosas, donde se obtuvo que el diseño

(voladura planificada) es la mejor opción para realizar una adecuada producción en zanjas rocosas y asimismo evitar los altos costos y beneficiar a los caseríos, centros poblados y sectores de la zona de estudio.

**Palabras claves:** Voladura empírica, voladura planificada, zanjas, diseño.

## **Abstract**

In some hamlets and/or sectors there was already a piped or drinking water service and sewerage in others only latrines, however mainly the drinking water system was deficient due to lack of sources from which this liquid can be extracted and that guarantee sustainability of said service during all seasons of the year, for which the need to build a Drinking Water and Sanitation system was urgent, this would be achieved by integrating said hamlets, populated centers and sectors, implementing a source of liquid that guarantees demand in most critical times, especially in times of drought, a pipeline, adduction, drinking water treatment, and distribution networks, as well as the construction of a new sewage system, basic sanitation units, and wastewater treatment plants .

This investigation began with its execution as planned and progressed according to the projections that had been made, until the personnel found solid rock in some sections of the installation of the water lines, but the work continued despite that plus, the operating costs were increasing and the work was delayed because it was not possible to attack other fronts, since the machinery and personnel were attacking the rocky front.

It was decided then for the use of explosives for the advance of these fronts, more with the fact that there were no personnel with experience in the use of these, the blasting was carried out by trial and error (empirically) in such a way that this method was ineffective. The entry of personnel with knowledge of blasting methods and their analyzes was necessary to obtain the desired results and complete the work in the estimated time.

For this reason, it was necessary to compare the design versus the empirical method in blasting to obtain better production results in rocky trenches, where it was found that the design (planned blasting) is the best option to carry out adequate production in rocky trenches and also avoid high costs and benefit the hamlets, populated centers and sectors of the study area.

**Keywords:** Empirical blasting, planned blasting, trenches, design.

# Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen .....	v
Abstract .....	vii
Introducción .....	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo .....	1
1.1. Generalidades .....	1
1.2. Descripción del problema de investigación .....	2
1.3. Objetivos del Estudio .....	4
1.3.1. Objetivo general .....	4
1.3.2. Objetivos específicos .....	4
1.4. Hipótesis y variables .....	4
1.5. Antecedentes investigativos.....	5
Capítulo II. Marco teórico y conceptual .....	10
2.1. Marco Teórico.....	10
2.2. Marco Conceptual.....	22
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación .....	26
3.3. Voladuras planificadas.....	49
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados .....	65
Conclusiones .....	72
Recomendaciones .....	73
Referencias bibliográficas .....	74
Anexos .....	1

## Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Criterio de daño por vibraciones según McKenzie.....	21
Tabla 2: Acceso número 1 .....	28
Tabla 3: Acceso número 2 .....	29
Tabla 4: Ficha técnica – Generalidades SULLAIR 185 .....	34
Tabla 5: Ficha técnica – RH572.....	35
Tabla 6: Ficha técnica de generador eléctrico - EF2600FW.....	37
Tabla 7: Ficha técnica – BOSH SDS-máx® .....	38
Tabla 8: Ficha técnica – Dinamita Famesa Semigelatina® 65 .....	40
Tabla 9: Datos recolectados de las voladuras empíricas .....	48
Tabla 10: Coordenadas del polígono de VP.....	51
Tabla 11: Resultados de producción voladuras planificadas .....	63
Tabla 12: Resultados del avance voladuras planificadas .....	64
Tabla 13: Comparación de producción en voladuras empíricas y planificadas en zanjas rocosas.....	70
Tabla 14: Diferencias en la producción de metros cúbicos en grupos comparativos de voladura empírica y planificada.....	71

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Diseño de zanjeo en doble hilera .....	16
Figura 2: Diseño de zanjeo en tres hileras .....	17
Figura 3: SD para fragmentación y control de flyrock.....	19
Figura 4: Simulación de distribución de energía en software .....	20
Figura 5: Ubicación geopolítica de la región Amazonas.....	26
Figura 6: Ubicación geopolítica de la provincia de Utcubamba .....	27
Figura 7: Ubicación de la investigación.....	27
Figura 8: Plano geológico regional cuadrángulo Bagua Grande .....	31
Figura 9: Esquema del sistema proyectado de agua potable .....	32
Figura 10: Esquema del sistema proyectado de agua potable .....	33
Figura 11: Compresora SULLAIR 185 .....	35
Figura 12: Perforación neumática .....	36
Figura 13: Generador eléctrico YAMAHA EF2600FW.....	37
Figura 14: Perforación eléctrica .....	38
Figura 15: Broca Sandvik.....	39
Figura 16: Dinamita Famesa Semigelatina® 65.....	40
Figura 17: Exsacord NP3.....	41
Figura 18: Área de toma de muestras de VE .....	42
Figura 19: Medición de la profundidad de los taladros de VE.....	42
Figura 20: Medición del ancho de zanja.....	43
Figura 21: Malla de una voladura empírica .....	44
Figura 22: Malla de perforación de una VE .....	45
Figura 23: Resultados de una voladura empírica .....	46
Figura 24: Medición de resultados de VE.....	46

Figura 25: Medición del avance en voladuras empíricas.....	47
Figura 26: Acabado de zanja con VE.....	49
Figura 27: Área de toma de muestras VP.....	50
Figura 28: Coordenadas Polígono de VP.....	51
Figura 29: Consideraciones sobre la roca a detonar.....	52
Figura 30: Medición de potencia de la roca.....	53
Figura 31: Distribución inicial de los taladros en la zanja.....	54
Figura 32: Parámetros para simulación de la primera voladura.....	57
Figura 33: Distribución de energía del Vol6.....	58
Figura 34: Simulación configuración de las cargas en la zanja.....	58
Figura 35: Simulación Voxeles que simulan la roca (verde).....	59
Figura 36: Simulación vectores de velocidad de Voxeles en la detonación.....	59
Figura 37: Simulación fracturamiento de la roca.....	60
Figura 38: Simulación VPPc vertical.....	60
Figura 39: Trazado de malla de acuerdo a lo especificado.....	61
Figura 40: Malla de perforación VP.....	62
Figura 41: Resultados de VP.....	62
Figura 42: Fracturamiento de roca y acabado de zanja (limpieza con excavadora).....	65

## Introducción

Esta zona de estudio (caseríos, centros poblados y sectores) se encuentra ubicada en el distrito de Jamalca, provincia de Utcubamba, región Amazonas del Perú, con una altitud media de 1330 msnm.

En cuanto a la comparación entre el diseño versus método empírico en voladura para obtener mejores resultados de producción en zanjas rocosas, se obtuvieron mejores resultados con el diseño (voladuras planificadas), permitiendo a que se pueda determinar el tipo de explosivos de acuerdo con la geología de la zona de estudio y al mismo tiempo permitió establecer la cantidad y distribución de explosivos.

Por otro lado, en estos caseríos del distrito de Jamalca, utilizan la voladura empírica, no contando con los diversos parámetros para una voladura planificada, ocasionando inadecuadas distribuciones de explosivos, causando una mala fragmentación y dando un mayor esfuerzo a la excavadora, haciendo que el trabajo requerido se duplique.

Esta investigación es clave para diversas empresas que se dedican a las obras civiles, ya que de esta manera evidencian que tipo de método es adecuado para mejorar los resultados en la producción de zanjas rocosas. Como se indicó en el párrafo anterior, en estos caseríos utilizan el método empírico sin medir las consecuencias, no solo económicas, sino también sociales.

Por ello, el propósito de la investigación es realizar una comparación entre el diseño y método empírico en voladura para evidenciar los mejores resultados de producción en zanjas rocosas y asimismo los beneficios económicos y sociales para los caseríos, centros poblados y sectores del distrito de Jamalca.

# Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

## 1.1. Generalidades

En ingeniería de minas una de las ramas más apasionantes y también sujeta a mucha investigación es la voladura de rocas, debiéndose a que se encarga de extraer el mineral de la tierra o realizar accesos hacia este, ya que hay que recordar que no se encuentra en la superficie. Por lo tanto, el ingeniero de minas tiene que investigar, planificar y ejecutar voladuras teniendo en cuenta aspectos como fragmentación, vibraciones, proyecciones, entre otros.

Paralelamente a la aplicación de la voladura de rocas en minería, también es aplicable en la construcción de obras civiles, aunque en Perú esta actividad se ve muy limitada, ya que solo se recurre a métodos tradicionales al tratarse de estas. De tal manera, que al mencionar métodos tradicionales nos referimos a trabajos manuales con herramientas tales como combas, cinceles, martillos eléctricos e hidráulicos o trabajos con maquinaria pesada (excavadoras, retroexcavadoras, etc). Además, en muy pocos casos se usa voladura de rocas y cuando se usa estas se realizan de manera empírica sin ninguna planificación, ni un diseño geométrico de malla, ocasionando retrasos de ejecución y aumento en costos operativos.

Por ello, es necesario de un especialista en voladura en obras civiles, este especialista tiene la misión de aplicar sus conocimientos y experiencia para la realización de explosiones, teniendo las consideraciones de auto sostenimiento del talud, minimizar las proyecciones de rocas o fly rocks y controlar las vibraciones.

La aplicación de voladura de rocas en obras civiles puede darse en la construcción de carreteras, puentes, zanjas, túneles, gasoductos, obras de irrigación, obras de distribución de agua potable, hasta incluso en demoliciones de estructuras, aunque en nuestro país debido a sus legislaciones aún no están aprobadas y por este hecho no se ejecutan.

La presente investigación abordará la construcción de zanjas para la distribución de agua a caseríos en la región Amazonas – Perú, esperando que sirva para la mayor incursión de ingenieros de minas en obras civiles, como también para guiarlos, adaptando y ajustando parámetros para sus trabajos específicos.

## **1.2. Descripción del problema de investigación**

Actualmente, la voladura es una de las operaciones principales con respecto a la actividad minera y su diseño se basa en diferentes modelos matemáticos o en diseños de mallas para adquirir un mejor resultado con respecto a su producción de zanjas rocosas.

De tal manera, que en Ecuador existe un problema en cuanto al acceso de agua potable para las zonas rurales, teniendo como principal causa las acequias que perjudican a las infiltraciones de agua y flujos de agua subterráneas; por lo tanto, tienen el objetivo de que se mejore este aprovechamiento de agua potable como un recurso que sea indispensable con la implementación del diseño de zanjas de infiltración (Cevallos y León, 2021).

Por otro lado, en Argentina se encuentra la falta de agua, evidenciándose en los últimos años en sus localidades que se ubican en las Sierras Chicas como Villa Allende, Mendiolaza y La Calera; por ello, realizan trabajos de voladura para poder realizar zanjas con diversos diagramas de perforación y voladura, siendo requerido la utilización de explosivos, teniendo en cuenta la geometría de esta zanja con el propósito de que se construya un acueducto para que abastezca agua a su nueva planta potabilizadora que se encuentra ubicada en La Calera, Argentina (Viñas, 2020).

Además, se tiene que en Chile están pasando por una escasez de agua pudiéndose explicar por diferentes factores, pero la principal es por una mega sequía, donde un 47.2% de su población rural no tienen acceso al agua potable mediante las redes de distribución formales, relacionándose de forma directa con la pobreza multidimensional; por otra parte, el 55.9% de la comuna de Chile tienen un índice mayor de la pobreza multidimensional y

una proporción mayor de población con escasez de agua potable y un 84.7% de viviendas que son pobres multidimensionalmente abasteciéndose de agua mediante pozos, lagos, ríos, sin embargo, la calidad de agua que utilizan es desconocida y no se encuentra garantizada por el Estado de Chile (Frêne et al., 2022).

En Nazca, existe el problema de escasez de agua, originando que los pobladores no puedan adquirir a su recurso principal que es al agua, siendo indispensable para la región; por lo tanto, al momento de construir estas zanjas se identificaron dos técnicas, una a tajo abierto y otra subterránea, donde la primera es una zanja horizontal abierta que conduce el agua mediante la zanja hasta el reservorio y la otra técnica de subterránea tiene a galerías de zanjas rellenas y galerías subterráneas con la finalidad de que se pueda realizar un mantenimiento y cargar con una presión atmosférica este acueducto, manteniendo un régimen de flujo de agua que sea uniforme (Masalías, 2022).

En el proyecto minero Las Bambas requieren de realizar construcciones de zanjas, cimentaciones, sistema de tuberías y muros, sin embargo, existe una demora y es a causa de que su excavación de este macizo rocoso no es aplicable mediante equipos como tractores ripper, martillos hidráulicos demoledores, entre otros; por ello, es que recurren a las técnicas de voladura para ejecutar esta obra civil y facilitar una excavación adecuada del material rocoso para que se pueda implementar sus infraestructuras necesarias como el sistema de tuberías (Huallpachoque, 2018).

Por lo tanto, durante la elaboración de obra de potabilización de agua en la región Amazonas crearon un sistema de agua potable y saneamiento en caseríos y sectores en el distrito de Jamalca, Utcubamba, Amazonas, encontrando su roca sólida buscando realizar una zanja de 80cm de ancho por 70cm a 100cm de profundidades para su instalación de tuberías; sin embargo, esta obra presentó problemas vinculados a demoras en plazos de ejecución, radicando en que su excavación de este macizo rocoso no es aplicable a través de maquinaria pesadas, teniendo como otra opción de utilizar la

voladura, aunque al no contar con el personal con conocimientos de voladura, optaron por voladura a través de un método empírico sin que tomen en cuenta sus parámetros para este diseño de la obra (Díaz y Saavedra, 2022).

#### **1.2.1. Problema General**

- ¿Cuánto es la ineficiencia de producción en la aplicación de un método empírico?

#### **1.2.2. Problemas Específicos**

- ¿Cuánto se pierde en avance al usar un método empírico, si se compara con un diseño de voladura construcción de zanjas?
- ¿Qué beneficios se pierde cuando no se tiene una planificación y diseño de voladura en la construcción de zanjas?

### **1.3. Objetivos del Estudio**

#### **1.3.1. Objetivo general**

- Lograr una mayor eficiencia de producción con la realización de un diseño de voladura para la construcción de zanjas rocosas.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Elaborar un diseño de malla para la zanja de tal modo que se tenga un mayor avance.
- Obtener más beneficios aplicando una adecuada planificación y diseño de voladura en la construcción de zanjas.

### **1.4. Hipótesis y variables**

#### **1.4.1. Hipótesis general**

- Comparativamente, un diseño de voladura generará una mayor eficiencia en los resultados de producción, con respecto a una voladura empírica utilizada tradicionalmente en la construcción de zanjas rocosas.

### **1.4.2. Hipótesis específicas**

- Se evidenciará un mayor avance del proyecto al elaborar un diseño de voladura que aplicando un método empírico.
- El diseño y la planificación de una voladura traerá consigo beneficios como: un mejor acabo de las zanjas (autosostenibilidad), un mejor control de los flyrocks y una mayor seguridad en la manipulación de material explosivo.

### **1.4.3. Variables**

**1.4.3.1. Variable independiente.** Diseño versus método empírico en voladura

**1.4.3.2. Variable dependiente.** Producción en zanjas rocosas

## **1.5. Antecedentes investigativos**

### **1.5.1. Investigaciones internacionales**

Ajel et al. (2022) en su artículo “Experimental research on vibration isolation by open and filled trenches”, con el propósito de estudiar de forma experimental la mitigación de vibraciones por zanjas abiertas y rellenas debidas a una carga armónica inducida por el oscilador mecánico; su metodología es descriptiva y diseño experimental. Sus resultados en cuanto a la excavación de una barrera de zanja abierta activa disminuye sus componentes verticales de velocidades máximas de partículas entre el 60% y 95.4%, teniendo tasas altas de atenuación vinculándose con frecuencias altas de vibración de la fuente; con respecto a la construcción de una barrera de zanja abierta pasiva disminuye sus velocidades entre 66% y 88.3%; el empleo de barras activas rellenas con mezclas de suelo cohesivo nativo más caucho con un contenido de caucho que oscila entre 20 y 40% logró tasas de detección de 2.8 a 58.6%; la utilización de zanjas rellenas pasivas produjo tasas de mitigación de 7 a 51.8%. Teniendo como conclusión que las mediciones revelaron un incremento de velocidad en sus puntos frente a la zanja, debiéndose a las ondas reflejadas; de tal manera que este incremento es proporcional a la frecuencia de vibración, aunque la presencia de barrera se redujo en gran medida sus velocidades máximas de

partículas más allá de ella, encontrándose que su eficiencia del apantallamiento es más pronunciada a frecuencias de altas vibraciones.

Balamadeswaran et al. (2022) en su artículo “Controlled blast design for efficient and sustainable subsea excavations”, con el propósito de diseñar patrones de voladura y monitorear las vibraciones de voladura en subestructuras durante una voladura real; su metodología es descriptiva y diseño no experimental. Teniendo como resultado que las voladuras submarinas se utilizan para una amplia gama de propósitos, incluyendo su ampliación de canales, excavación de zanjas para determinar oleoductos y gasoductos, así como cables de comunicación, operaciones de demolición y construcción de subestructuras, donde la voladura de rocas bajo el agua es una fuente de vibración más difícil y menos entendida, teniendo un impacto significativo en seguridad de edificios y estructuras vecinas; por lo tanto, este diseño permitió monitorear sus movimientos de vibraciones, administrándolos para que se protejan sus entornos costeros de efectos de explosiones y garantizar su seguridad de diversas estructuras de edificios, así como para que se mantenga su eficiencia de explosiones. Concluyendo que cuando se utilizan explosivos submarinos, se tienen en cuenta las precauciones de seguridad adecuadas para que se protejan a sus trabajadores, otras embarcaciones en áreas explosivas y a los edificios de vibraciones de explosión.

Cevallos y León (2021) en su artículo “Zanjas de infiltración en su aprovechamiento de agua en la zona rural de Manabí”, con el propósito de describir su funcionamiento de zanjas de infiltración como una alternativa para su aprovechamiento de agua en la zona rural de Manabí, Ecuador; además, su metodología es de tipo documental con un enfoque descriptivo. Se obtuvo como resultado que esta implementación de zanjas de infiltración es efectiva para un adecuado manejo de sus recursos naturales en las zonas rurales de Manabí, por ello, consideran realizar estudios en mayores cantidades con respecto al terreno, ya que se construirán sus zanjas para que se determine su efectividad, evaluando sus mejores alternativas para su aprovechamiento adecuado. Llegando a la conclusión de

que es esencial esta aplicación de técnicas de zanjas de infiltración para que adquieran una conservación y aproveche el agua que proviene de lluvias para su establecimiento de cultivos y otras utilidades, traduciéndose en su incremento de productividades.

Kianian y Shiri (2021) en su artículo "Experimental investigation of the trench effect on lateral failure mechanisms around a pipe buried in clay", con el propósito de investigar el efecto de interacciones de tubería lateral, relleno y zanja en mecanismos de falla del suelo y resistencia lateral del suelo resultante en condiciones de enterramiento superficial y profundo; su metodología es enfoque cualitativa con un diseño experimental. Obteniendo como resultado que este material de relleno remodelado y de mejor rigidez comparando con el suelo nativo pueden afectar de forma significativa sus mecanismos de falla del suelo y resistencia lateral movilizada del suelo, por lo tanto, utilizaron velocimetría de imágenes de partículas (PIV) para que se observen de manera directa los desplazamientos interactivos del suelo; además, adoptó una condición de drenaje parcial para que se magnifique sus efectos de la interacción tubería/relleno/zanja; asimismo, se observó que sus efectos interactivos de la tubería, el relleno y zanja preceden a sus resistencias al corte individuales y reducen su resistencia última del suelo. Obteniendo como conclusión que esta investigación reveló una importancia de interacción tubería/zanja en su movilización de resistencia lateral del suelo y diversos otros mecanismos aún no abordados en su literatura; así como se identifican diversas vías de investigaciones nuevas, preparando un terreno para que se propongan soluciones que sean rentables, mejorando su predicción de respuesta lateral de tuberías enterradas en un próximo futuro.

Zhu (2021) en su artículo "Mindlin's solution to this soil deformation caused by trenching during the installation of concrete diaphragm wall panels", con el propósito de investigar la deformación del suelo durante la excavación de zanjas con lodo utilizando la solución Mindlin; su metodología es descriptiva con un diseño preexperimental. Su resultado se basó en la solución de Mindlin, proponiendo una solución analítica para que se calcule su deformación del suelo causada por su formación del muro pantalla debajo

del muro de contención de lodos, donde el desplazamiento horizontal del suelo circundante causado por esta excavación de zanjas del muro pantalla se incrementa con el aumento de la profundidad y su valor extremo aparece a una profundidad de un aproximado de  $5/6D$ , reduciendo de forma brusca; además, el desplazamiento horizontal tiene forma de cuchara y distancia entre su punto máximo de asentamiento y zanja se incrementa con el aumento de  $D$  y  $u$ , también se tiene que entre sus parámetros de cálculo, los tres parámetros de excavación  $D$ ,  $E$  y  $L$  tienen una sensibilidad fuerte y una gran influencia en su desplazamiento del suelo, derivando una ecuación de cálculo simple de desplazamiento horizontal basándose en  $E$ ,  $D$  y  $L$ . Llegando a la conclusión que esta solución de Mindlin puede proporcionar una aproximada solución con respecto a la deformación del suelo durante la excavación de zanjas con lodo y formulación simplificada, pudiendo utilizar para proporcionar una evaluación rápida del movimiento horizontal del suelo en la práctica de la ingeniería.

### **1.5.2. Investigaciones nacionales**

Díaz y Saavedra (2022) en su investigación “Gestión de proyectos que se aplican en la etapa de ejecución, monitoreo y control en la obra de saneamiento, bajo lineamientos de Guía PMBOK 6ta edición”, con el propósito de aplicar fundamentos y lineamientos de la guía del PMBOK en la obra de saneamiento “Creación del sistema de agua potable y saneamiento en caseríos del Sauce, El Laurel, San Lorenzo, Vista Alegre, La Palma, La Flor, Ramón Castilla, sectores y distrito de Jamalca, Utcubamba, Amazonas”; su metodología es de tipo aplicada, nivel descriptivo y diseño no experimental. Teniendo como resultado que en el mes de octubre del año 2020 se encontró un 21.655 de valor ganado frente al 12.39% de valor que había sido planificado para ese mes, es decir que encontraron adelantada el 9.26% por encima de lo que se había programado y con un bajo costo de lo que se había planificado para la ejecución de esta obra, siendo un monto de S/ 470 271.17, representando un ahorro que se ha conseguido en este mes de octubre. Concluyendo que esta aplicación de fundamentos y lineamientos de esta guía del PMBOK

en las zonas de la región Amazonas es de beneficios grandes, debiéndose a que este ayudó a sistematizar sus procedimientos de forma ordenada en su ejecución de esta obra; además, se determinó las falencias en su desempeño y calidad de esta obra, requiriendo solicitar sus acciones correctivas necesarias para que evite daños sociales y económicos.

Arana (2021) en su investigación “Construcción de zanjas de infiltraciones en laderas para recarga hídrica en distrito Huayllacayan, provincia Bolognesi-Ancash”, con el propósito de incrementar su oferta hídrica en localidad de Shulluqocha-Ancash, a través de construcción de zanjas de infiltración; su metodología es descriptiva y diseño experimental. Sus resultados en cuanto a su dimensionamiento de zanjas de infiltración para esta zona, sus laderas tuvieron una pendiente diversa entre 30 a 40%, donde el ancho de este borde superior de zanja fue 0.50m, ancho de la base de zanja fue 0.40m, una altura efectiva fue 0.30m, donde el fondo de zanjas sin pendientes y espaciamiento entre zanjas en promedio fue 14 metros y espaciamiento entre tabiques a lo largo de cada zanja de infiltración que varió entre 10 a 20m; con respecto a la tasa de precipitación máxima adquirida para la zona fue de 10.02 mm/hr para su frecuencia de 20 años y en cuanto su coeficiente de escorrentía evaluado para esta zona se estimó en manera muy conservadora en 0.50. Teniendo como conclusión que su velocidad de infiltración promedio en esta zona fue 43.14 mm/hr, donde en algunas zonas se tiene tasas aún mayores; y con respecto al volumen de infiltración anual de estas zanjas de infiltración construidas en esta zona fue de 131210.8 m<sup>3</sup>, alimentando sus diferentes fuentes de agua existentes en esta zona.

Huallpachoque (2018) en su investigación “Diseño y estimación de voladura para obras civiles en proyecto minero Las Bambas”, con el propósito de diseñar y estimar voladuras para obras civiles como zanjas, muros y cimentaciones en cercanas infraestructuras de planta concentradora en proyecto minero Las Bambas; su metodología es de tipo aplicada y de nivel descriptivo. Se obtuvo como resultado que en cuanto a su prioridad se controló su nivel de vibraciones a través del modelo a campo lejano,

determinando que su carga máxima a 15m tiene que ser de 4kg de explosivo con un exceso de carga, ocasionando que su velocidad pico partícula es mayor a 20 mm/s; además, se requirió de utilizar factores de carga mínimos entre 0.20 a 0.30 kg/m<sup>3</sup> y con respecto a su secuenciamiento de detonación se han configurado sus retardos a través del sistema no eléctrico dual; en cuanto al control de proyección de rocas se determinó que su taco adecuado a través del factor de seguridad donde su resultado tiene que estar entre 0.92 a 1.40; de tal manera, que su velocidad pico partícula en voladura de zanja fue 16.9 mm/s, cimentación fue 14.7 mm/s y el muro fue de 23.1 mm/s. Llegando a la conclusión que con su aplicación de voladura precorte se adquirió taludes que son estables y paredes nivelados, teniendo una simulación de este diseño de voladura con el programa Jksimblast generando un nivel de confiabilidad; esta estimación se desarrolló a través de reportes y fotografías de vibraciones difundidos por un sismógrafo; finalmente se evaluó el daño de esta onda aérea de presión, donde sus resultados son aceptables y esperados.

## **Capítulo II. Marco teórico y conceptual**

### **2.1. Marco Teórico**

#### **2.1.1. *Uso de explosivos en obras civiles***

En el desarrollo de la agricultura, forestación, obras sanitarias y de recuperación ecológica, así como en trabajos de preparación de terrenos para la explotación minera o petrolera, y en la explotación de placeres de oro, estaño y otros metales pesados, especialmente en zonas de selva, se tiene que efectuar diversos trabajos de canalización, drenaje, corte de árboles, retiro de tocones, rotura de bolones y aflojamiento de suelos, además de la apertura de trochas y caminos, que pueden ser grandemente facilitados con el empleo de explosivos, como es usual en otros países para bajar el costo de mano de obra y maquinaria y para acortar el tiempo de trabajo; en obras sanitarias debido a la cercanía con estructuras, se debe tener un especial cuidado con las vibraciones y las proyecciones de las voladuras, en este tipo de obras es común hacer zanjas, canales y trincheras (EXSA, 2015).

**2.1.1.1. Tipos de explosivos en obras civiles.** Con respecto a los tipos de explosivos más utilizados en obras civiles se encuentra a las siguientes:

- Dinamitas gomas, se caracteriza por una consistencia gelatinosa y su resultado se mezcla nitroglicerina con nitrocelulosa, teniendo una composición predominante como el nitrato amónico, haciendo que su mezcla sea aún más energética que la propia nitroglicerina.
- Dinamitas pulverulentas, estos productos en su composición tienen un componente desencadenante de su reacción explosiva, su principal aplicación es la voladura de rocas semiduras y blandas con una velocidad de detonación aproximada de 3.000 m/s.
- Anfos, se basa en explosivos pulverulentos, sin embargo, estos anfos se encuentran compuestos por mezclas de nitrato amónico y combustible líquido, donde para su adecuado funcionamiento se requiere de una iniciación buena de detonación, pudiendo conseguirse con esta utilización de cordones detonantes, cebos de dinamita gomas o multiplicadores.
- Emulsiones explosivas, se basa en dispersiones de un líquido inmiscible en otro, componiéndose de dos etapas diferentes donde en la primera etapa oxidante está compuesta por una solución de nitratos y la segunda etapa oleosa combustible está compuesta de manera general por aceites y ceras (Aldana, 2022).

### **2.1.2. Voladuras en obras civiles.**

En las obras civiles, se busca utilizar técnicas de voladura que permitan el auto sostenimiento de la roca, lo que significa que se busca minimizar la cantidad de roca que cae al suelo después de la voladura. Esto se logra mediante la fragmentación controlada de la roca, de manera que se obtienen bloques de tamaño adecuado para ser movidos por equipos pesados. Además, en las obras civiles se prestan atención especial al aspecto visual y sonoro de la voladura, ya que se busca reducir al mínimo el impacto en la población

y la fauna cercanas. Por ejemplo, se utilizan técnicas de voladura con baja emisión de ruido y se busca minimizar la cantidad de polvo y escombros que se generan durante la voladura. La roca que se necesita es mayor para poder movilizarla con maquinaria pesada, ya que esta roca no tiene que ser movida por mano de obra y esta busca minimizar su tamaño para poder controlar mejor los costos y tiempos de ejecución. (Fernández, 2012).

### **2.1.3. Voladuras en zanjas**

Esta voladura de zanjas conforma una parte esencial de tecnología de explosivos, donde mayormente se implica en voladuras en banco con una anchura no superior a estos 2 metros, su frontera entre voladuras en banco y voladuras en zanjas pueden que sean un poco difusas, su inclinación de estos barrenos adquiere una esencial capital como su inclinación acusada de estos barrenos haciendo reducir la tensión en la roca, facilitando su efecto rompedor en su fondo y esponjamiento, especialmente se aplica al caso de zanjas profundas (Dávila, 2017).

### **2.1.4. Excavaciones con voladura controlada**

La voladura controlada, también conocida como voladura controlada de contorno o perimetral, es un método utilizado en la minería para mejorar la competitividad del macizo rocoso circundante. El objetivo principal de la voladura controlada es evitar la sobrerotura fuera de los límites establecidos, a fin de lograr superficies lisas y definidas y evitar el agrietamiento excesivo de la roca residual. Esto mejora la estabilidad del talud, lo que es fundamental tanto en trabajos subterráneos para prevenir el desplome de techos y otros riesgos, como en la superficie para la estabilidad de taludes (Pacco, 2019).

Las zanjas en zonas urbanas son muy comunes en acueductos, potabilización, drenajes, etc. Se realizó la construcción de un acueducto en la localidad de La Calera, la cual requirió la colocación de 2700 metros de tubería de 80 cm de diámetro para un caudal de agua de 2100 m<sup>3</sup>/h hacia la planta de potabilización para abastecer a las localidades de las Sierras Chicas en la provincia de Córdoba. La construcción de la obra requirió la

excavación de una zanja de 1,60 metros de ancho y profundidad variable (entre 0,80 m y 5,50 m) en un 20% de la longitud de la misma se requirió el uso de explosivos debido a la presencia de rocas aflorantes correspondientes al basamento cristalino ígneo-metamórfico que comprende migmatitas, gneises, mármoles, tonalitas, granitos y aplitas de dureza media a alta. Se utilizaron diferentes mallas de perforación, diseño de cargas explosivas y secuencia de encendido para controlar la fragmentación de las rocas. Se debió controlar las vibraciones, onda aérea y proyecciones debido a la presencia de viviendas cercanas a la zanja con el fin de evitar daños en las estructuras. (Viñas, 2020).

Para la realización de las redes de agua y alcantarillado se requieren voladuras controladas con el objetivo de mitigar el riesgo de vibraciones, onda aérea y proyecciones de roca debido a que estas obras se realizan en zonas urbanas y cercanas a viviendas y otras estructuras. Es importante tener en cuenta la cercanía de las viviendas a las voladuras, el material de las viviendas, el tránsito peatonal y vehicular, y cualquier otra estructura cercana a las voladuras. Es necesario controlar los diseños de mallas y carguío por parte de los supervisores e ingenieros encargados de la obra para garantizar la seguridad y evitar daños en las estructuras cercanas. (Delgado et al., 2014).

### **2.1.5. Diseño y evaluación de voladuras para obras civiles**

**2.1.5.1. Diseño de malla de voladura en zanjas.** Estas zanjas son obras civiles basado en un diseño geométrico lineal, teniendo un ancho de 0.6 m a 3m y su profundidad entre 0.5m y 5m, de tal manera, que mayormente se ubican en una superficie cercana a zonas que son urbanas y esta aplicación depende de muchos requerimientos como construcciones de drenajes, sistema de tuberías, acueductos de aguas, entre otros; Además, esta excavación de zanjas a través de la utilización de explosivos presenta algunas características que obligan a que se desarrolle un diseño de voladura de acuerdo a sus especificaciones técnicas de un plano de diseño civil, las condiciones en que se encuentran las rocas y que se sitúen en zonas aledañas para su infraestructura, tomando

medidas que sean especiales referente a su control de vibraciones y proyecciones de roca (Huallpachoque, 2018).

**2.1.5.2. Cálculo del burden y espaciamiento para zanjas.** Según Konya (2009), el cálculo del burden y del espaciamiento va a depender mucho del diámetro de perforación y de la geometría de la zanja (ancho) con dimensiones ya establecidas. Se define la siguiente fórmula, que cuando solo se tiene características generales de la roca y del explosivo, además de asentamientos humanos cercanos, será de mucha ayuda:

$$B = 0.012 \left( \frac{2SG_e}{SG_r} + 1.5 \right) D_e \quad (1)$$

Donde:

B: Burden (m)

SGe: Gravedad Específica o Densidad del Explosivo (g/cm<sup>3</sup>)

SGr: Gravedad específica o Densidad de la Roca (g/cm<sup>3</sup>)

De: Diámetro del Explosivo (mm)

**2.1.5.3. Trazos de malla para zanja según Konya (2009).** ¿Es importante tener otras consideraciones para la elaboración de un diseño de zanjas?

Konya (2009) plantea que sí, es importante considerar el tamaño de la tubería y el equipo de excavación a utilizar al diseñar una zanja. El ancho de la zanja debe ser suficientemente amplio para permitir la instalación y la inspección de la tubería, pero no tanto que resulte en un desperdicio innecesario de material o un costo adicional. Además, el tamaño del cucharón de la excavadora debe ser mayor o igual al ancho de la zanja para que pueda retirar el material de la voladura de manera eficiente. Por eso es importante tener un plan de perforación previo al trabajar en este tipo de proyectos.

La geología local también va a jugar un papel muy importante para el diseño de nuestra voladura en zanja. La roca intemperizada y descompuesta puede ser inestable y

difícil de trabajar, y puede resultar en condiciones de trabajo peligrosas si no se maneja adecuadamente. Además, colocar explosivos en la zona del descapote puede resultar en una detonación ineficiente y en una gran cantidad de residuos de roca innecesarios. Por lo tanto, es importante tener un conocimiento profundo de la geología local y la profundidad real de la roca en cada taladro para planificar y ejecutar adecuadamente la voladura. Además, el uso de equipos para perforar como sondas y topógrafos para medir la profundidad de los taladros son herramientas valiosas en este proceso (Konya, 2009).

Para la voladura en zanjas, Konya (2009) centra las diferencias en las técnicas de voladura entre roca masiva, sólida y roca con estratos. Si es necesario excavar una zanja angosta en una capa de roca estratificada, una técnica utilizada a menudo es colocar una hilera simple de barrenos a lo largo del eje de la zanja. El espaciamiento entre estos barrenos será similar al especificado en la ecuación (1). En todas estas voladuras, se debe utilizar una relación L/B mínima de uno.

Si la zanja tiene que ser excavada a una profundidad poco profunda, se requerirán taladros de diámetro menor a los necesarios para una zanja profunda. El tiempo de retardo debe ser tal que los taladros se activen de manera secuencial a lo largo de la hilera. Si los taladros se activan al mismo tiempo, se dispersará una cantidad significativa de roca en las inmediaciones de la zanja. A medida que la altura de los bancos se reduce, el riesgo de fly rock aumenta y puede ser necesario utilizar tapetes de voladura. La técnica de la hilera sencilla de taladros no es adecuada para roca dura y masiva. Los taladros normalmente escopetearán sin causar mucha fragmentación entre los barrenos. En un material masivo, se suele utilizar una zanja con doble hilera de barrenos.

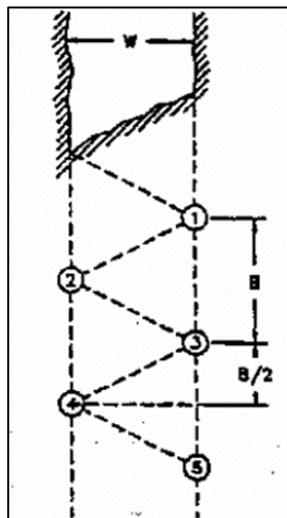
La zanja de doble hilera se diseña de acuerdo a la figura 1. En materiales masivos, se sugiere colocar los taladros en el límite de la excavación. Sin embargo, en materiales más débiles, es común recomendar colocar los taladros a 30 cm del límite de la excavación, ya que puede producirse un rompimiento trasero considerable. Si se colocan los taladros

a 30 cm del límite de la excavación en materiales masivos, los resultados serán pobres. Para determinar si una plantilla para una zanja utilitaria está dentro de los límites razonables, se utilizan los siguientes criterios:

- La distancia del burden, o la distancia entre taladros, debe ser calculada utilizando la ecuación (1) y colocada de acuerdo con lo que se muestra en la figura 1, diseño de zanqueo en doble hilera. Cabe destacar que esta distancia no es el burden real, ya que la distancia perpendicular desde el taladro hasta la cara libre en el momento de la detonación es menor.
- El ancho de la zanja debe ser entre 0.75 veces y 1.25 veces burden. Si el ancho de la zanja es menor a 0.75 el burden, será necesario usar taladros de menor diámetro con cargas de explosivos menores y con burden adecuados para estas cargas. Por otro lado, si el ancho de la zanja es mayor a 1.25 veces el burden, se requerirá taladros de mayor diámetro y su burden correspondiente, o se podría utilizar un zanqueo con tres hileras como se ilustra en la figura 2, diseño de zanqueo en tres hileras.
- La relación  $L/B$  debe ser mayor a 1.

**Figura 1**

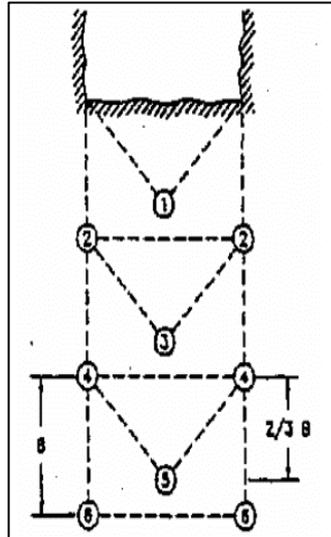
*Diseño de zanqueo en doble hilera*



*Nota:* fuente tomada de (Konya, 2009).

## Figura 2

### Diseño de zanjeo en tres hileras



Nota: fuente tomada de (Konya, 2009).

#### 2.1.6. Cálculo del taco adecuado

El taco en voladura es el relleno de la parte superior del taladro con material estéril que tiene como función retener los gases producidos por la explosión para evitar que escapen y lograr una mayor fragmentación de la roca. Las consecuencias de un taco insuficiente o excesivo pueden generar problemas de ruido, cracterización, proyecciones, fragmentación irregular y vibración excesiva (Romero, 2015).

Según Konya (2009) la relación común para la determinación del taco es:

$$T = 0.7 \times B \quad (2)$$

El taco se suele realizar con detritus de perforación, arcilla, piedra chancada fina y angular, cartón y en taladros inundados el agua puede servir como taco (Romero, 2015).

Por lo general, los residuos de perforación que rodean al taladro, arcillas o piedra chancada fina y angular, se utilizan como relleno. La longitud habitual de los tacos suele ser de 0.7 veces el burden. Sin embargo, de acuerdo a Alan Bauer y Frank Chiapetta (2004), basándose en los resultados obtenidos en pruebas de cráter y/o filmaciones con

cámara de alta velocidad, una forma recomendada para establecer la longitud adecuada del taco, con el objetivo de minimizar tanto la generación como alcance de los "flyrock" es utilizando el siguiente procedimiento: establecer la longitud adecuada del taco en función de la distancia medida desde el collar del taladro en la superficie hasta el centro de una carga de longitud igual a diez veces el diámetro del taladro, que parte del extremo superior de la columna explosiva ( $L_w$ ) y establecer un valor final multiplicando la denominada "Scaled Depth of Burial, SD" por la raíz cúbica de la carga explosiva ( $W$ ) contenida en el largo igual a 10 veces el diámetro del taladro. En concreto, el largo de taco ( $T$ ) será:

$$T = D - \frac{L_w}{2} \quad (3)$$

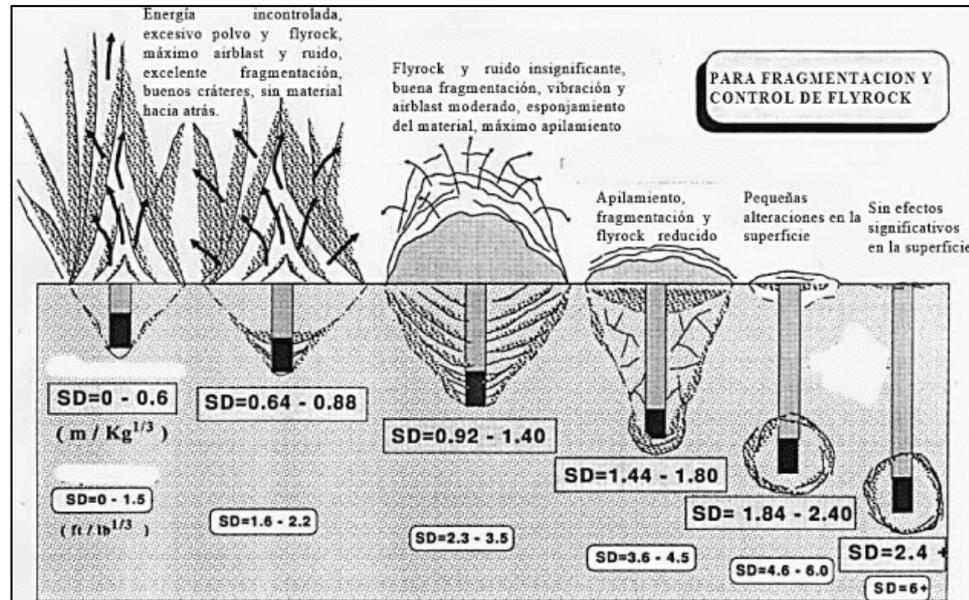
Siendo el factor de seguridad:

$$SD = \frac{D}{W^{1/3}} \quad (4)$$

La figura 3 (SD para fragmentación y control de fly rock) tomado de Alan Bauer y Frank Chapietta (2004), ilustra de manera clara este método de cálculo, indicando específicamente cuáles valores de la "Scaled Depth of Burial, SD" deben ser considerados para mantener el "flyrock" bajo control. Valores bajos generarán una excesiva proyección de rocas mientras que valores medios ayudarán a controlar la proyección de rocas y también se logrará una buena fragmentación y esponjamiento del material.

**Figura 3**

*SD para fragmentación y control de flyrock*



Nota: fuente tomada de (Bauer, A. y Cheapetta, F., 2004)

### 2.1.7. Distribución de energía

La voladura de rocas es un proceso tridimensional que consiste en aplicar una energía externa a un macizo rocoso para producir su fragmentación y desplazamiento. La energía externa proviene de la detonación de explosivos confinados dentro de taladros perforados en la roca, que generan ondas de presión y gases a altas temperaturas. La forma en que la energía del explosivo se transfiere a la roca depende de varios factores, como el tipo y la cantidad de explosivo, el diámetro y la profundidad de los taladros, el burden y el espaciamiento entre ellos, el cebo y el iniciador de las cargas y el orden de detonación. Estos factores determinan la distribución de energía del explosivo, que es la forma en que la energía se concentra y se propaga en la roca para producir los efectos deseados. (Martínez et al, 2012).

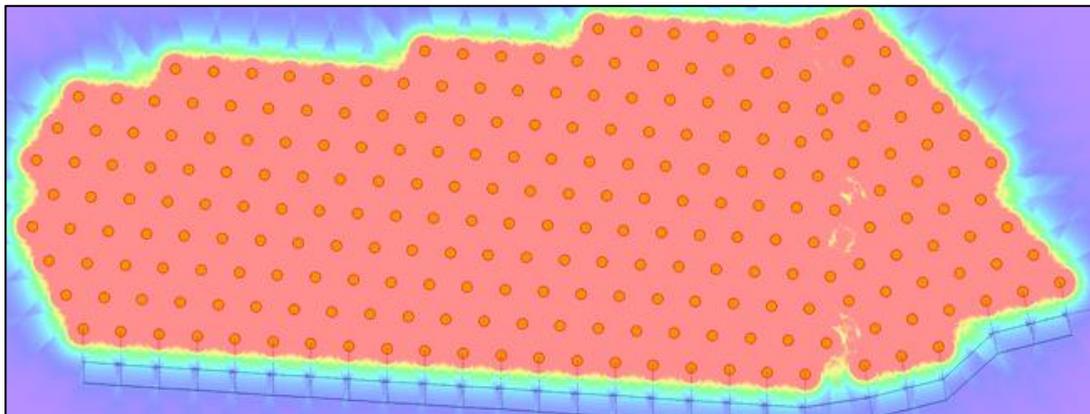
La distribución de energía del explosivo tiene una gran influencia en los resultados de la voladura, como el grado de fragmentación, el desplazamiento y la forma de acumulación del material volado, el consumo de explosivo y los efectos ambientales negativos, como las vibraciones, el ruido y las proyecciones. Por lo tanto, es importante

diseñar la distribución de energía del explosivo de manera óptima, buscando maximizar el aprovechamiento del explosivo y minimizar los impactos negativos. (Seguridad Minera, 2014).

Para analizar la distribución de energía del explosivo se puede emplear el concepto de factor de carga, que es la cantidad de explosivo necesario para romper un metro cúbico o una tonelada de material ( $\text{kg}/\text{m}^3$  o  $\text{kg}/\text{t}$ ); o el factor de energía, que es la cantidad necesaria de energía del explosivo que se necesita para romper un metro cúbico o una tonelada de material ( $\text{kJ}/\text{m}^3$  o  $\text{kJ}/\text{t}$ ). Para calcular el factor de carga y/o energía en una voladura completa se puede sumar las contribuciones del factor de carga y/o energía a cada punto en la roca para todos los taladros. (EXSA, 2015).

#### **Figura 4**

*Simulación de distribución de energía en software*



*Nota: fuente propia*

#### **2.1.8. Cuidado de paredes finales**

El cuidado de las paredes finales en operaciones de voladura de rocas es un aspecto crítico para garantizar la seguridad y la integridad de la operación. La voladura puede producir vibraciones que pueden dañar las paredes finales y comprometer la estabilidad de la operación. Por lo tanto, es importante aplicar criterios de daño por vibraciones para minimizar los efectos de la voladura en las paredes finales. (Bhandari, 2017).

En el caso de las paredes finales en una operación de voladura, es importante aplicar criterios de daño por vibraciones para evaluar el riesgo de daño debido a las vibraciones producidas por la voladura. El objetivo es garantizar que la vibración generada por la voladura no supere los límites de seguridad y, por lo tanto, no cause daño a las paredes finales. (Duvall, 2002).

El criterio de daño por vibraciones de McKenzie se puede aplicar para evaluar el riesgo de daño a las paredes finales. Para ello, es necesario medir la velocidad de partícula de la vibración en diferentes puntos de las paredes finales y comparar los resultados con los límites de seguridad establecidos por el criterio de McKenzie. (Eloranta, 2013).

$$VPP_c = \frac{\sigma V_p}{E} \quad (4)$$

Donde:

$VPP_c$ : Velocidad Pico Partícula Crítica (mm/s)

$\sigma$ : Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)

$V_p$ : Velocidad de propagación de la onda P (m/s)

E: Modulo de Young (GPa)

Este  $VPP_c$  es sometido a la comparación que realiza McKenzie (1993) según el criterio de daño potencial de las vibraciones.

**Tabla 1**

*Criterio de daño por vibraciones según McKenzie.*

Tipo de Daño	VPPc
Intenso fracturamiento	4VPPc
Creación de nuevas fracturas	VPPc
Extensión de fracturas preexistentes	1/4VPPc

Nota: Tabla adaptada de Methods of improving blastings operations (1993)

### **2.1.9. Criterio técnico económico.**

Lo que se plantea en este proyecto es el cálculo del burden, tomando como base el modelo matemático de Konya y con este esperar los mejores resultados de producción (volumen volado) en la construcción de zanjas rocosas para lo cual nos guiaremos de los resultados que los softwares de simulación de voladura nos proporcionan. Aprovechando también los softwares de simulación se buscará que nos proporcione los mejores resultados en lo que se refiere a fragmentación, distribución de energía y vibraciones.

Al haber realizado el diseño de la malla en base al modelo matemático planteado, se reemplazará el método empírico que venían haciendo previamente por este diseño, y se realizará la comparación respectiva de los resultados finales.

De comprobarse la hipótesis general de este proyecto, los beneficios para la empresa que se encuentra realizando esta obra serían:

- Mayor y rápido avance, pudiendo terminar esta obra en el plazo establecido.
- Mejorar la calidad del acabado de la zanja, permitiendo mayor autosostenibilidad (seguridad).
- Reducción en costos, permitiendo a la empresa ahorrar en costos de voladura y destinarlas a otros frentes.

## **2.2. Marco Conceptual**

### **2.2.1. Voladura**

Conjunto de procesos necesarios para romper y/o triturar roca sólida orientada a diferentes objetivos.

### **2.2.2. Empírico**

Enfoque basado en la experiencia y la práctica, en el que se utiliza una combinación de técnicas no probadas y basadas en el ensayo y error.

### **2.2.3. Perforación**

Proceso de crear agujeros en la roca o el terreno con el objetivo de colocar explosivos en ellos.

### **2.2.4. Carga**

Cantidad (Kg, cartuchos, m) y disposición de explosivos utilizados en una voladura determinada.

### **2.2.5. Diseño**

Proceso de planificación y desarrollo sistemático de una estrategia de voladura con el objetivo de obtener resultados óptimos en términos de seguridad, eficiencia, calidad y costo.

### **2.2.6. Taladro**

Perforación cilíndrica en roca, de largo y diámetro definido, el cual va a tener una ubicación única en el espacio y va a tener un diseño de carga.

### **2.2.7. Explosivo**

Producto químico o mezcla de productos químicos que liberan una gran cantidad de energía al ser detonados.

### **2.2.8. Burden (B)**

Distancia desde la superficie de la roca hasta la cara de corte o avance y es un factor crítico en el diseño de la voladura.

### **2.2.9. Espaciamento (S)**

Distancia horizontal entre los taladros de voladura adyacentes en una sección determinada.

#### **2.2.10. Diámetro ( $\Phi$ )**

Tamaño de los agujeros taladrados en la roca para colocar los explosivos en una operación de voladura. Este diámetro es una de las características más importantes en la planificación y diseño de una voladura, ya que afecta directamente a la eficiencia y seguridad de la misma. El diámetro de perforación puede ser ajustado para maximizar la efectividad de la voladura y minimizar los desechos y el impacto ambiental.

#### **2.2.11. Profundidad**

Distancia desde la superficie hasta la parte inferior del agujero taladrado en la roca para colocar los explosivos en una operación de voladura.

#### **2.2.12. Banco (H)**

Altura total del material a ser volado desde la superficie hasta la parte inferior de la zanja o excavación.

#### **2.2.13. Taco (T)**

Cantidad de material que se coloca sobre o alrededor de la carga de explosivo antes de la voladura. Esta técnica se utiliza para controlar la dirección y la distribución del material volado y para reducir la cantidad de fragmentos y vibraciones indeseadas durante la explosión. El taco puede estar hecho de materiales como tierra, piedra u otros materiales, y su tamaño y composición dependen de las condiciones específicas de cada operación de voladura.

#### **2.2.14. Subperforación (SD)**

Longitud del taladro por debajo del nivel del piso, el cual se necesita para romper la roca a la altura del banco y, alcanzar una fragmentación y desplazamiento adecuado.

#### **2.2.15. Producción**

Cantidad de material ( $m^3$ ) que se puede extraer de una mina, cantera o en este caso zanja utilizando voladura. La producción efectiva depende de muchos factores, como

la calidad de la roca, la planificación y diseño de la voladura, la elección del tipo y cantidad de explosivo, y las condiciones en el sitio.

#### **2.2.16. Zanja**

Estructura excavada en una formación rocosa mediante la aplicación de explosivos. Esta técnica se utiliza para acceder a minerales o para preparar un área para la construcción de infraestructuras. La zanja se crea mediante la fragmentación controlada de la roca y la remoción de materiales no deseados para alcanzar la profundidad y la sección transversal requeridas.

#### **2.2.17. Avance**

Área detonada en cada voladura usando la misma cantidad de explosivo y la misma cantidad de accesorios de voladura con ambos métodos ( $m^2/\text{disparo}$ ).

#### **2.2.18. Desplazamiento**

Cantidad de material rocoso que se mueve o se desplaza debido a la detonación de la carga explosiva. Este desplazamiento puede tener un impacto significativo en la eficiencia de la operación de voladura y en el resultado final de la excavación. La cantidad y la dirección del desplazamiento dependerán de diversos factores, como la geología de la zona, la configuración y profundidad de la perforación, la composición y cantidad de la carga explosiva, entre otros. Es importante tener en cuenta el desplazamiento al planificar y ejecutar una operación de voladura, con el objetivo de minimizar su impacto negativo y maximizar la producción.

#### **2.2.19. Energía**

Medida de la capacidad destructiva de un explosivo. Se puede calcular a partir de su masa y su velocidad de detonación, y se utiliza comúnmente para comparar diferentes tipos de explosivos y para determinar la cantidad necesaria para realizar una tarea específica, como la voladura de rocas en una mina. La energía de explosivo es importante porque es un factor crítico en la determinación de la eficacia y seguridad de una voladura.

# Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

## 3.1. Generalidades del lugar de estudio

### 3.1.1. Ubicación geográfica.

Esta investigación se basa en la creación de un sistema de agua potable y saneamiento en algunos caseríos del distrito de Jamalca en la provincia de Utcubamba, región Amazonas del Perú; en cuanto a sus coordenadas centrales UTM: 803153,705 Norte y 9347820,121 Este, a una altitud media de 1330 m.s.n.m. (Centro Poblado Pururco).

**Figura 5**  
*Ubicación geopolítica de la región Amazonas*



Nota: fuente tomada de (INEI, 2018).



Además, esta investigación cuenta con una geología diversa debido a la ubicación en la zona de transición entre la selva y sierra. En general, la zona está compuesta por rocas sedimentarias (calizas y areniscas) y volcánicas activas y extintas, lo que ha dado lugar a la formación de rocas ígneas como la andesita, riolita y la lava.

Existen dos principales desvíos en la carretera Fernando Belaunde Terry para acceder a los caseríos y sectores del proyecto, de tal manera que al momento de ingresar al margen derecho de la carretera se encuentra el acceso número 1, situado en el desvío hacia Ñuñayjalca, y el acceso número 2 está ubicado cerca de la comisaría de Puerto Naranjitos. Por lo tanto, si se elige ingresar por el acceso número 1, se llega a las localidades de El Sauce, San Isidro y La Banda a través de una vía afirmada en construcción a nivel de bicapa; sin embargo, si se opta por ingresar por el acceso número 2 se accede a los caseríos de San Lorenzo, La Palma, El Laurel, Ramón Castilla, Vista Alegre, La Flor, Angamos, Pururco y a los sectores de El Potrero, Playa Hermosa, La Esmeralda y San Pedro mediante una trocha carrozable a nivel de afirmado.

Con respecto a la tabla 2, se muestra el acceso número 1, acceso desde la ciudad de Bagua Grande hasta Ñuñayjalca con una distancia de 14 km, tiempo de 30 minutos y un tipo de vía asfaltado; luego desde Ñuñatemple hasta San Antoño con una distancia de 40 km, tiempo de 90 minutos y un tipo de vía afirmado, ambos por vía terrestre.

**Tabla 2**

*Acceso número 1*

Item	Inicio	Fin	Distancia (Km)	Tiempo (min)	Tipo de vía	Medio
1	Bagua Grande	Ñuñayjalca	14	30	Asfaltado	Terrestre
2	Ñuñatemple	San Antoño	40	90	Afirmado	Terrestre

*Nota:* Adaptado de (Laurel, 2022).

En cuanto a la tabla 3, se muestra el acceso número 2 que va desde la ciudad de Bagua Grande hasta Puerto Naranjitos con una distancia de 16 km, tiempo de 35 minutos y un tipo de vía asfaltado; luego desde Puerto Naranjitos hasta La Esmeralda con una distancia de 2 km, tiempo de 5 minutos y a partir de acá tienen un tipo de vía afirmado; después está desde La Esmeralda hasta CP. Pururco con una distancia de 6 km y tiempo de 15 minutos; desde CP. Pururco hasta Ramon Castilla con una distancia de 2 km y tiempo de 3 minutos; desde Ramon Castilla hasta el cruce Vista Alegre con una distancia de 2 km y tiempo de 5 minutos; desde el cruce de Vista Alegre hasta el Lurel con una distancia de 5 km y tiempo de 5 minutos; desde el Lurel hasta San Lorenzo con una distancia de 2 km y tiempo de 7 minutos; luego viene desde San Lorenzo hasta La Palma con una distancia de 8 km y tiempo de 20 minutos, todo es por vía terrestre.

**Tabla 3**

*Acceso número 2*

Item	Inicio	Fin	Distancia (Km)	Tiempo (min)	Tipo de vía	Medio
1	Bagua Grande	Puerto Naranjitos	16	35	Asfaltado	Terrestre
2	Puerto Naranjitos	La Esmeralda	2	5	Afirmado	Terrestre
3	La Esmeralda	CP. Pururco	6	15	Afirmado	Terrestre
4	CP. Pururco	Ramon Castilla	2	3	Afirmado	Terrestre
5	Ramon Castila	cruce Vista Alegre	2	5	Afirmado	Terrestre
6	cruce Vista Alegre	El Lurel	2	5	Afirmado	Terrestre
7	El Lurel	San Lorenzo	2	7	Afirmado	Terrestre
8	San Lorenzo	La Palma	8	20	Afirmado	Terrestre

*Nota:* Adaptado de (Laurel, 2022).

### **3.1.2. Geomorfología y clima**

El centro poblado de Pururco se encuentra ubicado en la provincia de Utcubamba - región de Amazonas en el norte del Perú, esta zona presenta una compleja geomorfología con un relieve accidentado caracterizado por la presencia de cerros y valles profundos. Por otro lado, este centro poblado se encuentra en una zona de alta montaña, rodeado de montañas y cerros cubiertos de vegetación. Además, esta zona cuenta con una gran biodiversidad y es considerada una zona de importancia ecológica para la región.

Con respecto al clima en el centro poblado de Pururco es tropical de montaña, con temperaturas frescas y una alta humedad relativa durante todo el año, estas precipitaciones son abundantes y se concentran principalmente entre los meses de noviembre y abril, mientras que la época seca se extiende de mayo a octubre. Para la temperatura promedio anual es de alrededor de 18°C, con variaciones estacionales que van desde los 12°C hasta los 22°C; sin embargo, debido a la abundancia de precipitaciones, esta zona presenta un clima ideal para la agricultura y la producción de alimentos.

### **3.1.3. Geología**

**3.1.3.1. Geología Regional.** En la zona donde se ubica el proyecto, el cuadrángulo de Bagua Grande se sitúa en el límite entre la Cordillera Oriental de los Andes y la llanura amazónica, dando lugar a una geología compleja y variada.

Esta geología del cuadrángulo está dominada por rocas sedimentarias del Cretácico al Cuaternario, encontrándose dispuestas en una secuencia estratigráfica compleja y en ocasiones interrumpida por fallas y pliegues. Esta zona es conocida por sus depósitos de oro, cobre y plomo asociados a vetas y yacimientos, relacionándose a zonas de fracturamiento y fallas.

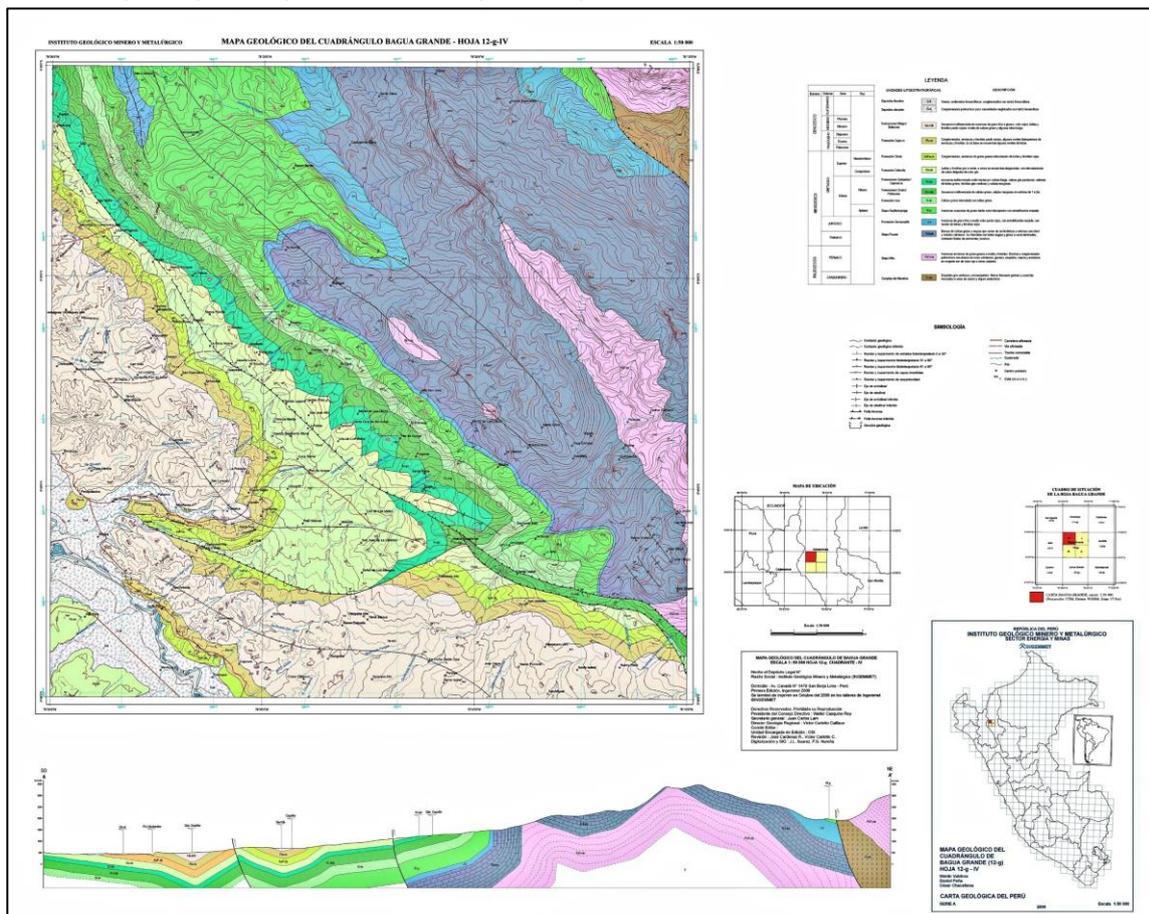
Entre las principales formaciones geológicas presentes en el cuadrángulo se encuentran la Formación Pucará, compuesta por rocas sedimentarias marinas del

Cretácico inferior, la Formación Contamana, compuesta por areniscas, lutitas y conglomerados del Paleógeno, y la Formación Iquitos comprende depósitos fluviales y de inundación del Neógeno. También se encuentran rocas volcánicas de la Formación Huayabamba, así como depósitos de sedimentación reciente como terrazas fluviales y depósitos aluviales.

Esta zona también presenta una compleja estructura geológica con la presencia de diversas fallas y pliegues que han generado una gran heterogeneidad en distribución de depósitos minerales y en topografía de la región. De tal manera, que entre las principales fallas presentes en la zona se encuentran la falla Bagua y Montañita, que han generado una importante actividad sísmica en la región.

**Figura 8**

*Plano geológico regional cuadrángulo Bagua Grande*



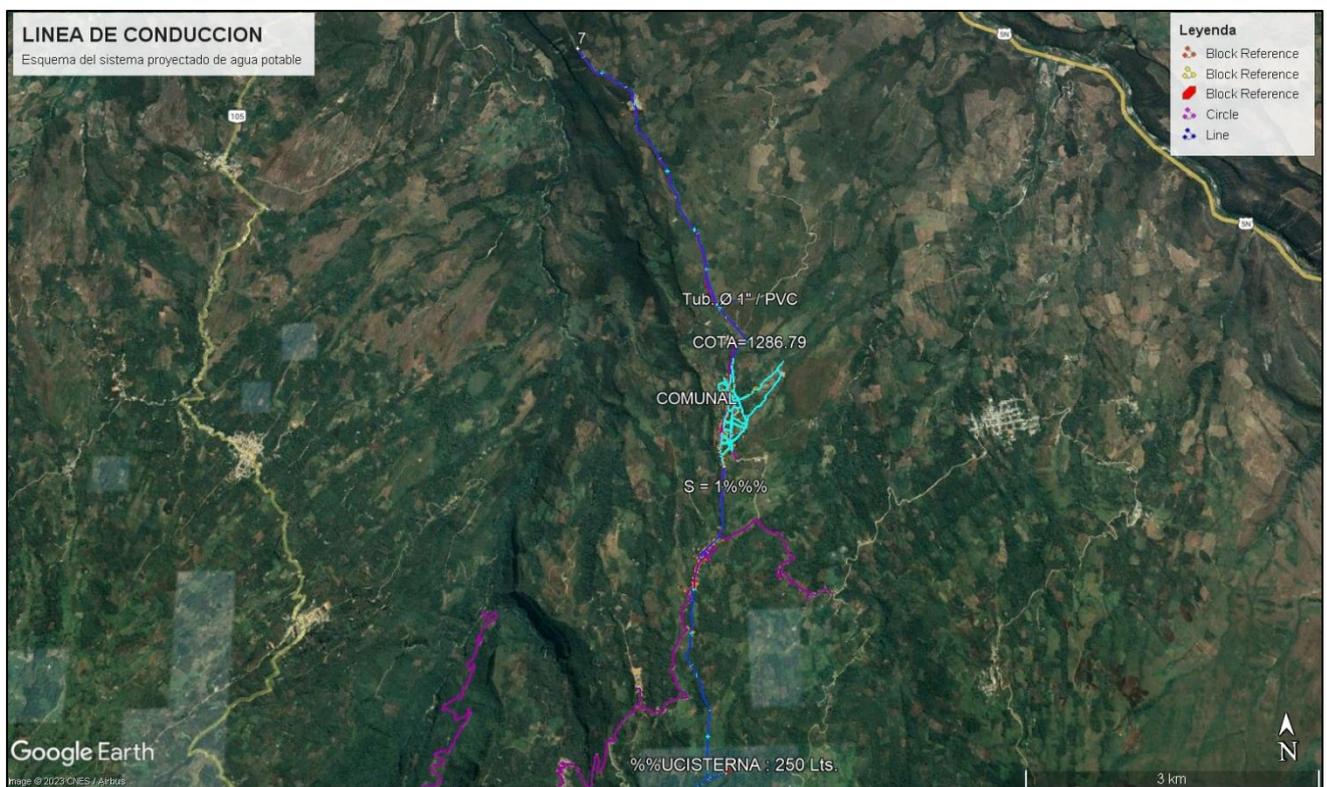
*Nota: fuente Geocatmin*

### 3.1.4. Sistema de potabilización y saneamiento

Está conformado por dos fuentes de agua tipo quebrada, captándose mediante estructuras tipo barraje para luego ser tratada mediante sedimentadores y filtros lentos. En cuanto al efluente se lleva mediante líneas de conducción hacia los sistemas de almacenamiento y finalmente, a las redes de distribución con sus respectivas conexiones domiciliarias.

**Figura 9**

*Esquema del sistema proyectado de agua potable*



Nota: fuente tomada de (Conducción KMZ, 2022).



Además, el tramo de esta línea de conducción está compuesto por tuberías de PVC con diferentes diámetros para cada tramo; en cuanto a la línea de abducción, se construirán dos tanques de almacenamiento, uno para cada quebrada, con capacidad para 50 m<sup>3</sup> cada uno. También se construirá una cámara de regulación, en la que se ajustará el flujo hacia la planta de tratamiento.

Finalmente, se construirán redes de distribución con sus respectivas conexiones domiciliarias. Con respecto a la construcción de la red de distribución se hará por tramos, dependiendo de la ubicación de las viviendas, instalándose válvulas de control en puntos estratégicos para poder controlar el suministro de agua potable. También se instalarán medidores de agua en las conexiones domiciliarias para poder llevar un control del consumo de agua y garantizar el suministro a toda la población.

### **3.1.5. Equipos y accesorios disponibles**

#### **3.1.5.1. Equipos.**

- Compresora de aire, consta en un equipo que se utiliza para generar aire comprimido y es fácilmente transportable; este aire comprimido que se va a generar será usado para el funcionamiento de las perforadoras neumáticas.

Para esta investigación se usó una compresora SULLAIR 185, por lo tanto, en la tabla 4 se muestra la ficha técnica de esta compresora.

**Tabla 4**

*Ficha técnica – Generalidades SULLAIR 185*

<b>Generalidades</b>	
Modelo	49HP (T3)
Flujo Real – cfm (m <sup>3</sup> /min)	185 (5.2)
Presión nominal – psig (bar)	100 (7)
Rango de presión, min – psig (bar)	80 (5.5)
Rango de presión, máx – psig (bar)	125 (8.6)

*Nota:* Adaptado de ficha técnica SULLAIR 185

## Figura 11

Compresora SULLAIR 185



Nota: fuente propia

- Perforadora neumática, consta en una herramienta que utiliza el aire comprimido para hacer perforaciones en materiales duros como metal, concreto o roca. Además, consta de un motor que convierte la energía del aire comprimido en movimiento rotativo, que a su vez mueve una broca de perforación.

Para esta investigación se usó una perforadora neumática Atlas Copco RH572E, por lo tanto, en la tabla 5 se muestra la ficha técnica de esta perforadora neumática.

## Tabla 5

Ficha técnica – RH572

Perforadora de la roca neumática		RH572E
Peso	kg	22.8
Longitud	mm	583
Consumo de aire a 6 bares	l/s	37
Frecuencia de impacto	golpes/min	2040
Velocidad de rotación	rpm	170
Conexión de manguera	mm	19
Portaherramienta de barrena: Hex.	mm	22x108

Nota: Adaptado de ficha técnica Atlas Copco - Perforadoras Neumáticas

**Figura 12**

*Perforación neumática*



*Nota:* fuente propia

- Generador eléctrico, consta en una herramienta portátil diseñado para proporcionar energía eléctrica confiable en entornos donde la electricidad de la red no está disponible o se encuentra inestable.

Para esta investigación se usó un generador eléctrico YAMAHA EF2600FW, por lo tanto, en la tabla 6 se muestra la ficha técnica de este generador eléctrico.

**Tabla 6**

*Ficha técnica de generador eléctrico - EF2600FW*

<b>Motor</b>	
Potencia nominal	50 Hz
Relación de compresión	12V/8.3A
Torque máximo	220V
Sistema de arranque	Convecional-monofásico
<b>Generador</b>	
Tipo	Convecional-monofásico
Tensión	220 V
Frecuencia	50 Hz
Potencia nominal	2 kVA
Potencia máxima	2.3 kVA
Salida de CC	12 V / 8.3 A
Motor (tipo)	MZ175: 4T, OHV, refrigerado por aire
Sistema de arranque	Por cuerda

*Nota:* Adaptado de ficha técnica YAMAHA - Generador eléctrico EF2600FW

**Figura 13**

*Generador eléctrico YAMAHA EF2600FW*



*Nota:* fuente tomada de ficha técnica YAMAHA - Generador eléctrico EF2600FW

- Perforadora eléctrica, consta en una herramienta de mano que se utiliza para hacer agujeros en materiales como madera, metal, roca, plástico, entre otros. Asimismo, consiste en un motor eléctrico que hace girar una broca, ya que se utiliza para hacer el agujero deseado.

Para esta investigación se usó una perforadora eléctrica BOSH SDS-máx® 2 in. Combination Hammer, por lo tanto, en la tabla 7 se muestra la ficha técnica de esta perforadora eléctrica.

**Tabla 7**

*Ficha técnica – BOSH SDS-máx®*

<b>Especificaciones</b>	
Altura	11.3"
Amperaje	15
Ancho	5.0"
BPM sin carga	1000-2150
Día máx. de orificio-Broca sacanúcleos	6"
Longitud	23.5"
Máximo diámetro de broca	2"
Peso	26.2 lb
Voltaje	120 V

*Nota:* fuente: Tomado ficha técnica BOSH SDS-máx. – Perforadoras eléctricas

**Figura 14**

*Perforación eléctrica*



*Nota:* fuente propia

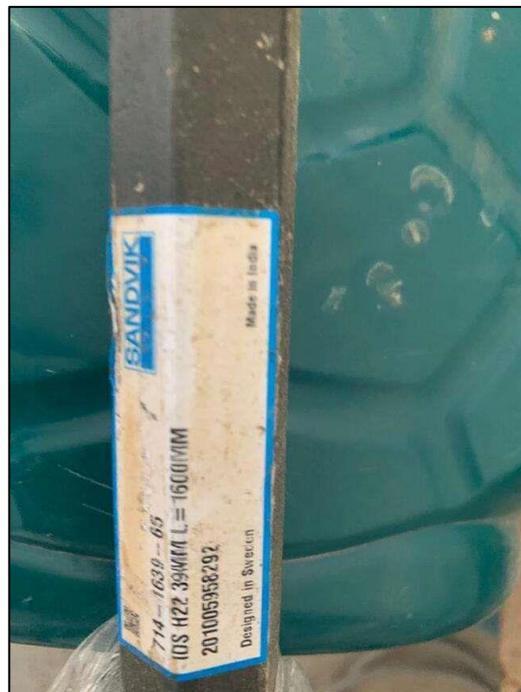
### 3.1.5.2. Accesorios de perforación.

- Broca, consta en un accesorio de perforación que se utiliza para perforar agujeros en materiales duros como concreto, roca, etc.

Para esta investigación se usó brocas de 32 mm de diámetro y 1600 mm de longitud.

### Figura 15

*Broca Sandvik*



*Nota:* fuente propia

### 3.1.6. Accesorios y explosivos disponibles para la voladura en el proyecto

**3.1.6.1. Accesorios.** En esta investigación con respecto a los accesorios de voladura se consideran los siguientes.

- Mecha de seguridad, este accesorio permite iniciar una voladura de forma más segura con una velocidad de consumo aproximada de 165 s/m.
- Fulminante común N°8, este accesorio sirve para detonar explosivos primarios que va unido y es iniciado por la mecha de seguridad para iniciar la voladura.

### 3.1.6.2. Explosivos.

- Dinamita, es un explosivo el cuál presenta un alto poder rompedor y buena resistencia al agua, compuesto a base de Nitroglicerina.

Para esta investigación sólo se tenía Dinamita Famesa Semigelatina® 65, ya que se tenía que trabajar para todos los frentes de voladura.

**Tabla 8**

*Ficha técnica – Dinamita Famesa Semigelatina® 65*

<b>Dinamita Famesa Semigelatina® 65</b>		
Densidad relativa (gr / cm <sup>3</sup> )		1.14 ± 0.1
Velocidad de detonación (m/s)	confinado	5400 ± 300
	s / confinar	3700 ± 300
Presión de detonación (kbar)		83
Potencia relativa em peso (%)		70
Fuerzas hess (mm)		22
Volumen normal de gases (l/kg)		910
Resistencia al agua		Muy buena
Categorías de humos		Primera

*Nota:* Adaptado de ficha técnica Dinamita Famesa Semigelatina® 65 - Altos explosivos

**Figura 16**

*Dinamita Famesa Semigelatina® 65*



*Nota:* fuente propia

- Cordón detonante 3P, es un explosivo compuesto en su núcleo de pentrita (PETN) recubierto con fibras sintéticas y forrado con un material plástico, al igual que la dinamita; en esta investigación sólo se contaba con cordón detonante **Pentacord 3P** y **Exsacord NP3**, 3P y NP3, es decir, que está compuesto por 3,00 gr de PETN por cada metro de cordón, teniendo una alta velocidad de detonación (6800 m/s), siendo de fácil manipuleo y seguro, permitiendo detonar los explosivos en una secuencia controlada.

**Figura 17**

*Exsacord NP3*



*Nota:* fuente propia

### **3.2. Voladuras empíricas**

De acuerdo a la necesidad de abrir zanjas para la colocación de las líneas de conducción y abducción en áreas con presencia de roca que dificultan la labor de la maquinaria pesada, esto ha llevado a la utilización de voladuras como una solución práctica. De tal manera, que en el área de estudio actualmente realizan las voladuras empíricas (ensayo y error).

Con respecto a la figura 18 se observa el área de estudio, teniendo mediciones de 77.45 m, 28.26 m y 34.40 m; en esta área de estudio se realizó la toma de muestras en cuanto a la voladura empírica (VE).

### Figura 18

Área de toma de muestras de VE



Nota: fuente propia

### Figura 19

Medición de la profundidad de los taladros de VE



Nota: fuente propia

En cuanto a la figura anterior se observó la medición de profundidad de taladros; sin embargo, para la distribución de cargas en estos taladros, la colocación de cargas explosivas no se realizó de manera uniforme. Es decir, se utilizaron diversas cantidades de explosivos en taladros, dependiendo solo de indicaciones del maestro de obra.

De tal manera, que en algunos taladros se colocaron cargas completas de dinamita (1 cartucho), mientras que en otros se usaron cantidades menores como media carga (1/2 cartucho) o un cuarto de carga (1/4), esto es de acuerdo con la cantidad disponible en el campo y cantidad de taladros perforados para el o los disparos a ser efectuados en ese día.

En la figura 20 se observa la medición del ancho de zanja, estas mediciones se realizaron durante 13 días, siendo uno de los principales parámetros para realizar la voladura empírica.

## **Figura 20**

*Medición del ancho de zanja*



*Nota:* fuente propia

Con respecto a las siguientes figuras se observa la malla de perforación para las zanjas de una voladura empírica, donde no tuvieron en cuenta parámetros adecuados, ni una planificación previa; esto ocasionó consecuencias, ya que esta falta de criterio se observó en la ubicación de taladros donde fueron colocados en lugares determinados por decisión del maestro de obra, sin ninguna realización de mediciones previas.

De tal manera, que la colocación de los taladros en estos lugares determinados solo por decisión del maestro de obra generó una distribución desigual de estos mismos, afectando de manera negativa a la producción.

### **Figura 21**

*Malla de una voladura empírica*



*Nota: fuente propia*

## Figura 22

### *Malla de perforación de una VE*



*Nota:* fuente propia

Después de que se realizó la malla de perforación de esta voladura empírica, al momento de la ejecución de los disparos se observó una falta de supervisión, donde realizaban a un ritmo de uno a dos por día, esto es dependiendo de perforaciones hechas y de material que se llevaba a campo, debiéndose a que no tenían una planificación previa de estas detonaciones.

También se observó que esta ejecución de disparos lo realizaban trabajadores que iban aprendiendo de acuerdo a lo que ejecutaban y no tenían ninguna capacitación previa, generando una falta de control en su procesamiento y falta de precisión en la rotura de la roca; además, no consideraron la velocidad de consumo de la mecha de seguridad, resultando detonaciones peligrosas y riesgosas para el personal y equipo utilizado.

### Figura 23

#### Resultados de una voladura empírica



Nota: fuente propia

Por lo tanto, en esta voladura empírica, los resultados de producción al no tener un diseño previo fueron medidos de acuerdo a las dimensiones de la zanja y longitud desde el primer taladro hasta el último taladro perforado por disparo del día, como se muestra en la siguiente figura.

### Figura 24

#### Medición de resultados de VE



Nota: fuente propia

En cuanto a su producción de esta investigación no consideraron a la fragmentación, debiéndose a que no es un proyecto minero, sino que es un proyecto de obra civil donde la producción para sus frentes de voladura dependió de metros cúbicos ( $m^3$ ) de material que fue removido por día de trabajo.

Para el avance de esta investigación con las voladuras empíricas resultó ser muy irregular, debiéndose a la falta de planificación para los frentes de voladura, es decir, que estas detonaciones no eran constantes; este avance dependió de los días que se tarda en terminar de detonar el área de toma de muestras.

### **Figura 25**

*Medición del avance en voladuras empíricas*



*Nota:* fuente propia

De tal manera, que en la tabla 9 se detallan los tramos que realizaron las voladuras empíricas durante un periodo de 13 días entre el mes de agosto y el primer día de setiembre, para cubrir completamente el área de estudio considerada en esta

investigación, teniendo en cuenta el ancho de la zanja (m) y la profundidad de perforación (m); también se muestra el avance total que fue 140.10 m con una producción de 83.42 m<sup>3</sup>.

**Tabla 9**

*Datos recolectados de las voladuras empíricas*

N° Vol.	Día	Hora	Avance (m)	Ancho Zanja (m)	Profundidad Perforación (m)	Producción (m <sup>3</sup> )
1	23/08/2021	12:35	8.20	0.80	0.70	4.59
2	23/08/2021	17:10	6.10	0.80	0.70	3.42
3	24/08/2021	13:10	14.00	0.80	0.70	7.84
4	25/08/2021	12:00	10.10	0.80	0.70	5.66
5	25/08/2021	15:20	5.40	0.80	1.00	4.32
--	26/08/2021	--	--	--	--	--
6	27/08/2021	15:05	17.10	0.80	0.70	9.58
7	28/08/2021	17:03	16.00	0.80	0.70	8.96
--	29/08/2021	--	--	--	--	--
8	30/08/2021	13:00	14.60	0.80	0.70	8.18
9	30/08/2021	16:27	5.70	0.80	1.00	4.56
10	31/08/2021	14:13	16.30	0.80	0.70	9.13
11	31/08/2021	17:20	4.50	0.80	1.00	3.60
12	1/09/2021	13:51	17.00	0.80	0.70	9.52
13	1/09/2021	16:57	5.10	0.80	1.00	4.08
<b>Total</b>			<b>140.10</b>	<b>Total</b>		<b>83.42</b>

*Nota:* fuente propia

También está el acabado de zanja donde se observó que cuando se llevó a cabo con voladuras empíricas, los taladros no estuvieron distribuidos de manera adecuada como se muestra en la figura 26; es decir, que el explosivo no logra cumplir su función de manera eficiente, ya que, en lugar de romper la roca, solo causa una fractura, siendo un mayor esfuerzo para la excavadora y prácticamente duplica el trabajo requerido.

## Figura 26

*Acabado de zanja con VE*



*Nota:* fuente propia

Finalmente, está la seguridad con respecto a las voladuras empíricas existió un conocimiento limitado en cuanto al uso de explosivos, teniendo implicaciones en la seguridad de estas voladuras; es decir, que el desconocimiento acerca del manejo de estos explosivos ha podido ocasionar accidentes y otros eventos no deseados, resaltando la necesidad de un mejoramiento con respecto a la práctica de voladuras y formación en seguridad.

### **3.3. Voladuras planificadas**

De acuerdo con los resultados poco eficaces de las voladuras empíricas, estas voladuras planificadas se presentan como una opción superior en términos de control y rendimiento.

Por ello, en esta investigación se trabajará con el explosivo y accesorios disponibles, distribución del explosivo en el taladro, diseño de la malla de perforación, la

secuencia de voladura no se tomará en cuenta debido a los accesorios disponibles, la definición de la geología y la implementación de medidas de seguridad.

Por otro lado, para que se garantice la seguridad y eficacia de la operación de voladuras planificadas se tiene en cuenta un procesamiento estructurado, donde primero se identifica la ubicación de la zanja, siendo importante, ya que se conocerá una ubicación exacta donde se realizará la zanja para determinar las condiciones geológicas y ambientales del área de estudio.

En cuanto a la figura 27 se observa el área de estudio, esta área de estudio se realizó la toma de muestras con respecto a la voladura planificada (VP).

### Figura 27

Área de toma de muestras VP

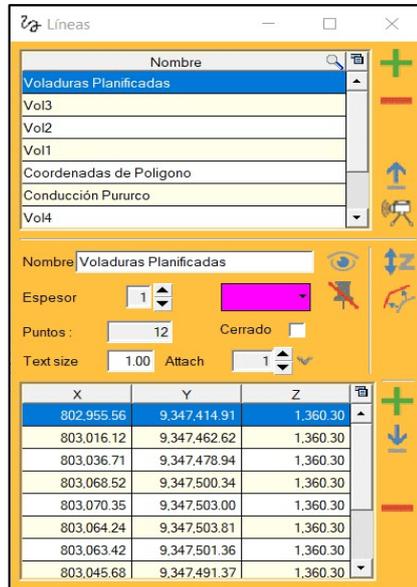


Nota: fuente propia

De tal manera, que es la zanja donde se realizaron las primeras voladuras planificadas y a partir de estas, dependiendo de los resultados de este trabajo se implementó el procesamiento de voladura para todo el proyecto, encontrándose ubicado en el Centro Poblado de Pururco, distrito de Jamalca, provincia de Utcubamba, región de Amazonas con coordenadas geográficas del polígono detalladas en la figura 28 y tabla 10.

**Figura 28**

*Coordenadas Polígono de VP*



*Nota:* fuente propia tomado de IBlast 8.1

**Tabla 10**

*Coordenadas del polígono de VP*

X	Y
802,955.56	9,347,414.91
803,016.12	9,347,462.62
803,036.71	9,347,478.94
803,068.52	9,347,500.34
803,070.35	9,347,503.00
803,064.24	9,347,503.81
803,063.42	9,347,501.36
803,045.68	9,347,491.37
803,016.32	9,347,468.54
802,973.50	9,347,436.12
802,953.52	9,347,418.38
802,955.59	9,347,414.95

*Nota:* fuente propia

En segundo lugar, se realizó una evaluación del terreno, siendo necesario, ya que se determinaron las características de las rocas presentes en el área de estudio; de tal manera, que de acuerdo a lo que se describió en la parte geológica de esta investigación se menciona al cuadrángulo “Bagua Grande” que está formado en su mayoría por rocas sedimentarias.

Sin embargo, no existe mayor información más allá de lo que se describió en esta parte de geológica, por lo tanto, se procedió hacer una identificación visual del tipo de roca presente en la zona de la zanja, donde se determinó la presencia mayoritaria de caliza (prueba de reacción del ácido clorhídrico).

Con respecto a la figura 29 se muestra las consideraciones sobre la roca a detonar, es decir las propiedades elásticas y físicas de esta caliza que fueron utilizadas en esta investigación para las simulaciones respectivas.

**Figura 29**

*Consideraciones sobre la roca a detonar*

<b>Name</b>	Density (kg/m3)	2,600.0
Caliza	P wave velocity (m/s)	1,660.0
	Compressive strength (Mpa)	250.00
	Tensile strength (Mpa)	10.00
	Young module (Gpa)	100.00
	Poisson ratio	0.23

*Nota:* fuente propia tomado de IBlast 8.1-Default

En la figura 30 se observa la medición de potencia de la roca, esta medición es importante ya que es de gran influencia para determinar en qué rango de potencia se encuentra la roca; lo cual, la medición de potencia de la roca fue de 70 cm, siendo equivalente a 0.70 m, encontrándose en el rango de poco potentes.

## Figura 30

### Medición de potencia de la roca



Nota: fuente propia

Por otro lado, en tercer lugar, se identificó todos los requerimientos para este proyecto, como la profundidad y ancho de la zanja, donde esta zanja es requerida para colocación de una línea de conducción de agua (potabilización), en este sentido las dimensiones requeridas para esta tubería en zanja son  $0.80 \times (0.70 \text{ m} - 1.00 \text{ m})$  a lo largo del área de estas dimensiones del proyecto descritas en capítulos anteriores.

En cuarto lugar, se realizó la selección de tipo de explosivo, teniendo en cuenta las condiciones del área de estudio, es decir, que este tipo de explosivo sea el más adecuado para esta voladura de rocas; de tal manera, que este proyecto cuenta con un solo tipo de explosivo que es la dinamita (Semigelatina 65), adaptándose al diseño de voladura y obtener mejores resultados posibles.

En quinto lugar, se diseñó el patrón de perforación para que permita una adecuada distribución de la carga explosiva; en esta investigación se tiene como punto de inicio la ecuación para el cálculo del burden de Konya para la distribución o patrón de perforación.

De la ecuación (1) se tiene:

$$B = 0.012 \left( \frac{2 \times 1.14}{2.60} + 1.50 \right) \times 32$$

$$B = 0.91 \text{ m} \approx 90 \text{ cm}$$

Teniendo en cuenta las dimensiones de la zanja (0.80 x 1.00 m)

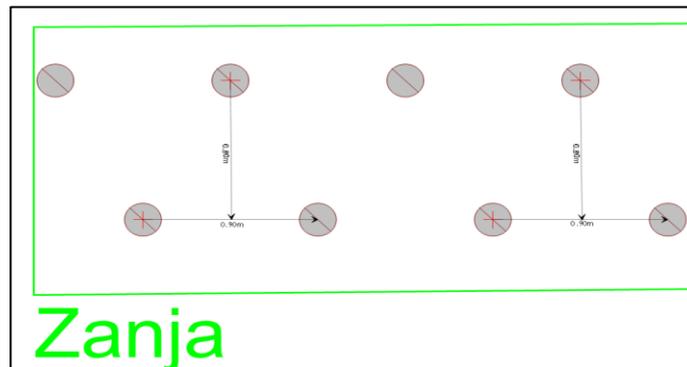
$$0.75(0.90) < 0.80 < 1.25(0.90)$$

$$0.675 < 0.80 < 1.125$$

Konya (2009) indica que para estas características de dimensiones, se sugiere un diseño de perforación de 2 hileras a lo largo de la zanja, distribuyendo los taladros como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 31**

*Distribución inicial de los taladros en la zanja*



*Nota:* fuente propia

En sexto lugar, se determinó la cantidad y distribución de explosivos requeridos para que se logre un fracturamiento deseado de las rocas; es decir, que para distribuir de manera adecuada el explosivo en el taladro es necesario calcular el taco adecuado, de acuerdo a Konya (2009) con la ecuación (2), se tiene:

$$T = 0.7 \times B$$

$$T = 0.7 \times 0.90 = 0.63 \text{ m}$$

Para saber si este taco calculado tiene el factor de seguridad adecuado aplicamos la ecuación (4):

$$SD = \frac{D}{(W)^{1/3}}$$

$$SD = \frac{0.63 + 10(0.032)}{\left(\frac{\pi(0.032)^2}{4} \times 10(0.032) \times 1140\right)^{1/3}}$$

$$SD = 1.19$$

De acuerdo con la figura 3, este factor de seguridad se encuentra en el rango de SD donde el flyrock y el ruido son insignificantes, se tendrá una buena fragmentación, vibración y onda aérea moderados, así como el esponjamiento del material y un máximo apilamiento.

Con respecto a la cantidad de explosivo por taladro dependerá de la potencia de la roca, por lo tanto, de la profundidad de la perforación y del taco ya calculado. Siendo que la potencia de la roca está entre 0.70 y 1.00 m.

Para potencias de 0.70 m:

$$\#Cartuchos = \frac{0.70 - 0.63}{0.205} = 0.34 \approx \frac{1}{2} \text{ Cartuchos}$$

Para potencias de 1.00 m:

$$\#Cartuchos = \frac{1 - 0.63}{0.205} = 1.80 \approx 2 \text{ Cartuchos}$$

Para el séptimo lugar, se establecieron procedimientos de seguridad, garantizando que esta voladura se realice de manera segura y minimice el riesgo para los trabajadores y el entorno. Por otro lado, para realizar las voladuras planificadas con el objetivo de aumentar la producción y el avance se estableció algunos procedimientos para salvaguardar a los trabajadores y al entorno (localidades y estructuras) cercanas donde se realizarán las voladuras, este procedimiento tiene las siguientes pautas:

- Planificación, en este punto antes de llevar a cabo una voladura, es necesario una planificación y evaluación de los riesgos, esto incluye la proximidad de estructuras y otros factores relevantes como restricciones de tránsito de personal y/o pobladores durante las detonaciones.
- Uso de protocolos de comunicación claros, en este punto es necesario establecer un sistema de comunicación claro entre los miembros del equipo involucrado en la voladura.
- Zonas de exclusión y evacuación, en este punto se tiene que las detonaciones se llevan a cabo en un área urbana y resulta desafiante evacuar a todas las personas, estableciendo un radio de seguridad de 100 metros desde el punto de detonación hasta la zona segura, ya que se trata de voladuras de menor escala con cargas explosivas reducidas y se prioriza la evacuación de las personas que se encuentren dentro de este radio.
- Verificación del amarre del cordón detonante con los taladros, en este punto siempre hay que asegurarse de que el cordón detonante este tensado y procurando la perpendicularidad para evitar fallas en el encendido.
- Capacitaciones en seguridad, en este punto se debe siempre realizar capacitaciones y charlas de seguridad previas a la realización de voladuras.

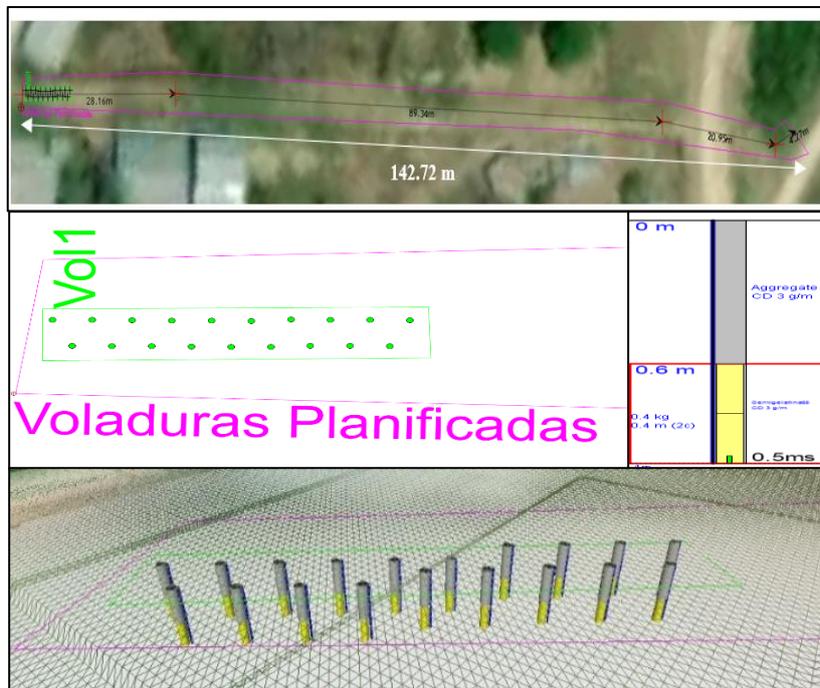
Para el octavo lugar se realizaron pruebas piloto (simulaciones), es decir que, para realizar la voladura completa, deben realizar pruebas piloto para asegurarse de que el diseño de la voladura es adecuado y ajustar los detalles necesarios.

Por lo tanto, mediante la utilización de software especializado (IBlast 8.1) en simulación de voladuras, se llevan a cabo análisis detallados de la distribución de energía y los efectos resultantes en el macizo rocoso antes de proceder con la detonación.

Estas simulaciones permiten perfeccionar los detalles y afinar los parámetros necesarios para garantizar un resultado óptimo, como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 32**

*Parámetros para simulación de la primera voladura*

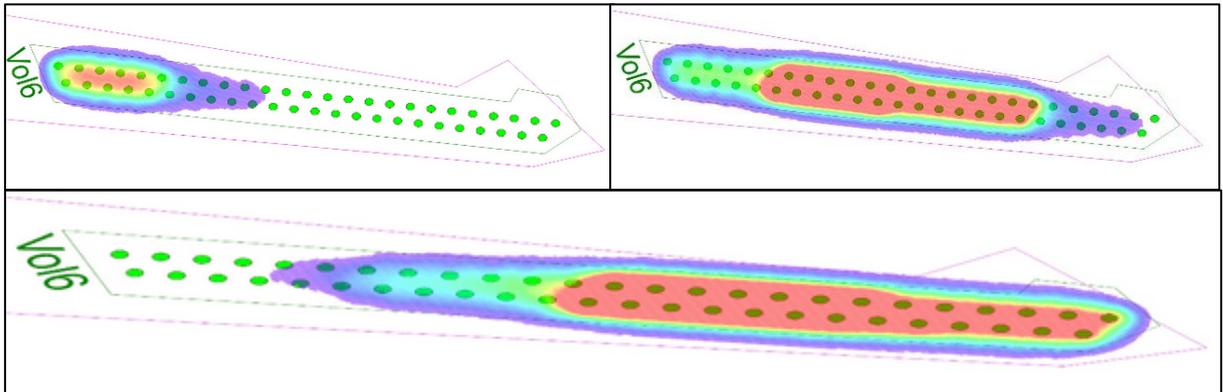


*Nota:* fuente propia

En esta figura 33 se observa la distribución de energía, teniendo en cuenta todos los parámetros para la simulación de la sexta voladura.

**Figura 33**

*Distribución de energía del Vol6*

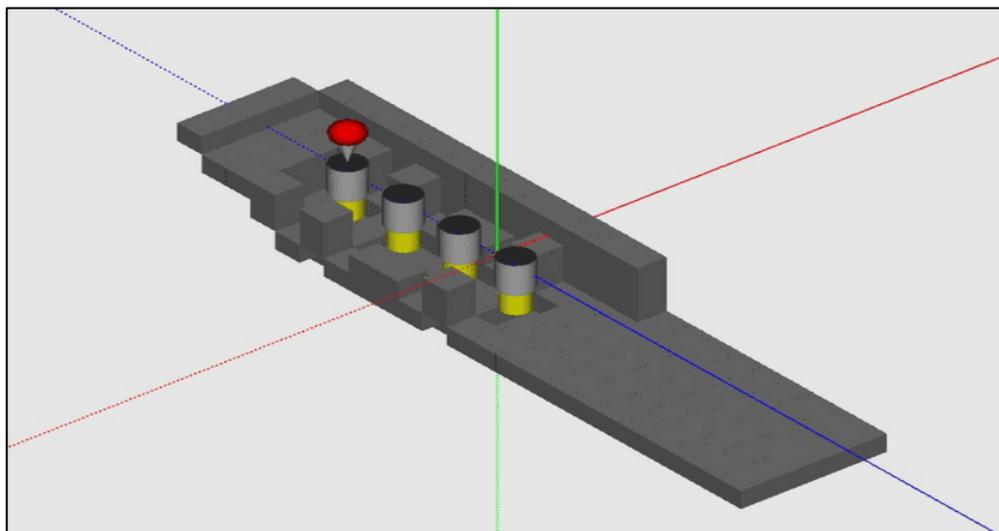


*Nota: fuente propia*

Por otro lado, para las siguientes figuras se observan las simulaciones que se realizaron con el software especializado (IBlast 8.1); es decir todas las pruebas piloto requeridas, donde se aseguró que el diseño de la voladura es adecuado y de esta manera antes de que se realice una voladura completa se ajustaron todos los detalles necesarios.

**Figura 34**

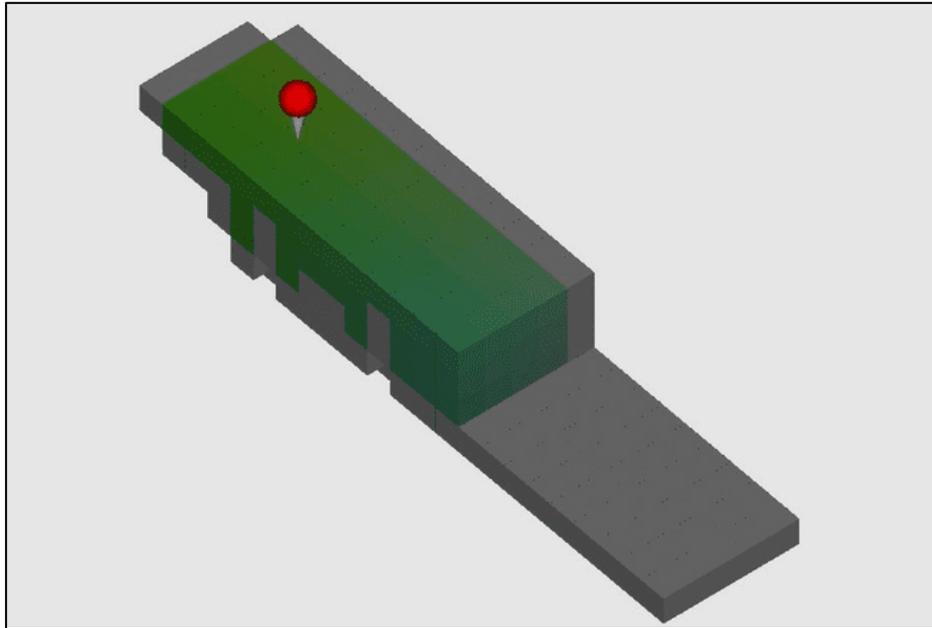
*Simulación configuración de las cargas en la zanja*



*Nota: fuente propia*

**Figura 35**

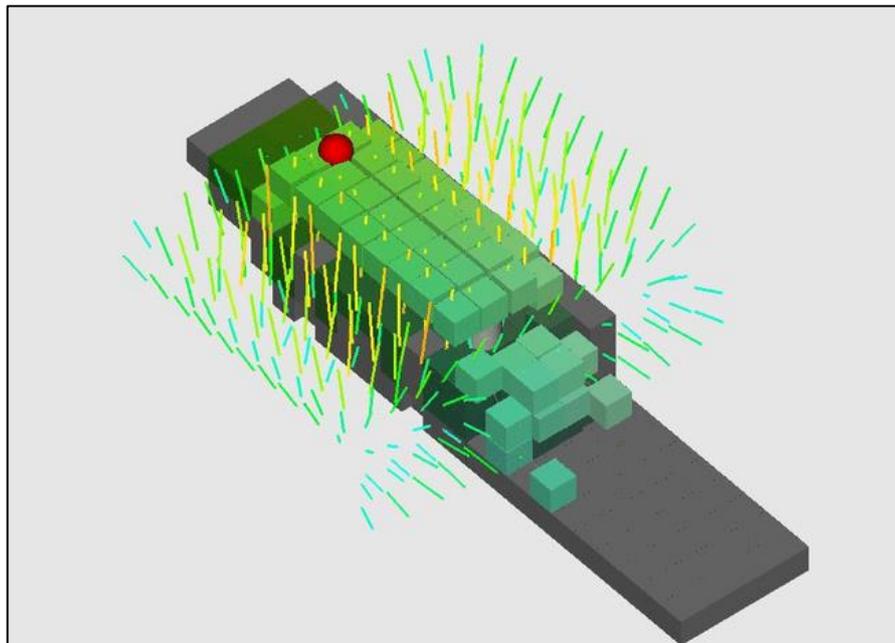
*Simulación Voxeles que simulan la roca (verde)*



*Nota: fuente propia*

**Figura 36**

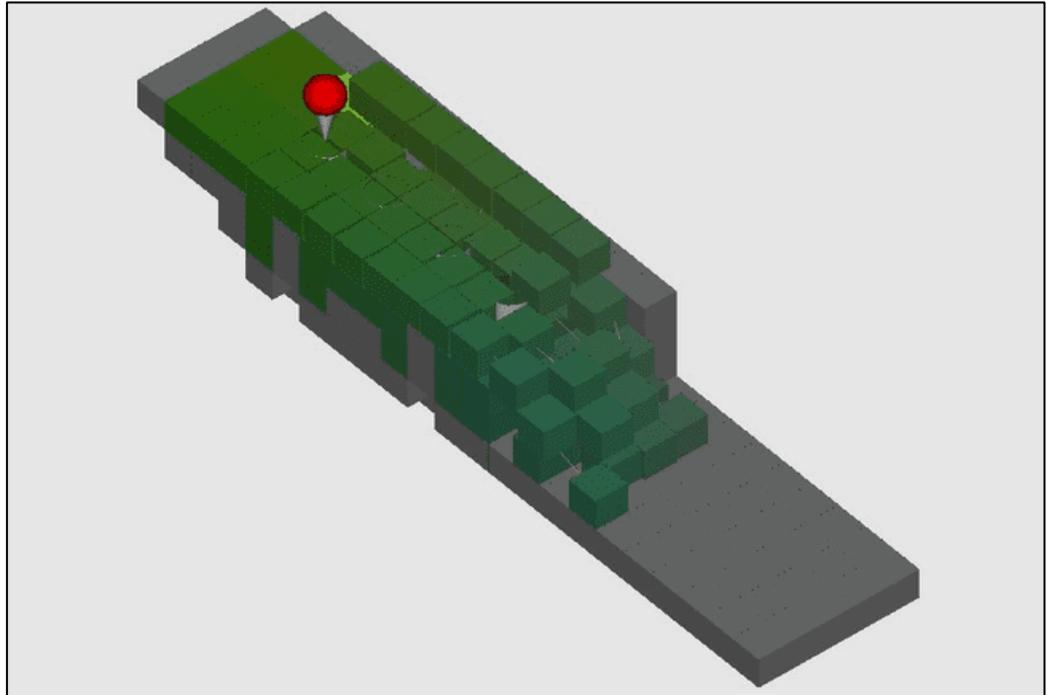
*Simulación vectores de velocidad de Voxeles en la detonación*



*Nota: fuente propia*

**Figura 37**

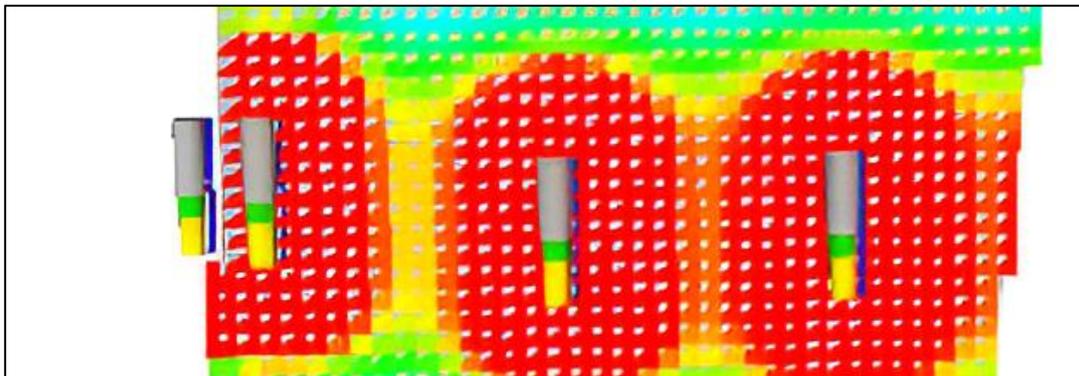
*Simulación fracturamiento de la roca*



*Nota: fuente propia*

**Figura 38**

*Simulación VPPc vertical*



*Nota: fuente propia*

En el noveno lugar, después de haber establecido sus procedimientos de seguridad y realizado sus pruebas piloto (simulaciones) requeridas y/o necesarias, se realizaron una voladura completa; es decir que en el primer procedimiento que es la planificación de estas voladuras se ha hecho hincapié con respecto al cumplimiento de estas normativas de

seguridad y parámetros determinados, dando como resultado voladura que se ajustan de acuerdo a las simulaciones previas realizadas, así como se muestra en las figuras anteriores.

En esta figura 39 se observa el trazado de malla de acuerdo a lo especificado en las simulaciones realizadas anteriormente.

### **Figura 39**

*Trazado de malla de acuerdo a lo especificado*



*Nota:* fuente propia

Con respecto a esta figura 40 se observa la malla de perforación, donde se tiene a la marcación para la parte izquierda y perforación para la parte derecha de los taladros de acuerdo a lo que se ha planificado con las simulaciones que se realizaron anteriormente.

## Figura 40

### *Malla de perforación VP*



*Nota:* fuente propia

Por último, se evaluaron los resultados de la voladura planificada como se muestra en la figura 41; esto es importante para determinar si se ha logrado una producción deseada y si cumplieron con todos los requerimientos de este proyecto.

## Figura 41

### *Resultados de VP*



*Nota:* fuente propia

Por ello, con estos resultados de voladuras planificadas se detallan los siguientes puntos.

El primero punto es con respecto a la producción, como se muestra en la tabla 12 se observa los resultados de producción con la voladura planificada durante un periodo de 6 días, teniendo en cuenta todos los parámetros geométricos determinados en este plan, así como el burden, espaciamiento, profundidad de perforación y número de taladros perforados por disparo. De tal manera, que en esta tabla se observó un burden total de 4.80 m y una producción de 175.46 m.

**Tabla 11**

*Resultados de producción voladuras planificadas*

N° Vol.	Día	Hora	B (m)	S (m)	Profundidad Perforación (m)	N° Taladros	Producción (m³)
1	3/09/2021	11:40	0.80	0.90	1.00	19.00	13.68
2	3/09/2021	16:30	0.80	0.90	1.00	28.00	20.16
--	4/09/2021	--	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
--	5/09/2021	--	0.00	0.90	0.00	0.00	0.00
3	6/09/2021	12:30	0.80	0.90	0.70	77.00	38.81
4	7/09/2021	12:30	0.80	0.90	0.70	76.00	38.30
5	8/09/2021	12:30	0.80	0.90	0.70	58.00	29.23
6	9/09/2021	12:30	0.80	0.90	1.00	49.00	35.28
<b>Total</b>			<b>4.80</b>		<b>Total</b>		<b>175.46</b>

*Nota:* fuente propia

El segundo punto es el avance, el progreso de las voladuras planificadas está condicionado por la cantidad de días que se requiere para detonar el área de toma de muestras, estas muestras tomadas se realizaron durante un periodo de 6 días, donde su avance obtenido fue de 142.72 m. Lo cual, estos datos correspondientes se presentan en la tabla 12.

**Tabla 12***Resultados del avance voladuras planificadas*

<b>N° Vol</b>	<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>Avance (m)</b>
1	3/09/2021	11:40	8.77
2	3/09/2021	16:30	12.30
--	4/09/2021	--	--
--	5/09/2021	--	--
3	6/09/2021	12:30	35.63
4	7/09/2021	12:30	34.99
5	8/09/2021	12:30	27.54
6	9/09/2021	12:30	23.49
<b>Total</b>			<b>142.72</b>

*Nota:* fuente propia

En el tercer punto está el acabado de zanja, esta implementación de voladuras planificadas ha permitido considerar numerosos parámetros que anteriormente no se tenían en cuenta durante las voladuras empíricas. Como resultado, se logró obtener acabados en la zanja con una mayor trituración de la roca, ya que a su vez permite que la excavadora realice su labor de manera más eficaz. En otras palabras, se establece una secuencia en la que la voladura es disparada y, posteriormente, se crea la zanja de manera más eficiente.

Esto se traduce en zanjas con acabados mejorados mediante el proceso de voladura, como se muestra en la figura 42 que se observa el fracturamiento de roca que se realizó con la voladura planificada y el acabado de zanja que se realizó la limpieza con la excavadora.

## Figura 42

*Fracturamiento de roca y acabado de zanja (limpieza con excavadora)*



*Nota:* fuente propia

En el último punto, se tiene a la seguridad, en este punto gracias a la implementación de los rigurosos protocolos de seguridad establecidos, se ha logrado establecer un entorno de trabajo más ordenado y estructurado. Además, se promueve una mayor conciencia y cuidado en el manejo de los explosivos, respetando escrupulosamente las distancias de seguridad requeridas, utilizando correctamente los equipos de protección personal (EPP), y considerando todos los aspectos relacionados con los accesorios de voladura.

## Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

### 4.1. Análisis de la información

Con las voladuras planificadas se obtuvieron mejores resultados, logrando obtener acabados en la zanja con una mayor trituración de la roca y de esta manera permitió a que la excavadora realice su trabajo de una forma más eficiente. Por lo tanto, al comparar al diseño versus método empírico en voladura se obtuvo mejores resultados con el diseño de voladura (voladura planificada).

## **4.2. Discusión de resultados**

### **4.2.1. Método empírico en voladura**

Con este método empírico en voladura en cuanto a la distribución de cargas en taladros se tienen que en la colocación de cargas explosivas no se realizó de manera uniforme, empleando diversas cantidades de explosivos en estos taladros y dependiendo solo de las indicaciones del maestro de obra. De tal manera, que en algunos taladros se colocaron cargas completas de dinamita (1 cartucho), mientras que otros utilizaron menores cantidades como  $\frac{1}{2}$  cartucho o  $\frac{1}{4}$  de carga, siendo de acuerdo a la cantidad disponible en campo y cantidad de taladros perforados para el o los disparos a ser efectuados en ese día.

Además, se realizó una malla de perforación para estas zanjas de voladuras empíricas, pero no tuvieron en cuenta parámetros adecuada ni una planificación previa, sin embargo, se ejecutó estas voladuras empíricas durante un período de 13 días para que cubra de manera completa el área de estudio, teniendo en cuenta al ancho de zanja y la profundidad de perforación, donde tuvieron un total de 140.10 m de avance y con una producción de 83.42 m<sup>3</sup>.

Asimismo, se realizó el acabado de zanja observándose que con las voladuras empíricas sus taladros estuvieron distribuidos de manera inadecuada, no logrando cumplir su función de forma eficiente causando solo una fractura; por ello, en la seguridad de este método existieron implicaciones donde existió un conocimiento limitado con respecto al uso de explosivos, pudiendo ocasionar accidentes y otros eventos no deseados.

Al comparar con la investigación de Ajel et al. (2022) refiere que de manera experimental realizan las mitigaciones de vibraciones a través de zanjas abiertas y rellenas, donde han obtenido que en la excavación de una barrera de zanja abierta ha reducido sus componentes verticales de velocidades máximas de partículas entre un 60% y 95.4%, teniendo tasas altas de atenuación vinculándose con frecuencias altas de

vibraciones y para la construcción de una barrera de zanja abierta pasiva reduce sus velocidades entre 66% y 88.3%; es decir que esta investigación reveló un incremento de velocidades en sus puntos frente a la zanja y esto se debe a las ondas reflejadas.

Además, comparando con la investigación de Arana (2021) donde indica que sus dimensionamientos de zanjas de infiltración para la localidad de Shulluqocha tuvieron ladera de una pendiente entre un 30 a 40%, ancho del borde superior fue 0.50 m, ancho de base fue 0.40 m, altura fue 0.30 m, al fondo de estas zanjas se encuentran sin pendiente con un espaciamiento entre zanjas fue 14 metros y espaciamiento entre tabiques entre 10 a 20 m; es decir que esta investigación reveló la importancia de sus dimensionamientos de zanjas de infiltración al momento de realizar su construcción, ya que al tener en cuenta todos sus parámetros genera una alimentación en las diferentes fuentes de agua existentes para esta localidad.

#### **4.2.2. Diseño de malla en voladura**

En cuanto a este diseño de malla en voladura se realizaron voladuras planificadas, teniendo en cuenta pasos para la planificación de dicha voladura para obtener mejores resultados de producción en zanjas rocosas como las coordenadas del polígono donde se realizan las voladuras planificadas, así como la geología de la zona de estudio donde se tuvo en cuenta las propiedades físicas y elásticas de la Caliza, también se tuvo en cuenta el tipo de explosivo a utilizar que fue la dinamita (Semigelatina 65), adaptándose al diseño de voladura; este diseño se realizó mediante el cálculo de burden de Konya para así poder obtener la distribución inicial de los taladros en la zanja.

De tal manera, se realizó voladuras planificadas durante 6 días, donde se obtuvo una producción de 175.46 m<sup>3</sup> y con un avance de 142.72 m, en cuanto al acabado de zanjas esta implementación de voladuras planificadas permitió considerar diversos parámetros que anteriormente no se tenían en cuenta durante las voladuras empíricas; es decir que estas voladuras planificadas permitieron establecer una secuencia en donde la

voladura es disparada y de esta manera se crea la zanja de una forma más eficaz, traduciendo esto en zanjas con acabados mejorados a través de un procesamiento de voladura.

De acuerdo a lo realizado en estas voladuras planificadas se obtuvo que gracias a esta implementación de los rigurosos protocolos de seguridad y con todos los parámetros adecuados, lograron establecer un entorno de trabajo más ordenado y estructurado; por lo tanto, se promovió una conciencia y cuidado mayor en cuanto al manejo de sus explosivos, donde utilizaron de manera correcta sus EPP y asimismo consideraron todos sus aspectos vinculados con sus accesorios de voladura.

Comparando con la investigación de Huallpachoque (2018) indica que en el proyecto minero Las Bambas se determinó una carga máxima a 15m, donde los explosivos tienen que ser de 4kg con un exceso de carga causando una velocidad pico partícula siendo mayor a 20 mm/s, requiriendo una utilización de factores de cargas mínimas entre 0.20 a 0.30 kg/m<sup>3</sup>; de tal manera que al diseñar y estimar voladuras para obras civiles como las zanjas se logró controlar el nivel de las vibraciones, asimismo se controló la proyección de rocas, determinando su taco adecuado a través del factor de seguridad teniendo un resultado entre 0.92 a 1.40; además, la velocidad pico partícula en voladura de zanja fue de 16.9 mm/s.

Asimismo, se compara con la investigación de Balamadeswaran et al. (2022) donde señala que requiere de un diseño de patrones de voladura para monitorear las vibraciones de voladura en subestructuras durante una voladura real; determinando que utilizan explosivos submarinos adecuados, teniendo en cuenta todas las precauciones de seguridad para todo el personal al momento de realizar estas detonaciones para las zanjas y así establecer oleoductos y gasoductos, encontrando que estas con el diseño permitió monitorear todos sus movimiento de vibraciones garantizando la seguridad de todos los trabajadores.

Por otro lado, al comparar con la investigación de Díaz y Saavedra (2022) refiere que para realizar construcciones de zanjas no solo tienen en cuenta parámetros para el diseño de una malla en voladura (voladura planificada), sino que también para este tipo de proyectos tienen en cuenta fundamentos y lineamientos de la guía del PMBOK 6ta edición, ya que es requerido para obras de construcciones de sistemas de agua potable y saneamientos en la región Amazonas; es decir que obtuvieron beneficios como la ayuda de sistematizar sus procedimientos de manera ordenada en la ejecución de su obra y asimismo ayuda a encontrar falencias en su desempeño y calidad de esta obra para que se solicite acciones correctivas necesarias y de esta manera se evite daños sociales y económicos.

#### **4.3. Contrastación de la hipótesis**

En la tabla 13 presenta los resultados obtenidos en términos de producción de metros cúbicos ( $m^3$ ) en dos enfoques diferentes de voladura: el enfoque empírico y el enfoque planificado. Los datos se muestran en función de varias métricas estadísticas, incluyendo la media, desviación estándar y la media del error estándar.

En el enfoque de voladura empírica, se realizaron un total de 13 voladuras, y la producción promedio fue de aproximadamente  $616.92 m^3$  por voladura; en cuanto a la desviación estándar de estos resultados fue de alrededor de  $289.659 m^3$ , lo que indica la variabilidad de la producción entre las diferentes voladuras. Además, la media del error estándar se calculó en aproximadamente  $80.337 m^3$ , lo que muestra cuánto difieren las producciones individuales de la media.

Por otro lado, en el enfoque de voladura planificada, se llevaron a cabo 6 voladuras en total. En este caso, la producción promedio fue significativamente mayor, alrededor de  $2349.83 m^3$  por voladura. Sin embargo, la desviación estándar de la producción fue más alta, aproximadamente  $1342.009 m^3$ , lo que sugiere una mayor variabilidad en los

resultados entre las diferentes voladuras planificadas. La media del error estándar se calculó en unos 547.873 m<sup>3</sup> en este enfoque.

Estos resultados reflejan cómo la voladura planificada tiene una producción mucho mayor con menos cantidad de disparos que la voladura empírica. Es así como el enfoque planificado parece tener una producción promedio más alta, pero también una mayor variabilidad en comparación con el enfoque empírico. Estas diferencias pueden deberse a la influencia de factores geológicos, técnicos y de planificación en los resultados de producción en zanjas rocosas.

Ante ello, se procedió a realizar la contrastación de hipótesis:

**H<sub>1</sub>:** Comparativamente, un diseño de voladura generará una mayor eficiencia en los resultados de producción, con respecto a una voladura empírica utilizada tradicionalmente en la construcción de zanjas rocosas

**H<sub>0</sub>:** Comparativamente, un diseño de voladura no generará una mayor eficiencia en los resultados de producción, con respecto a una voladura empírica utilizada tradicionalmente en la construcción de zanjas rocosas

### Tabla 13

*Comparación de producción en voladuras empíricas y planificadas en zanjas rocosas*

	Voladura	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Producción (m3)	Voladura empírica	13	616,92	289,659	80,337
	Voladura planificada	6	2349,83	1342,009	547,873

*Nota:* Datos fueron obtenidos de ficha de registro

En cuanto a la tabla 14 presenta un análisis comparativo de la producción de metros cúbicos en grupos de voladura empírica y planificada. La Prueba de Levene revela diferencias significativas en las varianzas de producción entre los grupos. Luego, se contrasta la hipótesis con la probabilidad obtenida de 0,000, concluyendo que existen diferencias significativas en la producción de la voladura empírica y planificada. En este

sentido, se rechaza la hipótesis alterna y se indica que, comparativamente, un diseño de voladura generará una mayor eficiencia en los resultados de producción, con respecto a una voladura empírica utilizada tradicionalmente en la construcción de zanjas rocosas

**Tabla 14**

*Diferencias en la producción de metros cúbicos en grupos comparativos de voladura empírica y planificada*

		Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
Producción (m3)	Se asumen varianzas iguales	24,651	,000	-4,575	17	,000	-1732,910	378,757	-2532,017	-933,803
	No se asumen varianzas iguales			-3,130	5,216	,025	-1732,910	553,732	-3138,750	-327,070

*Nota:* Datos fueron obtenidos de ficha de registro

## Conclusiones

Según las tablas 13 y 14, al comparar el diseño versus método empírico en voladura, se obtuvo mejores resultados con el diseño de malla en voladura, de tal manera realizando una voladura planificada permitió a que se adquiriera acabados en la zanja con una mayor trituración de la roca (Figuras 26 y 42), también permitió a que la excavadora realice su trabajo de una forma más eficiente y así mismo logró establecer un entorno de trabajo más estructurado y ordenado, contando con medidas de seguridad del personal con todos sus EPP adecuados.

En cuanto al método empírico de voladura se determinó que se utilizan diversas cantidades de explosivos en los taladros, donde en algunos de ellos se colocaron cargas completas de dinamita y otros utilizaron menores cantidades como  $\frac{1}{2}$  cartucho o  $\frac{1}{4}$  carga; asimismo, se realizaron voladuras empíricas durante un período de 10 días y tuvieron un total de avance de 140.10m y una producción de 83.42m<sup>3</sup> (Tabla 9).

Con respecto al diseño de malla en voladura se realizaron voladuras planificadas mediante el cálculo de burden de Konya (Ecuación 1), donde se tuvieron en cuenta pasos para la planificación de esta voladura y utilizaron el tipo de explosivo que fue la dinamita (Semigelatina 65); de tal manera, que se realizó voladuras planificadas durante un periodo de 7 días y tuvieron un total de avance de 142.72 m y una producción de 175.46 m<sup>3</sup> (Tablas 11 y 12).

## **Recomendaciones**

Se recomienda contar con un diseño de malla de voladura, teniendo en cuenta todos los parámetros para que puedan adquirir una adecuada voladura y así obtengan mejores resultados en cuanto a la producción en zanjas rocosas.

Se recomienda contar con un personal capacitado para realizar una voladura planificada y al mismo tiempo contar con todos los EPP adecuados para todo el personal, evitando accidentes dentro de la zona de estudio.

Se recomienda realizar un diagnóstico previo a una voladura planificada, ya que permitirá conocer la geología de la zona de estudio y de acuerdo a ello se seleccionará el tipo de explosivo adecuado para realizar esta voladura planificada.

## Referencias bibliográficas

- Ajel, H., Jubair, H. y Ali, J. (2022). An experimental study on vibration isolation by open and in-filled trenches. *Open Engineering*, 1 (1).  
<https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/eng-2022-0011/html>
- Aldana, R. (2022, 12 de mayo). *Tipos de explosivos en obra civil*.  
<https://www.aulacarreteras.com/tipos-de-explosivos-en-obra-civil/>
- Arana, O. (2021). *Construcción de zanjas de infiltración en laderas para la recarga hídrica en el distrito Huayllacayan, provincia Bolognesi, departamento Ancash* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional UNALM.  
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5349?show=full>
- Balamadeswaran, P., Mishra, A., Manikanda, K. y Kumar, E. (2022). Controlled Blasting design for efficient and sustainable underwater excavation: art meets science! *Natural Hazards*, 114 (24), 3701-3717.  
[https://www.researchgate.net/publication/362825465\\_Controlled\\_blasting\\_design\\_for\\_efficient\\_and\\_sustainable\\_underwater\\_excavation\\_art\\_meets\\_science](https://www.researchgate.net/publication/362825465_Controlled_blasting_design_for_efficient_and_sustainable_underwater_excavation_art_meets_science)
- Cevallos, J. (2021). Las zanjas de infiltración en el aprovechamiento de agua en el sector rural de Manabí. *Revista Científica Dominio de las Ciencias*, 7 (4), 2281-2303.  
<https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/3255/7464>
- Dávila, L. (2017). *Voladuras en zanjas*.  
<https://es.scribd.com/document/340976628/Voladuras-en-Zanjas>

Díaz, G. y Saavedra, L. (2022). *Gestión de proyectos aplicado a la fase de ejecución, monitoreo y control de una obra de saneamiento, bajo los lineamientos de la Guía PMBOK 6ta edición* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez Mendoza de Amazonas]. Repositorio Institucional UNTRM.

<https://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14077/2695/Maldonado%20Mendoza%20Hugo%20Puerta%20Mas%20Jack%20Miuller.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Frêne, C., Villarroel, F., Rojas, R., Sanzana, J., González, J., Alarcón, D., Gómez, F. y Barra, S. (2022). Escasez de agua en Chiloé: Red participativa de agua como solución para el sector rural. *Revista de geografía Norte Grande*, 1 (82), 375-396.

[https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S071834022022000200375&script=sci\\_arttex](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S071834022022000200375&script=sci_arttex)

Huallpachoque, A. (2018). *Diseño y evaluación de voladuras para obras civiles en el proyecto minero Las Bambas* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional UNA.

[https://node2.123dok.com/dt02pdf/123dok\\_es/000/554/554839.pdf.pdf?X-Amz-Content-Sha256=UNSIGNED-PAYLOAD&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-HA256&XAmzCredential=aa5vJ7sqx6H8Hq4u%2F20230623%2F%2Fs3%2Faws4\\_request&X-Amz-Date=20230623T181201Z&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amzxpaires=600&XAmzSignature=fef172431e9caaf9fc117f0ccac0c52d9bcfdb235c1cc2b1d7d28346687a7679](https://node2.123dok.com/dt02pdf/123dok_es/000/554/554839.pdf.pdf?X-Amz-Content-Sha256=UNSIGNED-PAYLOAD&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-HA256&XAmzCredential=aa5vJ7sqx6H8Hq4u%2F20230623%2F%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20230623T181201Z&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amzxpaires=600&XAmzSignature=fef172431e9caaf9fc117f0ccac0c52d9bcfdb235c1cc2b1d7d28346687a7679)

Kianian, M. y Shiri, H. (2021). Experimental study of trench effect on lateral failure mechanisms around the pipeline buried in clay. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 1(2), 198-211.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667143321000111>

Masalías, V. (2022, 14 de junio). *Permite recolectar agua en el desierto.*

<https://www.archdaily.pe/pe/982793/los-acueductos-de-nasca-un-sistema-hidraulico-ancestral-que-permite-recolectar-agua-en-el-desierto>

Viñas, N. (2020). Voladura en zanja urbana para la construcción del acueducto La Calera, Córdoba, Argentina. *ResearchGate*, 1-12.

[https://www.researchgate.net/publication/340299184\\_Voladura\\_en\\_zanja\\_urbana\\_para\\_la\\_construccion\\_del\\_acueducto](https://www.researchgate.net/publication/340299184_Voladura_en_zanja_urbana_para_la_construccion_del_acueducto)

Zhu, G. (2021). Mindlin solution on ground deformation caused by the trench excavation during installation of concrete diaphragm wall panels. *Scientific Reports*, 1 (11), 1-16.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8479089/>

## Anexos

	Pág.
Anexo 1: Matriz de consistencia .....	2
Anexo 2: Resultados de voladuras planificadas .....	3
Anexo 3: Zanjas realizadas.....	4
Anexo 4: Plano de evacuación de la primera voladura planificada ejecutada .....	5

## Anexo 1

### Matriz de consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	INDICADORES
¿Cuánto es la ineficiencia de producción en la aplicación de un método empírico?	Lograr una mayor eficiencia de producción con la realización de un diseño de voladura para la construcción de zanjas rocosas.	Comparativamente, un diseño de voladura generará una mayor eficiencia en los resultados de producción, con respecto a una voladura empírica utilizada tradicionalmente en la construcción de zanjas rocosas.	<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b>  Diseño versus método empírico en voladura	Burden (m), espaciamiento (m), longitud de perforación (m), distribución de taladros, cantidad de explosivo en el taladro.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS		
¿Cuánto se pierde en avance al usar un método empírico, si se compara con un diseño de voladura construcción de zanjas?	Elaborar un diseño de malla para la zanja de tal modo que se tenga un mayor avance.	Se evidenciará un mayor avance del proyecto al elaborar un diseño de voladura que aplicando un método empírico.	<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>	
¿Qué beneficios se pierden cuando no se tiene una planificación y diseño de voladura en la construcción de zanjas?	Obtener más beneficios aplicando una adecuada planificación y diseño de voladura en la construcción de zanjas.	El diseño y la planificación de una voladura traerá consigo beneficios como: un mejor acabado de las zanjas (autosostenibilidad), un mejor control de los flyrocks y una mayor seguridad en la manipulación de material explosivo.	Producción en zanjas rocosas	Material volado por disparo (m <sup>3</sup> ), avance (cantidad de disparos por muestra), acabado de la zanja, seguridad en la ejecución del trabajo.

## Anexo 2

### Resultados de voladuras planificadas



### Anexo 3

#### Zanjas realizadas



#### Anexo 4

*Plano de evacuación de la primera voladura planificada ejecutada*

