

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



Tesis

Nuevo diseño de malla de perforación y voladura para reducir costos en la U.E.A. Valeria -
Unidad minera Anama - Compañía minera anabí S.A.C.

Presentado por:

Raúl Alonso Huachaca Gómez

Cleomedes Motta Castillo

Para optar el título de Ingeniero de Minas

Abancay, Perú

2024



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

Nuevo diseño de malla de perforación y voladura para reducir costos en la U.E.A.

Valeria - Unidad minera Anama - compañía minera Anabí S.A.C.

Presentado por **Raúl Alonso Huachaca Gómez** y **Cleomedes Motta Castillo**, para optar el título de: Ingeniero de minas

Sustentado y aprobado el 12 de setiembre de 2024 ante el jurado evaluador:

Presidente:



Dr. Walquer Huacani Calsin

Primer miembro:



Mtro. Dario Dante Sánchez Castillo

Segundo miembro:



Mtro. Edgar Crispin Huacac Farfán

Asesor:



Dr. Franklin Aguirre Huillcas



CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 160-2024

La Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, a través de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería declara que, la Tesis intitulada **“NUEVO DISEÑO DE MALLA DE PERFORACIÓN Y VOLADURA PARA REDUCIR COSTOS EN LA U.E.A. VALERIA – UNIDAD MINERA ANAMA – COMPAÑÍA MINERA ANABÍ S.A.C.”** presentado por los Bachs **Cleomedes Motta Castillo** y **Raúl Alonso Huachaca Gómez**, Para optar el Título de **Ingeniero de Minas**; ha sido sometido a un mecanismo de evaluación y verificación de similitud, a través del Software Turnitin, siendo el índice de similitud **ACEPTABLE de (17%)** por lo que, cumple con los criterios de originalidad establecidos por la Universidad.

Abancay, 03 de setiembre del 2024



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS
DE APURIMAC
Dr. Lintol Contreras Salas
DIRECTOR(E) DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA

C. c.
Archivo
REG. N° 627

Agradecimiento

Principal agradecimiento a dios quién nos ha guiado y ha dado la fortaleza para seguir adelante. A nuestra familia por su comprensión y estímulo constante, además su apoyo incondicional a lo largo de nuestros estudios. A nuestro asesor que nos apoyó en la elaboración de este trabajo.



Dedicatoria

Esta tesis le dedicamos a nuestros padres quienes fueron las principales fuentes de apoyo. Gracias por inculcarnos los buenos valores, el ejemplo de esfuerzo que nos ha permitido a llegar a cumplir hoy una meta.



Nuevo diseño de malla de perforación y voladura para reducir costos en la U.E.A. Valeria -
unidad minera Anama - compañía minera Anabí S.A.C.

Línea de investigación: Minería y procesamiento de minerales

Esta publicación está bajo una Licencia de Creative Commons



ÍNDICE

	Pág
INTRODUCCIÓN	1
RESUMEN	2
ABSTRACT	3
CAPÍTULO I	4
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1 Descripción del problema	4
1.2 Enunciado del problema	5
1.2.1 Problema general	5
1.2.2 Problemas específicos	5
1.3 Justificación de la investigación	5
1.3.1 Justificación técnica	5
1.3.2 Justificación económica	5
1.3.3 Justificación social	6
CAPÍTULO II	7
OBJETIVO E HIPÓTESIS	7
2.1 Objetivos de la investigación	7
2.1.1 Objetivo general	7
2.1.2 Objetivos específicos	7
2.2 Hipótesis de la investigación	7
2.2.1 Hipótesis general	7
2.2.2 Hipótesis específicas	7
2.3 Operacionalización de variables	8
2.3.1 Variable independiente	8
2.3.2 Variable dependiente	8
2.4 Matriz de operacionalización de variables	8
CAPÍTULO III	9
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	9
3.1 Antecedentes	9
3.1.1 Macizo rocoso	14
3.1.2 Clasificaciones geomecánicas del macizo rocoso	21
3.1.3 Clasificación geomecánica romana (SMR)	23
3.1.4 Propiedades mecánicas en el macizo rocoso	24
3.1.5 Diseño de voladura	24



3.1.6	Parámetros de diseño en el método de explotación	26
3.1.7	Variables controlables en el diseño de voladura	26
3.1.8	Diseño geométrico de la voladura	27
3.1.9	Energía de los explosivos	28
3.1.10	Estructura de costos en minería	30
3.1.11	Costos operativos	30
3.1.12	Análisis de precio unitario	31
3.1.13	Clasificación de explosivos	32
3.1.14	Sistemas de iniciación	34
3.1.15	Regulaciones y criterio de control	35
3.2	Marco conceptual	37
CAPÍTULO IV		40
METODOLOGÍA		40
4.1	Tipo y nivel de investigación	40
4.1.1	Tipo de investigación	40
4.1.2	Nivel de investigación	40
4.2	Diseño de la investigación	40
4.3	Descripción ética de la investigación	41
4.4	Población y muestra	41
4.4.1	Población	41
4.4.2	Muestra	41
4.5	Procedimiento	41
4.5.1	Procedimientos generales	42
4.5.2	Los procedimientos se realizaron de acuerdo a la siguiente secuencia:	42
4.6	Técnica e instrumentos	43
4.6.1	Técnicas	43
4.6.2	Instrumentos	43
CAPÍTULO V		44
RESULTADOS Y DISCUSIONES		44
5.1	Análisis de resultados	44
5.1.1	Cálculos principales	44
5.1.2	Análisis de voladura antes de optimizar	48
5.1.3	Diseño de voladura propuesto	52
5.2	Resultados	57
5.2.1	Comparación	57
5.3	Discusión	62
CAPÍTULO VI		64
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		64
6.1	Conclusiones	64



6.2 Recomendaciones	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXOS	71



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 — Ruta 1 de acceso a la U.E.A. Valeria	6
Tabla 2 — Ruta 2 de acceso a la U.E.A. Valeria	6
Tabla 3 — Operacionalización de variables	8
Tabla 4 — Clasificación geomecánica (RMR)	14
Tabla 5 — Clasificación del macizo en base a la Q de Barton 1974	15
Tabla 6 — Alteraciones presentes en el tajo	45
Tabla 7 — Factor Kb	46
Tabla 8 — Propiedades del explosivo	46
Tabla 9 — Burden calculado según modelos matemáticos	47
Tabla 10 — Iteración de parámetros de voladura	53
Tabla 11 — Descripción de los costos de operación (insumos)	54
Tabla 12 — Costos unitarios por cada burden y longitud de carga	55
Tabla 13 — Costos total	60
Tabla 14 — Costos total del diseño optimizado	61
Tabla 15 — Matriz de consistencia	72
Tabla 16 — Iteraciones de burden y longitud descarga	73



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 — Clasificación de Barton 1974	15
Figura 2 — Velocidad de perforación vs el desgaste	19
Figura 3 — Diagrama de cajas de sistemas de clasificación (alteración hidrotermal y litología)	23
Figura 4 — Estructura de la base del análisis del precio unitario	32
Figura 5 — Vista del esquema de la malla de perforación, voladura y carguio de explosivos	49
Figura 6 — Antes de la voladura en Unidad Minera Anama de la Compañía Minera Anabí S. A. C.	50
Figura 7 — Después de la voladura en Unidad Minera Anama de la Compañía Minera Anabí S. A. C.	50
Figura 8 — Curva granulométrica modelo Kuz-Ram	52
Figura 9 — Curva de costo (P&V) y la longitud de carga	56
Figura 10 — Vista del esquema de carguio de explosivos optimizada	56
Figura 11 — Líneas de ISO tiempo diseño mina	57
Figura 12 — Halos de energía diseño mina.	57
Figura 13 — Líneas de ISO tiempo diseño optimizado.	58
Figura 14 — Líneas de ISO tiempo diseño optimizado.	58
Figura 15 — Curva granulométrica modelo Kuz-Ram	62
Figura 16 — Carga operante y velocidad pico partícula a 500 m del diseño sin optimización	74
Figura 17 — Carga operante y velocidad pico partícula a 500 m del diseño optimizado	75
Figura 18 — Alteraciones del tajo anama	76
Figura 19 — Plano geológico de Anama	77
Figura 20 — Plano de ubicación de U.E.A. VALERIA	78
Figura 21 — Ciclo de minado tajo anama	79

INTRODUCCIÓN

El propósito de este trabajo es disminuir los costos operativos en la U.E.A. Valeria - Unidad Minera Anama a través de técnicas estándares en los procesos de voladura y perforación. Por ello, en la industria minera siempre se busca optimizar estos procesos a partir, de técnicas modernas, o con un resultado más eficiente, buscando no comprometer la seguridad de los trabajadores, ya que este busca tener una mejora constante.

El desarrollo de esta tesis comenzó con un estudio del estatus actual de la empresa minera, donde se observará las operaciones de minado y su impacto en los gastos operativos. Luego se aplicará técnicas de diseño para proponer mejoras en los estándares de minado, donde se verá afectado el diseño de malla de perforación, el tipo y carga de explosivo, la geomecánica del macizo rocoso y otros parámetros que se ven relacionado a la optimización de los procesos mencionados.

En relación con la perforación, con el proceso de voladura se observaron varias deficiencias, como el dispendio de material explosivo y su mala administración. La empresa experimentaba este problema debido a que se realizaba las operaciones sin criterios técnicos y sin un análisis de simulación detallado de la malla de perforación de voladura, estas deficiencias se reflejaban en los indicadores observados como el factor de potencia.

El proyecto de tesis se presenta bajo el siguiente esquema: en el capítulo I se desarrolla la formulación del problema considerando la descripción del problema, el enunciado del problema, la justificación de la investigación, la ubicación y contextualización del estudio; en el capítulo II se considera los objetivos e hipótesis de la investigación; en el capítulo III se desarrolla el marco teórico referencial considerando los antecedentes, el marco teórico y el marco conceptual; en el capítulo IV se desarrolla metodología de la investigación, en la se considera el tipo y nivel de investigación, el diseño de la investigación, la población y la muestra seleccionada, las técnicas e instrumentos de obtención de datos, y la estadística de la investigación; finalmente, el capítulo V se presenta la administración del proyecto de investigación considerando el cronograma de actividades, el presupuesto y las fuentes de financiamiento.



RESUMEN

El proyecto de investigación se centra en abordar los desafíos operativos y los gastos elevados relacionados con la perforación y voladura, en la Unidad Minera Anama de la Compañía Minera Anabí S. A. C. El carente análisis exhaustivo del macizo rocoso ha llevado a un gasto de aceros de perforación y explosivos, generando daños en la estructura y un aumento significativo en los costos operativos. Además, las vibraciones registradas en las voladuras apuntan a la posibilidad de movimientos sísmicos superiores a los límites permisibles, requiriendo una evaluación de la perforación y voladura. Para abordar este problema, se plantea un nuevo diseño de malla de perforación y voladura, buscando no solo optimizar la eficiencia operativa sino también reducir los costos. Este enfoque integral implica la revisión y modificación de estándares existentes para la carga explosiva, distribución de taladros y accesorios de voladura. Este rediseño se fundamenta en la premisa de que una planificación más precisa puede conducir a una disminución sustancial en el uso de recursos, específicamente, menor carga explosiva, accesorios de voladura y cantidad de taladros. Se evalúan los resultados de la voladura actual y malla de perforación y se proyecta el diseño optimizado, considerando parámetros clave como el Burden, la longitud de carga y el número de taladros, se logra un ahorro total de \$ 3071 en costos operativos, respaldando la eficacia del nuevo diseño. Además, se observa una mejora en la granulometría, lo que sugiere una fragmentación más uniforme y, por ende, una optimización en la extracción y procesamiento de minerales.

Palabras clave: *Costos, diseño, planificación, vibraciones.*



ABSTRACT

The research project focuses on addressing the operational challenges and high expenditures related to blasting and drilling at the Anama Mining Unit of Compañía Minera Anabí S. A. C. The lack of thorough analysis of the rock mass has led to a waste of drilling steels and explosives, resulting in damage to the structure and a significant increase in operating costs. In addition, the vibrations recorded during blasting point to the possibility of seismic movements above the permissible limits, intensifying the urgency of an effective intervention. To address this problem, a novel blasting and perforation mesh design is proposed, seeking not only to optimize operational efficiency but also to reduce associated costs. This comprehensive approach involves the review and modification of existing standards for explosive charge, drill distribution and blasting accessories. This redesign is based on the premise that more accurate planning can lead to a substantial decrease in the use of resources, specifically, less blast charge, blasting accessories and number of drills. The results of the current blasting and drill mesh are evaluated and the optimized design is projected, considering key parameters such as Burden, charge length and number of drill holes, a total savings of \$ 3071 in operating costs is achieved, supporting the effectiveness of the new design. In addition, an improvement in granulometry is observed, suggesting a more uniform fragmentation and, therefore, an optimization in the extraction and processing of minerals.

Keywords: *Costs, design, planning, vibrations.*



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

Las organizaciones del sector minero tienen como objetivo lograr una mayor eficiencia en sus operaciones unitarias de perforación y voladura. Hay empresas que se especializan en trabajos de perforación; su selección de la columna de perforación se basa en un estudio detallado de la geomecánica, actualmente se está desarrollando el trabajo mundial sobre la perforación del macizo rocoso.

La Unidad Minera Anama enfrenta numerosos desafíos al perforar, ya que no evalúan cuidadosamente el comportamiento del macizo rocoso; a medida que se profundiza, las características geomecánicas cambian. El tipo de roca no es consistente, por lo que es necesario realizar este estudio de forma paulatina para evitar el gasto de los explosivos en la voladura de rocas y perforación.

Conforme al monitoreo de las vibraciones obtenidas en la voladura primaria de los bancos 4696 PY 45, 4688 PY 45, 4688 PY 47 (Zona Norte), 4576 PY 06 (Zona Centro) y 4576 PY 07, 4576 PY 09 (Zona Sur). Esto indica que está dañando el perímetro de la obra. Según la clasificación de Bieniawski y la clase de roca se encuentra entre 22 a 30 (RMR), considerándose de mala a regular.

Por ello se estima que podría estar habiendo movimientos sísmicos superiores a los límites máximo permisibles podrían llegar a generar fracturas y fisuras en la labor de trabajo la cual está ocasionando aumento de costos.

Por eso al mejorar la malla de perforación y voladura modificando algunos estándares que sean beneficiosos podría generar una reducción de costos ya que usaría una cantidad reducida de taladros, menor número de carga explosiva y accesorios de voladura.



1.2 Enunciado del problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo contribuye el nuevo diseño de malla de perforación y voladura en la reducción de costos en la U.E.A. Valeria-Unidad Minera Anama-Compañía Minera Anabí S.A.C.?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es el nuevo diseño de malla de perforación que permite reducir los costos en la U.E.A. Valeria - Unidad Minera Anama - Compañía Minera Anabí S.A.C.?
- ¿Cuál es el nuevo diseño de carga explosiva y el uso de accesorios de voladura que permiten reducir los costos en la U.E.A. Valeria-Unidad Minera Anama - Compañía Minera Anabí S.A.C.?
- ¿Cuál es el costo unitario que genera el nuevo diseño de malla de perforación y voladura en la U.E.A. Valeria - Unidad Minera Anama - Compañía Minera Anabí S.A.C.?

1.3 Justificación de la investigación

1.3.1 Justificación técnica

La investigación se considera de carácter técnico porque el estudio de parámetros y cálculos detallados de perforación y voladura es necesario en el correcto diseño de los taladros para obtener los resultados deseados de acuerdo con los cálculos realizados. Además, los hallazgos del presente estudio de la malla de perforación para Unidad Minera Anama de la Compañía Minera Anabí S.A.C. servirán como referencia técnica para otras empresas que enfrenten circunstancias análogas y busquen solucionar los problemas que enfrenta.

1.3.2 Justificación económica

El planteamiento de una novedosa malla de perforación y voladura, permitirá tener una alta eficiencia en cuanto al uso del número óptimo de explosivos y taladros a perforar al haber una mejor distribución de ellos, lo cual reflejará una disminución de gastos en la etapa de perforación y voladura de la Unidad Minera Anama - Compañía Minera Anabí S.A. C.



1.3.3 Justificación social

Es de necesidad para la seguridad del personal de trabajo porque al usar un novedoso diseño de la malla de perforación y voladura del frente a través del modelo matemático, nos permitirá controlar el daño excesivo en los bancos de las labores de avance de la Unidad Minera Anama - Compañía Minera Anabí S. A. C.; por lo cual evitaremos la fracturas o fisuras, que permitirá una operación estable y segura para los trabajadores.

Tabla 1 — Ruta 1 de acceso a la U.E.A. Valeria

Ruta	Distancia (km)	Tipo de vía	Tiempo (h)
Arequipa – Cusco		Aérea	1
Cusco – Abancay	183	Carretera asfaltada	4
Abancay – Santa Rosa	66	Carretera asfaltada	1
Santa Rosa – Antabamba	71	Carretera afirmada	2
Antabamba – Desvío Anama	68	Carretera semi afirmada	2
Desvío Anama	17	Trocha carrozable	1
Total	405		11

FUENTE: Anabi S.A.C, 2011.

Tabla 2 — Ruta 2 de acceso a la U.E.A. Valeria

Ruta	Distancia (km)	Tipo de vía	Tiempo (h)
Lima – Nazca	444	Asfaltado	6
Nazca-Desvío hacia Ayacucho	400	Asfaltado	7,5
Santa Rosa-Antabamba	71	Afirmado	2,5
Antabamba-Proyecto Anama	60	Trocha Carrozable	4
Total	975		11

FUENTE: Anabi S.A.C, 2011.



CAPÍTULO II

OBJETIVO E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos de la investigación

2.1.1 Objetivo general

Realizar un nuevo diseño de malla de perforación y voladura para reducir costos en la U.E.A. Valeria-Unidad Minera Anama-Compañía Minera Anabí S.A.C.

2.1.2 Objetivos específicos

- Establecer un nuevo diseño de malla de perforación que permita disminuir los costos en la U.E.A. Valeria - Unidad Minera Anama - Compañía Minera Anabí S.A.C.
- Determinar el nuevo diseño de carga explosiva y accesorios de voladura que permiten reducir los costos en la U.E.A. Valeria-Unidad Minera Anama-Compañía Minera Anabí S.A.C.
- Determinar el costo unitario que genera el nuevo diseño de malla de perforación y voladura en la U.E.A. Valeria-Unidad Minera Anama-Compañía Minera Anabí S.A.C.

2.2 Hipótesis de la investigación

2.2.1 Hipótesis general

El nuevo diseño de malla de perforación y voladura reduce los costos en la U.E.A. Valeria-Unidad Minera Anama-Compañía Minera Anabí S.A.C.

2.2.2 Hipótesis específicas

- El nuevo diseño de malla de perforación permite disminuir los costos en la U.E.A. Valeria - Unidad Minera Anama - Compañía Minera Anabí S.A.C.
- Nuevo diseño de carga explosiva y accesorios de voladura permiten reducir los costos en la U.E.A. Valeria-Unidad Minera Anama-Compañía Minera Anabí S.A.C.
- El nuevo diseño de malla de perforación y voladura reduce el costo unitario en la U.E.A. Valeria-Unidad Minera Anama-Compañía Minera Anabí S.A.C.



2.3 Operacionalización de variables

2.3.1 Variable independiente

Nuevo diseño de perforación y voladura

2.3.2 Variable dependiente

Reducción de costos

2.4 Matriz de operacionalización de variables

En la tabla 4, se detalla la operacionalización de las variables en base a sus características y lo que comprometen.

Tabla 3 — Operacionalización de variables

Variables	Dimensiones	Indicadores	Unidad
Independiente Nuevo diseño de malla de perforación y voladura	Macizo rocoso	✓ Propiedades: Dureza Resistencia Elasticidad Plasticidad Abrasividad Textura Estructura	Escala de Mohs MPa E/Coef. de Poisson - Cont. de cuarzo - -
	Explosivos	✓ Propiedades: Potencia y energía Velocidad de detonación Densidad Estabilidad Resistencia al agua Sensibilidad Transmisión de detonación	% en peso y vol. m/s g/cm ³ Prueba de Abel Horas - Por simpatía
Dependiente Reducción de costos	Perforación	• Diseño de malla: Burden Espaciamiento Diámetro Longitud Inclinación	m m mm m Grado sexagesimal
		Costos de perforación	\$/m
	Voladura	Costos de explosivos Costos accesorios	\$/kg \$/m, \$/Unid.
NOTA Esta tabla muestra paso a paso las variables consideradas para lograr los objetivos específicos de la investigación			

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 Antecedentes

a) Internacionales

Conforme el proyecto de tesis: “Diseño del sistema de perforación y voladura en los bancos de la mina de caliza el Tesoro, contrato de concesión ubicada en la vereda las caleras del municipio de Nobsa-Boyacá”, los bachilleres Correa y Martinez plantearon realizar el diseño de voladura y perforación considerando parámetros seguros y técnicos que faciliten una extracción eficiente y organizada en la unidad minera la Calera. Este proyecto se llevó a cabo en la cantera de piedra caliza, considerando la cercanía de la cantera a la zona residencial aledaña al proyecto. Entre los medios que permitieron recolectar y adquirir los datos necesarios para desarrollar este estudio, se incluye una sección bibliográfica y de estudios anteriores de la empresa trituradora, que se encuentra ubicada cerca de la región del proyecto. Se describe el área; información entregada por la firma de calizas Nobsa, la cual fue correlacionada y validada mediante giras de campo donde se identificaron propiedades geológicas; ubicación de afloramientos; trabajos mineros recientes e información estructural por sectores y muestras referidas para análisis de laboratorio de suelos. La operación de voladura y perforación no cuenta con criterios técnicos para su optimización sin dañar el entorno donde se realiza la voladura, lo que genera un incremento significativo en el costo de operación. Luego de la evaluación de la información recibida, se presenta un esquema de perforación que busca un compromiso entre las probables consecuencias medioambientales y la ganancia en el progreso de la operación de perforación y voladura, favoreciendo el costo por metro cúbico de roca extraída (CORREA & MARTINEZ, 2017).

Un equipo de perforación se incluye en el diseño en base al tamaño de la operación y con propiedades idóneas para el proyecto, así como la relación geométrica de la malla de perforación en base a las propiedades de la roca.

Según la tesis realizada por Mejía se propuso optimizar el proceso de perforación y voladura subterránea para la Sociedad Minera Oro Sol Uno. En primer lugar, se



analizó la data de campo, seguido de ello se evaluó las propiedades geomecánicas del macizo rocoso y se aplicó método el Langerfors y Kihlstrom para reemplazar las técnicas empíricas que se aplican en esta unidad minera. Concluyendo un alto volumen de arranque, avance del túnel y consumo específico. Por lo tanto, este documento, nos ayuda a analizar un método donde se diseña una malla de perforación, y con este analizar la mejora de la voladura a través de este método (MEJIA, 2019)

En el estudio denominado “Optimización de los procesos de perforación y voladura en el túnel fase A-B de interconexión del proyecto Sopladora”, el proyecto planteó utilizar el método de perforación rotativa neumática y la voladura se realiza exclusivamente con carga de fondo, sin utilizar carga de columna ni retacado. Donde para el cálculo de las características y cantidad de explosivos se tomó en cuenta la teoría presentada en el libro titulado como “Técnica Sueca de Voladuras de Rune Gustafsson.”. Donde se determinó que la propuesta implementada en el túnel Fase A-B, significo un ahorro de 60% de explosivos, así como una mejora en el avance de perforación y una mejora en la potencia y velocidad de perforación a diferencia de las técnicas empíricas utilizadas (GUAMAN, 2018).

b) Nacionales

En la investigación de nombre “Proyectos de mejora y reducción de costos en una mina superficial de cobre”, el bachiller León en el 2018 tuvo por objetivo utilizar el yacimiento de Cu con el fin de determinar la posible implementación de proyectos que brinden mejorar operativamente los ahorros de los costos del área de operaciones. Para identificar áreas de desarrollo, primero es necesario comprender el entorno de trabajo. Como resultado, se brindará una descripción de la región de Carguio y sus subáreas, como Desagüe de Tajo y Carguio. Por último, se discuten las ventajas económicas y operativas de la ejecución de estos proyectos. Adicionalmente, se menciona que aquellos factores involucrados en estas subáreas para ver si hay algún potencial de mejora y proporcionar propuestas de mejora y ahorro de costos. Es importante recalcar que la importancia de este concepto se encuentra en su aplicabilidad a circunstancias donde el precio de los productos básicos viene a ser económicos. Circunstancias como esta empujan a las corporaciones mineras a buscar siempre formas de reducir gastos. Por ello, una estrategia eficiente para minimizar gastos es la implementación de estas iniciativas, que sumarán a la solidez económica de la empresa frente a tiempos difíciles (LEÓN, 2018).



En la tesis de Baca e Hinojosa, denominada “Diseño de la malla de perforación y voladura para el control y estabilidad del macizo rocoso en la Unidad Minera San Cristóbal”, se propone realizar el diseño de la malla de perforación y voladura con el propósito de reducir las vibraciones del macizo rocoso en la mina San Cristóbal. El monitoreo de las vibraciones producidas en la voladura del Nivel 1380 de la labor TJ dio como resultado valores que encuentran por encima del umbral de velocidad, lo que indica que se está destruyendo el perímetro de la obra. Según la categorización del macizo rocoso, la obra exhibe una clase de roca de regular con una RMR de 21 a 30; así, movimientos sísmicos superiores a 37800 mm/s. se espera que se produzca el inicio de fisuras y fracturas en la periferia de la obra. Dado los cálculos, movimientos telúricos superiores a 21514 mm/s provocarían el inicio de fisuras y fracturas en el perímetro de la obra, siendo para esta obra un resultado de 17907 mm/s en la suma de vectores. Los números están por encima de la velocidad crítica, según los resultados del monitoreo de vibraciones registrado durante la voladura del Nivel 1380 de la obra TJ. Según a la categorización del macizo rocoso, este estudio muestra una clase de roca de regular con una RMR de 21 a 30. En conclusión, se estiman movimientos sísmicos superiores a 37880 mm/s. Se perforaron 8 taladros de corte en el perímetro para evitar roturas innecesarias y obtener mejores resultados. Los taladros de contorno se cargan con material explosivo de menor potencia utilizando cartuchos Emulnor 1000 con un menor diámetro que el taladro para regular mejor el contorno del trabajo y evitar la sobre excavación, al mismo tiempo que disminuye los niveles de vibración.

En la investigación de CAHUAPAZA (2022), se propuso realizar la reducción de costos de perforación y voladura a través de aplicar la modelo matemática de Pinco y Crosby en la minera Apumayo S. A. C. En la unidad minera se detectaron altos gastos operativos en las unidades unitarias, las cuales constituyen el 7 % y 17 % del gasto total de operación de la empresa minera, respectivamente; entonces si la tendencia continuara influirá en los gastos operativos de la organización. La técnica se estableció utilizando un enfoque cuantitativo y un diseño de investigación preexperimental con un nivel comparativo-descriptivo; se adaptará para modificar la variable independiente en la muestra conformada por 12 proyectos extraídos de una población estudiada de 19 proyectos de voladuras. Inicialmente se analizaron los gastos unitarios utilizando la malla de perforación con la mezcla pesada anfo explosiva; posteriormente, con el modelo de Pinco y Corsby se modificaron las medidas de la malla de perforación. Al reemplazar la mezcla explosiva por ANFO



73 pesado gasificado, se mejoró los costos unitarios de perforación y voladura de 0,39 US\$/TM a 0,33 US\$/TM. En conclusión, el gasto unitario de voladura y perforación se reducirá en un 15,38 % mediante el empleo de un novedoso diseño de malla de perforación basado en el modelo matemático de Pinco y Crosby y el cambio de ANFO pesado por una combinación explosiva HA73G.

En la investigación de FIGUEROA (2017) se tuvo por objetivo utilizar un diseño de voladura y perforación basada en la teoría de Richard Ash, con la finalidad de optimizar la fragmentación en la Compañía Minera Antamina. Se evaluó el diseño del centro de perforación y de voladura del macizo rocoso con la meta de asegurar una buena fragmentación. Se realizaron trabajos de campo, laboratorio y oficina para lograr el objetivo. La recopilación de información se dio con una investigación básica en la primera fase del estudio para estimar los parámetros básicos y evaluar los factores principales que condicionan la perforación y voladura. Para evaluar el diseño de la malla de perforación y voladura de los frentes de explotación de las operaciones mineras superficiales, se obtuvo la información recopilada durante los primeros estudios para combinar está en una etapa posterior. Esto permitirá brindar recomendaciones para asegurar una buena fragmentación. Los parámetros en el diseño de perforación y voladura, si es necesario, en los trabajos minerales de superficie, se han calculado mediante una variedad de análisis usando la información geológica recopilada en los fundamentales y empleando herramientas de cálculo de voladura.

En la investigación titulada “Optimización de los rendimientos de perforación a partir del modelo geotécnico con fines de minimizar costos de perforación en la Compañía Minera Antamina” CAMERA (2019), tuvo por objetivo identificar la influencia de los rendimientos de perforación en la disminución de gasto de operación. Debido a las variadas características del macizo rocoso que hacen desafiante esta actividad, el problema de la perforación se centra en el bajo desempeño de la tasa de penetración. La litología del macizo rocoso exhibe fluctuaciones abruptas, lo que hace que la resistencia mecánica de la roca fluctúe rápidamente y, como resultado, también afecta los rendimientos de perforación. La base para resolver estos problemas de perforación serán los parámetros que ofrece la geotecnia. Los informes de los supervisores de perforación en el terreno también contribuyeron en el contraste de los datos con el fin de lograr el objetivo establecido. Es importante señalar que el parámetro de velocidad de perforación del modelo geotécnico se basa en información



proporcionada por el área de envío y también se recopila de la memoria computarizada contenida dentro de la plataforma de perforación, lo que significa que los rendimientos son más precisos. Sin embargo, debido a un aspecto humano ya la supervisión del desempeño con tecnología menos avanzada, la información recopilada por los supervisores en campo puede presentar una alta proporción de errores.

Según el trabajo de investigación titulado “Optimización de la malla de perforación y la voladura para reducir los costos de operación de las unidades mineras San Juan de Arequipa - Chalhuane de la empresa Adgeminco – 2019”, indica que la minera se enfrenta a problemas con el progreso lineal y los costos elevados relacionados con la perforación y voladura. Por ello, esto implica un aumento en el tiempo, un aumento en el uso de aceros en la perforación, un mayor consumo de explosivo, donde se observó que hay un aumento en el costo y producción de la unidad minera. Por la tanto, se buscó optimizar los costos mediante la implementación de un novedoso diseño de una malla de perforación, una selección más adecuada de material explosivo; tomando en cuenta la geomecánica de la roca y el sistema de ventilación ya preexistentes. Donde los autores concluyeron que, con las nuevas mallas de perforación y una selección de explosivo adecuada, se pudo reducir costos y aumentar la producción, a diferencia de los anteriores resultados empíricos. Este trabajo de investigación usara esta información para tomar en cuenta los cálculos matemáticos, que se usaron, y poder brindar una optimización de costos en el presente proyecto minero (BRANLY & RAMOS, 2021).

La investigación denominada “Reducción de costos operativos en labor Carmen Nv. 3040 mediante la optimización de estándares de perforación y voladura, CIA. minera Poderosa S.A -2018”, enfoca su trabajo en la optimización de costos mediante parámetros estándares de perforación y voladura, concluyendo que la eficacia de la perforación influye en la eficiencia de la voladura. Donde se llevó a realizar controles de perforación, una distribución de la carga de explosivo, diseño de malla de perforación, personal especializado y con experiencia. Estos resultados demostraron una diferencia de costos antes y después de la implementación. Este trabajo servirá como, base para tomar en cuenta parámetros más detallados que otro trabajo de investigación carecen (CAHUAPAZA, 2022). Marco teórico



3.1.1 Macizo rocoso

Se describe como la configuración que las rocas adoptan en su entorno natural (RAMÍREZ y ALEJANO, 2004) pudiéndose hallar en ella elementos estructurales como fallas, fracturas, juntas, diaclasas, plegamientos, entre otros (CARDENAS Huamani, 2019).

La geomecánica es una disciplina que posibilita el estudio detallado del macizo rocoso, implicando una labor multidisciplinaria en las áreas de geología, mecánica de rocas e hidrogeología, principalmente (SUASNABAR Ortega, 2019).

Para caracterizar el macizo rocoso se emplea sistemas de clasificación geomecánica que se componen de métodos empíricos como Q de Barton (1974); RMR de Bieniawski (1989) y GSI (1980). Este último, incorpora parámetros para estimar un criterio de rotura, lo que resulta relevante en el análisis de la masa de roca (RAMÍREZ & ALEJANO, 2004).

- Clasificación geomecánica – Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989)

Tabla 4 — Clasificación geomecánica (RMR)

RMR	CLASE	CALIDAD	COHESIÓN (MPA)	ANGULO DE ROZAMIENTO O(°)
81-100	I	Muy buena	>0,4	>45
61-80	II	Buena	0,3-0,4	35-45
41-60	III	Media	0,2-0,3	25-35
21-40	IV	Mala	0,1-0,2	15-25
0-20	V	Muy mala	<0,1	<15

FUENTE: Bieniawski, 1989.

- Clasificación de Barton
 - Parámetros a considerar en la determinación de la Q de Barton
- RQD: porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm.
- Jn: parámetro para describir el número de familias de discontinuidad.



- J_r : parámetro para describir la rugosidad de las juntas.
- J_a : parámetro para describir la alteración de las juntas.
- J_w : factor asociado al agua en juntas.
- SRF: factor asociado al estado tensional.

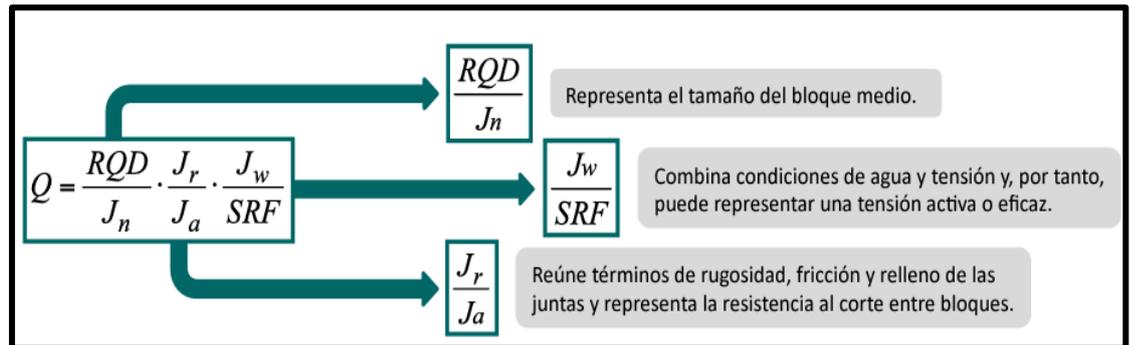


Figura 1 — Clasificación de Barton 1974

Tabla 5 — Clasificación del macizo en base a la Q de Barton 1974

TIPO DE MACIZO ROCOSO	ÍNDICE Q
Excepcionalmente malo	0,001-0,01
Extremadamente malo	0,01-0,1
Muy malo	0,1-1
Malo	1-4
Medio	4-10
Bueno	10-40
Muy bueno	40-100
Extremadamente bueno	100-400
Excepcionalmente bueno	400-1000
FUENTE: Extraído de Barton , 1974.	

3.1.1.1 Propiedades mecánicas de las rocas

Permeabilidad, densidad, porosidad, humedad y grado de saturación son las propiedades básicas de las rocas. Estas permiten comprender la



composición y comportamiento de las rocas en su entorno geológico (RAMÍREZ & ALEJANO, 2004).

a) Densidad

Viene a ser la masa contenida en un volumen determinado de roca. En otras palabras, es una propiedad que indica cuánta materia está presente en un espacio específico de la roca. Es un parámetro importante para comprender el comportamiento y la resistencia de las rocas ante las fuerzas y cargas a las que pueden estar expuestas. Otro concepto que se maneja de la densidad en el contexto de la Mecánica de Rocas se refiere a la cantidad de materia en una región específica de la roca, expresada en unidades de masa por volumen. Esta propiedad es relevante para comprender cómo las rocas se comportan y resisten ante fuerzas y cargas externas (RAMÍREZ & ALEJANO, 2004).

$$p = \frac{m}{v} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

$$\rho : \text{Densidad } \left(\frac{kg}{m^3}\right) m : \text{masa (kg)} v : \text{volumen (m}^3\text{)}$$

b) Humedad

La humedad se refiere al contenido de agua presente en las rocas, lo cual puede afectar su resistencia y estabilidad. Es esencial considerar este factor al analizar y diseñar estructuras geológicas o proyectos de ingeniería que involucren rocas (RAMÍREZ & ALEJANO, 2004).

$$H = \frac{m_h}{m_s} \times 100 \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde:

$$H: \text{Humedad (\%)} m_h: \text{masa agua en muestra (g)} m_s: \text{masa de roca (g)}$$

c) Porosidad

Se refiere al espacio vacío presente en una roca, lo cual influye en su capacidad para almacenar y transportar fluidos y puede afectar su



resistencia y comportamiento mecánico ante cargas externas. Comprender y evaluar la porosidad es fundamental en proyectos de ingeniería y análisis de estructuras geológicas (RAMÍREZ & ALEJANO, 2004).

$$n = \frac{V_p}{V} \times 100 \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde:

n: porosidad (%) *m_n*: volumen de poros (cm³) *m_s*: volumen total (cm³)

d) Saturación

Saturación o grado de saturación es la proporción de espacios porosos en una roca que están ocupados por agua. Es un parámetro importante para evaluar cuánto de esos espacios están llenos de agua y cómo esto puede afectar las propiedades y comportamiento de la roca en términos de resistencia, deformabilidad y flujo de fluidos (RAMÍREZ & ALEJANO, 2004).

$$S_r = \frac{V_h}{V_p} \times 100 \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde:

S_r: Grado de saturación (%) *V_h*: Volumen de agua (cm³) *V_p*: volumen de poro (cm³)

e) Velocidad de propagación

Viene a ser rapidez a la cual las ondas de energía, como las ondas sísmicas, se transmiten a través de una roca. Es un parámetro importante para comprender las propiedades elásticas de la roca y su capacidad para transmitir ondas. La velocidad de propagación puede proporcionar información sobre la integridad y la calidad de la roca, y es relevante en estudios sísmicos y de ingeniería geotécnica (RAMÍREZ & ALEJANO, 2004).

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1-u}{(1+u)(1-u)}} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Donde:



E: módulo elástico de roca (MN

/m²)u: coeficiente de poisson (adimensional)p: densidad de la roca (Kg /m³)

3.1.1.2 Indicadores en los rendimientos de perforación

Los principales indicadores son:

- Rotary ROP (tasa de penetración en modo rotacional): Esta medida examina la correlación entre la distancia total perforada y el tiempo total pasado en modo rotacional.
- Sliding ROP (tasa de penetración en modo orientado): Este término se refiere a la correlación entre la distancia total perforada y el tiempo total utilizado, ambos en modo orientado.
- Distancia de deslizamiento (distancia perforada en modo orientado): Proporción de la distancia total perforada en una corrida normalizada por 100 m o 100 ft a la distancia total perforada en modo orientado.
- Tiempo en el hoyo: Esta medida mide esencialmente la longitud del camino normalizado a cada longitud del intervalo perforado, que es de 100 m o 100 ft.” (LEÓN, 2018).

3.1.1.3 Fuerza de empuje y diámetro de perforación

Según Aparicio (2009) la fuerza de empuje que debe suministrarse directamente con la dureza de la roca y debe ser lo suficientemente grande como para superar su resistencia a la compresión. Pero, para evitar que la cabeza de perforación se dañe antes de lo debido, esta fuerza no puede ir más allá de un valor límite específico. La fuerza excesiva provoca el hundimiento del cabezal y la subsiguiente destrucción en formaciones de rocas duras o extremadamente duras, lo que indica el fin del funcionamiento de la herramienta. A su vez, se encontrará una mayor resistencia cuanto mayor sea el diámetro de perforación, mayor sea la cabeza de la broca y, en consecuencia, mayor sea la superficie a perforar. Los dos factores que afectan la fuerza de empuje vienen a ser la dureza de la roca y el diámetro de la perforación (KPI, 2024)

La siguiente formula:



$$F_{\min} = 25Sc\phi[\text{lbp}] \quad \text{Ecuación 3.6.}$$

Donde:

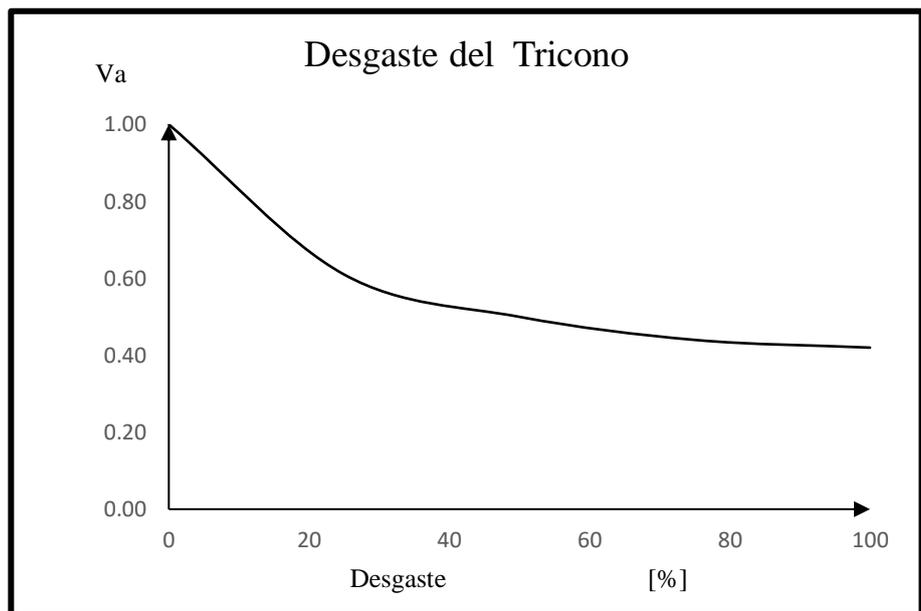
F_m : es la fuerza de empuje mínima(lbp/ Φ)

Sc : es la resistencia a la compresión de roca (MPA)

Φ : es el diámetro de perforación (pulg.)

3.1.1.4 Desgaste del tricono

Según Aparicio (2009) con el desgaste del tricono, la velocidad de avance cae dramáticamente.



FUENTE: Extraído de, KPI, 2024.

Figura 2 — Velocidad de perforación vs el desgaste

3.1.1.5 Energía consumida por la rotación

La columna de barras debe girarse aplicando una fuerza tangencial (F). La energía utilizada en una vuelta (E_r) es igual a la fuerza multiplicada por la distancia recorrida (Camarena, 2019).

$$W_r = 2\pi \times N \times T[\text{kgm/min}] \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Donde:

W_r : potencia (kgm/min)

N : Velocidad de rotación (rpm).

T : par rotacional del motor (kgm).



N es la velocidad de rotación, o el número de revoluciones por minuto [rpm], por lo tanto, es indirectamente proporcional a la dureza de la roca (Sc).

3.1.1.6 Perforación con martillo en fondo

Son perforadoras en las que, a diferencia de los martillos en cabeza, el elemento que proporciona la percusión o martillo va situado en el interior del taladro e incorpora únicamente el mecanismo de percusión (los elementos que proporcionan la rotación y empuje son del todo independientes y están situados en superficie). El chasis y los restantes elementos son similares a las mencionadas para las perforadoras de martillo en cabeza, incluyen también el compresor y la cabina para el operador.

3.1.1.7 Propiedades de las discontinuidades

Oyanguren y Monge (2004) indican que las discontinuidades en un macizo rocoso se refieren a las interrupciones o variaciones en la estructura de las rocas que pueden influir en su estabilidad y comportamiento. Estas características son de gran relevancia en la ingeniería civil, geología y minería, ya que pueden tener un impacto significativo en la estabilidad de pendientes, excavaciones subterráneas, presas y otros proyectos. A continuación, se enumeran algunas de las propiedades más relevantes de las discontinuidades en un macizo rocoso:

Orientación: La dirección y el ángulo de inclinación de la discontinuidad en relación con la superficie de la roca son fundamentales para evaluar su influencia en la estabilidad de estructuras y pendientes.

Espaciamiento: La distancia entre discontinuidades en la masa rocosa puede variar considerablemente y afectar la permeabilidad, resistencia y estabilidad de la roca.

Apertura: La separación entre las caras de la discontinuidad varía, desde una apertura mínima, denominada "cierre", hasta aperturas más amplias, influyendo en la permeabilidad y capacidad de transporte de fluidos a través de la roca.



Rugosidad: La textura de las superficies de las discontinuidades puede ser un factor clave, ya que las superficies rugosas tienden a ofrecer mayor resistencia al deslizamiento en comparación con las superficies lisas.

Relleno de la discontinuidad: Algunas discontinuidades pueden contener materiales como arcilla, cuarzo, minerales o fragmentos de roca, lo que influye en su resistencia y permeabilidad.

Persistencia: La longitud continua de una discontinuidad a través del macizo rocoso puede influir significativamente en la estabilidad de estructuras.

Alteración: Procesos como la oxidación o la meteorización pueden debilitar la resistencia de las discontinuidades, afectando su capacidad para soportar cargas.

Fricción y cohesión: Las propiedades de fricción y cohesión de las discontinuidades son esenciales para evaluar su capacidad de resistir deslizamientos y deformaciones.

Ángulo de intersección: Cuando dos o más discontinuidades se cruzan, el ángulo de intersección entre ellas puede afectar la estabilidad local y la distribución de tensiones.

Tipo de discontinuidad: Existen diversos tipos de discontinuidades, como fallas, diaclasas, juntas, estratificaciones, que influyen en su comportamiento y efectos en el macizo rocoso (RAMÍREZ & ALEJANO, 2004).

3.1.2 Clasificaciones geomecánicas del macizo rocoso

La clasificación geomecánica se crea para definir de forma clara y concisa los distintos niveles de calidad del macizo rocoso en función de las características de las discontinuidades y la matriz rocosa. Además, ello permite establecer parámetros de calidad macizo rocoso mediante la observación directa de sus características y mediante la ejecución de ensayos simples; estos índices están asociados a los requerimientos de apoyo como a parámetros de deformabilidad y resistencia, así como la estabilidad de la excavación (EADIC, 2024)



3.1.2.1 Índice de calidad de la roca (RQD).

El cálculo del índice de calidad de la roca se determina mediante el enfoque escalar de Priest y Hudson y concluyen que el valor teórico del RQD puede determinarse a través de las curvas de distribución de probabilidad exponencial negativa y así hallar el valor de espaciamiento observado entre las discontinuidades (CORREA & MARTINEZ, 2017).

3.1.2.2 Clasificación RMR.

Se basa en características relacionadas con el índice de calidad de la roca RQD, la resistencia y el estado de las discontinuidades. Con el uso de la teoría del caos y los vínculos matemáticos, se aplican funciones continuas en el análisis. Su finalidad es analizar estadísticamente los parámetros geológicos recopilados en el sistema RMR GRATTZ, (2018).

3.1.2.3 Índice geológico de resistencia (GSI)

Esta técnica de categorización utiliza datos recopilados a partir de observaciones geológicas de campo para inferir las propiedades geomecánicas del macizo rocoso. Para esta clasificación se consideran los factores de calidad de la discontinuidad y estado medio de la fractura (CORREA & MARTINEZ, 2017).

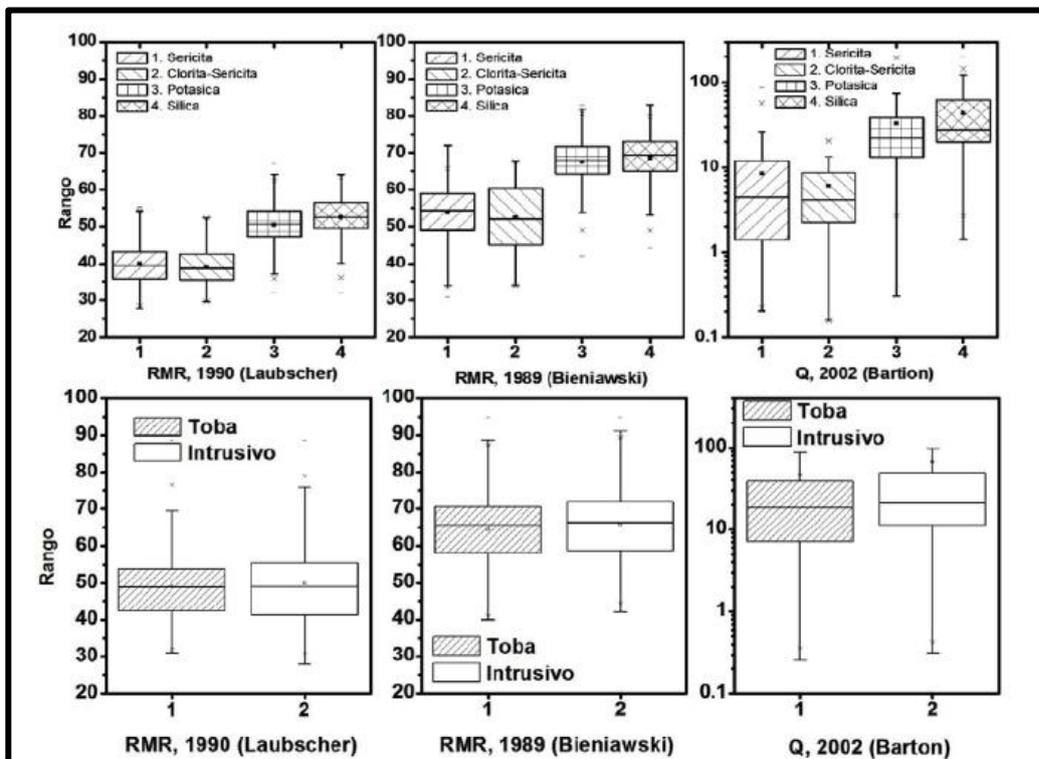
Debido a que el índice de calidad de RMR es superior a 23, según Correa y Martinez está relacionado con la siguiente ecuación:

$$\text{GSI} = \text{RMR} - 5$$

$$\text{GSI} = 85 - 3 \qquad \text{Ecuación 3.8}$$

$$\text{GSI} = 80$$





FUENTE: RMR 1990, Laubscher, RMR 1989, Bieniawski y Q 2002, Barton.

Figura 3 — Diagrama de cajas de sistemas de clasificación (alteración hidrotermal y litología)

3.1.3 Clasificación geomecánica romana (SMR)

La geomecánica se utiliza con frecuencia para caracterizar taludes rocosos. La posibilidad de un sistema de categorización geomecánica de taludes existía en 1985 por Romana, el cual se obtiene incrementando la RMR a una serie de factores de ajuste, dependiendo de la relación geométrica entre las discontinuidades y la pendiente del tipo de falla cinemáticamente compatible con el sistema discontinuidad-pendiente, al igual que la suma de un factor proporcionado por el método de excavación tomando en cuenta la ecuación que sigue (CORREA & MARTINEZ, 2017):

$$SMR = RMR_{básico} + (F1 * F2 * F3) + F4 \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Donde:

SMR: Slope Mass Rating

F1: es dependiente del paralelismo entre las direcciones de las discontinuidades o de la línea de intersección de los planos de rotura, en el caso cuñas y del talud.



F2: buzamiento de la discontinuidad (β_j) en roturas planas y de la inmersión (o plunge) de la línea de intersección (β_i) en roturas por cuña. Para la rotura por vuelco, toma el valor de 1.

F3: relación entre el buzamiento del talud y el buzamiento de la discontinuidad (rotura plana o por vuelco) o la inmersión de la línea de intersección (rotura en cuña).

F4: factor de ajuste por el método de excavación empleado.

3.1.4 Propiedades mecánicas en el macizo rocoso

La resistencia a la deformación y el comportamiento frente a la deformación considerando el módulo de Young y relación de Poisson son dos factores que facilitan la descripción y caracterización de la matriz rocosa. La constitución mineralógica y la resistencia son determinantes de la capacidad que la roca tiene para mantener juntos sus componentes (SUÁREZ, 2015).

3.1.5 Diseño de voladura

El uso de diseños tiene por finalidad lograr la mejor eficiencia posible en términos de eliminación, fragmentación y dilución. Dependiendo de si la perforación es ascendente, descendente o mixta, estos patrones deben tenerse en cuenta de varias maneras. Es fundamental tener en cuenta el control del equipo, el control de la recuperación y la dilución, el control de la fragmentación y la gestión de la densidad lineal explosiva al seleccionar parámetros como piedra, espaciamento y densidad lineal explosiva. Al modelar la energía de la explosión y determinar los patrones de fractura y fragmentación de la roca, la malla de diseño puede especificarse con mayor precisión (FIGUEROA, 2017).

3.1.5.1 Parámetros del diseño básico de la malla de voladura

Determinan cómo se llevará a cabo la detonación de explosivos para fracturar rocas, permitiendo un trabajo más eficiente y seguro. Estos criterios incluyen:

Separación entre perforaciones: Se refiere a la distancia horizontal entre los agujeros de perforación en la estructura. Este aspecto depende del tipo de roca, su resistencia y el tamaño de los explosivos empleados. Un espaciamento apropiado garantiza una fragmentación eficaz y un aprovechamiento óptimo de la energía explosiva.



Calibre de los barrenos: Es crucial para determinar la cantidad de explosivos que se puede cargar en un agujero. Debe ser seleccionado adecuadamente según el tipo de explosivos y la roca que se va a romper.

Profundidad de los taladros: La profundidad de los taladros se refiere a qué tan hondos son los agujeros de perforación en la roca. Debe determinarse en función del tamaño y la forma deseada de la fragmentación, así como de las condiciones geológicas del sitio.

Ángulo de perforación: Es el ángulo en el cual se realizan los taladros con respecto a la superficie de la roca. Este ángulo puede variar según la aplicación y la geometría deseada de la explosión. Un ángulo inadecuado puede resultar en una fragmentación no deseada o una distribución desigual de los fragmentos.

Tipo de explosivo: Existen explosivos de alta velocidad y alta potencia, así como explosivos de baja velocidad y baja potencia, y la elección dependerá de las condiciones específicas del sitio y los objetivos de la voladura.

Secuencia de detonación: está relacionado con el orden en que se encienden los explosivos. Esta secuencia puede variar para lograr una fragmentación controlada y reducir la vibración y las ondas de choque.

Distribución de carga explosiva: La disposición y la cantidad de explosivos en cada taladro deben planificarse cuidadosamente para garantizar una fragmentación eficiente y uniforme. Esto incluye la cantidad de explosivo en la sección alta, intermedia y baja de los taladros.

Iniciadores y retardadores: Los iniciadores y retardadores se utilizan para controlar el tiempo de detonación de los explosivos y garantizar que la secuencia de voladura se realice de manera segura y controlada.

Zona de seguridad: Debe establecerse una zona de seguridad adecuada para proteger a las personas y los equipos de las ondas de choque y fragmentos expulsados durante la voladura.

Supervisión y control: La malla de voladura debe ser supervisada y controlada minuciosamente antes de la detonación para asegurar la



eficiencia y seguridad de la operación (BACA & HINOSTROZA, 2021).

3.1.6 Parámetros de diseño en el método de explotación

Vienen a ser el tamaño y forma del yacimiento, la altura y el ángulo del buzamiento, la profundidad del yacimiento, la geomecánica del macizo rocoso, disponibilidad y tipo de soporte, impactos de hundimientos superficiales, tipo de descarga, longitud a explotar, arranque, dirección de explotación, tipo de conducción, tipo de conducción, comportamiento de retroceso, dureza mineral de la roca e impacto ambiental (CAHUAPAZA, 2022).

3.1.6.1 Factores geotécnicos que afectan el diseño de la voladura

El cambio en la cohesión tiene el mayor impacto en el aumento del factor de seguridad en taludes de falla plana. Para ángulos de inclinación cercanos a los 90° , sólo esta característica y la altura de la pendiente tienen influencia ya que el rozamiento en la discontinuidad explica su contribución al factor de seguridad. El tamaño del bloque tiene un impacto significativo en el factor de seguridad de falla de la cuña. Para cualquier escenario específico, existe un número de estabilidad $c/(H)$ que optimiza el factor de seguridad antes de que el factor de seguridad comience a disminuir hasta la falla. La característica que más influye en cuánto contribuye a la seguridad el sistema de malla metálica flexible con anclaje es el módulo de rigidez de la malla Grattz, (2018).

3.1.7 Variables controlables en el diseño de voladura

Es importante mencionar los factores que se controlan en cualquier actividad de voladura antes de pasar al tema de las voladuras a cielo abierto, se pueden dividir en tres grupos:

- Características dimensionales (retroceso, espaciamiento, longitud de carga, diámetro)
- Químico - Físico (energías, mecanismos de carga, potencias, tipos de explosivos)
- A partir del tiempo (tiempos de salida, tiempos de retraso, secuencia de inicio)



3.1.8 Diseño geométrico de la voladura

Para realizar el diseño geométrico se consideran los siguientes factores (CORREA & MARTINEZ, 2017):

- Diámetro
- Sobre perforación
- Altura de banco
- Taco
- Burden
- Carga de fondo
- Carga de columna
- Secuencia de iniciación y retardos
- Espaciamiento

3.1.8.1 Burden

Para determinar el Burden, Konya en el año 1983 propone el siguiente modelo matemático:

$$B = \left(\frac{2\rho_e}{\rho_r} + 1,5 \right) * d \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Donde:

B: Burden (pies)

ρ_e : densidad del explosivo (g/cm^3)

ρ_r : densidad de la roca (g/cm^3)

d : diámetro de la carga (mm)

3.1.8.2 Sobre perforación

Es la longitud del barreno por debajo del nivel del piso que se necesita para romper la roca a la altura del banco y lograr una fragmentación y desplazamiento adecuado que permita al equipo de carga alcanzar la cota de excavación prevista.



3.1.8.3 Altura de banco

Distancia vertical entre el punto más alto del banco (cresta) y el punto más bajo del banco (pata). La altura de banco depende del tamaño de los equipos, selectividad, legislación y la seguridad

3.1.8.4 Taco

EL taco es empleado para confinar el explosivo en la parte superior de la carga explosiva, reduciendo el nivel de eyecciones y ruido

3.1.8.5 Carga de fondo

Explosivo colocado en el fondo del barreno, que debe ser más potente que en el resto del barreno.

3.1.8.6 Carga de columna

Resto de explosivo que se introduce en el barreno sobre la carga de fondo

3.1.9 Energía de los explosivos

Es un concepto esencial en los sectores de la demolición, minería y construcción. Esta energía determina la capacidad de un explosivo para realizar trabajo mecánico, como la fractura de rocas y otros materiales. Durante la detonación, se libera esta energía, la cual se utiliza para fragmentar y desplazar rocas, suelos o estructuras. En estas industrias, la energía de los explosivos es una medida fundamental para seleccionar el tipo y la cantidad adecuados de explosivos para tareas específicas.

a) Determinación de la Energía

El proceso de determinación de la energía de un explosivo involucra una serie de cálculos y mediciones. La energía de un explosivo se puede expresar en diversas unidades, como julios o kilocalorías por gramo. Su cálculo se basa en la fórmula química del explosivo, su velocidad de detonación y la cantidad de explosivo presente en una carga. Los fabricantes de explosivos proporcionan información detallada sobre la energía de sus productos, lo que simplifica la selección de explosivos apropiados para aplicaciones particulares.



La determinación de la energía de un explosivo se basa en la fórmula de la energía:

$$E=1/2 \times m \times v^2 \qquad \text{Ecuación 3.11}$$

Donde:

E: energía (J)

M: masa del explosivo (kg)

V: velocidad de detonación (m/s)

b) Medición de la Energía

El cálculo de la energía de los explosivos se realiza en laboratorios especializados y es un procedimiento complejo. Utiliza dispositivos y técnicas precisas para determinar la energía potencial y el índice de detonación. Los resultados de estas mediciones ofrecen información valiosa para la selección y el diseño de cargas explosivas seguras y eficientes en aplicaciones prácticas, como la demolición controlada, la excavación minera o la construcción de túneles. La medición de la deformación permite calcular la energía liberada. Por ejemplo, si un explosivo de 100 g de TNT causa una deformación de 2 cm en un bloque de plomo, se puede calcular la energía liberada.

c) Ensayo de Trauzl en bloque de plomo

Es una técnica de amplio uso para medir la energía de los explosivos. En este procedimiento, se coloca el explosivo en un bloque de plomo, y se lleva a cabo la detonación bajo condiciones controladas. La energía liberada durante la detonación provoca una deformación en el bloque de plomo. La medición de esta deformación permite calcular la energía liberada por el explosivo. Supongamos que un explosivo causa una deformación de 5 mm en un bloque de plomo con 10 kg de masa. A través de la fórmula de energía se puede calcular la energía que desprende un material explosivo.



d) Ensayo de energía de burbuja bajo el agua

Es otra técnica empleada para medir la energía de los explosivos. En este método, el explosivo se sumerge bajo el agua, y la detonación genera una burbuja de gas. La energía liberada se calcula en función del tamaño de burbuja y la forma. Este ensayo es especialmente útil para determinar la energía de explosivos utilizados en entornos acuáticos o en proximidad a cuerpos de agua. Por ejemplo, si la burbuja tiene un volumen de 50 ml y la presión del gas dentro de la burbuja se registra durante la explosión, se puede determinar la energía liberada.

e) Modelo de factor de energía

Es una herramienta matemática que se emplea para predecir la energía liberada por una cantidad específica de explosivos. Este cálculo se basa en parámetros como la densidad del explosivo y la velocidad de detonación. El modelo es útil para estimar la energía potencial de una carga explosiva antes de su uso, lo que contribuye a optimizar el diseño y la seguridad de las voladuras. Por ejemplo, si se tiene un explosivo con una velocidad de detonación de 6000 m/s y una densidad de 1,5 g/cm³, el modelo de factor de energía proporcionaría una estimación de la energía liberada por unidad de masa (CORREA & MARTINEZ, 2017).

3.1.10 Estructura de costos en minería

Dentro de estos costos se incluyen comunicaciones, perforaciones, permisos, licencias, equipos de protección personal, informes geológicos, consultoría geológica, pago a comunidades por convenios exploratorios, alquiler de equipos, nómina de campo, circuitos de avance, pago a comunidades por convenios exploratorios, informes geológicos, consultoría geológica, campamento y otro (Gestión de Operaciones y Proyectos Mineros).

3.1.11 Costos operativos

El costo unitario completo del ciclo de fabricación es lo que se destina a lo que se determina por tonelada (por ejemplo, US\$ 2,50 por tonelada para minería) (CHAMBERGO, 2013)



3.1.12 Análisis de precio unitario

Según Vivar (2021) también conocido como análisis de costos unitarios. Método mayormente utilizado en las naciones latinoamericanas para la administración de varios proyectos. Los buenos métodos de administración de proyectos tratan de aumentar la precisión de la estimación en las etapas de planificación. Estas técnicas se basan en la teoría de la triple restricción considerando tiempo, alcance y costo, al igual que en otras áreas de gestión integración, calidad, riesgos y recurso.

a) Características

El análisis de precio unitario presenta las siguientes características:

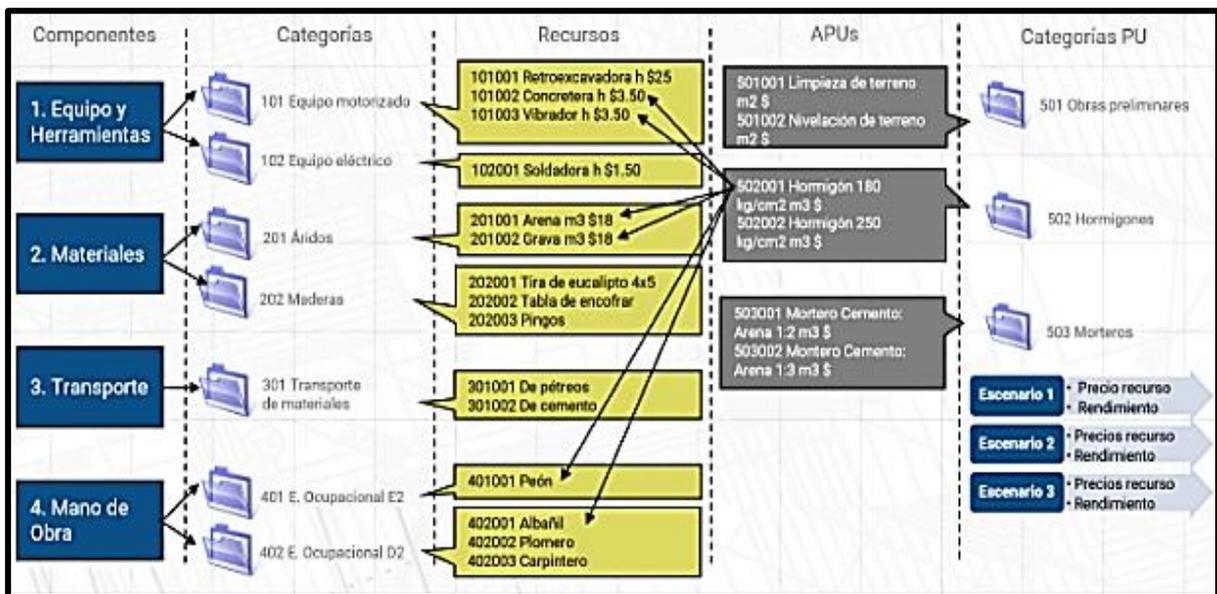
- Como no hay procedimientos de construcción comparables, es un proceso aproximado.
- Se basa en la experiencia del analista considerando el juicio de expertos, que en su mayoría promedia el consumo, los insumos y el desperdicio.
- Dado que es proclive a la evolución, es un proceso dinámico de mejora continua.

b) Estructura

La estructura del análisis de precio unitario consta de 3 niveles:

- Los componentes conforman el primer nivel, el cual solo puede consistir en lo siguiente: Análisis de precios, mano de obra, transporte, material, equipos y herramientas. El componente se halla a partir de la determinación del carácter del código de recursos.
- El segundo nivel es una estructura de categorías que se puede ver como un árbol de carpetas y se registra para ordenar la información de cada componente; el código de categoría se forma a partir del carácter inicial que identifica el componente, así como los caracteres alfanuméricos que identifican la categoría (VIVAR, 2021).
- El tercer nivel es para mantener los recursos en los primeros cuatro componentes y mantenimiento de análisis de precio unitario en el quinto componente.





FUENTE: Extraído de Vivar, 2011.

Figura 4 — Estructura de la base del análisis del precio unitario

3.1.13 Clasificación de explosivos

Ramírez (2014) menciona que los explosivos se organizan en distintas categorías según sus características y comportamiento. A continuación, se presentan estas categorías con ejemplos para enriquecer la información.

3.1.13.1 Explosivos primarios

Los explosivos primarios son altamente sensibles y pueden detonar con una cantidad mínima de energía o un estímulo, como un impacto o una chispa. Son utilizados como iniciadores o detonadores en aplicaciones industriales y militares

Nitroglicerina: La nitroglicerina es un paradigma de explosivo primario. Exhibe una alta sensibilidad y demanda únicamente un estímulo mínimo, como un impacto o una chispa, para su detonación. Se emplea frecuentemente como iniciador en contextos industriales y militares

Tetranitrato de pentaeritritol (PETN): El PETN constituye otro ilustre miembro de los explosivos primarios. Se utiliza en detonadores y sistemas de inicio debido a su elevada sensibilidad



3.1.13.2 Explosivos secundarios

RAMÍREZ, (2014), menciona Los explosivos secundarios requieren una fuente de iniciación, como una mecha o un detonador, para detonar. Son más seguros de manejar en comparación con los explosivos primarios y encuentran aplicación en demolición, minería y construcción. (RAMÍREZ, 2014).

Dinamita: La dinamita se clasifica como un explosivo secundario, ya que precisa de una fuente de iniciación, como una mecha o un detonador, para detonar. Se emplea ampliamente en labores de demolición y construcción

ANFO (Amonio Nitrato/Fuel Oil): El ANFO es un explosivo secundario convencional compuesto por amonio nitrato y aceite combustible. Requiere una fuente de ignición para detonar y se utiliza en actividades mineras y voladuras controladas.

3.1.13.3 Explosivos comerciales

Los explosivos comerciales pueden ser explosivos secundarios o deflagrantes diseñados y fabricados para aplicaciones específicas. Se utilizan en diversos sectores industriales y suelen ser seguros de manipular y almacenar.

Gelatina Explosiva: La gelatina explosiva es un ejemplo de explosivo comercial que se utiliza en voladuras controladas y aplicaciones mineras. Se presenta en formato de gel y se caracteriza por su facilidad de manipulación.

Emulsiones Explosivas: Las emulsiones explosivas representan otro tipo de explosivo comercial que se emplea extensamente en tareas de demolición y construcción. Están compuestas por una emulsión de agua y combustible, lo que garantiza su seguridad en el manejo (SUÁREZ, 2015).

3.1.13.4 Explosivos deflagrantes

Estos explosivos queman rápidamente en lugar de detonar. La deflagración es una transformación química exotérmica la cual se propaga por el material explosivo a una velocidad controlada. Se



encuentran comúnmente en fuegos artificiales y en la propulsión de proyectiles.

Pólvora negra: La pólvora negra es un explosivo deflagrante que arde a una velocidad relativamente baja. Ha tenido un uso histórico en la manufactura de armas de fuego y fuegos artificiales.

Cartuchos de pólvora de armas de fuego: Los cartuchos de pólvora empleados en armas de fuego son un ejemplo contemporáneo de explosivos deflagrantes. La pólvora arde gradualmente para propulsar una bala (SUÁREZ, 2015).

3.1.14 Sistemas de iniciación

Los sistemas de arranque desempeñan un papel crucial en la industria de los explosivos, ya que se utilizan para gestionar el momento y la secuencia de detonación de los explosivos. En esta sección, se examina la definición de sistemas de arranque y su desarrollo a lo largo del tiempo (DELGADO, 2014).

3.1.14.1 Definición

Los sistemas de arranque consisten en dispositivos y mecanismos diseñados para poner en marcha la detonación de explosivos de manera precisa y controlada. Su función principal es garantizar que los explosivos se activen en el momento y en el orden adecuados, lo que resulta fundamental para asegurar la seguridad y eficacia en diversas aplicaciones, como la demolición, la minería y la construcción. Estos sistemas varían en complejidad, abarcando desde simples mechas y detonadores eléctricos hasta sistemas más avanzados que incorporan tecnología electrónica y digital para lograr una sincronización precisa de múltiples explosivos.

3.1.14.2 Evolución de los sistemas de iniciación

Los sistemas de arranque han ido evolucionando notablemente. En sus primeras etapas, se empleaban mechas y dispositivos de relojería para iniciar la detonación de explosivos de forma manual. Con el tiempo, se han desarrollado sistemas más seguros y precisos:

Mecánicos: Inicialmente, se recurrió a mechas, relojes de arena y mecanismos de relojería para programar la detonación de explosivos. A



pesar de su eficacia, estos sistemas conllevaban riesgos de seguridad y no permitían una sincronización precisa.

Eléctricos: La introducción de detonadores eléctricos representó un avance significativo al permitir una sincronización más precisa. Estos sistemas hacen uso de corriente eléctrica para iniciar la detonación y se controlan mediante circuitos eléctricos.

Electrónicos y Digitales: Con los avances tecnológicos, se han desarrollado sistemas electrónicos y digitales más sofisticados. Estos sistemas emplean microprocesadores y dispositivos de programación para lograr una sincronización precisa de múltiples explosivos. Además, ofrecen funciones de monitoreo y diagnóstico que mejoran la seguridad y eficacia.

La evolución de los sistemas de arranque ha revolucionado la gestión de voladuras en la industria. La capacidad de sincronizar múltiples explosivos con precisión y seguridad ha resultado en avances significativos en áreas como la demolición, la minería y otros campos que emplean explosivos. Sin embargo, esta evolución también ha requerido un enfoque riguroso en cuanto a seguridad y la capacitación de profesionales que trabajan con estos sistemas, con el fin de prevenir accidentes y garantizar operaciones exitosas.

3.1.15 Regulaciones y criterio de control

En el ámbito de las vibraciones, especialmente en situaciones donde se trabaja con maquinaria pesada, explosivos o cualquier actividad que genere vibraciones, es fundamental contar con regulaciones y criterios de control. Estos son necesarios para garantizar la seguridad y minimizar los efectos adversos en las estructuras y el entorno. Estas regulaciones y criterios se establecen para definir límites seguros de vibración y especificar las acciones correctivas requeridas para proteger a las personas y las infraestructuras. Cumplir con estas regulaciones es esencial en aplicaciones industriales y de construcción (DELGADO, 2014).

a) Criterios alternativos USBM

El Servicio de Minas de los Estados Unidos (USBM) ha desarrollado criterios alternativos que se emplean para evaluar y controlar las vibraciones generadas



por actividades mineras y de construcción. Estos criterios proporcionan directrices para evaluar la exposición a vibraciones y determinar las medidas necesarias para proteger las estructuras y las personas. Los criterios USBM son ampliamente utilizados en la industria y brindan un marco sólido para abordar las preocupaciones relacionadas con las vibraciones (DELGADO, 2014).

b) Norma británica BS6472-1992

La norma británica BS6472-1992 se enfoca en la evaluación de las vibraciones generadas por diversas fuentes, como la construcción, la minería y el transporte. Esta norma establece directrices y límites de vibración para proteger las estructuras y garantizar la comodidad y seguridad de las personas. Define métodos de medición, evaluación y criterios de control para una amplia variedad de situaciones (DELGADO, 2014).

c) Norma alemana DIN 4150

La norma alemana DIN 4150 se concentra en las vibraciones generadas por actividades de construcción y maquinaria. Establece umbrales de vibración y ofrece orientación sobre la evaluación y el control de las vibraciones para proteger edificaciones y prevenir daños estructurales. Esta norma es ampliamente reconocida y aplicada en proyectos de la ingeniería civil y la construcción (DELGADO, 2014).

d) Norma Sueca SS 4866: 1991

La norma sueca SS 4866: 1991 se ocupa de las vibraciones generadas por diversas actividades, incluyendo la construcción, la minería y el transporte. Establece límites de vibración y proporciona directrices detalladas para la medición, evaluación y mitigación de las vibraciones. Su enfoque se orienta en asegurar la integridad de las estructuras y preservar la seguridad de las personas (DELGADO, 2014).

e) Efectos de Vibraciones en tuberías enterradas

Las vibraciones pueden tener consecuencias significativas en las tuberías enterradas. Estas vibraciones pueden originarse por actividades de construcción, tráfico pesado u otras fuentes y pueden afectar la integridad de las tuberías. El impacto de las vibraciones en las tuberías incluye la



posibilidad de daños, desplazamientos, corrosión y pérdida de hermeticidad. Para mitigar estos efectos, es necesario obedecer criterios de control y regulaciones adecuadas y se pueden aplicar medidas de protección, como aisladores de vibración o la supervisión constante de la integridad de las tuberías enterradas. La consideración de las vibraciones es esencial en la gestión de activos de infraestructuras subterráneas. (DELGADO, 2014).

3.2 Marco conceptual

a) Avance por metro lineal

En la minera se utiliza para medir la eficiencia o productividad de la perforación, excavación u otro proceso similar en relación con la distancia recorrida (REYES Fernández, 2015).

b) Burden

Se define como la distancia horizontal entre el taladro de perforación y la superficie o cara de la roca [J1]objetivo en un proceso de voladura, también se encarga de la propagación energética de la explosión y la fragmentación resultante. Un burden más grande puede resultar en una fragmentación menos efectiva, mientras que un burden más pequeño puede generar una distribución desigual de la energía y posiblemente causar daños indeseables. El burden se toma considerando las propiedades geológicas, el tamaño y la resistencia del macizo rocoso, así como los objetivos específicos de la operación minera (VALENCIA, 2021).

a) Costos directos

Se atribuyen directamente a una actividad, servicio o producto específico. En el ámbito minero, los costos directos pueden incluir los costos de trabajo directo, suministros, materiales y energía utilizados en la producción, los servicios contratados específicamente para un proyecto minero y otros gastos directamente relacionados con la actividad extractiva (REYES Fernández, 2015).

b) Costos operativos

Se refieren a los gastos operativos y de funcionamiento de una empresa, planta, proyecto o actividad. En el contexto de la minería, los costos operativos pueden incluir, entre otros, el consumo de energía, el mantenimiento de equipos, los salarios del personal, el suministro de materiales, los servicios de transporte y los gastos generales de administración (HUILLCA Moina, 2019).



c) Espaciamiento

En la minería y la construcción, el espaciamiento se refiere a la distancia horizontal entre los taladros de perforación utilizados en la voladura. Se selecciona en base a las características geológicas de la roca, la resistencia y tamaño del material, y el resultado deseado de la voladura.

d) Discontinuidades

Las discontinuidades se refieren a las fracturas, fallas o planos de debilidad presentes en el macizo rocoso. Estas interrupciones pueden incluir juntas, fisuras, diaclasas y estratos. La difusión de ondas sísmicas, estabilidad de excavaciones y la permeabilidad del macizo rocoso pueden ser influenciadas por las discontinuidades (RAMÍREZ & ALEJANO, 2004).

e) Geomecánica

La geomecánica es una disciplina que combina la geología y la mecánica para estudiar el comportamiento de las rocas y los suelos. Se enfoca en comprender cómo se comportan las formaciones geológicas bajo cargas y esfuerzos, y cómo estas propiedades afectan a la estabilidad de las excavaciones mineras y otros proyectos geotécnicos (SUASNABAR Ortega, 2019).

f) Macizo rocoso

El macizo rocoso se refiere a una masa o cuerpo de roca continua y compacta presente en la tierra. Puede ser una formación geológica sólida y homogénea o puede estar compuesto por varias capas o estratos. El macizo rocoso es donde se realizan las operaciones mineras y de construcción, y su caracterización es fundamental para la ejecución de proyectos y los diseños geotécnicos (CARDENAS Huamani, 2019).

g) Rendimiento

El rendimiento es una medida de la eficiencia o la productividad en la industria minera. Se refiere a la cantidad de mineral extraído o producido en relación con el tiempo, el esfuerzo y los recursos utilizados para lograrlo (BRANLY & RAMOS, 2021).

h) Voladura

La voladura es un proceso utilizado en la minería y la construcción para fragmentar rocas u otros materiales dentro de las actividades mineras, a través de la explosión



controlada. La tronadura implica la colocación estratégica de explosivos en taladros perforados en la roca con el fin de generar una fragmentación deseada para facilitar su extracción o para trasladarlo de manera más óptimo a la planta procesadora (SUÁREZ, 2015).

i) Velocidad de detonación

Velocidad a la que se difunde la onda de un explosivo en detonación. Es una medida importante que determina la eficacia y el rendimiento de los explosivos utilizados en la voladura controlada (ZEBALLOS, 2022).

j) Software JK Simblast

JK Simblast es un premiado sistema de software, posibilita simulación e administración informática de voladura en minas y operaciones referentes. El sistema modular es diseñado para ingenieros en necesidad de estandarizar su control de voladura, integrando toda la labor asociada con diseño, simulación, análisis y optimización. Esto incluye almacenamiento y manipulación de modelos, datos y resultados, dentro de un solo sistema



CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1 Tipo y nivel de investigación

4.1.1 Tipo de investigación

Se define métodos y técnicas elegidas, las cuales se utilizarán de forma lógica para resolver de manera eficiente el problema a investigar

Por ello la tesis de investigación tiene carácter descriptivo- aplicativo debido a que se identifica un problema relacionado a la mejora del diseño de perforación, el cual buscaremos obtener un diseño más eficaz y apropiado para operar (CABALLERO, 1987).

4.1.2 Nivel de investigación

Es el propósito de un investigador descubrir, describir y resolver un problema a través de la ejecución de una colección de estudios desarrollados sucesivamente.

El presente proyecto de tesis tiene como carácter aplicativo ya que al tener determinado el objetivo que es la mejora del diseño de perforación se enfocara en la búsqueda y consolidación de los conocimientos para lograr aplicar una malla de perforación más eficaz y apropiado para operar para reducir los costos (CABALLERO, 1987).

4.2 Diseño de la investigación

El nivel de diseño indica el esquema general el cual logrará darle coherencia y sentido práctico a las actividades que realizaremos para dar una respuesta al problema y al objetivo propuesto.

El proyecto que se presenta es de carácter descriptivo – aplicativo y tiene la finalidad evaluar el planteamiento en el diseño de malla de perforación y voladura, del antes y después de la utilización con los parámetros determinados (CABALLERO, 1987).



4.3 Descripción ética de la investigación

Los aspectos éticos a respetar son:

- a) Los materiales intelectuales de autores, sobre las teorías y conocimientos se realizará la correcta citación y se dará una precisión de la fuente bibliográficas en donde está ubicada lo que se cite o referencie.
- b) La reserva de información se consideró que se cuenta con las autorizaciones necesarias para su exhibición o gestión cuando se trata de información de repositorio institucional académico que se relaciona con la actuación o gestión de la organización.
- c) En relación a la contextualización en la estructura organizacional por el autor del presente estudio, los procedimientos y metodologías propuestas, desarrolladas y utilizadas en este estudio constituyen propiedad intelectual en sí misma por el autor de esta tesis.
- d) La mayoría de los involucrados en este estudio mantienen sus identidades en secreto, a excepción de aquellos personajes cuya trascendencia autorizaron su identificación.

4.4 Población y muestra

4.4.1 Población

Es el conjunto de unidades al cual se estudiará, de donde se desea recopilar información específica del cual luego nos ayudará a generar conclusiones (CABALLERO, 1987).

Por eso la población está constituida por la Unidad Minera Anama de la Compañía Minera Anabí S.A.C.

4.4.2 Muestra

Nos da a entender que la muestra es un parte de la población, en la cual se estudiara determinados caracteres en general de una población.

La muestra para el diseño de malla de perforación y voladura está conformada por la U.E.A. Valeria de la Unidad Minera Anama.

4.5 Procedimiento

Para el presente trabajo se realizó análisis de bibliografía, con respecto al tema en estudio, cuyas fuentes principales son tesis, artículos científicos, entre otros. Se ordenó, ejecutó, contrastó y elaboró la información obtenida en el presente trabajo de investigación con el



objetivo general de poder optimizar los procesos de perforación y voladura, mediante un nuevo diseño de malla de perforación, reduciendo costos y obteniendo un avance de producción más eficaz.

4.5.1 Procedimientos generales

- Se estableció una coordinación con el asesor del proyecto de tesis para determinar los pasos a seguir.
- Los resultados obtenidos se muestran en tablas de análisis utilizando Excel estadístico, incluyendo el plan de cumplimiento mensual de minado y el registro de sobre rotura según el área de costos.
- Se analizo diferentes tipos de investigación con respecto a implementación de nuevos diseños de mallas, reducción de costos, parámetros geo-mecánicos, selección y cantidad de explosivo, con la finalidad de aplicarlo al presente trabajo de investigación.

4.5.2 Los procedimientos se realizaron de acuerdo a la siguiente secuencia:

- **Procedimiento 1:** Para la presente tesis se realizó las observaciones directas sobre visitas durante diferentes periodos a la Unidad Minera Anama de la Compañía Minera Anabí S.A.C., durante estas visitas se realizó continuas revisiones e inspecciones a los reportes diarios en las labores de avance.
- **Procedimiento 2:** Se pasó a un método de revisión de la literatura se utilizó para obtener una mejor comprensión del diseño de minería a cielo abierto.
- **Procedimiento 3:** Se procesó toda la información de anterior, malla y se observó cuáles eran sus problemas y se realizó los cálculos para la nueva malla de perforación y voladura de sus nuevos parámetros que permitió reducir los costos en la Unidad Minera Anama de la Compañía Minera Anabí S.A.C.
- **Procedimiento 4:** Se realizó un análisis de comparación entre los resultados en costos generados por la nueva malla y a la anterior malla de perforación y voladura sus parámetros realizando gráficos y tablas para una mejor observación de la mejora en la Unidad Minera Anama de la Compañía Minera Anabí S.A.C.



4.6 Técnica e instrumentos

4.6.1 Técnicas

- Observación: Es la obtención de información a partir de observar atentamente y registrar la información para su posterior análisis.
- Análisis de documentos: Consiste en recoger de documentos relacionados a los conceptos más significativos informativamente sobre la malla de perforación superficial para poder conseguir mayor conocimiento y lograr conseguir nuestra nueva malla de perforación.

4.6.2 Instrumentos

- Guía de observación: La Guía de observación será para determinar la nueva malla de perforación observando los parámetros por la cual fue hecha la malla anterior analizando y registrando puntos que podrían ayudarnos a lograr mejorar esta malla anterior y lograr la reducción de costos.
- Guía de análisis documental: Está guía está hecha a base de los documentos leídos anteriormente con respecto a las mallas de perforación en minera superficial, y de los capítulos y artículos de las cuales se ha mencionado.
- Instrumentos de campo: Se hizo uso de flexómetros para la medición de las dimensiones de la actual malla de perforación, así como el uso de la picota de geólogo y cartillas de geomecánica para determinar los parámetros geomecánicos considerados en el diseño de mallas.



CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Análisis de resultados

- Se estableció un nuevo diseño de malla de perforación que permitió disminuir los costos en la U.E.A Valeria – Unidad Minera Anabi S.A.C.
- Se determinó un nuevo diseño de carga explosiva y se seleccionó los accesorios de voladura que permitió reducir los costos en la U.E.A Valeria – Unidad Minera Anabi S.A.C.
- Se determinó el costo unitario que genera el nuevo diseño de malla de perforación y voladura en la U.E.A Valeria – Unidad Minera Anabi S.A.C.

5.1.1 Cálculos principales

El proceso de diseño y configuración de mallas de perforación y voladura en zonas afectadas por alteraciones implica, en primera instancia, el cálculo de los espaciamientos entre barrenos, tomando en consideración las variaciones en la geología local. Las alteraciones, que pueden ser bastante heterogéneas en su distribución, juegan un papel fundamental en este proceso, ya que afectan directamente la disposición de los barrenos y la eficiencia de la voladura. Por lo tanto, comprender y caracterizar adecuadamente estas alteraciones es esencial en la búsqueda de la optimización y la eficacia de las operaciones del proceso de perforación y voladura.



Tabla 6 — Alteraciones presentes en el tajo

Alteraciones	% de alteración	Densidad (t/m ³)	Resistencia a la compresión (MPa)
Sílice masiva (SM)	15 %	3,2	300
Sílice granular (SG)	45 %	2,3	250
Sílice alunita (SA)	35 %	2,2	150

FUENTE: Área de geología y exploraciones Anabi SAC.

Para realizar el cálculo de uno de los parámetros esenciales del diseño de malla de perforación y voladura, con mayor precisión se utilizó la Fórmula Modificada de R.ASH, Konya, y Andersen, ello con el fin de comparar los resultados.

Ash en la versión modificada de su fórmula, se propuso considerar las propiedades específicas del explosivo y de la roca al comparar una roca estándar con aquella que sería sometida a la voladura. La fórmula modificada para el cálculo del burden es:

$$Ks = \frac{Kb * De}{12} \left(\frac{dr_1}{dr_2} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{SG_2 * Ve_2^2}{SG_1 * Ve_1^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

Donde:

- Ks: Burden (m)
- Kb: factor (los valores se asumen según la tabla)
- De: Diámetro de la carga explosiva (pulgadas); 6 ¾ pulgadas
- dr₁: Densidad de la roca estándar (ton/m³); 2.7 t/m³
- dr₂: Densidad de la roca a ser disparada (t/m³)
- SG₁: Densidad de la mezcla explosiva estándar (g/cc); 1,3 g/cc.
- SG₂: Densidad de la mezcla explosiva a ser usada (g/cc)
- Ve₁: Velocidad de detonación (VOD) de la mezcla explosiva estándar (m/s); 3657,6 m/s.

Ve₂: Velocidad de detonación (VOD) de la mezcla explosiva a usar (m/s)



Tabla 7 — Factor Kb

Clase de Roca	Densidad de explosivo (g/cm ³)	Clase de Roca		
		Blanda	Media	Dura
Densidad y potencia Baja	0,8 – 0,9	30	25	20
Densidad y potencia media	1,0 – 1,2	35	30	25
Densidad y potencia Alta	1,2 – 1,6	40	35	30

FUENTE: Exsa, Manual práctico de perforación y voladura, 2005.

Para nuestros cálculos la mezcla explosiva comercial (MEC) a considerar ha sido HA 37 (30% de emulsión, y 70% de ANFO), además la MEC con la cual se viene trabajando en la unidad minera es el más idóneo para el estudio.

Tabla 8 — Propiedades del explosivo

Explosivo	Densidad (g/cc)	A WS	ABS	RWS (%)	RBS (%)	Energía (MJ/kg)	Energía (kcal/kg)	VOD (m/s)	Resistencia
ANFO	0,78	910	710	100	100	3,39	860	4000	Baja
HA (28)	0,94	852	801	94	113	3,57	854	4328	Baja
HA (37)	1,03	840	865	92	122	3,52	840	4518	Baja
HA (46)	1,19	830	988	91	105	3,41	815	4907	Regular
HA (64)	1,32	770	103	85	143	3,22	770	5450	Buena
ANFO	1,00	910	710	100	120	3,39	860	4000	Buena

FUENTE: Konya, Ficha técnica de Famesa, 2023.



$$B = 3.15 \times \emptyset \times \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{explosivo}}}{\rho_{\text{roca}}}}$$

Ecuación 3.13

Donde:

- B: Burden (m)
- \emptyset : Diámetro del explosivo (mm)
- $\rho_{\text{explosivo}}$: Densidad del explosivo (g/cm³)
- ρ_{roca} : Densidad de la roca (g/cm³)

Andersen

$$B = \sqrt{L \times \emptyset}$$

Ecuación 3.14

Donde:

- B: Burden (m)
- L: Longitud de taladro (m)
- \emptyset : Diámetro del explosivo (m)

Aplicando las ecuaciones antes descritas y los parámetros considerados se muestran los resultados obtenidos según cada modelo matemático en la siguiente tabla:

Tabla 9 — Burden calculado según modelos matemáticos

ALTERACIONES	Ash modificado	Konya	Andersen	Promedio
Sílice masiva (SM)	4,26 m	4,45 m	3,79 m	4,17 m
Sílice granular (SG)	5,14 m	4,97 m	3,79 m	4,63 m
Sílice alunita (SA)	6,00 m	5,04 m	3,79 m	4,94 m

Los resultados obtenidos difieren de los parámetros con los cuales actualmente se viene trabajando en el tajo Valeria, para lo cual debemos tener un análisis más exhaustivo de la posibilidad de trabajar con los valores obtenidos para los cual más adelante se expondrán los análisis y resultados obtenidos.

Los parámetros adicionales necesarios para el diseño se determinarán siguiendo las siguientes relaciones:



La sobreperforación (Sp) se determina mediante la fórmula:

$$Sp = 3 * \varnothing \quad \text{Ecuación 3.15}$$

Donde:

- Sp : Representa la sobreperforación (m)
- \varnothing : Diámetro del taladro (6 3/4 pulg = 0.171m)

$$Sp = 3 * 0,171 \text{ m}$$

$$Sp = 0,514 \text{ m} \quad \text{Ecuación 3.16}$$

Por lo tanto, la sobreperforación en este caso sería de 51.435 cm para lograr un piso uniforme. En relación con la longitud final del taladro, se determina sumando la altura del banco (Hb) y la sobreperforación (Sp), expresado por la fórmula:

$$Lt = Hb + Sp \quad \text{Ecuación 3.17}$$

$$Lt = 8,50 \text{ m}$$

Taco: en cuanto al taco, este se compone de los restos de la perforación y se asegura con un listón de madera para su confinación, se determinará de la siguiente manera la misma que dependerá del burden calculado para cada alteración:

$$T = 0,7 * B \quad \text{Ecuación 3.18}$$

Donde:

- T : Longitud de taco (m)
- B : Burden (m)

Espaciamiento: En una malla triangular regular, el espaciamiento se determina mediante una relación al burden de 1,15. Esta relación se selecciona para garantizar una distribución efectiva de la energía de la MEC, asegurando una cobertura adecuada.

5.1.2 Análisis de voladura antes de optimizar

Para un área de alteración Sílice granular (más representativa) se consideraban los siguientes parámetros para el diseño de la malla de perforación:

- Altura Banco (m) = 8,0
- Diámetro de broca (plg) = 6 3/4



- Espacio Prom. (m) = 4,60
- Burden Prom. (m) = 4,00
- Profundidad Prom. (m) = 8,5
- Taco Prom. (m) = 4,5
- Sobreperforación (m) = 0,5

En seguida se muestra en una vista de perfil los parámetros con los cuales se trabajaba para taladros de producción, buffer y de recorte además se detalla el diseño de carga de explosivos para cada taladro:

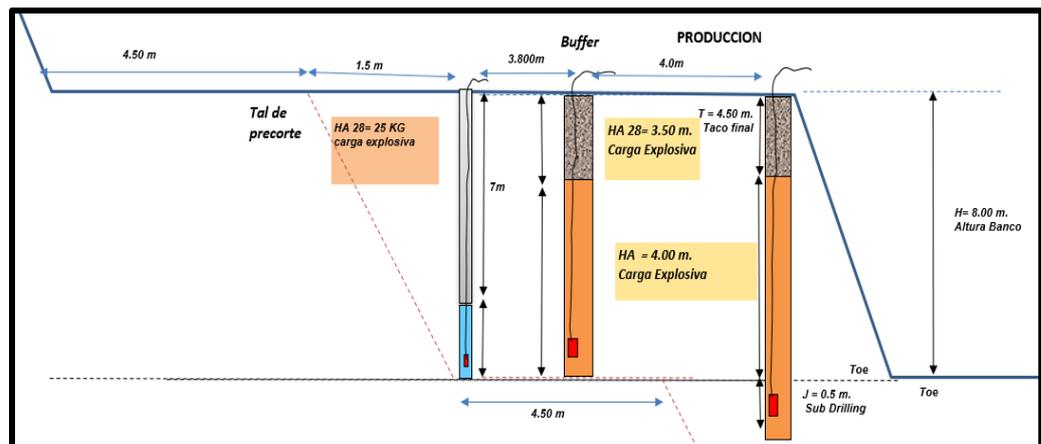


Figura 5 — Vista del esquema de la malla de perforacion, voladura y carguio de explosivos

Seguidamente, se muestra el resultado de una de las voladuras de las cuales podemos destacar la granulometría homogénea obtenida, así como el cuidado de las paredes del talud en el cual se han observado daños puntuales.





Figura 6 — Antes de la voladura en Unidad Minera Anama de la Compañía Minera Anabí S. A. C.



Figura 7 — Después de la voladura en Unidad Minera Anama de la Compañía Minera Anabí S. A. C.

Para determinar la curva granulométrica se ha empleado el modelo matemático Kuz – Ram, este modelo correlaciona las características de los explosivos, las características del macizo rocoso y los parámetros de diseño dentro de las ecuaciones con los resultados de fragmentación de rocas.

$$R = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^n} \quad \text{Ecuación 3.19}$$

La curva granulométrica obtenida según los parámetros empleado para una alteración sílice granular se muestra a continuación.

Dónde:

- R: Porcentaje en peso, de material pasante (dimensiones inferiores a X)
- e: Número irracional
- X_0 : Representa el tamaño característico de la roca.
- X: Tamaño de referencia o abertura de malla o tamiz.
- n: Índice de uniformidad (pendiente general de la curva)

$$n = \left[2.2 - 14 \frac{B}{D} \right] * \left[1 - \frac{W}{B} \right] * \left[1 + \frac{R-1}{2} \right]^{0.5} * \left[\frac{Lc}{H} \right] \quad \text{Ecuación 3.20}$$

Dónde:

- B: Burden (m)
- D: Diámetro de perforación (mm)
- W: Desviación estándar de la perforación (m)
- R: Relación espaciamiento/piedra (S/B)
- Lc: Longitud de carga explosiva (m)
- H: Altura de banco (m)

$$\langle X \rangle = A \left[\frac{V}{Q} \right]^{4/5} * Q^{1/6} * \left[\frac{PRP}{115} \right]^{-19/30} \quad \text{Ecuación 3.21}$$

Dónde:

- $\langle x \rangle$: Tamaño medio de partícula de roca después de la voladura. (cm)
- A: Factor de roca.
- V: Volumen de roca volada/taladro (m^3)
- Q: Carga explosiva dentro de un taladro (Kg)
- PRP: Potencia en peso relativo del explosivo: (ANFO = 100 %)

Parámetros Considerados:

- El diámetro de perforación empleado fue de 6 3/4 pulgadas.
- La altura de banco (H) es de 8 m y adicionando la sobre perforación se tiene una longitud (L) de 8,5 m.
- La geometría de voladura elegida fue de tipo triangular.
- De acuerdo con la geometría de la malla la relación espaciamiento y burden es de S/B = 1,15.
- Las desviaciones medias de 10 cm.



- La constante de roca ($A = 0.06(RMD+JPS+JPA+RDI+HF)$) resultando = 6,9
- Longitud de carga 4 m.

Con los parámetros descritos y las ecuaciones se ha obtenido la gráfica que se muestra a continuación:

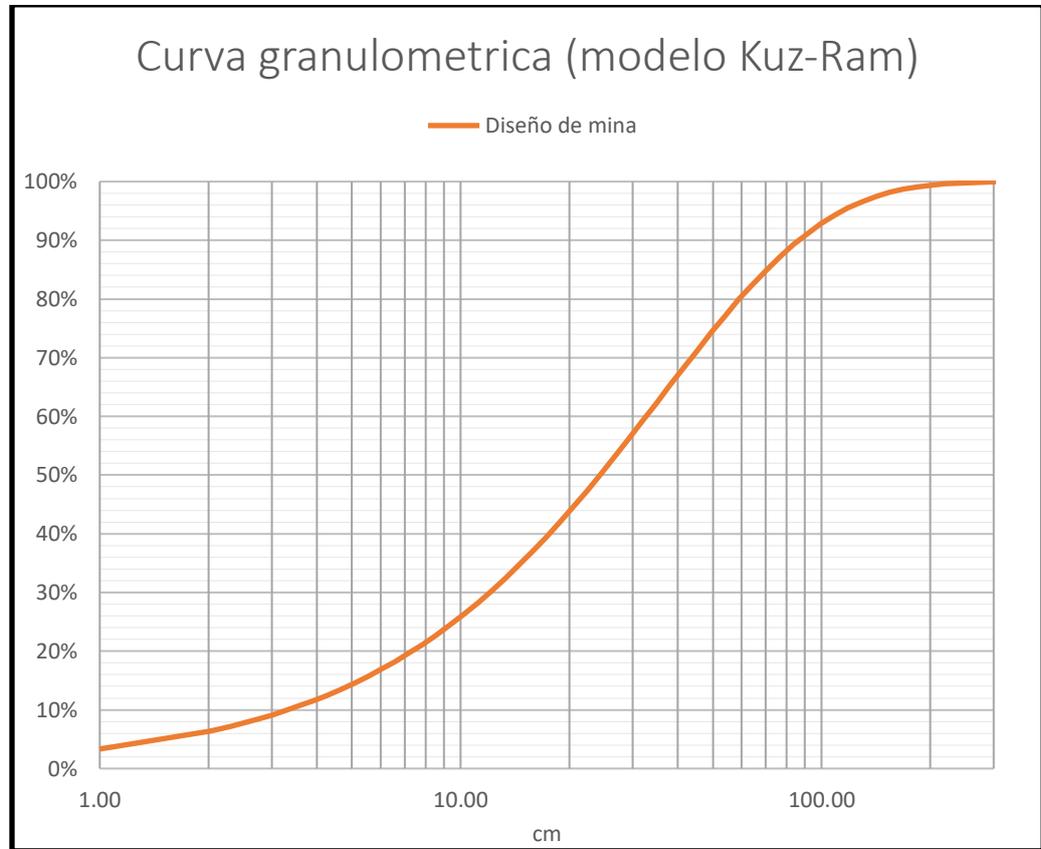


Figura 8 — Curva granulométrica modelo Kuz-Ram

5.1.3 Diseño de voladura propuesto

Después de las antecedentes de las operaciones detalladas, se busca mantener la granulometría así mismo reducir el costo de perforación y voladura por ello se realizó una iteración de parámetros principales como son el burden la longitud de carga, para una alteración de sílice granular el cual es predominante en la unidad minera, con el objetivo de mantener la curva granulométrica (X_{50}) al igual que en el caso antes de la optimización se muestran los resultados de la iteración.



Tabla 10 — Iteración de parámetros de voladura

Burden (m)	Longitud de carga (m)	X ₅₀ (m)
3,5	2,85	24,32
3,6	3,07	24,32
3,7	3,29	24,32
3,8	3,51	24,32
3,9	3,75	24,32
4	4,00	24,32
4,1	4,26	24,32
4,2	4,52	24,32
4,3	4,80	24,32
4,4	5,09	24,32
4,5	5,39	24,32
4,6	5,69	24,32
4,7	6,01	24,32
4,8	6,34	24,32
4,9	6,68	24,32
5	7,03	24,32
5,1	7,39	24,32
5,2	7,76	24,32
5,3	8,14	24,32
5,4	8,54	24,32
5,5	8,94	24,32

Además de ello, también se modelaron los costos de operación de perforación y voladura para justamente evaluar y alcanzar con nuestro objetivo de reducir costos. La Tabla siguiente especifica los costos unitarios utilizados para la evaluación, así como los resultados para cada caso.

Tabla 11 — Descripción de los costos de operación (insumos)

Descripción	UNID	P.U. US\$
NITRATO DE AMONIO	kg	0,62
EMULSION	kg	0,86
PETRÓLEO	gl	3,65
FANEL CTD 17 MS	pza	1,5
FANEL CTD 25 MS	pza	2,46
FANEL CTD 35 MS	pza	1,71
FANEL CTD 42 MS	pza	1,71
FANEL CTD 65 MS	pza	2,87
FANEL CTD 109 MS	pza	2,87
BOOSTER 1 Lb	und	3,74
CORDON DET. 5G	m	0,18
MECHA	m	0,14
FANEL DUAL 800/17 MS	und	5,24
FULMINANTE	und	0,13
LSEF 50 M/ROLLO	und	12,98
FUENTE: Fanel CTD, Fanel Conector Troncal Dual		

Tabla 12 — Costos unitarios por cada burden y longitud de carga

Burden (m)	Longitud de carga (m)	Costo P&V (\$/t)
3,5	2,85	0,57
3,6	3,07	0,55
3,7	3,29	0,53
3,8	3,51	0,52
3,9	3,75	0,50
4	4,00	0,49
4,1	4,26	0,48
4,2	4,52	0,47
4,3	4,80	0,46
4,4	5,09	0,45
4,5	5,39	0,45
4,6	5,69	0,44
4,7	6,01	0,43
4,8	6,34	0,43
4,9	6,68	0,42
5	7,03	0,41
5,1	7,39	0,41
5,2	7,76	0,41
5,3	8,14	0,40
5,4	8,54	0,39
5,5	8,94	0,40

El resultado muestra un claro descenso de los costos unitarios de perforación y voladura a medida que se va ampliando el Burden en esta ocasión cabe lugar a analizar la operatividad y asegurar los resultados proyectados, dentro de ello

considerando los modelos empíricos de para el taco de nuestro taladro es necesario determinar la longitud máxima que puede lograr cargar en cada taladro, en la figura 9 se muestra los parámetros antes evaluados junto con la longitud de carga máxima para el cual se determinó restando a la longitud del taladro la longitud de taco según la ecuación planteada anteriormente ($Taco = 0.7 * burden$).

La figura muestra una intercepción de un punto óptimo donde llega a su carga máxima, junto a ello reducir los costos unitarios de perforación y voladura además de mantener la granulometría, este valor se encuentra entre 4,5 m a 4,7 m lo que valida nuestros resultados obtenidos previamente con modelos matemáticos empíricos. Es así que planteamos nuestro diseño de malla de perforación y voladura, la que puede observar en una vista en perfil en la figura N°9.

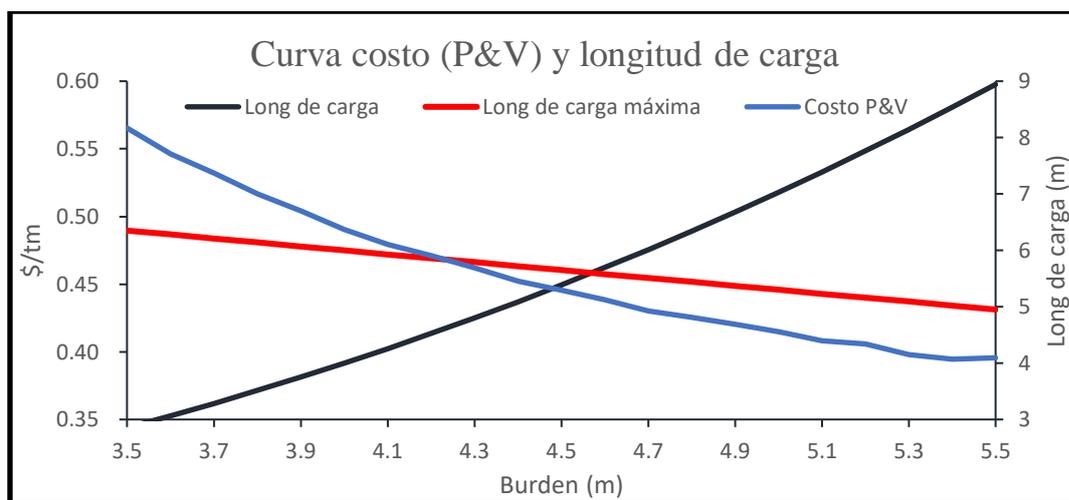


Figura 9 — Curva de costo (P&V) y la longitud de carga.

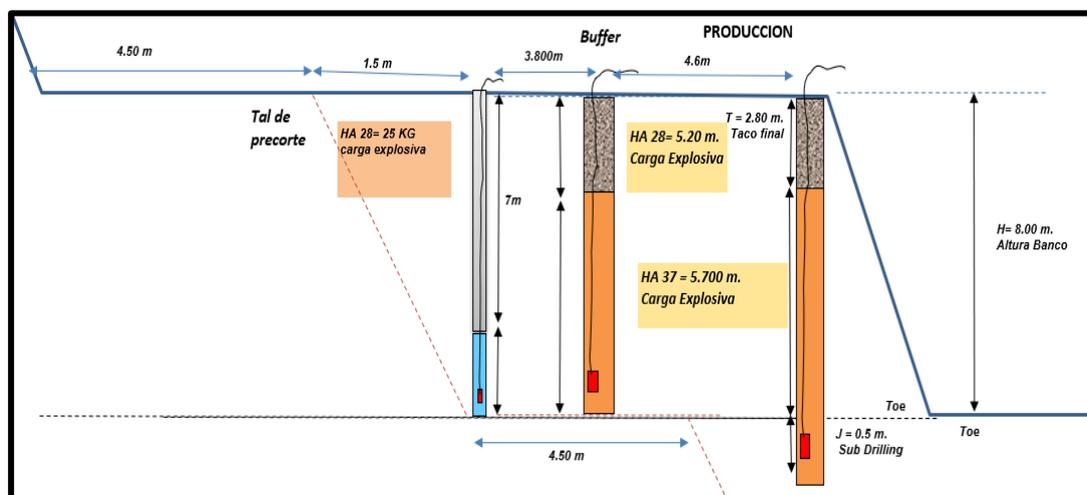
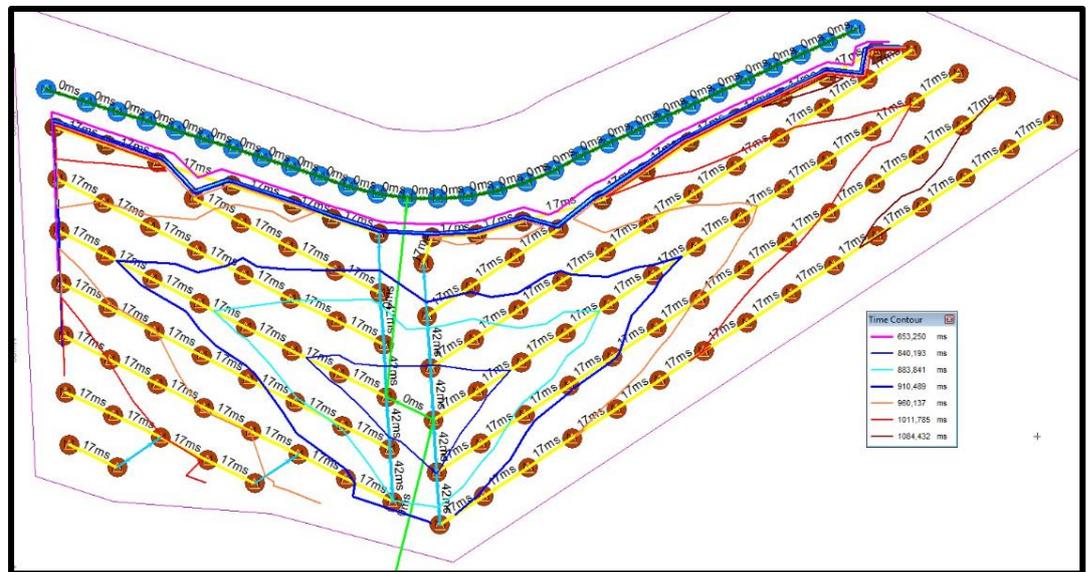


Figura 10 — Vista del esquema de carguio de explosivos optimizada

5.2 Resultados

5.2.1 Comparación

Para una comparación adecuada se diseñará dos mallas de perforación con parámetros de mina y otra con parámetros propuesto a fin de optimizar los costos de perforación y voladura, para un área de trabajo con alteración de sílice granular, los resultados de los diseños se muestran en la figura 11:



FUENTE: Software, JK SIMBLAST

Figura 11 — Líneas de ISO tiempo diseño mina

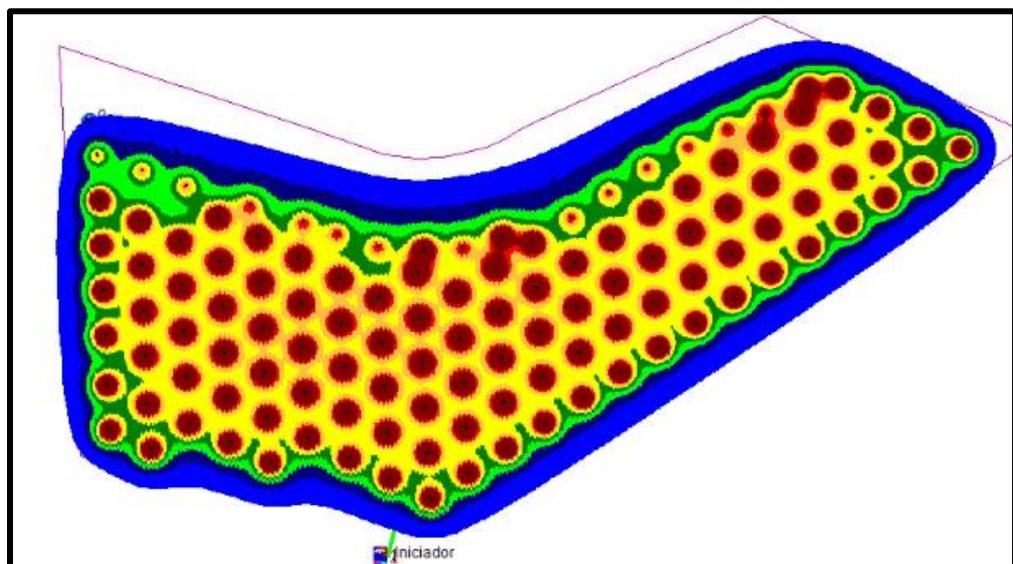


Figura 12 — Halos de energía diseño mina

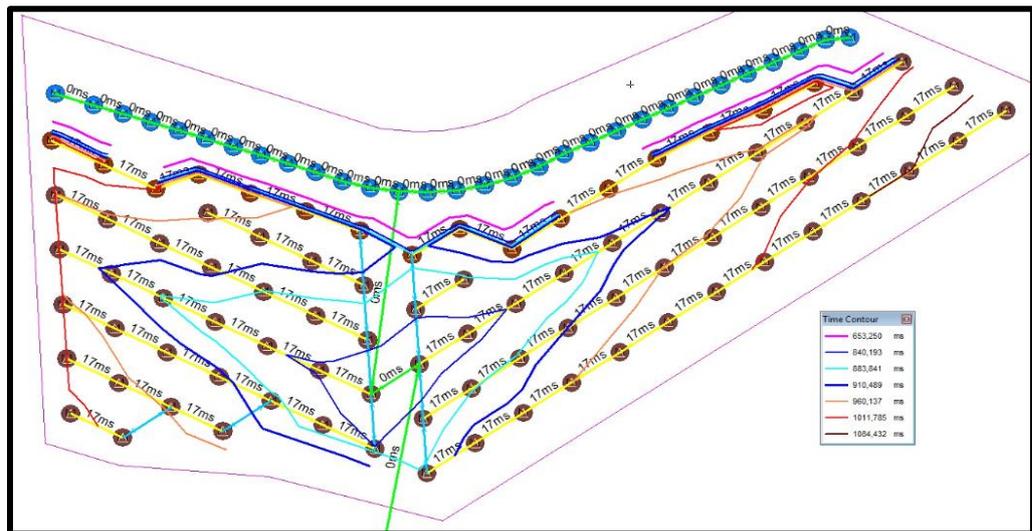


Figura 13 — Líneas de ISO tiempo diseño optimizado.

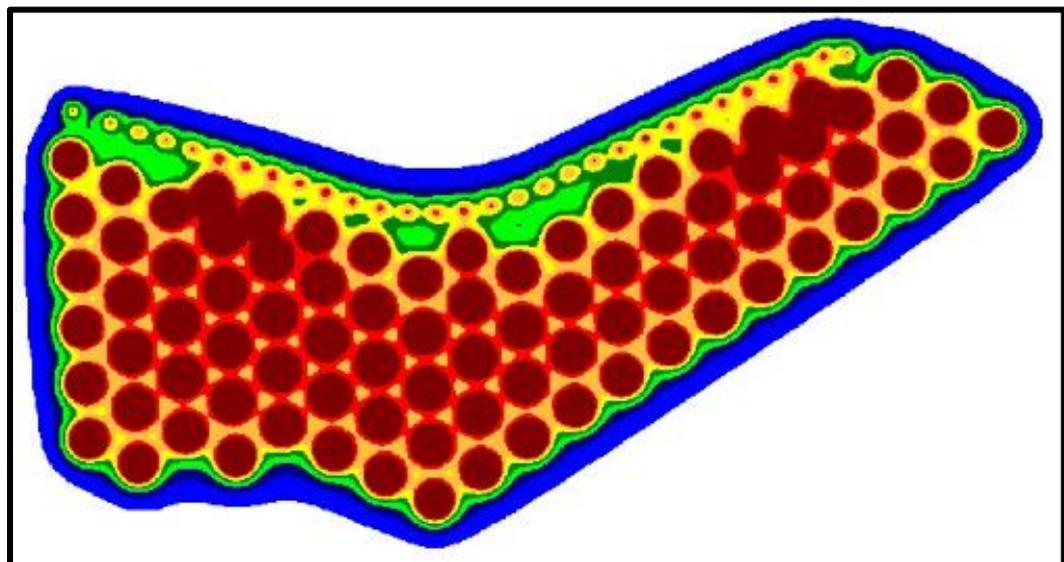


Figura 14 — Líneas de ISO tiempo diseño optimizado

A continuación, se presentan los resultados y los parámetros clave de cada diseño, primero, el diseño sin optimizar y luego el diseño optimizado:

Diseño Sin Optimizar:

- Número de Taladros: 149
- Longitud a Perforar: 1250 metros
- Mezcla Explosiva: HA 28
- Densidad del explosivo: 0.94 g/cc
- Kilogramos de Explosivo Necesarios: 11,656 kg HA 28
- Burden: 4 metros
- Espaciamiento: 4,6 metros

- Carga de Taladro: 4 metros
- Longitud de taladro de producción cargado: 5,2 metros

Diseño optimizado:

- Número de Taladros: 115
- Longitud Perforada: 954,5 metros
- Mezcla Explosiva: HA 37
- Densidad del explosivo: 1.03 g/cc
- Kilogramos de Explosivo: 11,919 kg HA 37
- Burden: 4,6 metros
- Espaciamiento: 5,3 metros
- Longitud de taladro de producción cargado: 5,7 metros

Comparando ambos diseños, se observa que el diseño optimizado logra una disminución en la cantidad de taladros necesarios, pasando de 149 a 115, lo que implica una optimización de la distribución de los taladros. Además, la longitud perforada disminuye de 1250 metros a 954,5 metros, lo que propone un uso más eficiente de los recursos. A pesar de una diferencia menor en la cantidad de explosivo utilizada (11,919 kg en el diseño optimizado frente a 11,656 kg en el diseño sin optimizar), los beneficios en términos de ahorro de costos y eficiencia son evidentes.

Tabla 13 — Costos total

Descripción	unid	P.U. US\$	Cantidad	Total US\$
Nitrato	kg	0,62	7669,65	4755,18
Emulsión	kg	0,86	3496,80	3007,25
Petróleo	gl	3,65	166,04	606,05
Fanel ctd 17 ms	pza	1,5	0,00	0,00
Fanel ctd 25 ms	pza	2,46	0,00	0,00
Fanel ctd 35 ms	pza	1,71	1,71	1,71
Fanel ctd 42 ms	pza	1,71	15,00	25,65
Fanel ctd 65 ms	pza	2,87	0,00	0,00
Fanel ctd 109 ms	pza	2,87	0,00	0,00
Booster 1 lb	und	3,74	149,00	557,26
Cordon det. 5g	m	0,18	5	0,90
Mecha	m	0,14	2	0,28
Fanel dual 800/17 ms	und	5,24	149,00	780,76
Fulminante	und	0,13	0,00	0,00
Lsef 50 m/rollo	und	12,98	0,00	0,00
Perforación:	m	10,00	1250,00	12500,00
Total				22235,00
Costo por tonelada	(\$/t)			0,47
Factor de potencia	(kg/t)			0,24

Tabla 14 — Costos total del diseño optimizado

Descripción	UNID	P.U. US\$	Cantidad	Total US\$
NITRATO	kg	0,62	7842,71	4862,48
EMULSIÓN	kg	0,86	3575,69	3075,10
PETRÓLEO	gl	3,65	169,78	619,72
FANEL CTD 17 MS	pza	1,5	0,00	0,00
FANEL CTD 25 MS	pza	2,46	0,00	0,00
FANEL CTD 35 MS	pza	1,71	1,00	1,71
FANEL CTD 42 MS	pza	1,71	15,00	25,65
FANEL CTD 65 MS	pza	2,87	0,00	0,00
FANEL CTD 109 MS	pza	2,87	0,00	0,00
BOOSTER 1 Lb	und	3,74	115,00	430,10
CORDON DET. 5G	m	0,18	5,00	0,90
MECHA	m	0,14	2,00	0,28
FANEL DUAL 800/17 MS	und	5,24	115,00	602,60
FULMINANTE	und	0,13	0,00	0,00
LSEF 50 M/ROLLO	und	12,98	0,00	0,00
Perforación:	m	10	954,5	9545,00
Total				19,164
Costo por tonelada	(\$/t)			0,40
Factor de potencia	(kg/t)			0,25

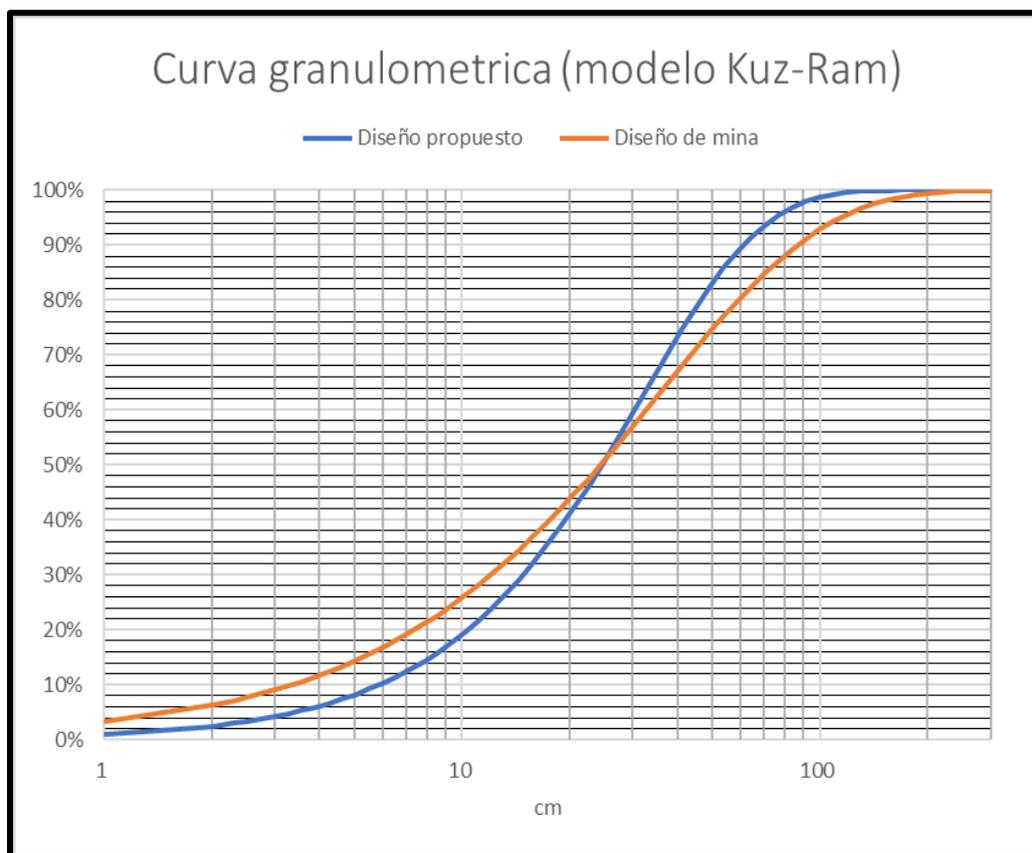


Figura 15 — Curva granulométrica modelo Kuz-Ram

También para corroborar la granulometría se graficó la curva de granulometría de ambos diseños en el cual se muestra una ligera mejora del diseño optimizado debido a que la longitud de carga ayuda a que el factor n incremente el cual controla la pendiente de la curva.

5.3 Discusión

El resultado del nuevo diseño de malla de perforación fue la reducción del número de taladros que pasaron de 149 a 115, lo que demuestra una mejor distribución de los taladros; además la longitud perforada se vio disminuía de 1250 a 954,5 metros, lo cual permite un uso más eficiente de los recursos.

El nuevo diseño de carga explosiva y accesorios de voladura permitió a pesar incrementar el uso de explosivo en 11919 kg de 11,656 g permite reducir costos al ocasionar un ahorro de costos debido a su eficiencia en el uso de recursos en la U.E.A. Valeria-Unidad Minera Anama-Compañía Minera Anabí S.A.C.

Desde una perspectiva financiera y de gestión, los datos indican una disminución en los costos totales en el diseño optimizado en comparación con el diseño de malla de perforación basado en parámetros de mina. El costo por tonelada se reduce de \$0.47 a

\$0.40, lo que refleja un ahorro sustancial en los procesos de perforación y voladura. En términos de ahorro total, la diferencia entre ambos diseños es de $\$22,235 - \$19,164 = \$3,071$. Este ahorro económico sustancial respalda el diseño optimizado.



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- El diseño optimizado de la malla de perforación y voladura, que incluye un número reducido de taladros, un espaciamiento ampliado de 5,3 m, burden de 4,6 m y una longitud de carga optimizada de 5,7 m, ha demostrado ser altamente efectivo en la reducción de gastos operativos y en la eficiencia de la fragmentación de la roca.
- El diseño optimizado de la malla de perforación y voladura, que incluye un número reducido de taladros (34 taladros menos) logra mejorar el proceso de perforación ya que se logra una longitud perforada de 1250 metros a 954,5 metros.
- La implementación del diseño optimizado ha resultado en ahorros sustanciales en comparación con el diseño sin optimizar, se ha logrado un ahorro total de \$3071 en costos operativos, ya que el costo por tonelada se redujo de \$0.47 a \$0.40 y origina un ahorro mostrando la eficacia del nuevo diseño propuesto y su capacidad para disminuir los gastos en la operación minera.
- La reducción de costos unitarios que genera el nuevo diseño de perforación y voladura se ve presente en el costo reducido de la perforación, el cual paso 22235 \$ a 9545 \$, lo cual se ve reflejado en termino de ahorro total de 22235 \$ a 19164\$ por costo de la perforación y voladura.

6.2 Recomendaciones

Basadas en los resultados y las conclusiones de esta investigación, se presentan las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda aplicar el mismo proceso de análisis y optimización de mallas de perforación y voladura en otras áreas de la unidad minera que presenten condiciones geológicas y geotécnicas similares a las evaluadas en este estudio. La experiencia y el éxito del diseño optimizado pueden replicarse para lograr ahorros de costos adicionales en la operación minera.
- La implementación de los diseños propuestos, tanto en áreas con alteraciones similares como en las áreas específicas que han sido optimizadas, debe llevarse a cabo de manera planificada y cuidadosa. Esto incluye la formación y capacitación



adecuadas del personal, así como la comunicación efectiva de los cambios al total de las partes interesadas.

- Es fundamental documentar y sistematizar el proceso de diseño y maximizar la eficiencia de mallas de voladura y perforación. Esto facilitará la replicación de éxitos en el futuro y permitirá una administrar mejor los recursos. La revisión y mejora continua del proceso son esenciales.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIAGA LOAYZA, A. (2022). *Diseño de mallas de perforación y voladura en base a la energía explosiva del anfo pesado para optimizar la fragmentación de rocas en la Unidad Minera Arasi*. Piura.

ANABIS S.A.C. (2011). Ubicación del Proyecto Anama.

APARICIO, A. (2009). *Análisis del proceso de perforación*. Lima: UPC. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/8568/01.pdf?sequence=2&isAllowed=y#:~:text=En%20suma%2C%20la%20fuerza%20de,seg%C3%BAAn%20el%20tipo%20de%20terreno.>

BACA, & HINOSTROZA. (2021). *Diseño de la malla de perforación y voladura para el control y estabilidad del macizo rocoso en la Unidad Minera San Cristóbal*. Huancayo: U. C. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10099/1/IV_FIN_110_TE_Baca_Hinostroza_2021.pdf

BENAVENTE, D., BERNABÉU, A. M., & CAÑEVERAS, J. C. (2004). *Estudio de propiedades físicas de las rocas*.

BERNAOLA ALONSO, J., CASTILLA GÓMEZ, J., & HERRERA HERBERT, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Madrid.

BRANLY, M., & RAMOS, A. (2021). Optimización de la extracción de mineral con winche de izaje, para incrementar la producción en la mina Challhuamayo de la corporación minera Santa Teresa E.I.R.L. *Universidad Nacional de Moquegua*.

CABALLERO, A. (1987). Metodología de la investigación científica .

Cahuapaza. (2022). *Optimización de costos en perforación y voladura mediante la aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco en la unidad minera Apumayo S.A.C.*”. Puno: Universidad Nacional del Altiplano. Obtenido de http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/18092/Cahuapaza_Saavedra_William.pdf?sequence=1&isAllowed=y

CAMARENA, A. (2019). *Optimización de los rendimientos de perforación a partir del modelo geotécnico con fines de minimizar costos de perforación en la Compañía Minera Antamina*. Huancayo: UNCP. Obtenido de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4966/T010_70261801_T.pdf?s



equence=1&isAllowed=yhttps://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4966/T010_70261801_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

CARDENAS HUAMANI, Y. E. (2019). *Proyecto de desarrollo del crucero 2050 para interceptar la Veta Paola e incrementar las reservas en Minera Yanaquihua Unidad Alpacay*. Arequipa.

CARDENAS HUAMANI, Y. E. (2019). *Proyecto de desarrollo del crucero 2050 para interceptar la Veta Paola e incrementar las reservas en Minera Yanaquihua Unidad Alpacay*. Arequipa.

CARLOS LÓPEZ , J., & LÓPEZ JIMENO, P. G. (2003). *Manual De Perforación Y Voladura De Rocas*. Madrid.

chamberg, G. (2013). *Estructura de costos en las operaciones de la empresa minera*. Obtenido de http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/18092/Cahuapaza_Saavedra_William.pdf?sequence=1&isAllowed=y

CHAMBERGO, G. (2013). *Estructura de Costos en Las Operaciones de La Empresa Minera*.

CORREA, & MARTINEZ. (2017). *Diseño del sistema de perforación y voladura en los bancos d, e y f en la mina de caliza el tesoro, contrato de concesión ili-16111 ubicada en la vereda las caleras del municipio de nobsa-boyacá*. Obtenido de <https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/2242/1/TGT-782.pdf>

CUCHIGAY, MOJICA, & CASTILLO. (2022). *Parámetros que inciden en la elección y análisis de un*. Obtenido de http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/facultades/f_sogamoso/pregrado/minas/documentos/PARxMETROS_QUE_INCIDEN_EN_LA_ELECCIxN_Y_ANxLISIS_DE_UN_MxTOD_O_DE_EXPLOTACIxN.pdf

DELGADO, P. (2014). *Estrategias en el diseño de perforación y voladura para estructuras aledañas controlando vibraciones y rocas al aire en Minas a Tajo Abierto*.

EADIC. (2020). *Clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos*. Obtenido de <https://eadic.com/blog/entrada/clasificaciones-geomecanicas-de-macizos-rocosos/>

EADIC. (2024). *Clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos 2015 - 2024*. <https://eadic.com/blog/entrada/clasificaciones-geomecanicas-de-macizos-rocosos/>. <https://eadic.com/blog/entrada/clasificaciones-geomecanicas-de-macizos-rocosos/>.



FERNÁNDEZ TIRADO, J. Á. (2016). *Optimización de avance lineal, reemplazando las perforadoras jackleg por jumbo hidráulico en el proceso de perforación y voladura de la gnl y crne en mina consuelo de la empresa especializada new horus s.a.c - poderosa*. Trujillo.

FERRER, & GONZALEZ. (1999). *Manual de campo para la descripción y*. Obtenido de [https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/62365/2007Caracterizaci%C3%B3nMacizosRocosos.pdf?sequence=1#:~:text=4\)%20Propiedades%20mec%C3%A1nicas%3A%20Resistencia%20y,Young%2C%20coeficiente%20de%20Poisson](https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/62365/2007Caracterizaci%C3%B3nMacizosRocosos.pdf?sequence=1#:~:text=4)%20Propiedades%20mec%C3%A1nicas%3A%20Resistencia%20y,Young%2C%20coeficiente%20de%20Poisson).

FIGUEROA, J. (2017). *Diseño de perforación y voladura aplicando la teoría de Richard Ash, para la mejora de la fragmentación en la compañía minera Antamina S.A. - 2017*. Huaraz: UNASAM. Obtenido de <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2890>

Gestión de Operaciones y Proyectos Mineros, G. (s.f.). Estructura de costos en las operaciones mineras. <http://max-schwarz.blogspot.com/2012/10/estructura-de-costos-en-las-operaciones.html#:~:text=Estos%20costos%20incluyen%20las%20perforaciones,%20pe rmisos%2C>.

GRATZ, SALAZAR, & RODRIGUEZ. (2018). Análisis de los factores que determinan el diseño de mallas metálicas para la estabilización de taludes en macizos rocosos. *Obras y proyectos*, 25-38. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-28132018000100025

GUAMAN, M. (2018). : optimización de los procesos de perforación y voladura en el tunel fase a-b de interconexión del proyecto sopladora. Macas. *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Extensión-Morona Santiago Facultad de Recursos Naturales* .

HUILLCA MOINA , Y. (2019). *Incremento de producción en tajos con el método corte y relleno ascendente aplicando equipos de rastrillaje y mejora de los avances con palas neumáticas en labores de desarrollo de la mina agromin la bonita – bella unión – arequipa – 2017*. Abancay.

KPI. (2024). ¿Cómo medir la Productividad en Perforación? *PERFORADOR*. <https://perforador20.wordpress.com/2018/07/07/kpi-como-medir-la-productividad-en-perforacion/>.

LEÓN, R. (2018). *Proyectos de mejora y reducción de costos en una mina superficial de cobre*. Lima: PUCP. Obtenido de https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/13147/LEON_RAUL_MEJORA_COSTOS_MINA_COBRE.pdf?sequence=1&isAllowed=y



MEJIA, K. (2019). Optimización del proceso de Perforación y Voladura subterránea para la Sociedad Minera Oro Sol Uno. Cuenca. *Universidad del Azuay Facultad de Ciencia y Tecnología Escuela de Ingeniería en Minas*.

PEREZ, GARCIA, VEGA, MONTOYA, NORIEGA, ALFONSO, & CAJICÁ. (2018). Estudio comparativo entre sistemas de clasificación geomecánica en un depósito tipo Pórfido. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 43, 34-44. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/1695/169555640004/html/>

PERFORADOR. (2018). *1.-Tasa de Penetración en Modo Rotacional (Rotary ROP): Es la relación entre la distancia total perforada y el tiempo total empleado, ambos en modo rotacional*. Obtenido de <https://perforador20.wordpress.com/2018/07/07/kpi-como-medir-la-productividad-en-perforacion/>

QUINA VALENCIA, E. L. (2021). *Diseño de mallas de perforación y voladura en base a la energía explosiva del anfo pesado para optimizar la fragmentación de rocas en la Unidad Minera Arasi*. Arequipa.

RAMÍREZ. (2014). *Guía de análisis forense post-explosión para explosivos de baja potencia*.

RAMÍREZ, P., & ALEJANO, L. R. (2004). *Mecánica de rocas : fundamentos e ingeniería de taludes*.

RAMOS AVILA, M. B. (2021). *Optimización de la extracción de mineral con winche de izaje, para incrementar la producción en la mina Challhuamayo de la corporación minera Santa Teresa E.I.R.L. - Ituata*. Moquegua.

REYES FERNÁNDEZ, Y. (2015). *Clasificación de costos*.

Rocha, Laredo, & Cebrián. (2017). *Modelización y optimización en el diseño de voladuras en abanico*. Obtenido de <https://www.interempresas.net/Mineria/Articulos/181113-Modelizacion-y-optimizacion-en-el-diseno-de-voladuras-en-abanico.html>

SCHWARZ, M. (2012). *Estructura de costos en las operaciones mineras*. Obtenido de <http://max-schwarz.blogspot.com/2012/10/estructura-de-costos-en-las-operaciones.html#:~:text=Estos%20costos%20incluyen%20las%20perforaciones,%2C%20permisos%2C%20comunicaciones%2C%20campamento%2C>

SUÁREZ, B. (2015). *Guía de análisis forense post-explosión para explosivos de baja potencia*. Universidad Autónoma de México. México D.F.



SUASNABAR ORTEGA, P. J. (2019). *Análisis técnico para la optimización del sostenimiento en los frentes de la compañía Minera Casapalca S.A. Cerro de Pasco.*

VALENCIA, L. (2021). Diseño de mallas de perforación y voladura en base a la energía explosiva del anfo pesado para optimizar la fragmentación de rocas en la Unidad Minera Arasi. *. Universidad Continental,.*

VIVAR, M. (2021). Análisis de precios unitarios como técnica de estimación en proyectos de construcción. Obtenido de <https://www.interpro.ec/analisis-de-precios-unitarios/>

ZEBALLOS, L. (2022). Alternativa de mejora de la malla de perforación y voladura, para reducir los costos de producción en La Empresa Minera Volcán – Unidad San Cristóbal. *. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión,.*



ANEXOS



Anexo 1.

Tabla 15 — Matriz de consistencia

Problema General	Objetivo General	Hipótesis general	Variables	Metodología	Técnicas de recolección
¿Cómo influye el nuevo diseño de malla de perforación y voladura en la reducción de costos en la U.E.A. Valeria-Unidad Minera Anama-Compañía Minera Anabí S.A.C.?	Realizar un nuevo diseño de malla de perforación y voladura para reducir costos en la U.E.A. Valeria-Unidad Minera Anama-Compañía Minera Anabí S.A.C.	El nuevo diseño de malla de perforación y voladura reduce los costos en la U.E.A. Valeria-Unidad Minera Anama-Compañía Minera Anabí S.A.C.			Técnicas
			Variable independiente	Tipo de investigación	-Observación
			Nuevo diseño de malla de perforación y voladura		-Análisis Documental
				El tipo de investigación tipo es descriptivo – aplicativo.	
Problema Específicos	Objetivo Específicos	Hipótesis Específicos			Instrumentos
¿Cuál es el nuevo diseño de malla de perforación que permite reducir los costos en la U.E.A. Valeria - Unidad Minera Anama - Compañía Minera Anabí S.A.C.?	Determinar un nuevo diseño de malla de perforación que permita reducir los costos en la U.E.A. Valeria - Unidad Minera Anama - Compañía Minera Anabí S.A.C.	Nuevo diseño de malla de perforación permite reducir los costos en la U.E.A. Valeria - Unidad Minera Anama - Compañía Minera Anabí S.A.C.	Variable dependiente	Nivel de investigación	Guía de observación.
			Reducción de costos		
¿Cuál es el nuevo diseño de carga explosiva y el uso de accesorios de voladura que permiten reducir los costos en la U.E.A. Valeria-Unidad Minera Anama-Compañía Minera Anabí S.A.C.?	Determinar el nuevo diseño de carga explosiva y accesorios de voladura que permiten reducir los costos en la U.E.A. Valeria-Unidad Minera Anama-Compañía Minera Anabí S.A.C.	Nuevo diseño de carga explosiva y accesorios de voladura permiten reducir los costos en la U.E.A. Valeria-Unidad Minera Anama-Compañía Minera Anabí S.A.C.		El nivel de la investigación aplicativo. Diseño de investigación Aplicativo.	Guía de análisis documental.
¿Cuál es el costo unitario que genera el nuevo diseño de malla de perforación y voladura en la U.E.A. Valeria-Unidad Minera Anama-Compañía Minera Anabí S.A.C.?	Determinar el costo unitario que genera el nuevo diseño de malla de perforación y voladura	Nuevo diseño de malla de perforación y voladura reduce el costo unitario en la U.E.A. Valeria-Unidad Minera Anama-Compañía Minera Anabí S.A.C.			



Anexo 2.

Tabla 16 — Iteraciones de burden y longitud descarga

Carga	Burden											
	0.45	3.50	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00	5.25	5.50	5.75	6.00
3.50		0.395	0.441	0.489	0.539	0.590	0.644	0.699	0.756	0.814	0.874	0.936
3.75		0.378	0.422	0.468	0.516	0.566	0.616	0.669	0.723	0.779	0.837	0.896
4.00		0.363	0.405	0.449	0.495	0.543	0.592	0.642	0.694	0.748	0.803	0.860
4.25		0.349	0.390	0.432	0.476	0.522	0.569	0.618	0.668	0.720	0.773	0.827
4.50		0.337	0.376	0.417	0.460	0.504	0.549	0.596	0.644	0.694	0.745	0.798
4.75		0.325	0.363	0.403	0.444	0.487	0.531	0.576	0.623	0.671	0.720	0.771
5.00		0.315	0.352	0.390	0.430	0.471	0.514	0.558	0.603	0.649	0.697	0.746
5.25		0.305	0.341	0.378	0.417	0.457	0.498	0.541	0.584	0.630	0.676	0.724
5.50		0.297	0.331	0.367	0.405	0.443	0.484	0.525	0.567	0.611	0.656	0.703
5.75		0.288	0.322	0.357	0.393	0.431	0.470	0.510	0.552	0.594	0.638	0.683
6.00		0.281	0.313	0.348	0.383	0.420	0.458	0.497	0.537	0.579	0.621	0.665
6.25		0.274	0.305	0.339	0.373	0.409	0.446	0.484	0.523	0.564	0.605	0.648
6.50		0.267	0.298	0.330	0.364	0.399	0.435	0.472	0.511	0.550	0.591	0.632



Anexo 3.

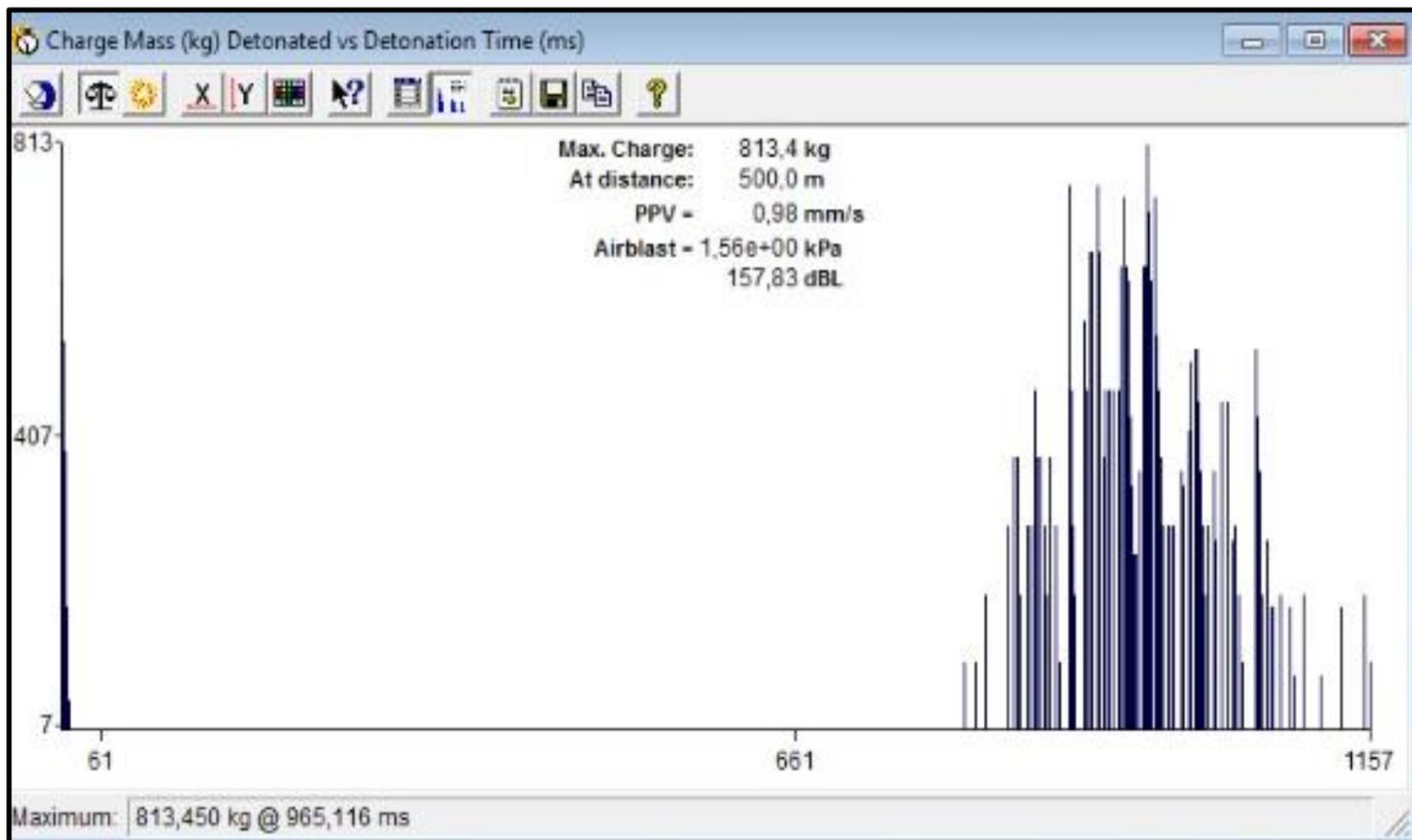


Figura 16 — Carga operante y velocidad pico partícula a 500 m del diseño sin optimización

Anexo 4.

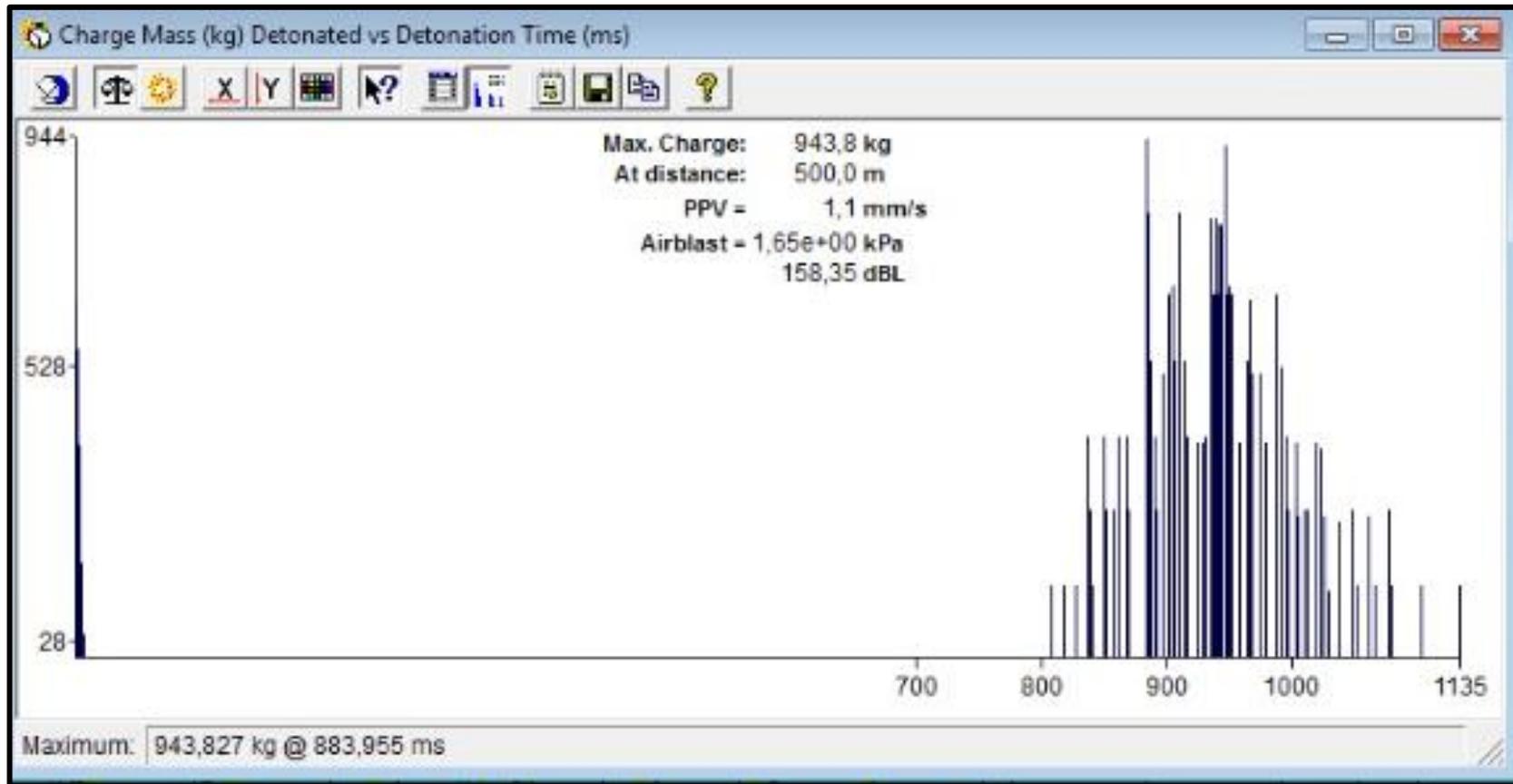


Figura 17 — Carga operante y velocidad pico partícula a 500 m del diseño optimizado

Anexo 5.

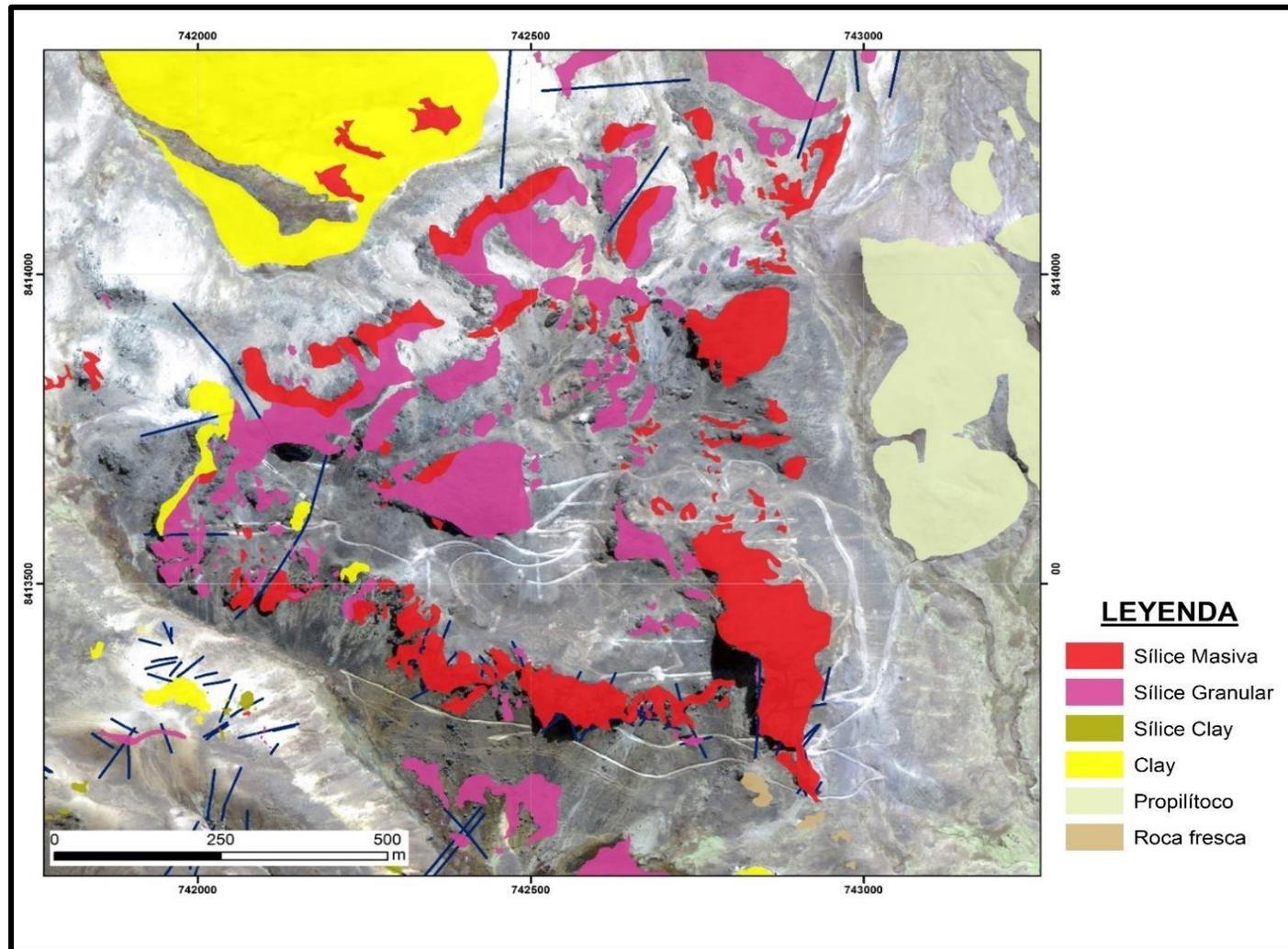


Figura 18 — Alteraciones del tajo anama

Anexo 6.

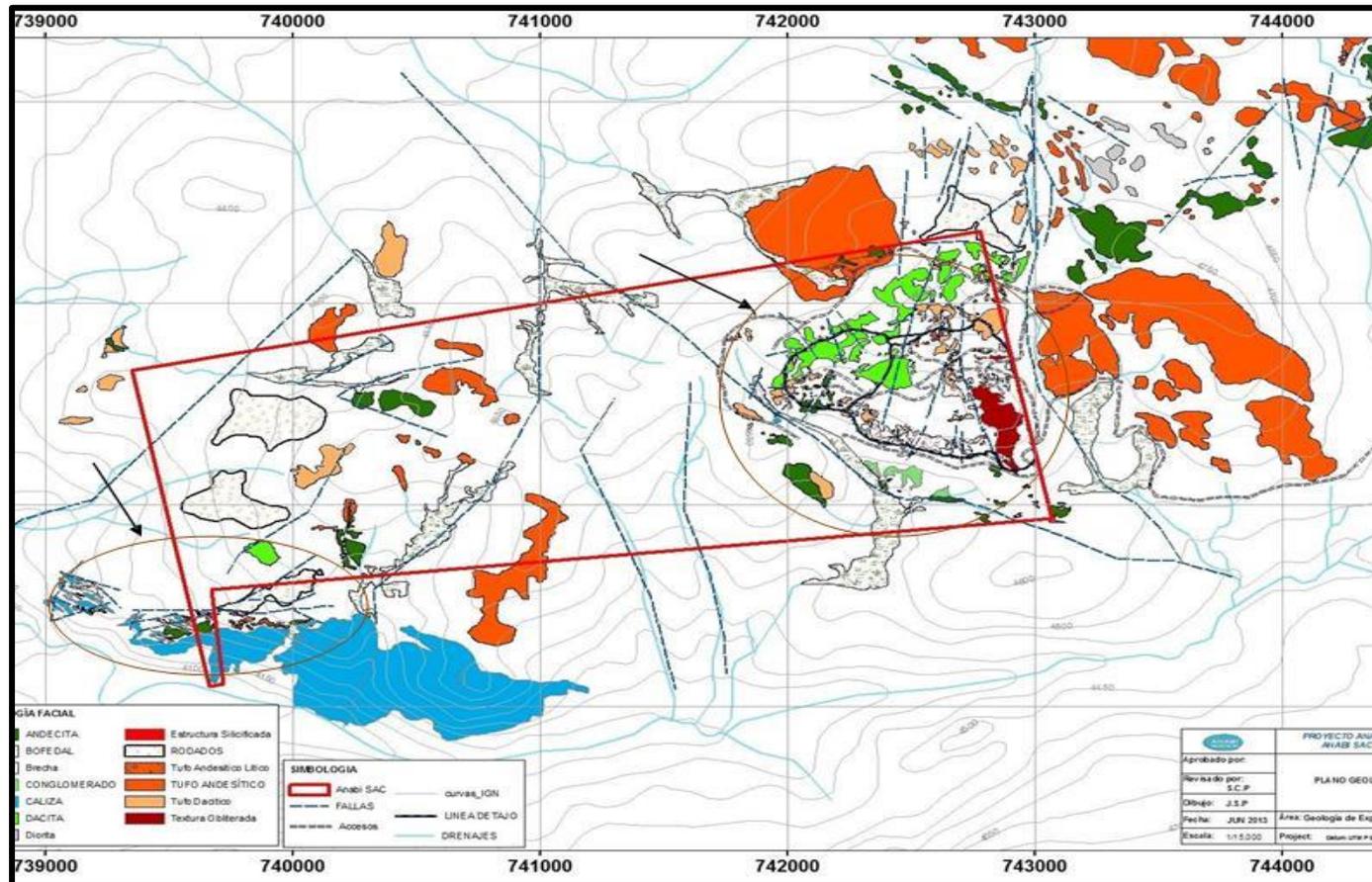


Figura 19 — Plano geológico de anama

Anexo 7.

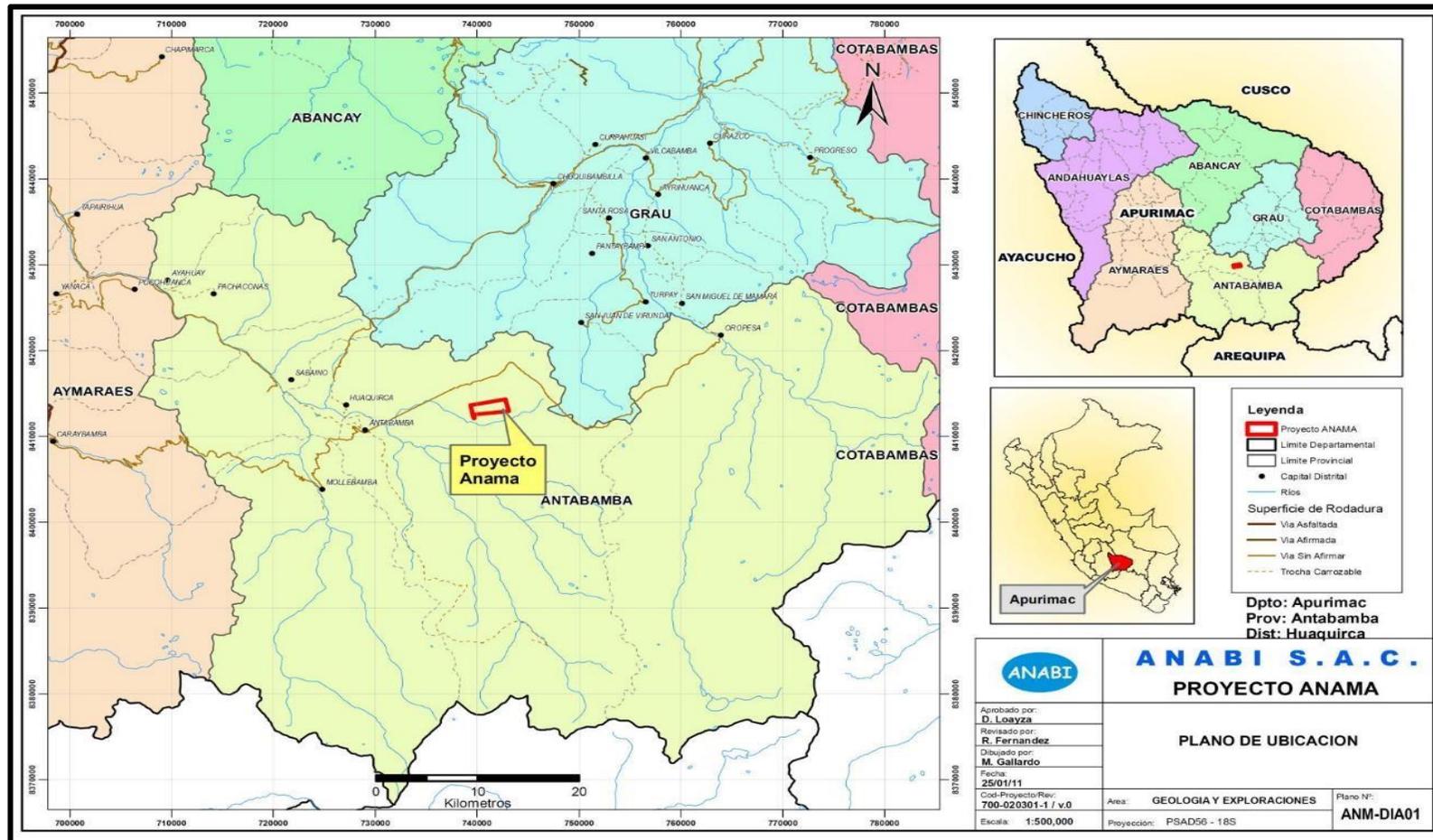


Figura 20 — Plano de ubicación de U.E.A. VALERIA



Anexo 8.

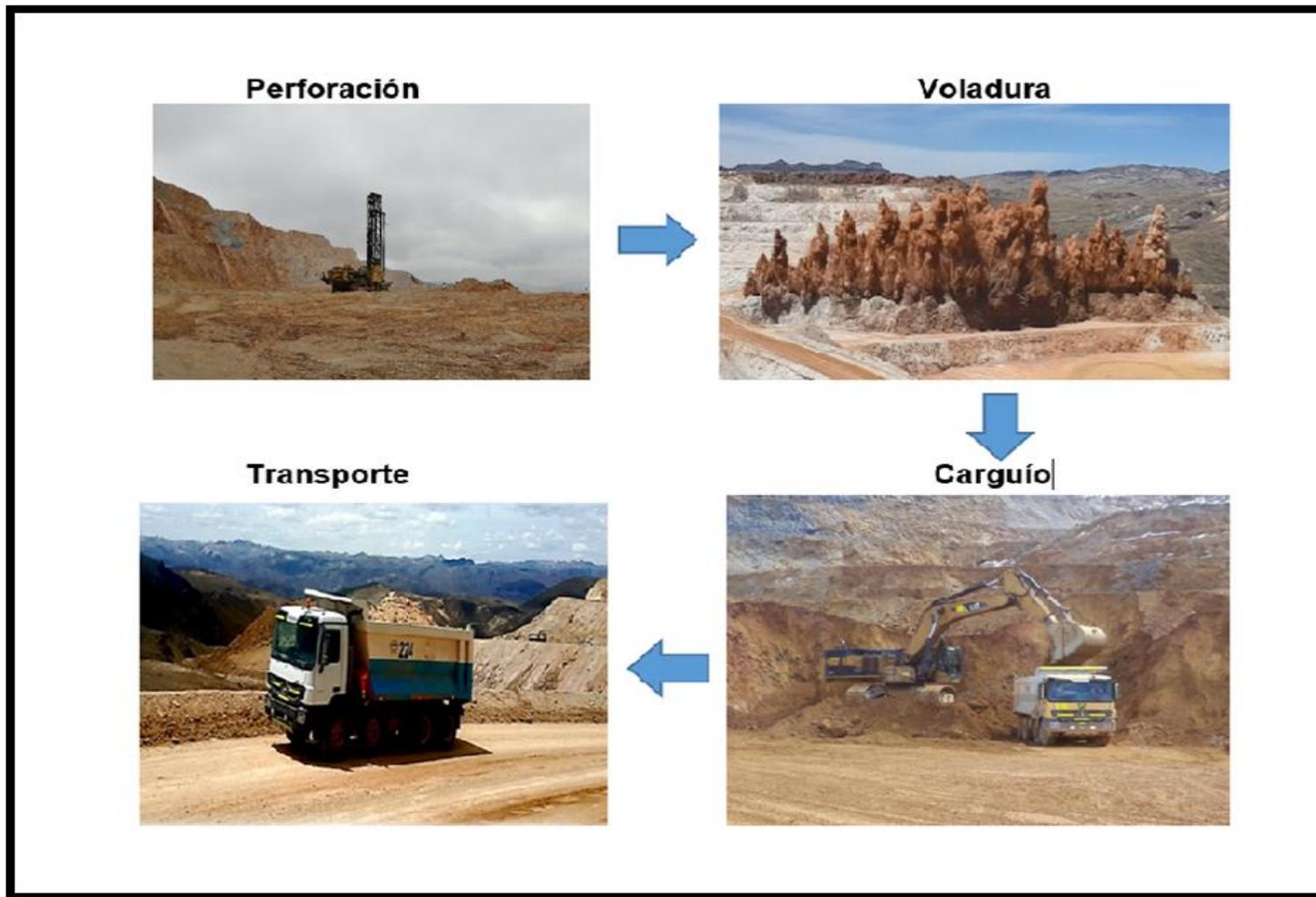


Figura 21 — Ciclo de minado tajo anama