



Universidad Nacional
SAN LUIS GONZAGA



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Esta licencia es la más restrictiva de las seis licencias principales Creative Commons, permitiendo a otras solo descargar sus obras y compartirlas con otras siempre y cuando den crédito, pero no pueden cambiarlas de forma alguna ni usarlas de forma comercial.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>



CONSTANCIA

N° 129-DI-FIMM-2025

El que suscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud de **TESIS** cuyo título es:

**“PROPUESTA DE MINADO POR TALADROS LARGOS EN LA
MEJORA DE EXPLOTACIÓN DEL PROYECTO VETA MARY –
CIA MINERA BUENAVENTURA S.A.A. 2022”**

Presentado por:

MAGALLANES MESIAS LUIS ABEL

Que, se ha recibido del operador del programa informático evaluador de originalidad de la **Escuela Profesional de Ingeniería de Minas**, de la Facultad de Ingeniería de Minas y Metalurgia, de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga, el informe automatizado de originalidad, el mismo que concluye de la siguiente manera:

El documento de investigación APRUEBA los criterios de originalidad con un porcentaje de similitud de 18%.

Para dar fe, se adjunta al presente el reporte de similitud de las bases de datos de iThenticate. **En Ica 23 de diciembre de 2025.**

Atentamente,

.....
DR. VICTOR MANUEL FLORES MARCHAN
DIRECTOR DE INVESTIGACION DE LA FIMM

UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUIS GONZAGA”
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS Y METALURGIA



PROPUESTA DE MINADO POR TALADROS LARGOS
EN LA MEJORA DE EXPLOTACIÓN DEL PROYECTO
VETA MARY – CIA MINERA BUENAVENTURA S.A.A.

2022

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Desarrollo en ciencias puras, ciencias de la tierra e ingeniería de procesos

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO DE MINAS

PRESENTADO POR

BACH. LUIS ABEL MAGALLANES MESIAS

ICA, PERÚ

2025



Dedicatoria

*Siempre primero, a Dios, sin él no hay nada, con él, lo es
todo.*



Agradecimiento

Desde lo más profundo de mi corazón, a mis padres, a mi familia.

A mi Facultad, que la llevo siempre en mi corazón.

A los docentes que hasta hoy siguen brindándome apoyo incondicional.

A la unidad minera y a sus profesionales.

Siempre agradecido.

Índice de contenidos

Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de tablas	viii
Índice de figuras.....	ix
Resumen.....	x
Abstract	xi
I. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Realidad problemática	12
1.2. Antecedentes.....	15
1.2.1. Internacionales.....	15
1.2.2. Nacionales	18
1.3. Bases teóricas	23
1.3.1. Minería subterránea.....	23
1.3.1.1. Definición	23
1.3.1.2. Características.....	25
1.3.1.3. Ventajas y desventajas	26
1.3.2. Minado por taladros largos.....	32
1.3.2.1. Definición	32
1.3.2.2. Características.....	34
1.3.2.3. Objetivos e importancia	35

1.3.2.4.	<i>Ventajas y desventajas</i>	37
1.3.2.5.	<i>Diseño e implementación</i>	40
1.3.2.6.	<i>Factores para su selección</i>	47
1.3.2.7.	<i>Comparativo con otros métodos</i>	53
1.4.	Formulación de los problemas.....	57
1.4.1.	<i>Problema general</i>	57
1.4.2.	<i>Problemas específicos</i>	57
1.5.	Justificación	57
1.6.	Objetivos.....	59
1.6.1.	<i>Objetivo general</i>	59
1.6.2.	<i>Objetivos específicos</i>	59
1.7.	Hipótesis.....	59
1.7.1.	<i>Hipótesis general</i>	59
1.7.2.	<i>Hipótesis específica</i>	59
II.	ESTRATEGIA METODOLÓGICA	61
2.1.	Tipo de investigación	61
2.2.	Tipo de investigación	61
2.3.	Nivel de investigación	61
2.4.	Diseño de investigación	62
2.5.	Población y muestra	62
2.5.1.	<i>Población</i>	62
2.5.2.	<i>Muestra</i>	62

2.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	63
2.7.	Técnicas de análisis e interpretación de datos	64
III.	RESULTADOS.....	65
3.1.	Análisis geológico	65
3.2.	Análisis geomecánico	66
3.3.	Minado	68
3.4.	Diseño del método de minado	68
3.5.	Parámetros de diseño.....	70
3.6.	Preparación y desarrollo	72
3.7.	Ciclo de minado	76
3.7.1.	<i>Perforación.....</i>	76
3.7.2.	<i>Voladura.....</i>	84
3.7.3.	<i>Limpieza.....</i>	84
3.7.4.	<i>Sostenimiento</i>	85
3.7.5.	<i>Extracción</i>	86
3.7.6.	<i>Relleno.....</i>	86
3.7.7.	<i>Ventilación.....</i>	88
3.7.8.	<i>Servicios.....</i>	88
3.7.9.	<i>Seguridad.....</i>	88
3.8.	OPEX.....	88
3.8.1.	<i>Costo de avance (preparación-desarrollo)</i>	89
3.8.2.	<i>Costo de minado</i>	89

3.8.3.	<i>Opex total</i>	90
3.8.4.	<i>Capex</i>	91
3.8.5.	<i>Evaluación económica</i>	91
IV.	CONCLUSIONES	94
V.	RECOMENDACIONES	96
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
VII.	ANEXOS	105
	Anexo N°1: Operacionalización de variables.....	106
	Anexo N° 2: Matriz de consistencia	107
	Anexo N° 3: Método de explotación BAF	109
	Anexo N° 4: Secuencia de minado BAF	110
	Anexo N° 5: Plano malla de perforación	111
	Anexo N° 6: Programa de avances	112
	Anexo N° 7: Programa de producción	113
	Anexo N° 8: Flujo de fondos	114
	Anexo N° 9: PU de explotación	115

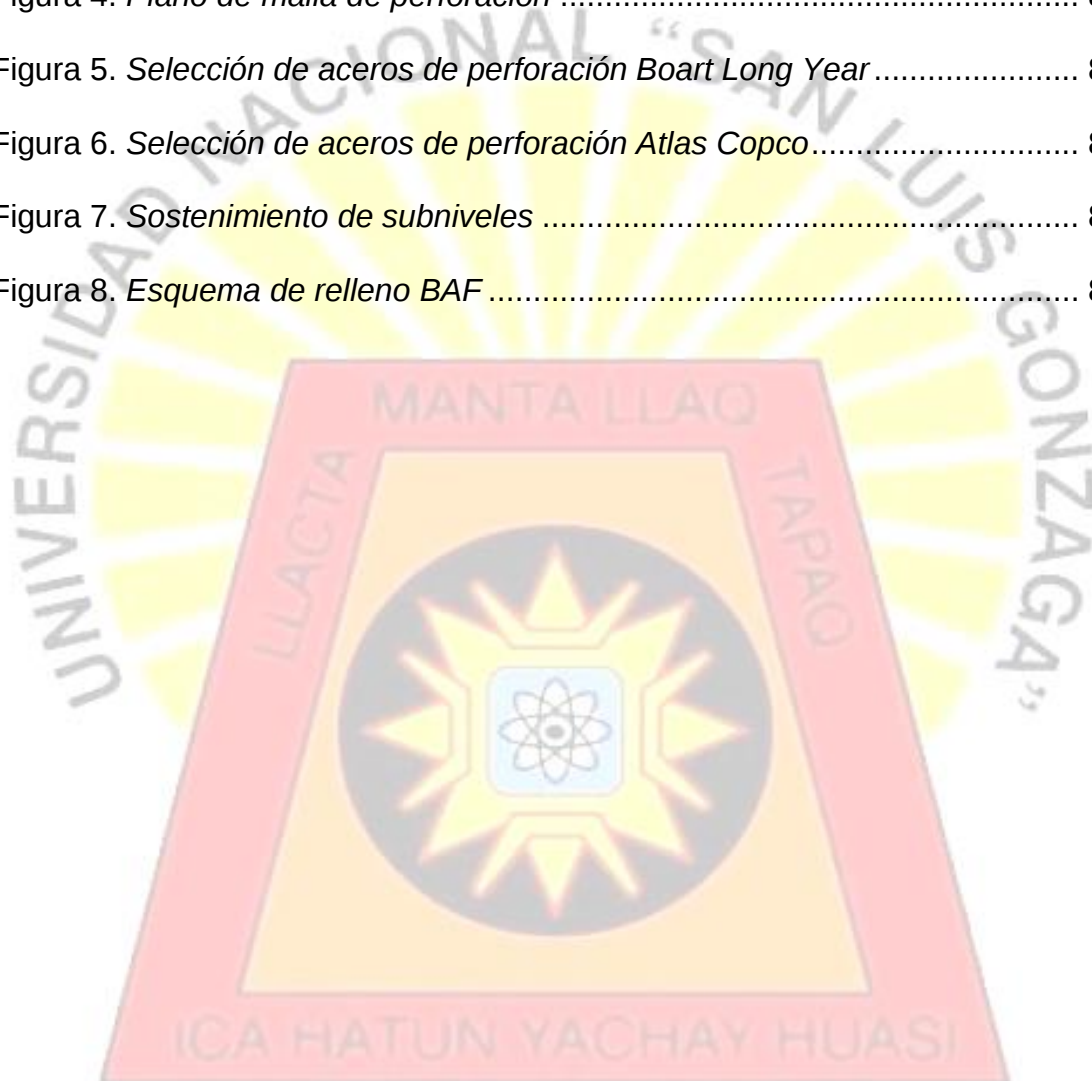
Índice de tablas

Tabla 1. <i>Reservas de la Veta Mary</i>	66
Tabla 2. <i>Resumen tipo roca por veta</i>	67
Tabla 3. <i>Parámetros de diseño</i>	70
Tabla 4. <i>Costos de aceros de perforación</i>	82
Tabla 5. <i>Costo por metro de avance (US\$/m)</i>	89
Tabla 6. <i>Costo de minado en \$/tms</i>	89
Tabla 7. <i>Costos de operación US\$/tms</i>	90
Tabla 8. <i>Aspectos de rentabilidad</i>	91
Tabla 9. <i>Comparativo de rentabilidad de métodos</i>	91



Índice de figuras

Figura 1. <i>Perspectiva 3D del diseño de minado</i>	70
Figura 2. <i>Esquema Preparación y Desarrollo</i>	75
Figura 3. <i>Equipo de perforación con taladros largos</i>	77
Figura 4. <i>Plano de malla de perforación</i>	80
Figura 5. <i>Selección de aceros de perforación Boart Long Year</i>	81
Figura 6. <i>Selección de aceros de perforación Atlas Copco</i>	81
Figura 7. <i>Sostenimiento de subniveles</i>	86
Figura 8. <i>Esquema de relleno BAF</i>	87



Resumen

El presente estudio tiene como objetivo determinar si la propuesta de minado por taladros largos influye en la explotación del proyecto Veta Mary – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022. Es de enfoque cuantitativo, tipo aplicada, explicativa, no experimental, La muestra se constituye por la Veta Mary del Nivel 610 de la Mina Julcani, en el año 2022. Se determinó en la etapa de preparación, el aporte de mineral alcanza un total de 800 toneladas métricas por mes (tms/mes), y en la etapa de explotación, se incrementa significativamente, alcanzando 1,800 tms/mes. La aplicación del método BAF permitirá una reducción significativa en el costo de operación, pasando de 197 US\$/tms a 171 US\$/tms. Además, la explotación de la Veta utilizando el método BAF se llevará a cabo en un tiempo más corto, con la estimación de que se concluirá en 15 meses. Esta reducción en el tiempo de explotación no solo acelera la recuperación de la inversión, sino que también mejora la eficiencia operativa, permitiendo que la mina alcance su capacidad máxima de producción en un plazo más breve, lo que aumenta la rentabilidad global del proyecto. Con base en la evaluación económica, se concluye que el método BAF (Bench and Fill) es un método rentable para la operación minera. El Valor Presente Neto (VPN) del Flujo de Caja es de US\$ 2,762,934, lo que demuestra que la implementación del método no solo es viable, sino que genera una rentabilidad positiva para la empresa.

Palabras Claves: Bench and fill, método de minado, taladros largos.

Abstract

The objective of this study is to determine if the proposal of mining by long drill holes influences the exploitation of the Veta Mary project - Cia Minera Buenaventura S.A.A. 2022. It is of quantitative approach, applied, explanatory, non-experimental type. The sample is constituted by the Veta Mary of Level 610 of the Julcani Mine, in the year 2022. It was determined in the preparation stage, the mineral contribution reaches a total of 800 metric tons per month (tms/month), and in the exploitation stage, it increases significantly, reaching 1,800 tms/month. The application of the BAF method will allow a significant reduction in the operating cost, from US\$197/tms to US\$171/tms. In addition, the mining of the Veta using the BAF method will be carried out in a shorter time, with an estimated completion time of 15 months. This reduction in mining time not only accelerates the payback of the investment, but also improves operational efficiency, allowing the mine to reach full production capacity in a shorter timeframe, which increases the overall profitability of the project. Based on the economic evaluation, it is concluded that the BAF (Bench and Fill) method is a cost-effective method for the mining operation. The Net Present Value (NPV) of the cash flow is US\$ 2,762,934, which shows that the implementation of the method is not only viable, but also generates a positive return for the company.

Keywords: Bench and fill, mining method, long holes.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

La explotación de los recursos minerales en la Veta Mary de la Compañía Minera Buenaventura S.A.A. ha sido realizada mediante métodos tradicionales de minería, los cuales, aunque efectivos en ciertos niveles, han dado lugar a diversas problemáticas operativas. Estas incluyen una baja productividad, altos costos operacionales y preocupaciones de seguridad, factores que se agravan conforme aumenta la profundidad y la complejidad de los cuerpos mineralizados. En este contexto, la propuesta de implementar el método de minado por taladros largos ofrece una solución viable y eficiente para abordar estas dificultades. Este método, modificado a partir de técnicas tradicionales, permite una extracción más eficiente de grandes volúmenes de mineral. Su aplicación en minas con características similares a las de la Veta Mary ha demostrado beneficios sustanciales, como el aumento en las tasas de recuperación de mineral y la reducción de costos operativos. Estos son aspectos clave que impactan directamente en la rentabilidad y competitividad de la minería moderna.

El método de taladros largos es especialmente eficaz en cuerpos minerales angostos y con inclinaciones pronunciadas, condiciones que suelen dificultar la aplicación de técnicas tradicionales como el corte y relleno. Su adopción puede significar una mejora significativa en los resultados operativos de la Veta Mary, permitiendo una explotación más eficiente, segura y rentable [1].

Diversos estudios previos realizados en proyectos mineros que emplearon el método de taladros largos han demostrado que esta técnica optimiza las operaciones de perforación y voladura, reduciendo costos y mejorando la recuperación de mineral. En particular, la implementación de este método en

minas con vetas angostas y profundas ha mostrado cómo es posible minimizar las tasas de dilución y mejorar la eficiencia del uso de explosivos, lo que, a su vez, se traduce en una reducción de los costos por tonelada de mineral extraído [2][3].

Investigaciones sobre proyectos mineros en Perú y Ecuador, especialmente en minas con características geotécnicas similares a las de la Veta Mary, evidencian que el método de taladros largos no solo mejora la productividad, sino que también aumenta la seguridad de las operaciones. Estos estudios subrayan cómo la técnica se adapta eficazmente a yacimientos complejos y puede implementarse con éxito en diferentes tipos de rocas y estructuras geológicas [4].

El análisis geomecánico realizado en estos estudios resalta la adaptabilidad del método a condiciones geológicas diversas, lo que lo convierte en una opción versátil para la Veta Mary, que presenta características geológicas complejas. Además, el método permite perforar a mayores profundidades y en áreas de difícil acceso, lo que optimiza el aprovechamiento de las reservas minerales sin comprometer la seguridad o la estabilidad de las operaciones mineras, lo que representa una ventaja significativa en la explotación subterránea.

Actualmente, el proyecto de la Veta Mary enfrenta importantes desafíos. El uso de métodos convencionales como el corte y relleno ascendente ha resultado ser ineficiente en términos de productividad, especialmente a medida que las reservas se profundizan y la mineralización se vuelve más compleja. Estos métodos no permiten una extracción óptima del mineral, lo que conlleva altos niveles de dilución y una recuperación subóptima de los recursos. Además, la minería tradicional en la Veta Mary se enfrenta a altos costos operativos,

derivados de las múltiples fases del proceso que requieren una gran cantidad de mano de obra y equipos especializados

Los principales problemas que enfrenta la Compañía Minera Buenaventura S.A.A. en la explotación de la Veta Mary incluyen la ineficiencia en la extracción de mineral, pues el uso de métodos tradicionales de minería no permite acceder de manera eficiente a las reservas más profundas del yacimiento, lo que limita la capacidad de extracción y no cumple con los estándares de eficiencia necesarios para maximizar la producción. Además, los altos costos operativos referido a los métodos convencionales requieren grandes inversiones en mano de obra y equipos especializados, lo que genera altos costos por tonelada de mineral extraída. Esto impacta negativamente en la rentabilidad de la operación, especialmente en yacimientos complejos como el de la Veta Mary. Inestabilidad geomecánica: La profundidad y la complejidad del yacimiento generan condiciones de trabajo peligrosas. Las estructuras inestables y las dificultades para asegurar la estabilidad de las paredes y techos incrementan el riesgo para los trabajadores, afectando la seguridad en la mina. Baja recuperación de mineral: La alta dilución de la roca durante el proceso de extracción reduce significativamente la recuperación de mineral. Esta pérdida de recursos disminuye la rentabilidad del proyecto, ya que una parte significativa del mineral valioso se pierde junto con el material estéril.

Las causas de los problemas que enfrenta la Compañía Minera Buenaventura S.A.A. en la explotación de la Veta Mary radican en la adopción de métodos de explotación que no están completamente adaptados a las condiciones geotécnicas específicas de esta veta en su avance. El corte y relleno ascendente, aunque adecuado en ciertos contextos, no es el método óptimo para

este tipo de vetas angostas y con alta inclinación, ya que su capacidad para manejar estas características es limitada. Como consecuencia, la operación experimenta baja productividad y altos costos operativos, lo que compromete la rentabilidad del proyecto. A largo plazo, la ineficiencia operativa podría poner en riesgo la viabilidad económica de la explotación minera en la Veta Mary.

La solución propuesta es la adopción del método de taladros largos en su variante Bench and Fill, que ha demostrado en proyectos similares su capacidad para mejorar la recuperación de mineral y reducir costos operativos. Este método optimiza tanto los procesos de perforación como los de voladura, permitiendo un acceso más eficiente a las reservas mineralizadas y una reducción significativa de la dilución. Además, al ser un método mecanizado, reduce la intervención manual y mejora el control de los trabajos, lo que se traduce en una mayor eficiencia.

Un beneficio adicional del método de taladros largos es la mejora de la seguridad laboral. Al operar en condiciones más controladas, este método reduce la exposición de los trabajadores a las condiciones inestables del yacimiento, minimizando los riesgos asociados con el trabajo subterráneo. Además, el diseño del método permite una mejor ventilación en las galerías, lo que contribuye a un ambiente de trabajo más seguro y saludable.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Internacionales

- Flores V. y Niemes M. [1], en Ecuador, en el año 2021, llevaron a cabo un estudio cuyo objetivo principal fue “Proponer un método de explotación del mineral que se encuentra en subniveles antiguos del contrato de explotación del proyecto minero Bosque de Oro

S.A. a través del planeamiento y diseño minero acorde a las características geomecánicas de la zona con el fin de aumentar la producción y reducir gastos de la empresa”. Fue una investigación descriptiva, aplicativa, observacional de campo. Se concluyó que:

- La implementación del método de corte y relleno ascendente permitió explotar selectivamente las zonas de mayor ley disponibles de inmediato, logrando la extracción de 1 638 t de mena con una recuperación metalúrgica del 95 %.
 - Se constató que la ley del mineral tiende a elevarse en los niveles superiores de explotación, con valores de oro entre 4,60 y 9,50 g/t, de plata entre 10,83 y 12,00 g/t, y de cobre entre 1,4 % y 3 %, lo que mejorará el umbral de corte y los ingresos por tonelada extraída.
 - Al reactivar el subnivel antiguo que conecta directamente con las vetas a explotar, BOSOROMIN S.A. obtuvo un ahorro de 53 000 USD, ya que este acceso facilitó el transporte del mineral a la superficie.
 - La producción se incrementó un 95 %, alcanzando un promedio de 117 t/día durante dos meses, lo que generó un ingreso neto de 162 224,45 USD, fondos que se destinarán a la exploración de nuevas reservas en la concesión vigente.
- Cárdenas H. y Vélez E. [5], en Ecuador, en el año 2019, elaboraron un estudio cuyo alcance principal fue “Analizar e implementar el diseño de explotación mediante el sistema Long Hole Stopping para

el proyecto minero Loma Larga”. Fue descriptivo, analítico, observacional. Las conclusiones determinaron que:

- El método Long Hole Stopping transversal encaja de forma ideal con las características geológicas y geométricas del yacimiento Loma Larga.
 - Esta técnica garantiza un elevado grado de extracción gracias a su adaptabilidad al diseño del proyecto.
 - Se proyecta extraer bloques de 18 m de ancho por 20 m de alto y 20 m de largo.
 - Tanto las galerías principales como los estribos de producción se excavarán directamente dentro del cuerpo mineralizado, adelantando la recuperación de mena y reduciendo los costos de infraestructura al evitar obras en zonas estériles.
 - El proceso es altamente mecanizado, lo que asegura un rendimiento de operación tanto eficiente como seguro.
 - La flexibilidad del sistema permite ajustar las dimensiones de extracción durante la explotación, facilitando la optimización del ritmo de trabajo e incluso un eventual cierre anticipado de mina.
 - Con este esquema, se planea extraer 13 926 475 t de mena, que contendrán aproximadamente 1 979 997 oz de oro a lo largo de los 12 años de vida útil del proyecto.
- Muñoz A. y Ocampo L. [6], en Ecuador, en el año 2019, elaboraron un estudio cuyo alcance principal fue “Optimizar el sistema de

explotación para la veta Bela de la mina Tiwintza, mediante la aplicación de parámetros técnicos, económicos y ambientales, para garantizar una extracción de los recursos minerales de manera responsable y sostenible”. Fue una investigación de tipo descriptiva, método deductivo, bibliográfico. Se concluyó que:

- Se realizaron levantamientos con estaciones geomecánicas para caracterizar el comportamiento del macizo rocoso, concluyéndose que se trata de una roca de buena calidad. No obstante, dado este hallazgo, resulta imprescindible instalar sostenimiento en las zonas estudiadas para garantizar su estabilidad, aspecto que excede el alcance técnico de este proyecto.
- Se diseñó una malla técnica de perforación adaptada a cada faena, lo que reduce tanto la cantidad de barrenos como el desgaste de brocas, aceite y demás consumibles, generando un ahorro estimado de 1 723,29 USD por voladura. Asimismo, se optimizó la carga de explosivos por disparo, logrando economizar 928,03 USD en cada ciclo de tronadura. Por último, la propuesta de un sistema de ventilación mecanizada aporta beneficios en materia de seguridad laboral, con un costo de instalación de 4 483,99 USD.

1.2.2. Nacionales

- Flores J. [7], en Ica, en el año 2022, llevó a cabo una investigación cuyo objetivo fundamental fue “Establecer de qué manera una

evaluación técnico-económica influye en la selección del método de explotación de la veta Keyla – Unidad Operativa Inmaculada 2020”. Fue una investigación de aplicada, nivel descriptivo, diseño no experimental y enfoque cuantitativo. Se concluyó que:

- Se demostró que la evaluación técnico-económica es determinante para escoger el método de explotación más eficiente, ya que permite calcular el margen operacional por tonelada, obtener valores actuales netos positivos en todos los escenarios y verificar tasas internas de retorno superiores al 12 % indicadores de alta rentabilidad.
 - Se comprobó que el margen operativo condiciona la elección del método más eficaz, pues compara la ganancia en dólares por tonelada producida. El mejor desempeño correspondió a taladros largos en subniveles, con US 243,58/ton, seguido por US 216,47/ton y US 205,48/ton en corte y relleno SM con y sin scoop, respectivamente.
 - Se estableció que el valor actual neto (VAN) orienta la selección del método óptimo, al indicar la rentabilidad real de la inversión. El VAN más alto se obtuvo con taladros largos en subniveles (US 7 316 119), seguido por corte y relleno SM con scoop (US 5 502 179), corte y relleno SM sin scoop (US 5 333 454), todos valores mayores a cero.
- Baldeon M. [8], en Huancayo, en el año 2021, llevó a cabo un estudio cuyo alcance esencial fue “Mejorar la producción mediante la aplicación del método de explotación sublevel stoping con

taladros largos en vetas angostas – veta Ramal Alianza de minera Argentum”. Fue una investigación explicativa, método inductivo-deductivo, alcance aplicado y diseño no experimental. Se concluyó que:

- Durante la aplicación del método Sublevel Stoping con taladros largos en las vetas Ramal Alianza y Alianza, la producción creció de 580 479 t en 2012 a 743 680 t en 2019. Este aumento vino acompañado de un incremento del cash cost de 24,97 US\$/t a 44,33 US\$/t en el mismo lapso, reflejando una operación más rentable. Además, el costo operativo por tonelada descendió de 112,42 US\$/t a 78,48 US\$/t entre 2012 y 2019, lo que a su vez redujo el costo total de mina de 61,41 US\$/t a 39,54 US\$/t y mejoró aún más la rentabilidad del proyecto.
 - Las vetas Alianza y Ramal Alianza se alojan en rocas volcánicas de composición andesítica del grupo Mitu, miembro Santa Catalina, con orientación N45°E y buzamiento de 60–80° SE, y anchos que varían entre 1,5 m y 2,5 m. La explotación mediante Sublevel Stoping con bloques de 20 m de longitud por 13 m de altura y una separación de subniveles de 20 m no presenta riesgos de inestabilidad ($RH = 3,94$) aun sin sostenimiento adicional, garantizando así la seguridad de las labores.
- Pariona L. y Benito A. [3], en Huancayo, en el año 2020, llevaron a cabo una investigación cuyo objetivo principal fue “Determinar la

implementación del método de minado bench and fill en la veta María Luisa unidad productora Carahuacra”. Fue una investigación de método científico, diseño aplicado, nivel descriptivo, técnicas de la observación y de campo. Las conclusiones señalaron que:

- La adopción del método bench and fill redujo el costo operativo en 14,12 US\$/t.
 - Este esquema demuestra ser viable al compararlo con otros métodos, pues acorta la vida útil del yacimiento en cuatro años: con bench and fill la extracción concluiría en 8 años frente a los 12 años requeridos por el sistema de corte y relleno.
 - En términos anuales, el gasto operativo para bench and fill se sitúa en 37 178 796 US\$, mientras que con corte y relleno asciende a 44 895 842 US\$, lo que implica un ahorro de 7 717 046 US\$ al año al elegir bench and fill.
 - El costo unitario de bench and fill es de 5,24 US\$/t frente a 6,57 US\$/t del método de corte y relleno, significando una reducción de 1,33 US\$/t.
 - En conjunto, la comparativa evidencia un beneficio de 5,89 US\$/t al implementar bench and fill.
- Aquino E. [2], en Huancayo, en el año 2020, llevó a cabo una investigación cuyo alcance fundamental fue “Determinar la implementación del método de minado Bench and Fill en la veta Mary de la unidad productora Carahuacra de Volcan Compañía Minera S.A.A.”. Fue una investigación de método deductivo,

analítico, tipo aplicada, nivel descriptivo, técnicas de observación directa. Las conclusiones indicaron que:

- Al comparar el opex mina, Bench and Fill muestra un costo de 58,34 US\$/t, frente a 72,46 US\$/t de Corte y Relleno, consiguiéndose así una reducción de 14 US\$/t al optar por Bench and Fill.
 - A nivel anual, el gasto operativo asociado a Bench and Fill asciende a 42 918 080,86 US\$, mientras que en Corte y Relleno llega a 51 516 268,20 US\$. Con Bench and Fill se ahorran 8 598 187,34 US\$ al año.
 - El costo unitario de Bench and Fill es de 5,53 US\$/t, comparado con 6,94 US\$/t de Corte y Relleno, lo que implica un ahorro de 1,41 US\$/t con la implementación de Bench and Fill.
 - En conjunto, el trade-off refleja un beneficio neto de 5,88 US\$/t al aplicar el método Bench and Fill.
- Suarez R. [9], en Huancayo, en el año 2019, llevó a cabo una investigación cuyo alcance fundamental fue “Determinar en qué medida la evaluación del método de explotación por subniveles con taladros largos optimiza la producción en la compañía minera Chalhuane S.A.C.”. Fue una investigación de método científico, tipo aplicado, nivel descriptivo, técnicas de la observación directa. Las conclusiones indicaron que:
 - El método Bench and Fill con taladros largos reduce notablemente el costo de minado, situándolo en 20,48

US\$/t, frente a los 41,52 US\$/t que implica el sistema de corte y relleno ascendente, lo cual representa un ahorro de 21,04 US\$/t.

- Durante el diseño e implementación de Bench and Fill, la producción mensual del tajo pasó de 962,82 t a 9 889,2 t, acortando la vida útil del frente a apenas tres meses. Al mismo tiempo, el costo de producción bajó de 62,40 US\$/t a 41,36 US\$/t, demostrando la factibilidad de aplicar este método en vetas angostas de Minera Chalhuane S.A.C.
- En cuanto a la perforación, el índice en slot es de 0,58 t m³ por metro perforado, mientras que en labores de producción alcanza 2,11 t m³/mp. El rendimiento por voladura con dos filas de taladros largos es de 256 t por disparo, y el Jumbo MK logra avanzar 127,8 m de agujero por día de trabajo.
- El factor de potencia cantidad de explosivo por tonelada es de 0,28 kg/t en el método CRAM (Breasting) y de 0,38 kg/t en Sublevel Stopping, resultando Breasting el más eficiente. Dado un RMR del mineral entre 31 % y 40 %, se recomienda ajustar burden y espaciamiento a 1,5 m para optimizar la fragmentación.

1.3. Bases teóricas

1.3.1. Minería subterránea

1.3.1.1. Definición

La minería subterránea es la técnica de explotación de minerales que se lleva a cabo debajo de la superficie terrestre, a través de la construcción

de túneles, galerías y otras labores subterráneas para acceder al yacimiento mineral. A diferencia de la minería a cielo abierto, donde el mineral se extrae directamente desde la superficie, la minería subterránea implica excavar una red de accesos subterráneos para localizar y remover los recursos minerales que están a profundidad o cubiertos por estratos de roca estéril. En términos simples, la minería subterránea consiste en cavar debajo del suelo para alcanzar vetas, mantos o cuerpos de mineral que no afloran en la superficie, o que debido a su profundidad y las condiciones geológicas del entorno, no pueden ser explotados eficientemente mediante métodos de minería a cielo abierto. Esta técnica es crucial para la extracción de recursos que se encuentran en capas profundas o en zonas inaccesibles por otros métodos [10].

Asimismo, la minería subterránea se define como el conjunto de operaciones mineras realizadas debajo del terreno natural, mediante la creación de accesos subterráneos que permiten la extracción de minerales ubicados a profundidades considerables. Es una rama de la ingeniería de minas que combina métodos tradicionales de excavación con tecnologías modernas, como equipos mecanizados, sistemas de ventilación y monitoreo geotécnico, para lograr una explotación segura y rentable de recursos minerales inaccesibles desde la superficie [11].

Esta definición abarca una diversidad de métodos de explotación subterránea, tales como cámaras y pilares, subniveles, hundimientos, entre otros, cada uno adecuado para diferentes tipos de yacimientos. Sin

embargo, todos estos métodos comparten el principio fundamental de trabajar bajo tierra para acceder y extraer los recursos del subsuelo [12].

1.3.1.2. Características

La minería subterránea posee una serie de características propias, así como objetivos operativos y una importancia económica-social particular dentro de la industria minera [13]:

- **Construcción de infraestructura subterránea:** La minería subterránea implica la construcción de accesos como galerías, rampas, chimeneas y pozos, que permiten llegar al mineral y transportarlo. Estas labores pueden extenderse por kilómetros bajo tierra en las minas más grandes, conformando laberintos subterráneos complejos y extensos.
- **Menor huella superficial:** A diferencia de la minería a cielo abierto, que deja un cráter o una gran excavación visible, las excavaciones subterráneas no alteran significativamente la topografía superficial, salvo por algunas bocaminas, portales de rampas o edificaciones anexas como plantas y campamentos. Esto reduce el impacto visual y la afectación directa del terreno en superficie.
- **Operaciones unitarias específicas:** La minería subterránea comprende un ciclo de operaciones particulares como perforación, voladura, ventilación, sostenimiento, extracción, y transporte, que deben ser coordinadas en espacios confinados. Estas operaciones requieren un control estricto del ambiente de trabajo, con sistemas de ventilación constante para proveer oxígeno y diluir gases,

sistemas de drenaje para agua infiltrada, iluminación artificial, y comunicaciones robustas para la coordinación del trabajo.

- Mayor complejidad técnica: Diseñar y mantener una mina subterránea es un desafío técnico considerable. Se debe asegurar la estabilidad de las excavaciones mediante soportes artificiales y planificar cuidadosamente la secuencia de extracción para evitar comprometer la integridad de la mina. Un paso en falso podría desencadenar hundimientos internos. Por ello, la minería subterránea depende fuertemente de la geomecánica y del monitoreo continuo de las condiciones del macizo rocoso.
- Ambiente de trabajo limitado: Los espacios en el interior de la mina suelen ser angostos, oscuros, con humedad y ruido elevado, y con riesgos latentes como derrumbes o la presencia de gases peligrosos. Esto exige la implementación de estrictas medidas de seguridad industrial, muchas de las cuales están reguladas por normas específicas. Por ejemplo, en Perú, el D.S. 024-2016-EM establece estándares para la calidad del aire, fortificación, refugios de emergencia, entre otros, para garantizar la seguridad en las minas subterráneas.

1.3.1.3. Ventajas y desventajas

Ventajas [14]:

- Menor impacto ambiental superficial: Al realizar las labores principales bajo tierra, la alteración del paisaje es mucho más reducida. No se generan grandes excavaciones ni desmontes superficiales, lo que preserva la topografía original y reduce

problemas como el polvo y el ruido en las áreas cercanas. Por ejemplo, en una mina subterránea, típicamente solo se ven bocaminas y relaveras, mientras que en la minería a cielo abierto se crea un tajo abierto visible desde kilómetros. Además, este enfoque minimiza la necesidad de reubicar comunidades o infraestructura en la superficie.

- Acceso a yacimientos profundos: La minería subterránea es la única vía viable para explotar minerales a gran profundidad de manera económica. Cuando la sobrecarga supera cierto espesor, continuar con minería a cielo abierto se vuelve prohibitivo en términos de costos. La minería subterránea permite seguir extrayendo en profundidad ilimitada, como se ha evidenciado en minas de oro en Sudáfrica que alcanzan casi 4 km de profundidad, algo imposible en minería a cielo abierto. Esto aumenta las reservas explotables de la mina.
- Mayor selectividad en ciertos métodos: Algunos métodos de minería subterránea permiten extraer únicamente la veta o el mineral, con mínima dilución de estéril, lo que mejora la ley del mineral extraído y reduce la generación de relaves o desmonte. Un ejemplo es el método de corte y relleno manual, que puede recuperar solo la vena de alta ley, algo que no es posible en minería a cielo abierto sin extraer también roca circundante de baja ley. En general, la minería subterránea, al seguir directamente el depósito, permite un control más preciso sobre qué material se remueve.

- Operatividad independiente del clima: Las operaciones subterráneas son menos susceptibles a las condiciones climáticas externas. Lluvias intensas, nevadas o temperaturas extremas afectan mucho menos a las minas subterráneas, ya que el personal y los equipos trabajan bajo tierra, en un entorno más estable. En comparación, una mina a cielo abierto podría tener que frenar debido a tormentas eléctricas o excesiva precipitación, lo que presenta riesgos de deslizamientos. La minería subterránea, por su parte, puede mantener su producción sin interrupciones, salvo por eventos climáticos extremos que bloqueen los accesos.
- Seguridad ante peligros externos: Los trabajadores subterráneos están protegidos de peligros superficiales como caídas de rayos, vientos fuertes, calor extremo del sol, etc. Además, en lugares con temperaturas muy frías, trabajar bajo tierra proporciona un ambiente más templado. En situaciones de guerra o conflictos, las instalaciones subterráneas también ofrecen un mayor resguardo.
- Posibilidad de mayor recuperación final del mineral: En la minería subterránea, es posible dejar estructuras de soporte temporales (como pilares) y luego recuperarlos con relleno. Esto permite extraer un mayor porcentaje del yacimiento que en minería a cielo abierto, donde siempre queda mineral en taludes. Por ejemplo, en la minería subterránea, se pueden planificar recuperaciones de pilares al final del proceso, lo que puede lograr recuperaciones superiores al 90% del depósito.

- Vida de mina prolongada: Una operación subterránea puede extender la explotación durante muchos años, profundizando gradualmente. Incluso después de que un tajo abierto se haya agotado, se puede transicionar a minería subterránea y continuar produciendo durante décadas adicionales desde los niveles inferiores. Un ejemplo de esto es la mina Chuquicamata en Chile, que, tras agotarse a rajo abierto, continuó operando como mina subterránea. Esto aporta estabilidad económica a largo plazo para las regiones mineras, asegurando la continuidad de la actividad económica en el área.

Desventajas [15]:

- Mayores costos de inversión inicial: Abrir una mina subterránea es generalmente más costoso que iniciar una mina a tajo abierto. La construcción de túneles, rampas, sistemas de ventilación, y estaciones de bombeo de agua, así como la instalación de energía eléctrica en el interior de la mina, implica una inversión inicial fuerte antes de poder extraer la primera tonelada de mineral. Además, los equipos subterráneos como jumbos, LHD, y locomotoras suelen ser más especializados y más caros en proporción a su tamaño que los camiones o palas de minería a cielo abierto. Esto hace que el umbral de tonelaje necesario para recuperar la inversión sea alto.
- Menor productividad y escala de producción: En términos generales, la minería subterránea produce menos toneladas por día que una operación a cielo abierto de tamaño equivalente. Las labores confinadas limitan el tamaño de los equipos y el número de

frentes que pueden operar simultáneamente. Por ejemplo, una gran mina a cielo abierto de cobre puede mover 100,000 toneladas/día, mientras que pocas minas subterráneas alcanzan esa tasa. Esto significa que, para minerales de baja ley que requieren un alto throughput (como menas de hierro o cobre de baja ley), la minería subterránea no es competitiva frente al cielo abierto en términos de volumen.

- **Mayor complejidad operativa:** Coordinar las operaciones bajo tierra es logísticamente complejo. Los espacios subterráneos son estrechos, lo que limita el transporte del mineral hacia la superficie, creando cuellos de botella (como sistemas de fajas o locomotoras con capacidad limitada, o acarreo en camiones pequeños por rampas). Además, la planificación minera debe ser rigurosa para evitar que un frente de extracción comprometa la estabilidad de otro. También existen restricciones de ventilación, ya que demasiados equipos diésel funcionando juntos pueden generar falta de oxígeno. Estos factores requieren personal altamente capacitado e ingeniería intensa para operar eficientemente. Un error de diseño podría inutilizar áreas de la mina o causar accidentes graves.
- **Mayores riesgos de seguridad intrínsecos:** Aunque la minería subterránea moderna ha incorporado numerosas medidas de seguridad, trabajar bajo tierra conlleva riesgos inherentes. Estos incluyen derumbes o caída de rocas desde el techo, inundaciones repentinas por interceptación de agua subterránea, atmósferas

peligrosas (como acumulación de gases tóxicos o explosivos como metano y deficiencia de oxígeno), incendios internos y explosiones de polvo de carbón en minas carboníferas. Estos eventos pueden tener consecuencias severas debido a que el personal está confinado sin vías fáciles de escape. Un accidente grave en minería subterránea suele generar más víctimas y complicaciones en el rescate que en minería superficial. La prevención es vital, pero el entorno subterráneo sigue siendo más riesgoso comparado con la minería en superficie.

- Limitaciones físicas de acceso: El tamaño de las galerías subterráneas limita el tamaño de maquinaria que se puede utilizar. Por ejemplo, voladuras de 3-4 metros de avance por ciclo son más pequeñas que los bancos de 15 metros que se pueden volar en minería a cielo abierto. Además, el acarreo subterráneo suele ser menos eficiente: los camiones subterráneos son más pequeños y lentos al subir rampas, en comparación con los camiones gigantes de minería a cielo abierto, lo que incrementa los costos por tonelada transportada.
- Mayor costo operativo continuo: Aparte de la inversión inicial, ciertos costos operativos en minería subterránea son mayores, como los gastos en ventilación eléctrica 24/7, bombeo constante de agua si hay infiltraciones, fortificación de las labores (con sostenimiento de túneles), y iluminación permanente. También la gestión de seguridad (capacitación, equipos de rescate, planes de emergencia) conlleva costos adicionales que son obligatorios.

- Impactos ambientales distintos: Aunque el impacto superficial es menor, la minería subterránea puede ocasionar otros impactos ambientales. Estos incluyen la posible subsidencia (hundimiento de terreno) si se colapsan grandes espacios subterráneos, la generación de aguas ácidas subterráneas que deben ser bombardeadas y tratadas antes de su descarga, y la alteración de acuíferos profundos al desagotarlos para trabajar en seco. Un ejemplo es la alteración de flujos de agua subterránea, que puede resultar en el seco de ríos o manantiales si la mina intercepta su curso. Estos impactos no son tan visibles como en la minería a cielo abierto, pero requieren atención y mitigación.

1.3.2. Minado por taladros largos

1.3.2.1. Definición

El método de minado por taladros largos, también conocido como sublevel stoping o explotación por subniveles, es un método de explotación subterránea que utiliza perforaciones de gran longitud para extraer el mineral. Este método consiste en un sistema a gran escala de perforación y voladura, donde se perforan taladros largos (generalmente de 10 a 30 metros o más) desde galerías subniveles dispuestas a diferentes alturas dentro del yacimiento. A través de voladuras secuenciales, se fracturan grandes volúmenes de roca mineralizada en cada disparo. El material fragmentado cae por gravedad en un espacio vacío creado previamente, denominado slot o chimenea inicial, y se acumula en la base del tajo, también conocido como stope. Desde esta acumulación, el mineral se extrae mediante equipos de carguío y transporte. Una vez extraído el

mineral, el vacío dejado por la extracción puede rellenarse con material estéril o relleno cementado, con el fin de mantener la estabilidad del tajo o permitir la continuidad de la explotación en zonas adyacentes. Este método es ampliamente utilizado en la minería subterránea debido a su efectividad para extraer grandes volúmenes de mineral y su capacidad para ser adaptado a diversos tipos de yacimientos [16].

El método de minado por taladros largos se originó a finales de la década de 1930 en la mina Horne de Noranda, ubicada en Canadá, como un reemplazo de los métodos tradicionales de explotación por bancos. La adopción temprana de este método incluyó el uso de relleno cementado para sostener las labores, utilizando relaves y escoria granulada, lo que permitió extraer casi el 100% del mineral del cuerpo Lower H en dicha mina. Desde entonces, este método ha ganado popularidad y se ha difundido mundialmente, siendo ampliamente aceptado en la industria minera, especialmente para yacimientos de mediana a gran escala que cuentan con condiciones geomecánicas favorables [4]. En resumen, la minería por taladros largos se caracteriza por el uso de perforaciones profundas y voladuras controladas para vaciar cámaras de mineral, lo que lo convierte en un método altamente mecanizado y eficiente de explotación subterránea. Su efectividad y adaptabilidad lo han consolidado como uno de los métodos preferidos para la explotación de grandes yacimientos en minería subterránea [17].

1.3.2.2. Características

El método de taladros largos presenta varias características distintivas que lo diferencian de otros métodos subterráneos de explotación, las mismas que son [18]:

- Explotación a gran volumen (bulk mining): Este método se caracteriza por excavaciones de mayor tamaño que los métodos selectivos. Se basa en la creación de subniveles horizontales desde los cuales se perforan abanicos o anillos de taladros largos hacia el cuerpo mineral, permitiendo extraer grandes volúmenes de mineral.
- Requiere una roca encajonante competente y buzamiento alto: El método es eficaz en yacimientos con un buzamiento generalmente superior a 50° , lo que permite que el mineral fragmentado fluya por gravedad hacia el espacio vacío creado por la voladura.
- Baja selectividad: Al volar grandes porciones de roca, puede haber mezcla de material estéril con el mineral si la voladura no se controla adecuadamente. Esto lo diferencia de métodos más selectivos como el corte y relleno, que permiten una mayor precisión en la extracción.
- Uso de relleno artificial: A menudo se complementa con el relleno artificial (cementado o no) en los espacios vacíos para aumentar la recuperación y sostener las paredes. Esto es particularmente importante en vetas o cuerpos angostos, donde se busca minimizar la dilución del mineral.

- Alto grado de mecanización: El método emplea equipos altamente mecanizados, como perforadoras jumbo de largo alcance, sistemas de comunicación y control de tiros (con detonadores electrónicos) y equipos LHD (Load-Haul-Dump) para el carguío remoto del material fragmentado. Esto permite una mayor eficiencia y seguridad en las operaciones.

En conjunto, estas características hacen del método de taladros largos una opción eficiente y adecuada para grandes yacimientos con condiciones geológicas favorables, a pesar de su menor selectividad y la necesidad de un control riguroso en las voladuras.

1.3.2.3. Objetivos e importancia

Los objetivos principales del método de taladros largos son incrementar la productividad y reducir los costos operativos en comparación con los métodos tradicionales. Al utilizar perforación de largo alcance y voladura masiva, este método permite extraer un gran tonelaje diario de mineral. Por ejemplo, al implementar taladros largos en vetas previamente explotadas manualmente, la producción mensual por tajo puede duplicarse, pasando de 2,000 a 4,000 toneladas gracias a la mecanización del proceso [8].

Asimismo, otro objetivo crucial es mejorar la seguridad al alejar a los trabajadores del frente de trabajo. La operación se realiza principalmente desde galerías protegidas (subniveles) y mediante control remoto en el carguío, lo que reduce la exposición del personal a derrumbes o explosiones.

Finalmente, el método de taladros largos también tiene como objetivo optimizar la recuperación del mineral del yacimiento. Si está bien diseñado, este método puede lograr recuperar una gran parte del recurso, alcanzando tasas de extracción muy altas, especialmente si se aplica relleno para permitir la extracción de los pilares remanentes. Esto no solo mejora la eficiencia de la explotación, sino que también contribuye a maximizar el aprovechamiento del yacimiento [8].

La importancia del método de taladros largos radica en su contribución a la minería moderna, ya que permite explotar yacimientos de medianas y altas dimensiones con una mayor eficiencia en comparación con métodos selectivos manuales. Este método ha cobrado especial relevancia en depósitos de vetas de alto valor que anteriormente solo podían explotarse lentamente mediante métodos convencionales. Según estudios, la mecanización a través de taladros largos ha traído beneficios como mayor seguridad, mayor productividad y reducción de costos en la explotación de vetas angostas [19].

Además, al permitir manejar mayores tasas de producción a menor costo unitario, el método se convierte en una opción económicamente atractiva. Se ha documentado que un proyecto minero que cambia de corte y relleno convencional a taladros largos puede incrementar su Valor Actual Neto (VAN) en alrededor de 6%, lo que representa beneficios económicos adicionales sustanciales [20].

En resumen, el método de taladros largos es crucial porque facilita la extracción rentable de cuerpos mineralizados profundos y de geometría vertical, maximizando la producción y elevando los estándares de

seguridad en minería subterránea, lo que lo convierte en una solución clave para optimizar la explotación minera.

1.3.2.4. Ventajas y desventajas

El método de taladros largos ofrece varias ventajas significativas frente a los métodos subterráneos tradicionales, pero también conlleva desventajas y desafíos técnicos.

Entre las principales ventajas destacan [20]:

- Alta productividad y bajos costos unitarios: Al romper y extraer grandes volúmenes de mineral en cada voladura, este método permite alcanzar altos ritmos de producción diarios. Estudios comparativos han demostrado que el costo operativo por tonelada puede ser hasta un 8% más bajo en comparación con métodos como corte y relleno, lo que lo hace más eficiente en términos de costos.
- Mecanización y eficiencia: El uso de equipos avanzados como jumbos de perforación, sistemas de ventilación forzada y equipos de acarreo modernos optimiza el ciclo de minado, reduciendo la dependencia de trabajo manual y aumentando la velocidad de operación. Esto también reduce la exposición de los trabajadores a riesgos, mejorando significativamente la seguridad ocupacional.

Por ejemplo, la implementación de microequipos en vetas angostas, como los jumbos de taladro largo tipo “miniraptor” y los LHD teleoperados, ha logrado eliminar accidentes por caída de roca, mejorando notablemente los índices de seguridad en las operaciones.

- Mayor recuperación del yacimiento: Con un adecuado diseño de perforación y el uso de relleno, este método permite extraer prácticamente todo el mineral, dejando mínimos pilares. En la mina Horne, precursora del método, se alcanzó una recuperación cercana al 100% del cuerpo mineralizado gracias al relleno cementado, lo que maximiza la extracción de recursos.
- Adaptabilidad a mayor escala: A diferencia de métodos muy selectivos que son más lentos, el método de taladros largos es altamente escalable, lo que permite satisfacer las demandas de producción elevadas. Esto lo hace especialmente adecuado para operaciones de mediana y gran minería, donde se requieren altos volúmenes de extracción de manera continua y eficiente.

En resumen, el método de taladros largos ofrece una mayor eficiencia y seguridad en la minería subterránea, con ventajas significativas en productividad, costos y recuperación del mineral, pero también exige una correcta planificación y adaptación a las condiciones geológicas del yacimiento.

No obstante, el método de taladros largos presenta varias desventajas importantes que deben ser consideradas al evaluar su viabilidad en proyectos de minería subterránea [19]:

- Menor selectividad y riesgo de dilución: Debido a su naturaleza masiva, es difícil evitar la extracción de roca estéril junto con el mineral. Si el diseño y la ejecución no son precisos, se produce sobrerotura (sobre-fragmentación de las cajas) y dilución de la ley del mineral. La voladura en abanico (fan drilling) es una de las

operaciones más complejas en este método, ya que la desviación de los taladros o una secuencia de voladuras inadecuada puede incrementar significativamente la dilución y las pérdidas de mineral. La inexactitud en la perforación es uno de los principales factores responsables de la dilución.

- Requiere condiciones geomecánicas favorables: El método depende de la estabilidad de las paredes rocosas. Si la roca encajonante es débil o está muy fracturada, mantener abiertas las cámaras grandes puede ser peligroso. En rocas incompetentes, es necesario emplear fuertes sostenimientos o relleno, o incluso optar por otro método de minado. La seguridad de las excavaciones y la estabilidad estructural son cruciales para el éxito del proceso.
- Inversión inicial y desarrollo más complejo: La implementación de taladros largos requiere una inversión significativa en maquinaria especializada (como jumbos largos, sistemas de ventilación y fortificación robustos) y en el desarrollo de infraestructura (como galerías de subnivel, chimeneas de comunicación, y rampas de acceso al nivel inferior para extracción). Esto implica mayores costos de capital y un periodo de preparación más largo antes de comenzar la producción, en comparación con métodos más simples y manuales.
- Planificación y control exigentes: La secuencia de voladuras debe ser cuidadosamente diseñada para evitar derrumbes no deseados o bloqueos. Es necesario crear un slot inicial eficaz; de lo contrario, las voladuras posteriores no tendrán un espacio libre hacia donde

expandirse, lo que puede generar problemas. Además, la técnica de abrir un slot vertical seguro (usando raise borer, Alimak o tiros descendentes) agrega complejidad al arranque del método. La ventilación de los humos de voladura en grandes cámaras y el manejo de vibraciones sísmicas requieren medidas adicionales de control para garantizar la seguridad operativa.

- Limitaciones en cuerpos muy pequeños o muy irregulares: En yacimientos extremadamente angostos, incluso los microequipos pueden no operar de manera eficiente, o la dilución puede hacer económicamente inviable el método. En tales casos, se prefieren métodos ultraselectivos. Además, en geometrías muy complejas (por ejemplo, vetas con cambios bruscos de rumbo o inclinación), el taladro largo pierde eficacia, ya que no puede adaptar fácilmente los tiros a las curvas del cuerpo mineralizado.

En resumen, aunque el método de taladros largos presenta numerosas ventajas en términos de productividad y recuperación, también implica ciertos riesgos y desafíos técnicos que requieren una planificación y ejecución cuidadosa, así como condiciones geológicas y geomecánicas favorables para garantizar su efectividad y seguridad.

1.3.2.5. Diseño e implementación

El diseño e implementación exitosa del método de taladros largos requiere seguir una serie de etapas secuenciales, integrando estudios geotécnicos y de ingeniería de minas. A grandes rasgos, los pasos fundamentales son [8], [9]:

1. Estudios preliminares y condiciones del yacimiento: El primer paso para implementar el método de taladros largos es evaluar las características del depósito con el fin de verificar la viabilidad del método. Esto incluye un análisis geológico (para determinar la forma, dimensiones y continuidad del cuerpo mineral) y un análisis geomecánico (para evaluar la resistencia y calidad del macizo rocoso, así como el buzamiento del yacimiento). Un parámetro importante a considerar es el RMR (Rock Mass Rating) o Q de la roca encajonante, que ayuda a determinar la estabilidad del entorno subterráneo. El Reglamento de Seguridad peruano exige realizar y actualizar mensualmente estudios geomecánicos para las labores subterráneas, lo cual alimenta directamente el diseño del método y la planificación de la operación. Si el yacimiento presenta alta inclinación y la roca es competente, se puede proceder con la planificación detallada del sublevel stoping. Además, en esta fase se definen las leyes de corte (cut-off) y el contenido económico del mineral, lo que permite tomar decisiones sobre la extensión de las zonas a explotar con este método, asegurando su rentabilidad y eficiencia.

2. Diseño de la configuración de explotación (subniveles y cámaras):

En esta etapa, se establecen las distancias verticales entre los subniveles (pisos) y las dimensiones de los tajos (cuerpos mineros a explotar). La separación entre subniveles suele oscilar entre 10 y 25 metros verticales, dependiendo de la altura de banco que se desea volar de una sola vez y la estabilidad de la abertura

resultante. Un banco más alto aumenta la eficiencia al permitir extraer más toneladas por corte, pero también implica mayores esfuerzos en las paredes de la excavación. Asimismo, se definen las dimensiones de las galerías de subnivel de perforación. Por ejemplo, si se usarán equipos convencionales, las secciones de las galerías suelen ser de 3.0 x 3.5 m, mientras que, si se emplean microequipos para vetas angostas, las secciones serán más pequeñas. También es crucial planificar la ubicación de los puntos de extracción inferiores (draw points), que se pueden ubicar mediante galerías transversales en el nivel base del tajo o mediante chimeneas de traspaso hacia los niveles de transporte. Esto asegura un flujo eficiente del material extraído y una correcta gestión de los recursos en el proceso de explotación.

3. Desarrollo de accesos y preparación: Antes de iniciar la producción, se debe construir la infraestructura subterránea necesaria para llevar a cabo la explotación. Esto incluye la excavación de rampas o accesos que conecten los diferentes niveles del yacimiento, permitiendo el acceso a las áreas de trabajo. También se lleva a cabo la habilitación de galerías de subnivel en la pared colgante o en la caja (footwall) del cuerpo mineral, desde donde se realizarán las perforaciones para extraer el mineral. Además, se instalan sistemas de ventilación, energía y comunicaciones en estas labores subterráneas para garantizar un ambiente seguro y eficiente para los trabajadores. En muchos casos, se excava también una chimenea o raise interno (raise de

ventilación y/o de transporte de mineral) que sirve para comunicar niveles y también como ruta de escape para los gases de voladura. Durante esta etapa de preparación, se implementan sostenimientos en las galerías, adaptados a las condiciones de la roca, utilizando pernos, malla, shotcrete (hormigón proyectado), marcos u otros elementos de refuerzo según sea necesario. Estos sostenimientos aseguran que la infraestructura sea segura antes de comenzar las voladuras de producción, garantizando la estabilidad de las excavaciones subterráneas.

4. Diseño de malla de perforación y secuencia de voladura: Este proceso constituye el corazón del método de taladros largos. En esta fase, se proyectan los taladros de producción desde los subniveles superiores hacia el espacio donde se encuentra el bloque de mineral a remover. Los taladros suelen tener diámetros de 2 a 4 pulgadas (50–105 mm) y se disponen generalmente en abanicos o anillos en el plano vertical del cuerpo mineral. La densidad de taladros (es decir, el burden y el espaciamiento) se calcula considerando la dureza de la roca y la fragmentación deseada. Por ejemplo, en vetas angostas, se puede diseñar un abanico de aproximadamente 8 taladros convergentes en el mineral, con un burden de ~1.0 m, con el fin de minimizar la sobrerotura de las paredes. Un elemento crítico en este diseño es la creación de un slot o apertura inicial, dado que los métodos de taladros largos requieren un espacio vacío al que expandir el primer disparo. Esta abertura inicial se genera dentro del bloque

mineral y existen varios métodos para su creación: perforar y volar un raise piloto (chimenea lanzada) desde arriba, emplear un equipo raise borer para perforar un pozo, o realizar un minado con plataforma (Alimak) para cortar manualmente una ranura vertical. Esta abertura inicial se ubica típicamente en un extremo del tajo. Una vez creada la abertura, se define la secuencia de voladura. El proceso usual es volar en cortes verticales por filas de taladros, comenzando desde el slot hacia el lado opuesto del tajo. Cada voladura arranca una rebanada de mineral que cae hacia la base del tajo, lo que permite una extracción eficiente del material. La secuencia de voladura incluye retardos escalonados cuidadosamente para asegurar que la rotura progrese de manera ordenada y evitar choques. Los diagramas comunes de secuencia de voladura contemplan disparar primero los taladros más cercanos al slot y luego, de manera progresiva, los más lejanos, con microsegundos de diferencia entre disparos para un control preciso de la voladura.

5. Operación de voladura, ventilación y extracción: Una vez ejecutadas las voladuras según la secuencia diseñada, se procede a ventilar la labor para evacuar los gases generados durante el proceso de voladura. En la minería subterránea, la ventilación es obligatoria inmediatamente después de cada disparo antes de que los trabajadores ingresen a remover el mineral. Esto se logra utilizando ductos y ventiladores auxiliares en el tajo, lo que garantiza un ambiente seguro para las labores. Luego, se realiza

la extracción del mineral fracturado, también conocida como mucking. En el caso del método de taladros largos, la extracción se lleva a cabo desde el nivel inferior. Para ello, se emplean equipos LHD (Load-Haul-Dump) o scooptrams, que ingresan a los puntos de extracción para recoger el material acumulado y transportarlo. Este material puede ser llevado a un chute, una tolva o directamente por la rampa hacia la superficie. Es crucial sincronizar el ritmo de extracción con las voladuras para mantener una producción continua. En algunos casos, en grandes tajos, se alterna el proceso de voladura y limpieza en diferentes secciones del tajo para evitar interrupciones en la producción. Además, si la altura del banco es muy grande, puede ser necesario realizar fragmentación secundaria de algunos bloques sobredimensionados antes de proceder con la carga. Esta fragmentación secundaria se puede realizar utilizando martillos picadores o realizando pequeñas voladuras secundarias para reducir el tamaño del mineral y facilitar su manejo.

6. Sostenimiento y relleno post-voladura: A medida que avanza el vaciado del tajo, es fundamental monitorear la estabilidad de las paredes expuestas. Si se detectan signos de inestabilidad, como caídas de rocas o grietas, se instala sostenimiento adicional para garantizar la seguridad. Esto puede incluir el uso de pernos más largos o cables de anclaje en los subniveles o en los contornos accesibles de la excavación. En muchos casos, una vez que se ha retirado una porción significativa del mineral, se procede a rellenar

el hueco con material estéril o relaves mezclados con cemento (conocido como backfill en pasta). El relleno se coloca de forma continua o en etapas durante el proceso de explotación. Esto es especialmente relevante en variantes como el método Avoca o Bench-and-fill, donde se alternan fases de minado y relleno para proporcionar soporte a las paredes y permitir la extracción segura de los tajos adyacentes. Un procedimiento común es rellenar el stope desde el nivel inferior mediante ventanas o chimeneas a medida que se completan ciertos cortes. Este relleno se mantiene con un talud de relleno de aproximadamente 45° , que sirve como piso de trabajo para perforar la siguiente rebanada de mineral. Este método ha sido implementado en diversas minas, como la mina Austria Duvaz, bajo el nombre de bench and fill, donde se combinan voladuras por taladros largos con relleno inmediato para controlar la dilución y sostener el terreno durante la explotación.

7. Repetición del ciclo y cierre: El proceso de perforación, voladura, ventilación, extracción y relleno se repite cíclicamente subnivel por subnivel hasta que se haya explotado todo el panel o sector planificado del yacimiento. Al concluir la extracción, los rellenos consolidados ocupan el vacío dejado por la extracción. En caso de no haber sido relleno, se aíslan las cavidades resultantes conforme a las normativas de seguridad, lo cual puede incluir la construcción de muros o tapones en los accesos para evitar el ingreso futuro a las áreas no explotadas. Finalmente, se realiza una evaluación de los resultados obtenidos en términos de fragmentación lograda,

dilución, cumplimiento de la producción programada, costos, entre otros factores. Esta evaluación permite retroalimentar el diseño de los tajos en operaciones futuras, optimizando el proceso y ajustando las estrategias para mejorar la eficiencia y los resultados de la explotación en los próximos ciclos.

En conclusión, la implementación del método de taladros largos es un proceso integral que abarca desde un cuidadoso diseño técnico hasta una ejecución disciplinada en terreno. Cada paso del proceso desde la dimensión de las distancias de subnivel, pasando por el emplazamiento adecuado del slot, hasta la secuencia de disparos y relleno es crucial para asegurar que el método logre sus objetivos de extracción eficiente y segura del mineral. Las mejores prácticas en la industria recomiendan validar el diseño mediante pruebas piloto, como, por ejemplo, voladuras de prueba en secciones pequeñas, y mantener un monitoreo constante de la estabilidad y la calidad de la fragmentación durante la operación. Este monitoreo permite ajustar parámetros según sea necesario para optimizar el rendimiento y reducir riesgos. Siguiendo estos pasos de manera metódica y ajustando las variables del proceso según las condiciones específicas del yacimiento, el minado por taladros largos puede implementarse con éxito, incluso en escenarios desafiantes, como vetas angostas o profundas, maximizando el rendimiento del yacimiento y contribuyendo al éxito a largo plazo de la operación minera.

1.3.2.6. Factores para su selección

La elección del método de taladros largos para explotar un yacimiento subterráneo depende de diversos factores técnicos, económicos y

operacionales específicos del depósito. Entre los principales criterios de selección se destacan [4], [21]:

- Geometría y buzamiento del yacimiento: El método de taladros largos es especialmente adecuado para cuerpos mineralizados con inclinación pronunciada, generalmente superior a 60° , y con cierta continuidad vertical. Un buzamiento alto permite que el material roto caiga por gravedad, lo que facilita la extracción y elimina la necesidad de arrastrar manualmente el mineral. Este método aprovecha la inclinación para mejorar la eficiencia en la remoción del mineral. En contraste, en depósitos horizontales o con baja pendiente, métodos como cámaras y pilares o longwall son más apropiados, ya que permiten una extracción más controlada y adaptada a la geometría del yacimiento. El espesor del cuerpo mineral también juega un papel clave en la selección del método. El método de taladros largos es ideal para vetas o mantos de espesor moderado a grande, típicamente desde 1.5-2 metros hasta decenas de metros. Sin embargo, en vetas extremadamente estrechas (menos de 1 metro), puede haber dificultades para implementar abanicos de tiros sin incluir demasiada roca estéril. A pesar de estas limitaciones, existen adaptaciones mecanizadas para trabajar en vetas angostas, como el uso de equipos más estrechos y la realización de disparos en corte zigzag, lo que permite mantener un control más preciso de la extracción y minimizar la dilución del mineral.

- **Calidad del macizo rocoso:** La competencia de la roca encajonante es un factor crítico para la implementación del método de taladros largos. Este método requiere paredes y techos estables durante el proceso de explotación, ya que se generan cavidades grandes. Idealmente, el macizo rocoso debe ser de calidad media a buena, con un RMR (Rock Mass Rating) superior a 50 (Clase II o III), lo que garantiza que el macizo pueda sostener vanos amplios sin que se produzca un colapso inmediato. En rocas muy fracturadas o débiles (con un RMR bajo, de Clase IV-V), el riesgo de derumbes es alto si se abren cámaras grandes, lo que hace que el método de taladros largos sea menos adecuado. En estos casos, se inclina la balanza hacia métodos que impliquen relleno inmediato o sostenimiento intensivo, como el corte y relleno convencional. No obstante, incluso en rocas de calidad moderada, es posible optar por el método de taladros largos si se incorpora relleno cementado tras cada etapa de explotación, lo que ayuda a garantizar la estabilidad del terreno. Además, la regularidad estructural del yacimiento es relevante. Yacimientos con contactos muy irregulares dificultan el control de la voladura y tienden a aumentar la dilución del mineral, lo que hace menos atractivo este método. Lo ideal es contar con un cuerpo mineral de contornos relativamente uniformes, lo que facilita el diseño y la ejecución de las voladuras y mejora la eficiencia de la extracción.
- **Ley del mineral y selectividad requerida:** La ley del mineral y la selectividad son factores determinantes en la elección del método

de explotación. Si el depósito es de alta ley en un entorno con ganga estéril de muy baja ley, puede ser preferible optar por un método altamente selectivo para evitar la dilución del mineral. Métodos como el minado resue o el corte y relleno manual son más adecuados en estos casos, ya que permiten extraer el mineral con mayor precisión y sin mezclarlo con material estéril. Por otro lado, si la ley del mineral es media y el depósito tolera cierta dilución, o si la distribución del mineral es relativamente homogénea, el método de taladros largos se vuelve una opción viable. En este caso, se pueden aprovechar las economías de escala del método, permitiendo una extracción más eficiente y rentable. Un ejemplo relevante es el de vetas de oro de alta ley en Perú, donde algunas empresas han migrado de métodos manuales a taladros largos mecanizados buscando mayor productividad, pero controlando la dilución mediante mejores diseños de malla para evitar la pérdida de valor en el mineral extraído. Esto demuestra cómo la relación entre ley del mineral y dilución esperada es un factor clave en la selección del método. Se calcula la ley diluida resultante, y si la ley aún se mantiene dentro de los márgenes económicos rentables, el método de taladros largos se considera adecuado para la explotación.

- **Tamaño y producción necesaria:** El método de taladros largos es más adecuado para proyectos que requieren altos tonelajes diarios o mensuales de mineral. Para operaciones que buscan producir más de 1000 toneladas/día de producción subterránea, este

método es particularmente conveniente, ya que permite una extracción masiva y eficiente. En estos casos, se prefieren métodos masivos como el sublevel stoping o el sublevel caving, que son ideales para grandes volúmenes de material. Por otro lado, en operaciones de pequeña minería, que producen decenas de toneladas al día, el uso de taladros largos generalmente no está justificado debido a la alta inversión inicial y los costos operativos asociados. Sin embargo, puede ser viable en casos donde se busque introducir mejoras tecnológicas que optimicen la productividad a largo plazo.

- Disponibilidad de equipo y experiencia tecnológica: La decisión de adoptar el método de taladros largos también depende de los recursos disponibles y de la capacidad técnica de la empresa. Implementar este método requiere perforadoras de largo alcance, personal capacitado en el diseño de voladuras masivas, así como una logística adecuada para el manejo de explosivos y ventilación. Si la empresa ya cuenta con esta experiencia tecnológica o tiene la posibilidad de adquirirla, puede proceder a implementar el método de taladros largos. Sin embargo, si la experiencia y los recursos no están disponibles, la curva de aprendizaje y los costos de capacitación podrían hacer que métodos tradicionales sean una opción más viable a corto plazo. En muchos casos, las minas en Perú han comenzado a incursionar en el método de taladros largos mediante la incorporación de asesores especializados y la realización de pruebas piloto en un tajo representativo. Esta

estrategia permite evaluar la viabilidad del método en condiciones reales de operación antes de generalizar su implementación a gran escala, minimizando riesgos y asegurando que el equipo y la tecnología estén alineados con los requerimientos del yacimiento.

- Seguridad y consideraciones ambientales: Aunque el método de taladros largos reduce la exposición directa del personal al frente de trabajo, conlleva ciertos riesgos adicionales. Estos incluyen voladuras de gran tamaño, el potencial de vibraciones sísmicas que pueden afectar las labores cercanas o incluso la superficie, y la generación de mayores volúmenes de gases tóxicos durante cada evento de voladura. Si la mina está ubicada cerca de poblaciones o estructuras sensibles, el uso de voladuras masivas podría verse limitado por consideraciones de vibración o ruido, lo que podría afectar la viabilidad del método en ciertas áreas. Desde una perspectiva ambiental, el hecho de extraer más mineral más rápidamente genera más relaves y desmonte en un periodo de tiempo más corto, lo que requiere una planificación adecuada de los depósitos de residuos. La correcta gestión de estos materiales es esencial para minimizar el impacto ambiental y cumplir con las regulaciones vigentes. Además, las regulaciones y permisos gubernamentales son un factor clave en la adopción de este método. En Perú, por ejemplo, se exige que la metodología de explotación propuesta esté incluida en el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y en el Plan de Minado aprobado por la autoridad competente. Si algunas técnicas, como el sublevel caving, no son

aprobadas debido a su impacto ambiental, el uso de taladros largos con relleno podría ser preferido para minimizar hundimientos y controlar el impacto de la extracción, ya que el relleno ayuda a estabilizar las cavidades y reducir los riesgos de subsidencia.

1.3.2.7. Comparativo con otros métodos

En la minería subterránea existe una gama de métodos de explotación, cada uno con ventajas y limitaciones. El método de taladros largos se compara principalmente con otros métodos aplicables a vetas o cuerpos de geometría similar, tales como el corte y relleno (cut and fill), el shrinkage stoping (método de rebaje por relleno autosoportado), métodos de cámaras y pilares, e incluso con métodos de hundimiento (block caving, sublevel caving) en contextos distintos. A continuación, se realiza un comparativo de taladros largos frente a estos métodos clave [22]:

- Frente a Corte y Relleno Ascendente: El corte y relleno es un método tradicional utilizado principalmente para vetas angostas y de alta ley, donde se minan cortes horizontales de cierta altura (típicamente entre 2 y 4 metros) y el espacio vacío resultante se rellena para servir de piso al siguiente corte superior. Este método es altamente selectivo y ofrece un buen control, ya que permite seguir fielmente la veta, extraer casi exclusivamente mineral, y mantener el techo siempre sostenido con el relleno. Es especialmente adecuado para rocas débiles o altamente fracturadas, ya que asegura la estabilidad de la labor subterránea. Sin embargo, el corte y relleno tiene ciertas desventajas: es un proceso lento y costoso en términos de mano de obra, lo que limita

la producción y hace que el avance sea relativamente bajo. La necesidad de realizar rellenos frecuentes también restringe el ritmo de trabajo. En comparación, el método de taladros largos logra una productividad mucho mayor, ya que permite extraer grandes volúmenes de mineral en una sola voladura, con menos intervención humana directa. Esto resulta en mayores tasas de producción y reducción de costos operativos, lo que lo convierte en una opción más eficiente para yacimientos más grandes y cuando se requieren altos volúmenes de extracción.

- Frente a Shrinkage (rebaje por contracción): El método shrinkage, utilizado históricamente en vetas empinadas, implica realizar voladuras escalonadas desde abajo hacia arriba, dejando que el mineral roto se acumule en la propia labor para dar soporte a las paredes, y luego retirarlo parcialmente (se “encoge”) hasta completar el rebaje. Este método permite explotar cuerpos verticales y relativamente continuos, similar a los taladros largos, pero presenta varias desventajas significativas. En primer lugar, requiere que los mineros ingresen sobre el material fragmentado entre las voladuras, lo que los expone a entornos inseguros. Además, la ventilación y el desplazamiento sobre rocas sueltas en el tajo son complicados, lo que aumenta el riesgo de accidentes. En términos de productividad, el método shrinkage tiende a ser más lento debido a que parte del mineral se deja in situ hasta que se completa el rebaje del bloque, y la fragmentación por voladuras cortas puede ser menos eficiente en comparación con otros

métodos. Por otro lado, el método de taladros largos permite retirar el mineral casi inmediatamente después de cada voladura y operar a distancia, sin necesidad de que el personal esté dentro del tajo durante la voladura. Esto mejora la seguridad y aumenta la productividad. Además, el control de la dilución en shrinkage puede ser difícil una vez que el vacío se llena de escombros, mientras que en taladros largos, la secuencia de disparos y los rellenos parciales proporcionan un mejor control sobre la dilución y la recuperación del mineral. Por estas razones, el método shrinkage ha caído en desuso en la minería moderna a gran escala, siendo sustituido por taladros largos o variantes mecanizadas en muchas minas. Sin embargo, aún subsiste en algunas operaciones pequeñas donde la simplicidad y los bajos costos iniciales son una prioridad, y se acepta comprometer la seguridad en favor de estos factores.

- Frente a Hundimientos (Sublevel Caving y Block Caving): Los métodos de hundimiento comparten con los taladros largos la idea de extracción masiva, pero difieren en cuanto al control sobre el proceso. En los métodos de hundimiento, se permite e incluso se induce el colapso del estéril hacia el espacio minado (lo que implica derrumbes controlados de la caja techo). Sublevel Caving (hundimiento por subniveles) es una variante del sublevel stoping. Ambos métodos usan subniveles para perforar y volar, pero en el sublevel caving, no se deja el hueco abierto ni se rellena el vacío. En su lugar, se permite que la roca de caja caiga y rellene el vacío a medida que se extrae el mineral. Sin embargo, este proceso

genera mucha mayor dilución, ya que el material estéril se mezcla con el mineral y se extrae junto con él. Por su parte, el block caving (hundimiento por bloques) es un método masivo utilizado en yacimientos grandes y enormes, donde se socava la base del bloque y se fragmenta todo el macizo por gravedad. Este método es incompatible con vetas angostas, ya que requiere dimensiones grandes para ser efectivo y pierde toda selectividad. La falta de control sobre la fragmentación en este método lo hace menos adecuado para yacimientos más pequeños o vetas de alta ley. En comparación con sublevel caving, el método de taladros largos ocupa un punto intermedio entre los métodos altamente selectivos (como corte y relleno) y los métodos de hundimiento totalmente masivos. Los taladros largos tienen menos dilución y mayor recuperación de ley, pero tienden a lograr una menor tasa de producción en yacimientos enormes. Además, requiere más sostenimiento activo en las excavaciones subterráneas. Una ventaja del sublevel caving es que permite explotar rocas más pobres económicamente, pero su impacto superficial, como los hundimientos en la superficie, y la alta dilución son elevados. En el caso de un proyecto como Veta Mary, que es de tamaño moderado y tiene mineralización de veta, un método de hundimiento como sublevel caving sería inapropiado debido a la escala y la probable cercanía a otras estructuras subterráneas. En cambio, el método de taladros largos, con control de relleno, resulta ser una opción

más razonable para extraer el mineral de manera eficiente sin comprometer significativamente la ley del mineral.

1.4. Formulación de los problemas

1.4.1. Problema general

¿De qué manera la propuesta de minado por taladros largos influye en la explotación del proyecto Veta Mary – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022?

1.4.2. Problemas específicos

- ¿De qué manera la propuesta de minado por taladros largos influye en la extracción de minerales – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022?
- ¿De qué manera la propuesta de minado por taladros largos influye en los costos operativos – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022?
- ¿De qué manera la propuesta de minado por taladros largos influye en la rentabilidad económica – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022?

1.5. Justificación

Justificación teórica. La introducción de técnicas vanguardistas como la perforación con taladros largos supone un avance relevante en la ingeniería de minas, sobre todo para la explotación de vetas estrechas. Este enfoque se sustenta en investigaciones previas que avalan su capacidad para incrementar la productividad y disminuir los costos operativos, factores esenciales en la minería contemporánea. Su fundamento teórico reside en la optimización de la perforación y la tronadura, cuyo manejo eficiente permite extraer mejor los yacimientos. Asimismo, enriquece la comprensión sobre el uso de taladros

largos en condiciones geomecánicas complejas, contribuyendo al perfeccionamiento de las prácticas de explotación.

Justificación práctica. En términos operativos, la aplicación de taladros largos en la Veta Mary supone un avance notable para la Compañía Minera Buenaventura S.A.A. Este sistema agiliza todo el ciclo de extracción al acortar los plazos de perforación y tronadura, traducándose en mayores ritmos de producción y una disminución del costo unitario de cada tonelada extraída. Además de elevar la capacidad diaria, reduce la dilución del mineral y eleva la calidad del material recuperado, elementos clave para la rentabilidad y continuidad del yacimiento.

Justificación por conveniencia. La adopción de este método de extracción no solo potencia la competitividad y la eficiencia de la compañía, sino que también brinda al investigador la posibilidad de diseñar y validar nuevas técnicas en el ámbito minero. Este trabajo abre la puerta a desarrollar líneas de investigación innovadoras, transferibles a variados entornos geológicos, favoreciendo tanto el crecimiento profesional del investigador como la evolución constante del sector minero nacional.

Justificación económica. Desde un punto de vista económico, la propuesta promete una significativa reducción en los costos operacionales al incrementar la eficiencia en el proceso de perforación y voladura. La disminución de los costos por tonelada, junto con el aumento en la producción, puede resultar en una rentabilidad mayor para la Compañía Minera Buenaventura S.A.A. A largo plazo, esto podría traducirse en un mayor retorno de la inversión y una mejora en la competitividad de la empresa en el mercado internacional.

Justificación técnica. Técnicamente, la propuesta representa una innovación significativa en el uso de tecnologías de perforación avanzada, como los taladros

largos. Esta técnica permite una perforación más precisa y eficiente en vetas angostas, lo que optimiza la extracción del mineral y reduce los impactos negativos en la estabilidad del macizo rocoso. Además, el control detallado de los parámetros de perforación y voladura contribuye a una mayor seguridad y un mejor rendimiento en las operaciones mineras

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Determinar si la propuesta de minado por taladros largos influye en la explotación del proyecto Veta Mary – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022.

1.6.2. Objetivos específicos

- Determinar si la propuesta de minado por taladros largos influye en la extracción de minerales – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022.
- Determinar si la propuesta de minado por taladros largos influye en los costos operativos – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022.
- Determinar si la propuesta de minado por taladros largos influye en la rentabilidad económica – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022.

1.7. Hipótesis

1.7.1. Hipótesis general

La propuesta de minado por taladros largos mejora la explotación del proyecto Veta Mary – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022.

1.7.2. Hipótesis específica

- La propuesta de minado por taladros largos mejora la extracción de minerales – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022.

- La propuesta de minado por taladros largos reduce los costos operativos – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022.
- propuesta de minado por taladros largos mejora la rentabilidad económica – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022.



II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

2.1. Tipo de investigación

El enfoque **cuantitativo** privilegia la obtención y tratamiento de datos numéricos con el fin de contrastar hipótesis o teorías predefinidas. Se distingue por su rigor y objetividad, apoyándose en técnicas estadísticas para cuantificar fenómenos y detectar tendencias. Mediante procedimientos matemáticos, este enfoque permite establecer relaciones causales y extrapolar hallazgos a partir de muestras representativas de la población. Es especialmente idóneo para investigaciones que buscan describir o explicar fenómenos mediante mediciones precisas de variables [23].

2.2. Tipo de investigación

La investigación **aplicada** se distingue por su carácter práctico y su orientación a la solución de problemas concretos en entornos reales. En lugar de enfocarse únicamente en el desarrollo teórico, este tipo de estudio busca elaborar recomendaciones o respuestas precisas basadas en el conocimiento generado. Posee un alto valor instrumental, pues implementa directamente modelos y conceptos en situaciones reales, con el fin de influir en la práctica profesional o en la toma de decisiones en diferentes ámbitos como la ingeniería [24].

2.3. Nivel de investigación

El nivel **descriptivo** en una investigación persigue documentar con detalle las características y atributos de los fenómenos tal como se presentan, sin alterar ninguna variable. Este tipo de estudio funciona como una “instantánea” de la realidad en un instante específico, ofreciendo una visión objetiva y minuciosa del

objeto de estudio. En lugar de indagar causas, su propósito es brindar un panorama claro y completo de las particularidades de un grupo, evento o fenómeno, tal como ocurre en censos o estudios de mercado [25].

2.4. Diseño de investigación

El diseño **no experimental** se caracteriza porque el investigador no interviene sobre las variables, limitándose a observarlas en su contexto natural. Se emplea cuando no es viable o ético manipular factores. Dentro de este esquema destacan los estudios descriptivos, que documentan el fenómeno sin influir en él. Si bien no permiten probar causalidad directa, resultan útiles para descubrir patrones y formular hipótesis que luego podrían validarse mediante métodos experimentales. Asimismo, su valor es especialmente alto en investigaciones de campo, donde el ambiente real es fundamental para el análisis [26].

2.5. Población y muestra

2.5.1. Población

En investigación, la población se refiere al conjunto de unidades (personas, eventos, objetos, etc.) sobre las cuales se desea hacer inferencias. Dependiendo de los objetivos del estudio, la población puede ser finita o infinita [27]. La población estará conformada por todas las vetas de las minas pertenecientes a Cía. Minera Buenaventura S.A.A., en el año 2022.

2.5.2. Muestra

La muestra es un subgrupo de la población que se selecciona para participar en el estudio, con el objetivo de que sus características sean representativas del grupo total. La selección de la muestra se realiza

mediante técnicas de muestreo, y su tamaño debe ser suficiente para garantizar la representatividad y la fiabilidad de los resultados [27]. La muestra estará constituida por la Veta Mary del Nivel 610 de la Mina Julcani, en el año 2022.

2.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

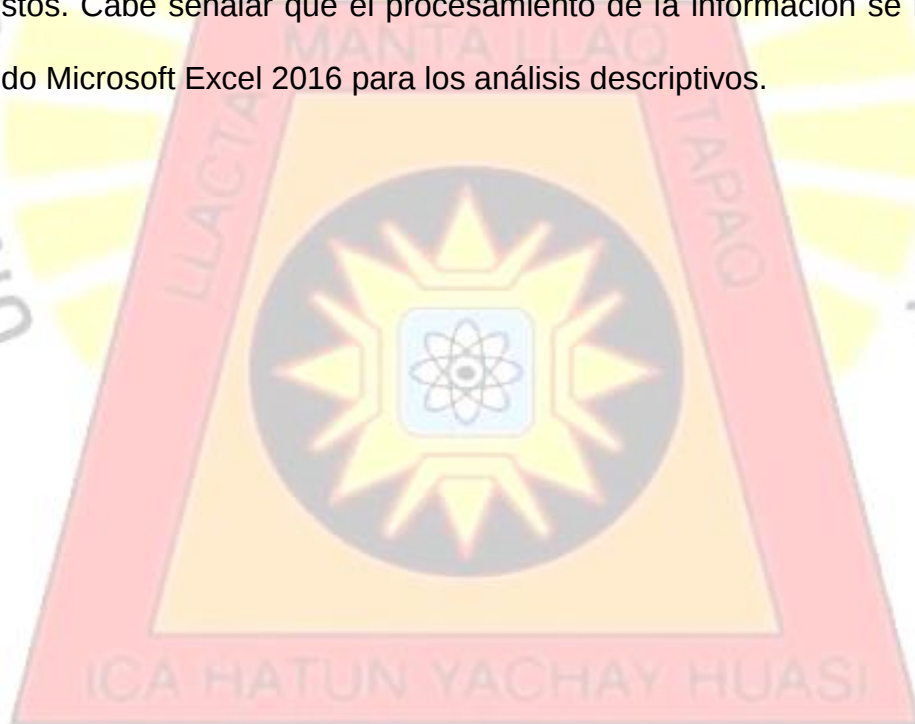
La **observación** constituye un método de obtención de datos en el que el investigador se inserta directamente en el escenario de estudio para anotar comportamientos, interacciones y fenómenos tal como suceden de forma espontánea. Es especialmente valiosa para desentrañar dinámicas sociales, culturales o conductuales en su entorno natural. Según el grado de involucramiento, puede distinguirse entre observación participante cuando el investigador toma parte activa en la situación y observación no participante, en la que permanece como espectador [28]. Finalmente, El **análisis documental** consiste en examinar y valorar fuentes escritas como informes, artículos académicos, libros o archivos para extraer datos pertinentes al estudio. Este procedimiento resulta especialmente valioso en investigaciones de carácter comparativo, ya que facilita la obtención de información sobre fenómenos pasados o sobre las corrientes de pensamiento existentes en un campo específico [29].

Se usarán **las fichas** de autoría propia que son herramientas para captar y sistematizar datos en investigaciones, permitiendo anotar y estructurar información clave obtenida de múltiples orígenes. Las fichas serán las obtenidas del resumen de los reportes e informes de diseño de minado por taladros largos.

2.7. Técnicas de análisis e interpretación de datos

La técnica de análisis e interpretación de datos engloba los métodos y procedimientos empleados para ordenar, transformar y examinar la información obtenida en el estudio, con el fin de extraer conclusiones y dar respuesta a las interrogantes de investigación. Este proceso resulta esencial para convertir los datos sin procesar en conocimientos valiosos y aplicables.

A continuación de la recolección de datos con los instrumentos mencionados, se procederá a clasificar la información recopilada y a ordenarla conforme a los indicadores establecidos. Posteriormente, dichos datos se someterán a análisis estadístico y se presentarán en tablas y gráficas acorde con los objetivos propuestos. Cabe señalar que el procesamiento de la información se realizará utilizando Microsoft Excel 2016 para los análisis descriptivos.



III. RESULTADOS

Mina Julcani de Compañía de minas Buenaventura S.A.A. actualmente realiza la explotación de minerales con el método “Corte y relleno convencional”. A solicitud de Compañía de minas Buenaventura S.A.A. se desarrolla la evaluación económica de poder aplicar en su operación la explotación con el método BAF y de esta forma realizar un minado seguro, de bajo costo y alta productividad.

3.1. Análisis geológico

Mineralogía: La Veta María Lizbeth es un ramal que forma parte de la Veta María Jesús y presenta características mineralógicas significativamente diferentes de otras vetas cercanas como Magdalena, María Jesús y Cecilia. Está compuesta principalmente por cuarzo blanco drúsico, con venillas de tetraedrita, parches de calcopirita, bandas de wolframita y bismutinita. Estas características minerales indican una variabilidad en la composición de la veta en comparación con otras estructuras cercanas.

Litología: La Veta María Lizbeth está emplazada en lavas dacíticas, lo que sugiere una asociación geológica con formaciones volcánicas que favorecen la presencia de ciertos minerales.

Descripción: Esta veta es ligeramente irregular, con ramales que se extienden hacia el piso de la veta. A nivel estructural, presenta una inflexión en la Chimenea 869, a partir de la cual cambia de rumbo: hacia el oeste, el rumbo es N85°W, mientras que hacia el este, el rumbo es N75°E. En términos generales, su tendencia es de este a oeste.

Buzamiento: El buzamiento de la Veta María Lizbeth es ligeramente variable, pero en promedio tiene un ángulo de 80° al sur, lo que indica una inclinación

hacia el sur, característica importante para la planificación de la explotación minera en la zona.

Tabla 1.
Reservas de la Veta Mary

BLOCK	t	A.D.	oz/t Au	oz/t Ag	%Pb	%Cu	%Zn	AgEq
Block 4	1,568	0.8	0.17	27.03	0.02	1.74	0.13	28.56
Block 7	1,248	0.8	0.12	20.52	0.36	2.69	0.00	22.45
Block 107	468	0.8	0.12	20.52	0.36	2.69	0.00	22.45
Block 8	337	0.8	0.01	19.25	2.59	0.65	0.00	21.86
Block 6	563	0.8	0.01	20.76	0.15	1.25	0.00	21.42
TOTAL	4,184	0.8	0.11	22.89	0.38	1.98	0.00	24.55

3.2. Análisis geomecánico

Evaluación geomecánica de la zona de Acchilla:

La zona de Acchilla presenta variabilidad litológica y estructural tanto en sección como en planta, lo que requiere un análisis detallado de las características geológicas y geomecánicas de las estructuras presentes para la elección del método de explotación más adecuado.

La evaluación geomecánica indica que existe la posibilidad de aplicar el método de SLS (Sublevel Stoping) con su variante bench and fill, adaptándolo según las condiciones específicas de cada estructura, como la calidad de roca y la inclinación del yacimiento. Este método es adecuado para extraer mineral de forma eficiente y segura, especialmente cuando las condiciones geomecánicas permiten el uso de bancos de voladura con relleno posterior.

Estructuras favorables para el método Bench and Fill:

Las estructuras más favorables para la aplicación del método bench and fill son aquellas que se encuentran emplazadas en lavas dacíticas levemente alteradas, como es el caso de la Veta María Lizbeth (Mary) y María Jesús Piso 1. Estas vetas muestran características geológicas y geomecánicas adecuadas, como un

buen buzamiento y competencia del macizo rocoso, que permiten la utilización del método sin necesidad de modificaciones significativas en el dimensionamiento de los bancos de voladura.

Estructura menos favorable:

Por otro lado, la estructura Tilsa 2 presenta condiciones menos favorables para aplicar el método bench and fill tal como está diseñado, debido a su baja calidad de roca o inclinación. En este caso, es necesario hacer un análisis adicional para determinar si es necesario ajustar la dimensión de los bancos o utilizar una variante del método para garantizar la estabilidad y la seguridad de la operación.

Tabla 2.
Resumen tipo roca por veta

NIVEL	MINA	VETA	RMR CAJAS	RMR CORONA
610	Acchilla	Jesús Piso 1		
660	Acchilla	Julcani	III-B y IV-A	IV-A
610	Estela	Maria Lizbeth	III-A y III-B	IV-A

La competencia de las cajas de esta estructura proporciona buenas condiciones para el método de minado mediante el uso de bancadas de mayor altura, lo que favorece la preparación de labores. Esta mayor competencia de roca permite trabajar con voladuras más grandes y una mayor eficiencia en el proceso de extracción, ya que la estabilidad de las paredes se ve garantizada, reduciendo la necesidad de un sostenimiento excesivo.

En cuanto a las condiciones geomecánicas de la estructura, los tipos de roca en las cajas se encuentran en el rango III-A a III-B, lo que indica una roca competente que es adecuada para el uso de métodos más agresivos de extracción, como el sublevel stoping o bench and fill. Esta clasificación refleja

que la roca en las cajas es lo suficientemente fuerte para soportar los trabajos sin comprometer la estabilidad del tajo.

Por otro lado, en la corona de la estructura, la roca se encuentra en el rango IVA, lo que sugiere que la roca en esta área es más débil en comparación con las cajas. Este tipo de roca puede requerir sostenimiento adicional o la implementación de rellenos para garantizar la seguridad de las labores y prevenir riesgos de colapso en la corona.

En resumen, las condiciones geomecánicas de la estructura favorecen el uso de bancadas de mayor altura debido a la competencia de las cajas, mientras que en la corona, es necesario implementar medidas de soporte adicionales para mantener la seguridad durante la extracción.

3.3. Minado

El método de Minado propuesto es el de Bench And Fill con taladros largos para vetas muy angostas como es el caso de la veta Julcani, Consiste en la preparación de subniveles con bancos de 6 a 7 ms de altura, una potencia de minado de 0.80 m. y relleno con material detrítico (Anexo 1).

3.4. Diseño del método de minado

El diseño de la explotación está orientado al uso de taladros largos en una mina con infraestructura convencional, lo que implica que las dimensiones de las labores están adaptadas a los requerimientos de los equipos de perforación y limpieza de bajo perfil. En este caso, la longitud de los bancos es de 6.0 metros, lo cual está diseñado para controlar la desviación en la primera etapa de perforación y voladura. Esta longitud permite asegurar una fragmentación controlada del material y evitar la sobrerotura de la roca, lo cual es crítico para mantener la eficiencia y la calidad en la extracción.

El acceso del personal y el movimiento de materiales como mineral y desmonte se realizará a través de las chimeneas de servicios, las cuales también se utilizarán para la logística e izaje de los equipos necesarios para las labores subterráneas. Esta infraestructura facilita el transporte vertical de los materiales y equipos en las distintas etapas de la operación minera.

En cuanto a la etapa de perforación, limpieza del mineral y desmonte, se utilizarán equipos mecanizados de bajo perfil que podrán desplazarse en una sección de 2.4 m x 2.4 m. Esta sección es adecuada para el perfil bajo de los equipos, lo que les permite operar eficazmente en espacios subterráneos más reducidos. Estos equipos son esenciales para maximizar la eficiencia de las operaciones subterráneas, al tiempo que se minimizan los riesgos asociados a la labor manual.

Los servicios básicos como energía eléctrica, aire y agua se conducirán a través de taladros de 5" de diámetro hasta las cámaras de servicio instaladas en cada subnivel. Esto garantiza que las condiciones operativas en el interior de la mina sean adecuadas para la ejecución de las tareas, proporcionando los recursos necesarios para los equipos y trabajadores.

Finalmente, la extracción del mineral hasta la superficie continuará con los mismos procesos y sistemas de transporte ya establecidos, lo que asegura que el método de explotación subterránea se integre de manera eficiente con la infraestructura de extracción y transporte a superficie. Esto permite mantener un flujo constante de mineral desde las labores subterráneas hacia las instalaciones de procesamiento.

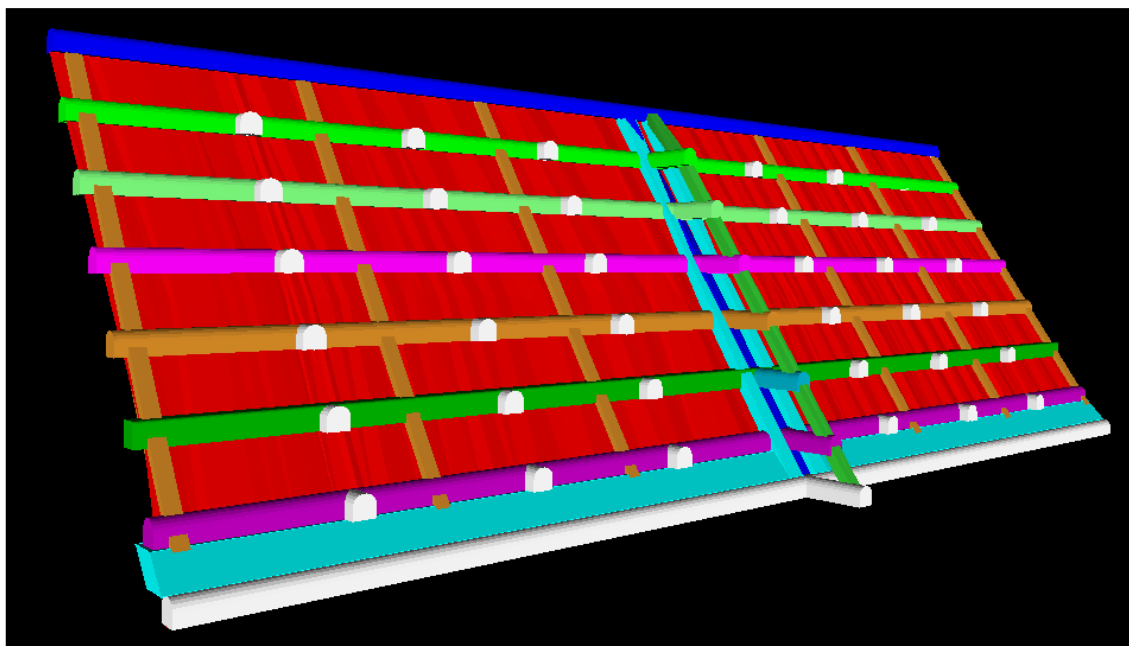


Figura 1. *Perspectiva 3D del diseño de minado*

3.5. Parámetros de diseño

Estos parámetros corresponden a una potencia de minado de 0.80 m., Por tratarse de una veta muy angosta. Las ratios se alejan bastante en comparación con las vetas de mayor potencia, porque se hace esfuerzos similares y se obtiene menor tonelaje de mineral. En el siguiente cuadro se muestran los principales parámetros de diseño aplicando el Bench and Fill (BAF):

Tabla 3.
Parámetros de diseño

DESCRIPCION	UNIDAD	CANT.
Ratio Preparación	tn/m-preparac.	13.82
Ratio Perforación	tn/m-perf.	0.65
Eficiencia Perforación - Voladura	%	90
Rendimiento Equipo Perforación	mts/guardia	50 - 90
Rango de Desviación	%	1.64
Factor de Potencia	Kg/tms	1.52
Rendimiento Equipo Limpieza	tn/hora	10
Produc. Mes desarrollo - preparación	tn/mes	500
Produc. Mes Explotación	tn/mes	1200
Productividad BAF en explotación	tn/tarea	3.33

Ratio Preparación (13.82 tn/m-preparac.): Este parámetro refleja la cantidad de material preparado por unidad de longitud, en toneladas por metro de preparación. Un valor de 13.82 sugiere una carga significativa de material procesado por cada metro de trabajo, lo que indica una alta eficiencia en las actividades previas a la perforación y voladura.

Ratio Perforación (0.65 tn/m-perf.): La ratio de perforación establece la cantidad de toneladas perforadas por metro de perforación, siendo 0.65 toneladas por metro el valor observado. Este dato es crucial para medir la eficiencia de los equipos de perforación en relación con la cantidad de material perforado por cada unidad de trabajo, sugiriendo una perforación moderadamente productiva.

Eficiencia Perforación - Voladura (90%): Este indicador muestra el porcentaje de eficiencia alcanzado en la perforación y voladura. Un 90% refleja una alta eficiencia en las actividades de perforación y voladura, lo que implica que la mayoría de las actividades están optimizadas y bien ejecutadas en términos de control y efectividad.

Rendimiento Equipo Perforación (50 - 90 mts/guardia): El rendimiento de los equipos de perforación está variando entre 50 y 90 metros por guardia, lo que indica una capacidad variable en función de las condiciones operativas. Este rango permite estimar la productividad de las máquinas perforadoras durante cada turno de trabajo.

Rango de Desviación (1.64%): Este parámetro representa el margen de error o variabilidad de la perforación en relación con las metas establecidas. Un valor de 1.64% sugiere que las desviaciones de las perforaciones respecto a los objetivos son relativamente bajas, lo que es indicativo de un control adecuado sobre las operaciones de perforación.

Factor de Potencia (1.52 Kg/tn): Este factor mide la potencia utilizada para extraer una tonelada de material. Un valor de 1.52 kg/tonelada refleja la eficiencia energética utilizada para la extracción, lo que es esencial para la gestión de los recursos energéticos en las operaciones de minería.

Rendimiento Equipo Limpieza (10 tn/hora): El rendimiento de los equipos de limpieza es de 10 toneladas por hora, lo que establece la eficiencia en el proceso de remoción de material de desecho o mineral no útil. Este parámetro es importante para mantener el flujo de trabajo fluido y evitar cuellos de botella en las operaciones.

Producción Mensual Desarrollo - Preparación (500 tn/mes): Este valor indica la cantidad de material preparado y desarrollado mensualmente. Con 500 toneladas al mes, se establece una meta de producción constante en la fase inicial de preparación, fundamental para asegurar el suministro adecuado de material para las siguientes etapas del proceso.

Producción Mensual Explotación (1200 tn/mes): Similar al parámetro anterior, este valor refleja la cantidad de material extraído durante el mes. Un valor de 1200 toneladas por mes resalta la capacidad de extracción del sitio, garantizando un flujo continuo de recursos para los procesos posteriores de tratamiento.

Productividad BAF en Explotación (3.33 tn/tarea): Este parámetro mide la productividad por tarea asignada al equipo BAF). Con una productividad de 3.33 toneladas por tarea, se evalúa la eficiencia operativa relacionada con la voladura y la carga del material extraído.

3.6. Preparación y desarrollo

Para un área de diseño de 150 m de largo x 50 m de cota se requerirá 1,575 m de desarrollo y preparación, De los cuales 1,236 ms (78%) corresponden a

labores en mineral los que se recuperara con la aplicación del circado. El costo de preparación se reduce al obtener mineral en el proceso.

Sección Longitudinal (NV 610 a NV 660): En esta sección longitudinal se observan las bancadas de extracción (denotadas como B1, B2, B3, B4, B5, y B6) distribuidas a lo largo de un corredor. Cada bancada tiene una dimensión de 2.4 x 2.4 metros, lo que es adecuado para el uso de equipos de bajo perfil, como perforadoras y cargadores, que operan en espacios restringidos. Esta disposición permite la ejecución de la perforación y voladura, seguidas por el relleno con material para mantener la estabilidad del terreno. La sección longitudinal también muestra la galería de acceso, que tiene un perfil de 2.4 x 2.4 metros, lo que asegura la circulación de equipos y personal de manera eficiente a lo largo de todo el proyecto minero.

Vista de Planta (NV 610 y NV 660): La vista en planta proporciona una visualización de la distribución de las galerías y los caminos de acceso. Los caminos de servicio tienen un perfil de 1.2 x 1.2 metros, lo cual es adecuado para el transporte de equipos y personal. En la planta se observa también el ore pass (paso de mineral), que facilita la descarga del mineral desde las bancadas superiores hacia las áreas de procesamiento o almacenaje. Además, en la planta se destaca el camino de acceso de equipos, con un perfil de 1.2 x 1.2 metros, lo que optimiza la movilidad de los equipos dentro de la mina.

Sección Transversal A-A': Esta sección transversal detalla el perfil de las bancadas en el método Bench and Fill, donde se observa cómo se extrae el material en una secuencia escalonada. El relleno de cada bancada, representado en la figura como material sombreado, se coloca inmediatamente después de la perforación y voladura. Este material de relleno es crucial para

evitar el colapso de las galerías y garantizar la seguridad de las operaciones mineras. En la sección transversal también se visualiza la pendiente del terreno, que, en este caso, tiene un ángulo pronunciado, lo que resalta la importancia del diseño de las bancadas para mantener la estabilidad y reducir el riesgo de deslizamientos.



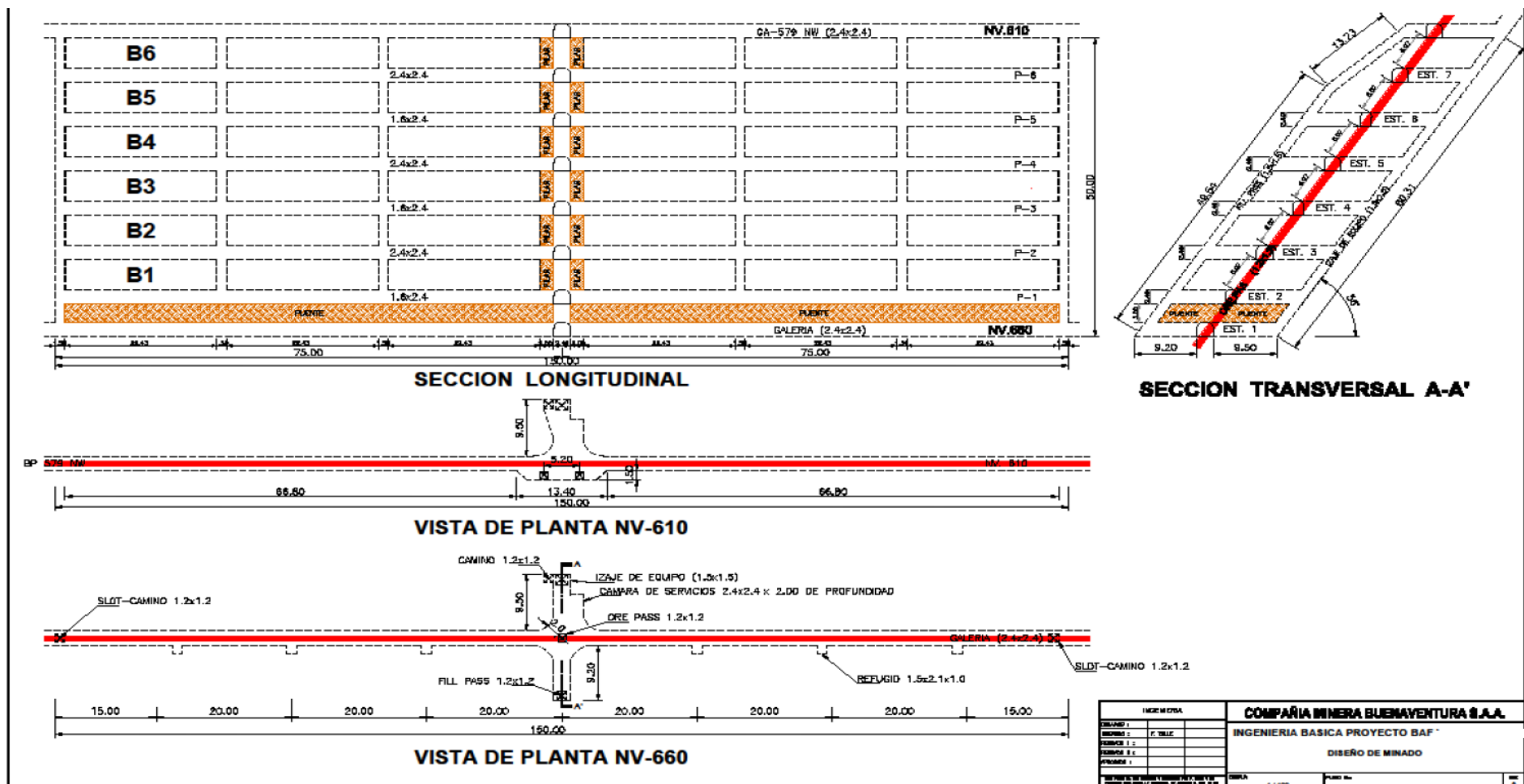


Figura 2. Esquema Preparación y Desarrollo

3.7. Ciclo de minado

3.7.1. Perforación

La calidad de la perforación en minas con vetas angostas, como en el caso de la Unidad de Julcani, es el resultado de un esfuerzo conjunto de todas las áreas involucradas en la operación minera, incluida la seguridad. Es fundamental reconocer que el trabajo del perforista es solo el resultado final de una serie de procesos interrelacionados que influyen en la precisión y eficiencia de la perforación.

En el desarrollo de los subniveles, uno de los aspectos críticos es la adecuada preparación del piso y techo, los cuales deben estar bien controlados para permitir una perforación fluida y sin obstáculos. Un mal estado en estas superficies podría ocasionar atascamientos en la columna de barrenación, lo que afectaría la eficiencia y calidad de la perforación. Para prevenir esto, se emplean planos de perforación detallados que especifican la traza de la estructura, la inclinación y la longitud de los taladros, elementos que permiten un control preciso sobre la ejecución del trabajo.

El rango de desviación permisible en la perforación, en este caso, es de 10 cm sobre una longitud de 6.0 metros, lo que refleja una alta calidad de perforación. Este nivel de precisión es notablemente bueno, considerando las diversas fuentes de error que podrían afectar la precisión de los taladros, tales como el levantamiento topográfico, la interpretación de la estructura geológica, la calidad de la roca, el posicionamiento de los puntos de perforación, y la destreza del operador. Cada uno de estos

factores debe ser cuidadosamente controlado para garantizar que la perforación cumpla con los estándares de calidad y eficiencia requeridos. El equipo utilizado en esta operación es el Nautilus PSA, que ha sido especialmente preparado para trabajar en secciones de 2.4 m x 2.4 m, lo que es adecuado para las condiciones de la mina de Julcani. Este equipo, que se puede desarmar para facilitar su transporte e instalación, tiene la capacidad de ser izado a través de skips o chimeneas de 1.5 m x 1.5 m, lo que garantiza una maniobrabilidad óptima en un entorno subterráneo estrecho. La parte más pesada del equipo es el power pack, que tiene un peso de 2,300 kg, lo que demuestra la robustez de la maquinaria necesaria para operar en estas condiciones. El equipo funciona con barras T-38 de 3 pies, lo que le otorga la flexibilidad y la capacidad de realizar perforaciones precisas en las vetas angostas de la mina.

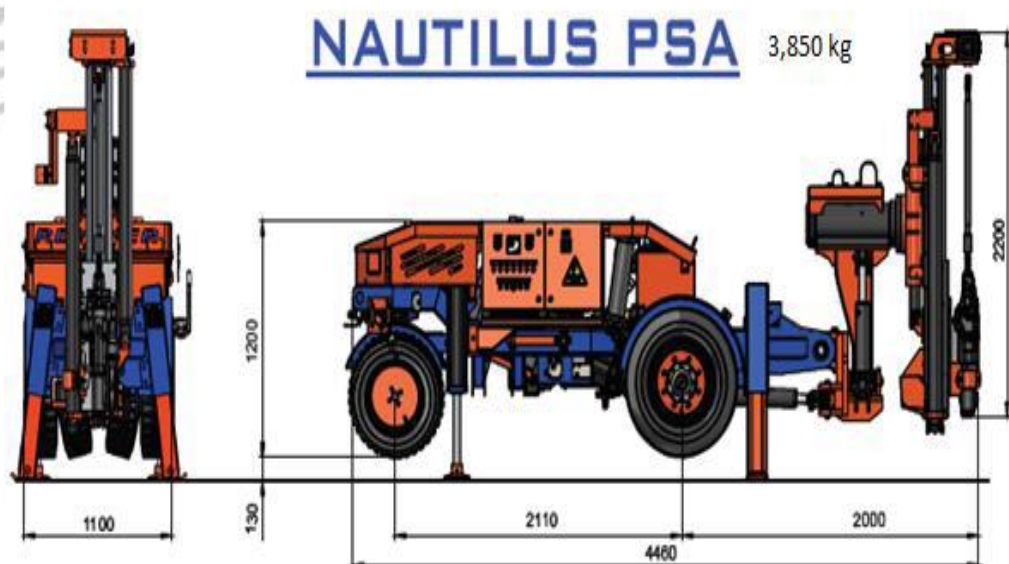


Figura 3. *Equipo de perforación con taladros largos*

Mallas de perforación

El diseño de los bancos de mineral en esta operación está orientado a maximizar la eficiencia y la calidad de la perforación y voladura, adaptándose a las características del terreno y los objetivos de producción. Estos bancos presentan tres caras libres, lo que significa que se disponen en un diseño de extracción donde tres de sus lados están expuestos y disponibles para trabajar. El explosivo se orienta hacia el slot de 0.80 m, lo que optimiza la fragmentación del mineral y facilita su posterior extracción.

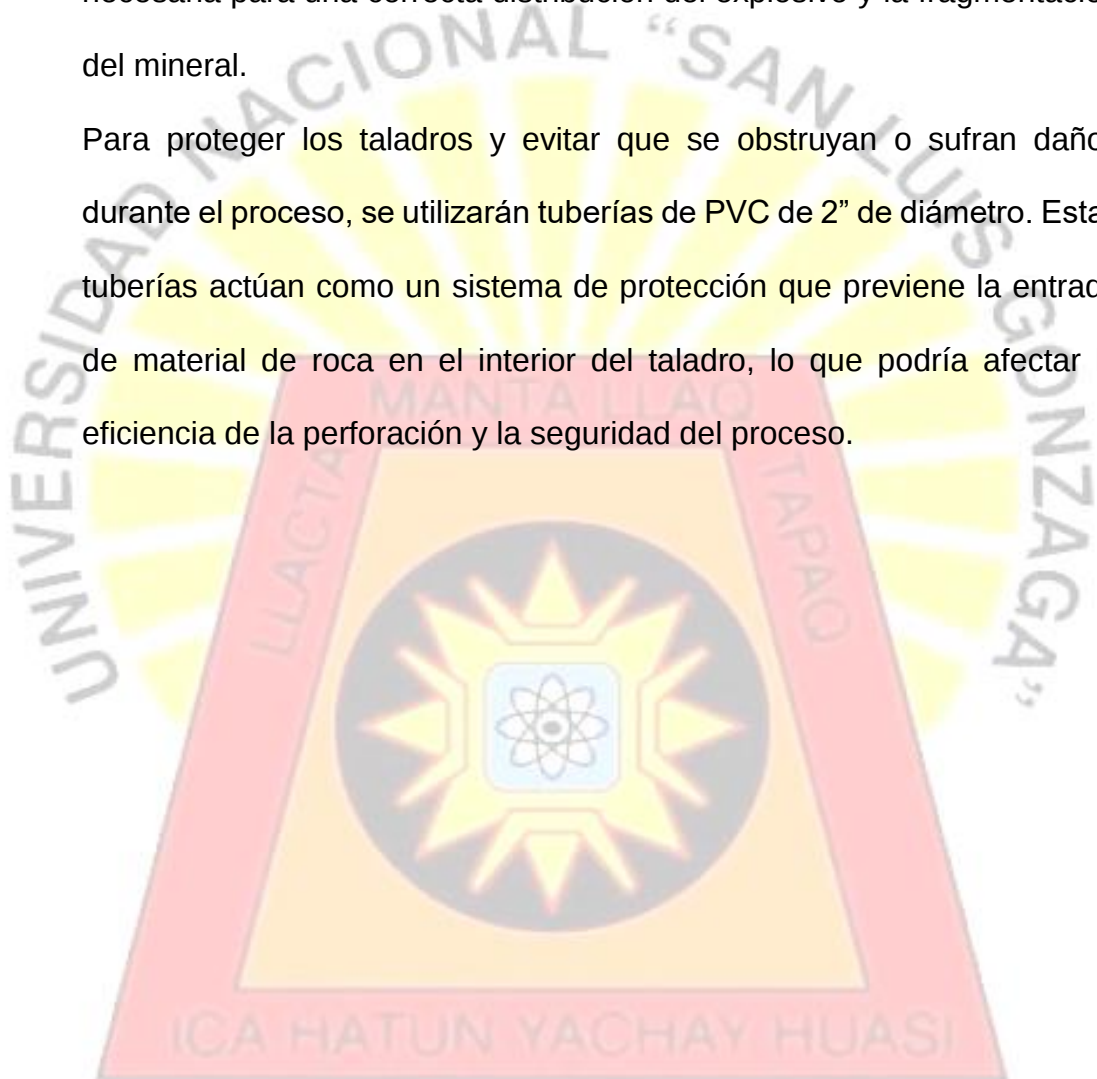
El sistema de perforación que se utilizará es el sistema de taladros en paralelo, con una malla de perforación 2:1. Este patrón de malla implica que el espaciamiento entre los taladros se ajusta a una ratio en el cual la distancia entre los taladros laterales es el doble que la distancia entre los taladros centrales. Esta configuración es ideal para garantizar una distribución uniforme del explosivo y una adecuada fragmentación del mineral.

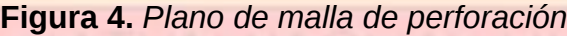
El burden del taladro central se establece en 0.50 m, lo que se refiere a la distancia entre el taladro y el frente de la roca a perforar. Esta distancia es crucial para asegurar que el explosivo se distribuya de manera eficiente y para controlar la fragmentación y las vibraciones generadas durante la voladura. Además, el espaciamiento entre los taladros laterales es de 0.70 m, lo que ayuda a optimizar el uso de los explosivos y mejora la eficiencia del proceso de perforación y voladura.

La ratio de perforación es de 0.65 tms/m-perf, lo que significa que por cada metro de perforación se extraen 0.65 toneladas de mineral, un valor que refleja una tasa de extracción eficiente para las condiciones de la mina.

Dado que la estructura geomecánica es relativamente débil, la desviación máxima permisible se establece en 1.64% respecto a la longitud del taladro, que es de 6.0 m. Esto significa que las desviaciones en la perforación no deben exceder 1.64% de la longitud total del taladro, asegurando así que el proceso de perforación mantenga la precisión necesaria para una correcta distribución del explosivo y la fragmentación del mineral.

Para proteger los taladros y evitar que se obstruyan o sufran daños durante el proceso, se utilizarán tuberías de PVC de 2" de diámetro. Estas tuberías actúan como un sistema de protección que previene la entrada de material de roca en el interior del taladro, lo que podría afectar la eficiencia de la perforación y la seguridad del proceso.





Aceros de perforación

Se utilizarán la columna de barrenación adecuado para un mayor control de la desviación. Se recomienda el uso de las brocas straict rac y/o las brocas retráctiles y el tubo tac, Estos elementos se caracterizan básicamente por su mayor diámetro con respecto a los aceros estándar los que aumentaran rigidez reduciendo la desviación especialmente los primeros metros del taladro, hasta lograr un control de este parámetro.

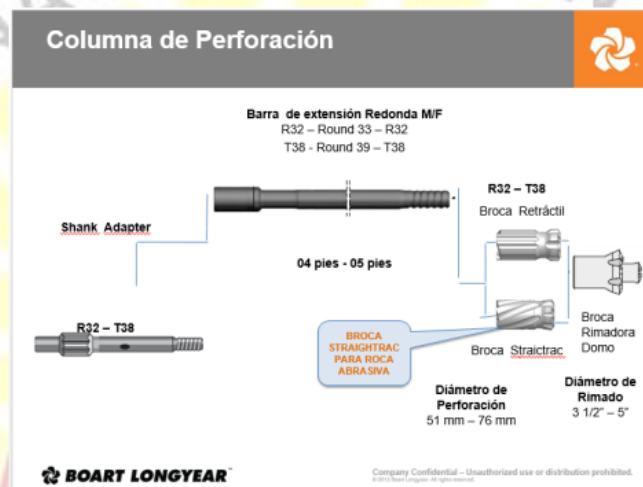


Figura 5. Selección de aceros de perforación Boart Long Year

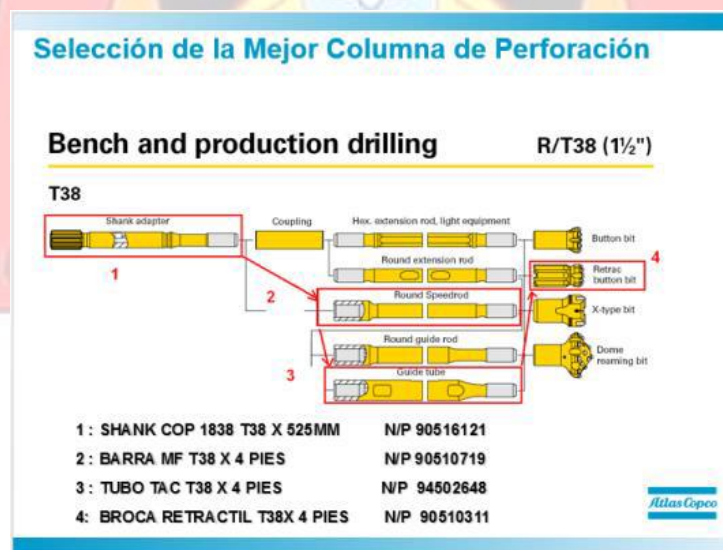


Figura 6. Selección de aceros de perforación Atlas Copco

Tabla 4.
Costos de aceros de perforación

COSTOS ACEROS PERFORACIÓN TALADROS LARGOS (Cortesía Boart Longyear)						
RENDIMIENTO POR TIPO DE ROCA						
DESCRIPCION	SUAVE No abrasiva	MEDIA Abrasive Media	DURA Muy Abrasive	Rendimiento Promedio Mts	(USD / Pieza)	(USD/Metros perforados)
Barra MF T-38 4'	700	450	300	450	233.49	0.52
Broca Retractil S. DC T38 - 64 mm	700	450	300	450	121.61	0.27
Shank S36/T38-038 (380 mm)	3000	2500	2000	2500	158.83	0.06
Rimadora Domo 127mm/T38	500	400	300	450	449.76	0.05
Tubo tac X 4 Pies/T38	700	500	350	500	500.00	0.28
Mantenimiento acero - afilado					1500.00	0.022
Costo Total US\$/Metro Perf.						1.202

Para empezar, la barra MF T-38 4' presenta un costo de 700 USD para rocas suaves, 450 USD para rocas medias y 300 USD para rocas duras. Su rendimiento promedio es de 450 metros de perforación, con un costo de 233.49 USD por pieza. En términos de costo por metro perforado, este equipo tiene un valor de 0.52 USD, lo que lo posiciona como una opción relativamente económica para perforaciones en rocas suaves.

Por otro lado, la broca retráctil S. DC T38 - 64 mm muestra un rendimiento similar con 450 metros de perforación y un costo de 121.61 USD por pieza, tanto en rocas suaves como medias. Sin embargo, su costo por metro perforado es de 0.27 USD, lo que la convierte en una opción más económica que la barra MF T-38 para las mismas condiciones geológicas. El Shank S36/T38-038 (380 mm) se distingue por su rendimiento superior, especialmente en rocas duras, alcanzando un rendimiento de 2500 metros de perforación, con un costo de 158.83 USD por pieza. Aunque su costo inicial es más alto, este equipo es extremadamente eficiente, con un costo por metro perforado de 0.06 USD, lo que lo convierte en una excelente opción para operaciones en formaciones rocosas más duras y difíciles.

La rimadora Domo 127mm/T38, que tiene un costo de 700 USD para rocas suaves y 500 USD para rocas medias, ofrece un rendimiento de 500 metros de perforación, con un costo de 449.76 USD por pieza. Su costo por metro perforado es de 0.28 USD, lo que la hace competitiva en cuanto a costo y eficiencia, especialmente en formaciones medias.

Los tubos tac X 4 pies/T38 presentan un rendimiento más bajo, con 350 metros de perforación, pero siguen siendo efectivos en rocas duras. El costo por pieza es de 500.00 USD, con un costo por metro perforado de 0.28 USD. Este equipo es útil en situaciones donde se requiere perforación en condiciones más difíciles, aunque su rendimiento es menor en comparación con otros equipos.

Finalmente, se considera un costo total por metro perforado de 1.202.

Entonces el costo estimado de perforación es

Depreciación: 1.34 \$/m

Accesorios y afilado: 1.20\$

Personal: 1.78 \$/m

Seguridad, movilidad, otros: 1.07 \$/m

Lo que hacen un total de 5.19 \$/m

Algunas empresas optan por administrar ellos mismos la perforación para reducir los costos por metro perforado llegando fácilmente al 50%. Lo que supone un costo de perforación por tonelada considerando que la empresa especializada factura 11.5 \$/metro-perforado y una ratio de perforación de 0.65 tn/m-perf, sería 16.10 US\$/ton.

3.7.2. Voladura

Es la etapa culminante de este proceso, Todo el trabajo anterior puede perjudicar si no se hace una buena voladura, por lo que se recomienda hacerlo con personal con experiencia que sepa utilizar los siguientes controles: Hoja de carga, Planos de perforación, Factor de potencia, Alturas de los tacos superiores e inferiores para evitar el efecto de cráter hacia los taladros adyacentes.

Dado que no es posible aplicar el Anfo en esta unidad se utilizará como material explosivo el Emulex de 1 ½" x 12". En una primera etapa se trabajará con un factor de potencia de 1.52 Kg/tms lo que deberá reducirse en función a la sobre rotura que se note de las cajas especialmente al techo, para ello la mayor la mayor concentración de carga estará en el taladro central reduciéndose la carga en los taladros laterales que trabajaran al mismo tiempo.

3.7.3. Limpieza

La limpieza del mineral, el desmonte y el relleno de los tajos en la operación subterránea se llevarán a cabo utilizando el scooptram Aramine L130E, un equipo mecanizado de bajo perfil que se operará a distancia mediante control remoto. Este sistema de operación remota mejora la seguridad al minimizar la exposición del operador a las zonas de riesgo, que es especialmente importante en los trabajos subterráneos.

El scooptram Aramine L130E cuenta con una capacidad del cubo de 0.6 m³, un peso total de 4700 kg, y unas dimensiones de 5.4 metros de largo (sin el techo protector), 1.58 metros de alto y 1.0 metro de ancho. Este equipo es adecuado para operar en espacios subterráneos angostos, lo

que lo hace ideal para el trabajo en minas donde la dimensión de las labores es limitada. En cuanto a su rendimiento, el scooptram es capaz de mover entre 10 y 12 toneladas métricas por hora (tms/hora) en gradiente horizontal, con una longitud máxima de operación de 80 metros. Para su movilidad en los subniveles de trabajo, el scooptram Aramine L130E será trasladado a través de las chimeneas de izaje, lo que facilita su acceso y transporte dentro de la mina subterránea. Este equipo se adapta a las condiciones subterráneas y contribuye significativamente a la eficiencia operativa.

En cuanto a los costos operativos, el costo horario promedio en el mercado para un equipo de este tipo (de 1.2 yd³) es de 40 USD por hora. Este costo es competitivo y permite realizar las tareas de limpieza y transporte de mineral de manera económica. Además, el motor eléctrico del scooptram hace que sea más eficiente y tenga un impacto ambiental reducido en comparación con los equipos que utilizan combustibles fósiles.

Este scooptram eléctrico es una excelente opción para operaciones subterráneas que requieren alta eficiencia en la extracción y transporte de mineral en espacios reducidos, mejorando la seguridad y optimizando los costos operativos en el proceso.

3.7.4. Sostenimiento

El primer sostenimiento que existe es la voladura controlada, algo práctico es espaciar los taladros de contorno a 50 cm y utilizar el exadit de 7/8" x 7". Puede hacerse los taladros con una jackleg, un techo en arco

contribuye al autosostenimiento y facilita el emboquillado en la perforación de taladros largos.

El segundo sostenimiento es el colocado de perno-malla en forma sistemática de acuerdo a la recomendación del Geomecánico, para los subniveles es importante que estos pernos estén colocados al techo y piso diagonalmente para evitar la sobre excavación especialmente después de la voladura en el punto de comunicación.

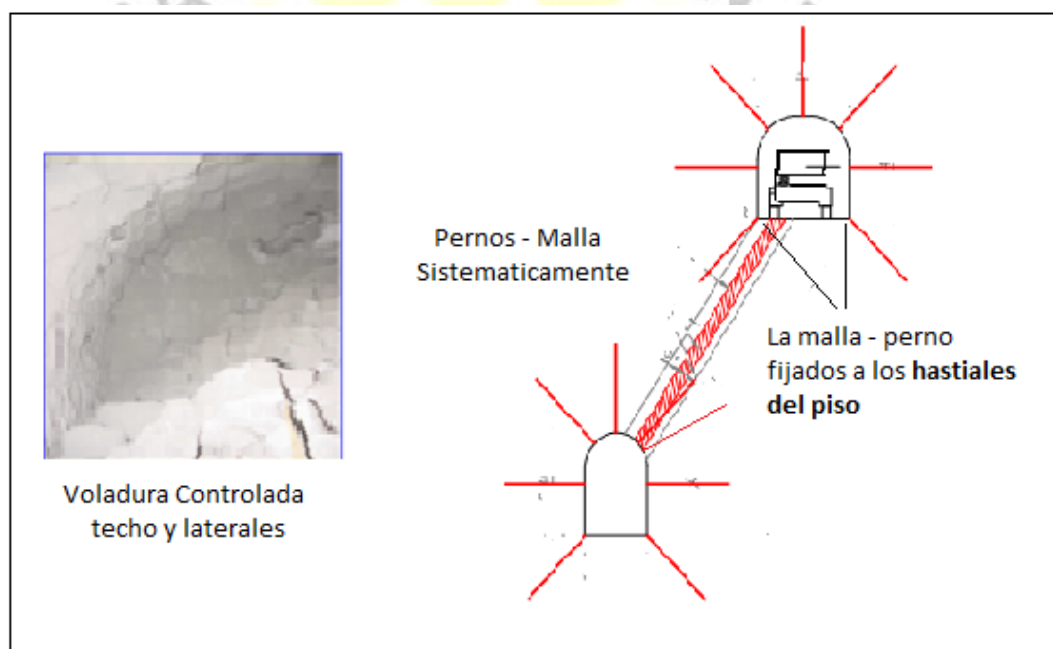


Figura 7. Sostenimiento de subniveles

3.7.5. Extracción

Utilizará la infraestructura existente, la tolva principal para la extracción de mineral debe tener un sistema electrohidráulico.

3.7.6. Relleno

La logística del material detrítico será por el Fill Pass que está en el centro del tajo, lo que permitirá en forma independiente abastecer a un sector mientras que el otro continúa en producción.

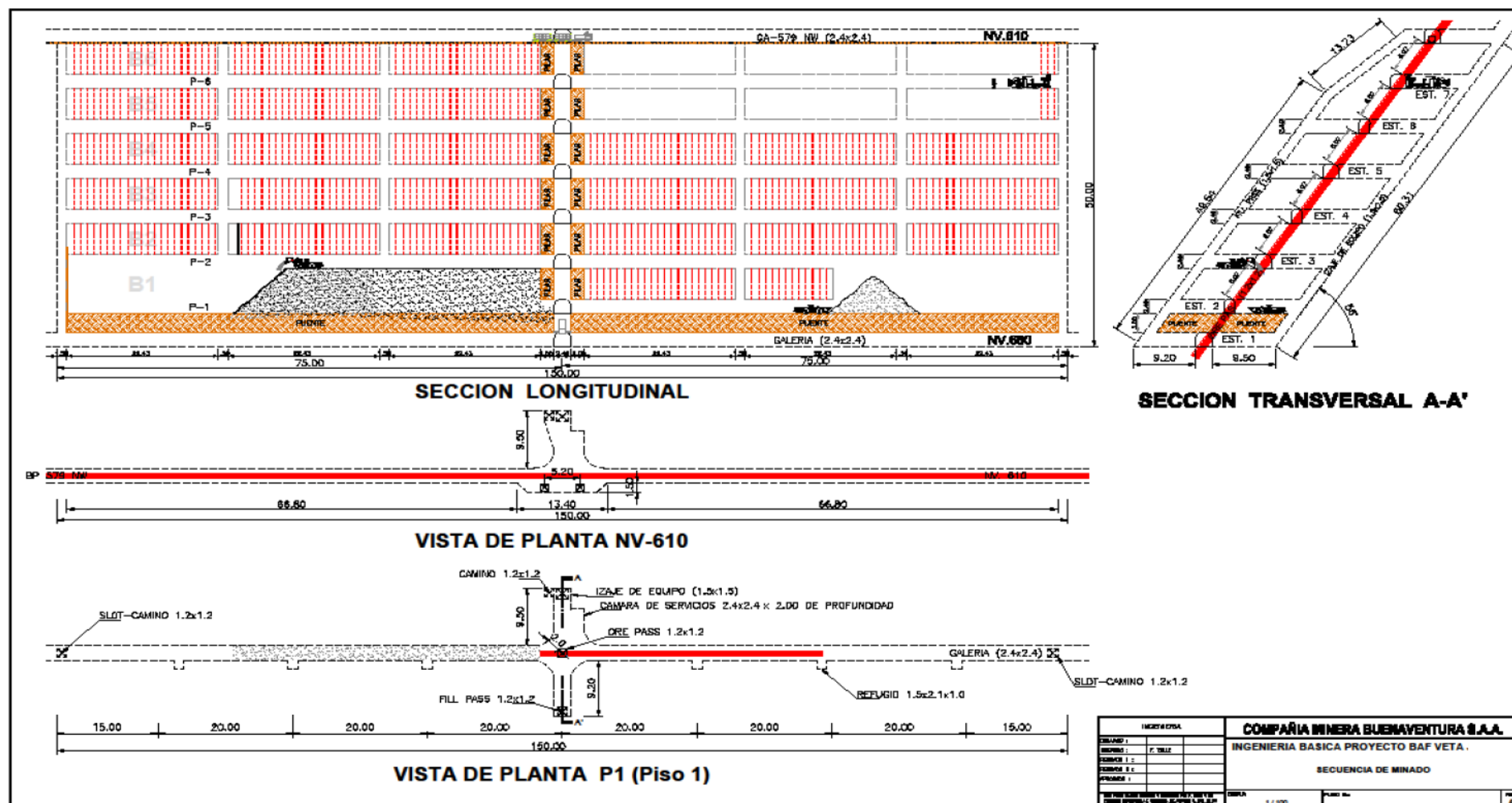


Figura 8. Esquema de relleno BAF

3.7.7. Ventilación

El aire fresco ingresará por el Nivel inferior ascendiendo por las chimeneas de servicios hacia los subniveles, Una fortaleza en este método es que en por los slots en todos los subniveles los gases calientes se desplazarán a los niveles superiores haciendo que el nivel de trabajo siempre este ventilado, si queremos aumentar flujo se puede colocar un extractor de 30,000 cfm en la parte superior de los slots que están en los extremos del subnivel para incrementar el movimiento de aire.

3.7.8. Servicios

Las tuberías de aire, agua, cables de eléctricos se tomarán a partir de las galerías principales y serán conducidos por taladros de 5" de diámetro hasta las cámaras de servicios de los diferentes sub niveles de trabajo. Esto evitará que las instalaciones sean trasladadas por las chimeneas ocasionando condiciones sub estándares.

3.7.9. Seguridad

El método está diseñado para que en cada una de sus etapas el riesgo de accidentes por condiciones de trabajo es reducidos En las etapas de perforación, voladura y limpieza el operario no está expuesto a la caída de roca, El personal debe realizar sus funciones de acuerdo a Procedimientos de Trabajos existentes para cada etapa.

3.8. OPEX

Para determinar el flujo Opex detallado del proyecto, se realiza el cálculo de costo en dos etapas, primero el costo de preparación y desarrollo y segundo el costo de minado:

3.8.1. Costo de avance (preparación-desarrollo)

Para obtener el flujo de egresos en preparación-desarrollo del proyecto, se toma en cuenta el programa de avances y el costo total por metro en avance.

Tabla 5.
Costo por metro de avance (US\$/m)

Item	LABOR	SECCION	P.TOTAL US\$/m
1	Ore Pass	1.2 x 1.2	202
2	Ch. Camino	1.2 x 1.2	202
3	Ch. Izaje	1.8 x 1.8	422
4	Estocada	2.4 x 2.4	394
5	Slot	1.5 x 0.80	173
6	Sub. Nivel	1.6 x 2.4	238
7	Sub Nivel	2.4 x 2.4	394
8	Refugios	1.5 x 2.1	174
9	Camara servicio	1.6 x 2.4	238

Se obtiene un flujo de egresos de US\$ 431,314 con los que se prepararán 16,327 tms de mineral. Con estos datos se obtiene el costo unitario (US\$/tm) en la etapa de Preparación-Desarrollo un valor de 26.42 US\$/tms.

3.8.2. Costo de minado

En la fase de explotación con método Bench and fill, por ser un método altamente productivo tiene un costo bajo, para este estudio alcanza un valor de 24.67 US\$/tms. Sumado al costo de explotación los otros costos de soporte, se obtiene el siguiente costo de minado:

Tabla 6.
Costo de minado en \$/tms

Administración mina	6.25
Exploración	14.95
Explotación	24.67

Labor mina	24.67
Mantenimiento	1.10
Servicios auxiliares de producción	6.89
Geología y servicios técnicos	6.27
Minado	81.49 US\$/tms

Para obtener el flujo de egresos en explotación se considera el costo de tratamiento y administración. De acuerdo al programa de producción el flujo de egresos en minado alcanza US\$ 2,226,996

3.8.3. Opex total

Sumando los fondos de egresos en Preparación-Desarrollo y minado, se tiene un flujo OPEX total de US\$ 2,658,310.

En el Opex total unitario (US\$/tms), se incluyen los costos de planta y administración y se muestran en el siguiente cuadro:

Tabla 7.
Costos de operación US\$/tms

ADMINISTRACION MINA	6.2
DESARROLLO	
EXPLORACION	15.0
EXPLOTACION	24.7
LABOR MINA	21.4
MANTENIMIENTO	1.1
PREPARACION	26.4
SERV. AUXILIARES DE PRODUCCION	6.9
GEOLOGIA Y SERV. TECNICO	6.3
Mina	107.9
Planta	8.4
Administracion	54.8
Total Operación	171.1

3.8.4. Capex

No se considera inversiones, el proyecto no contempla la compra de activos, los equipos pesados serán considerados en el costo operativo como alquiler.

3.8.5. Evaluación económica

Con el objeto de determinar la rentabilidad del proyecto, se ha realizado la evaluación económica por el método de Flujo de Fondos actualizado.

El Valor Presente Neto del Flujo de Caja da un valor de US\$ 2,762,934.

Tabla 8.
Aspectos de rentabilidad

WACC (Anual)	12.00%
VNA	\$ 2,762,934
PAYBACK (años)	1.00

Como parte de la evaluación a continuación se muestra un comparativo entre el método convencional y el BAF:

Tabla 9.
Comparativo de rentabilidad de métodos

		Convencional	BAF
Mineral a Extraer	tms	16327	16327
Valor de Mineral	US\$/TMS	358	358
Vida Util	mes	24	15
Flujo de Ingresos	US\$	5,845,066	5,845,066
Flujo de Egresos	US\$	3,047,130	2,658,310
Margen	US\$	2,797,936	3,186,756

La tabla 9 presenta un análisis comparativo entre dos métodos de extracción de mineral en una operación minera: el método Convencional y el método BAF (Bench and Fill). Los parámetros incluidos permiten evaluar el rendimiento económico y operativo de ambos métodos, proporcionando información

relevante sobre el flujo de ingresos, el flujo de egresos y el margen de rentabilidad.

Mineral a Extraer: En ambos métodos, Convencional y BAF, se extraerá un total de 16,327 toneladas métricas (tms) de mineral. Esta cantidad es constante entre ambos métodos, lo que sugiere que la cantidad de mineral disponible para la extracción no cambia, pero las diferencias en los costos y la eficiencia de cada método afectarán otros aspectos de la operación.

Valor de Mineral: El valor del mineral extraído se mantiene constante en 358 USD por tonelada métrica (US\$/TMS) para ambos métodos. Esto implica que, independientemente del método de extracción, el valor de mercado del mineral es el mismo, lo que proporciona una base comparativa justa entre ambos enfoques.

Vida Útil de la Operación: En el método Convencional, la vida útil de la operación es de 24 meses, lo que sugiere un ciclo de extracción relativamente más largo. En contraste, el método BAF tiene una vida útil de 15 meses, lo que podría indicar una extracción más intensiva o una mayor eficiencia operativa en un período de tiempo más corto.

Flujo de Ingresos: El flujo de ingresos es el mismo para ambos métodos, con un total de 5,845,066 USD. Esto sugiere que, dado el valor constante del mineral y la cantidad extraída, los ingresos no se ven directamente afectados por el método de extracción, ya que ambos métodos generan la misma cantidad de ingresos por la extracción del mineral.

Flujo de Egresos: Los egresos muestran una diferencia entre los dos métodos. En el caso del método Convencional, los egresos son de 3,047,130 USD, mientras que en el caso del método BAF, los egresos ascienden a 2,658,310

USD. Esto indica que, aunque ambos métodos requieren una inversión significativa, el método BAF tiene un costo operativo menor en comparación con el método convencional, lo que podría deberse a su enfoque más eficiente o al uso de técnicas de minería más optimizadas.

Margen de Rentabilidad: El margen de rentabilidad también varía entre los dos métodos. El margen del método Convencional es de 2,797,936 USD, mientras que el margen del método BAF es de 3,186,756 USD. A pesar de que los ingresos son los mismos para ambos métodos, el método BAF genera un mayor margen de rentabilidad debido a los menores costos operativos, lo que indica que es una opción más rentable a largo plazo.



IV. CONCLUSIONES

- 1°. En la etapa de preparación, el aporte de mineral alcanza un total de 800 toneladas métricas por mes (tms/mes), lo que equivale a la producción de 4 tajeos en el método de corte y relleno convencional. Esta cifra indica que el método propuesto tiene un rendimiento eficiente en la fase inicial de la explotación.
- 2°. En la etapa de explotación, el aporte de mineral se incrementa significativamente, alcanzando 1,800 tms/mes, lo que equivale a la producción de 9 tajeos utilizando el método de corte y relleno convencional. Este aumento en la producción refleja la alta capacidad de extracción del método BAF durante la fase de explotación.
- 3°. La aplicación del método BAF permitirá una reducción significativa en el costo de operación, pasando de 197 US\$/tms a 171 US\$/tms. Esta reducción de costos se logra gracias a la mayor eficiencia del método en comparación con otras técnicas de explotación minera, lo que optimiza los recursos y mejora la rentabilidad del proyecto. Además, la explotación de la Veta utilizando el método BAF se llevará a cabo en un tiempo más corto, con la estimación de que se concluirá en 15 meses, en comparación con los 24 meses que se requerirían al utilizar el método convencional. Esta reducción en el tiempo de explotación no solo acelera la recuperación de la inversión, sino que también mejora la eficiencia operativa, permitiendo que la mina alcance su capacidad máxima de producción en un plazo más breve, lo que aumenta la rentabilidad global del proyecto.

4º. Con base en la evaluación económica, se concluye que el método BAF (Bench and Fill) es un método rentable para la operación minera. El Valor Presente Neto (VPN) del Flujo de Caja es de US\$ 2,762,934, lo que demuestra que la implementación del método no solo es viable, sino que genera una rentabilidad positiva para la empresa.



V. RECOMENDACIONES

- 1º.** Modelado geológico detallado: Antes de la aplicación y/o preparación de las vetas propuestas, es esencial que se realice un modelado geológico detallado. Esto permitirá tener una visión precisa de las características del depósito. Para lograr esto, se recomienda implementar un programa de perforación infill drilling con una malla de 25x25 metros, lo que proporcionará datos más confiables sobre la geometría y la mineralización del yacimiento, facilitando la planificación eficiente de la explotación.
- 2º.** Evaluación geomecánica detallada: Se recomienda llevar a cabo una evaluación geomecánica más detallada antes de la ejecución. Esta evaluación es crucial, ya que constituye la base para determinar la altura de banco y el tiempo de autosoporte durante la operación. Con esta información, se podrá asegurar la estabilidad de las excavaciones y minimizar los riesgos asociados a la explotación subterránea.
- 3º.** Control en la ejecución del tajo piloto: Es fundamental realizar un control exhaustivo en la ejecución del tajo piloto. Esta fase es crucial para afinar los parámetros operacionales y ajustar los costos de preparación y explotación. El análisis de los resultados del tajo piloto permitirá hacer ajustes en el diseño y en los métodos de extracción, asegurando una mayor precisión y eficiencia en las etapas posteriores del proyecto.
- 4º.** Soporte adecuado de todas las áreas involucradas: Para que el proyecto sea exitoso, es fundamental que todas las áreas involucradas en la operación proporcionen el soporte adecuado en cada fase de la explotación. Esto incluye la colaboración entre los equipos geológicos,

geomecánicos, operativos y financieros para asegurar la correcta ejecución del proyecto. Un trabajo conjunto y coordinado permitirá optimizar los recursos y maximizar la rentabilidad del proyecto.



VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. Flores y M. Niemes, "Diseño del método de explotación de un cuerpo mineralizado en subniveles para conexión con frente de avance en el proyecto Minero Bosque de Oro (Tesis de pregrado)", Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil-Ecuador, 2021. Consultado: el 20 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/52304>
- [2] E. Aquino, "Implementación del método de minado bench and fill en la veta Mary del tajo 120 Unidad Productora Carahuacra de Volcan Compañía Minera S.A.A. (Tesis de pregrado)", Universidad Continental, Huancayo, 2020. Consultado: el 30 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8459>
- [3] L. Pariona y A. Benito, "Propuesta de implementación del método de minado bench and fill en el tajo 1050 de la veta María Luisa, Unidad Minera Carahuacra (Tesis de pregrado)", Universidad Continental, Huancayo, 2020. Consultado: el 30 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/9761>
- [4] D. Flores, "Aplicación de taladros largos en los nuevos tajeos de la veta 'Nicole' en la Unidad Minera Arcata S.A. (Tesis de pregrado)", Universidad Continental, Huancayo, 2021. Consultado: el 20 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11794/1/IV_FIN_110_TE_Flores_Acu%c3%b1a_2021.pdf

- [5] H. Cárdenas y E. Vélez, "Análisis del diseño de explotación mediante el sistema Long Hole Stopping para el proyecto minero Loma Larga, Azuay-Ecuador (Tesis de pregrado)", Universidad Nacional del Azuay, Ecuador, 2019. Consultado: el 17 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8925>
- [6] A. Muñoz y L. Ocampo, "Optimización del sistema de explotación de la mina metálica subterránea Tiwintza, Camilo Ponce Enríquez - Ecuador (Tesis de Titulación)", Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2019. Consultado: el 15 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/54856>
- [7] J. Flores, "Evaluación técnico-económica en la selección del método de explotación de la veta Keyla - Unidad Operativa Inmaculada 2020 (Tesis de pregrado)", Universidad Nacional San Luis Gonzaga, Ica, 2022. Consultado: el 30 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unica.edu.pe/items/269cc062-bf5b-4292-ad30-d9433b2ef7da>
- [8] M. Baldeon, "Aplicación del método de explotación taladros largos en vetas angostas sin By Pass - Veta Ramal Alianza de Minera Argentum (Tesis de pregrado)", Universidad Continental, Huancayo, 2021. Consultado: el 30 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/10043>
- [9] R. Suarez, "Evaluación del método de explotación por subniveles con taladros largos para optimizar la producción en la Compañía Minera Chalhuane S.A.C. (Tesis de pregrado)", Universidad Nacional del Centro

- del Perú, Huancayo, 2019. Consultado: el 30 de abril de 2025. [En línea].
Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5405>
- [10] J. Herrera, “Introducción a la minería subterránea. Vol II: Construcción de accesos”, Universidad Politécnica de Madrid. Consultado: el 18 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/62724/7/CONSTRUCCION_DE_ACCESOS_A_INTERIOR_LM1B4T2R0-20191114.pdf
- [11] Á. Quispe, “Minería subterránea: ¿En qué consiste? ¿Y cuales son sus tipos?”, Grupo Posada. Consultado: el 22 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://posada.pe/mineria-subterranea-en-que-consiste-y-que-son-sus-tipos/>
- [12] Universidad Politécnica de Madrid, *Diseño de explotaciones e infraestructuras mineras subterráneas*. Madrid (España), 2007. [En línea]. Disponible en: http://oa.upm.es/21841/1/071101_L3_labores_subterraneas_2.pdf
- [13] J. Herrera y J. Gómez, “Diseño de explotación e infraestructura mineras subterráneas”, Universidad Politécnica de Madrid. Consultado: el 18 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/21841/1/L3_labores_subterraneas_071101_2.pdf
- [14] Ingenium. Escuela de Formación profesional, “Minería subterránea: Definición y ventajas”. Consultado: el 8 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ingenium.edu.pe/blog/mineria/mineria-subterranea-definicion-y-ventajas/#:~:text=Desventajas%3A>
- [15] Ingeniería de Minas, “Minería subterránea”. Consultado: el 8 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ingenieriademinas.info/mineria->

Disponible en:
<https://repositorio.ucsm.edu.pe/server/api/core/bitstreams/9eb54869-8425-4786-8ef3-4ec1124c7799/content#:~:text=se%20aplica%20a%20los%20métodos,Este%20método%20se%20utiliza%20para>

[7] F. Cuadros, “Optimización de producción aplicando tajeo por subniveles con taladros largos en veta Gavia - Unidad Minera Huarón”, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2020. Consultado: el 22 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6833/T010_70416754_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

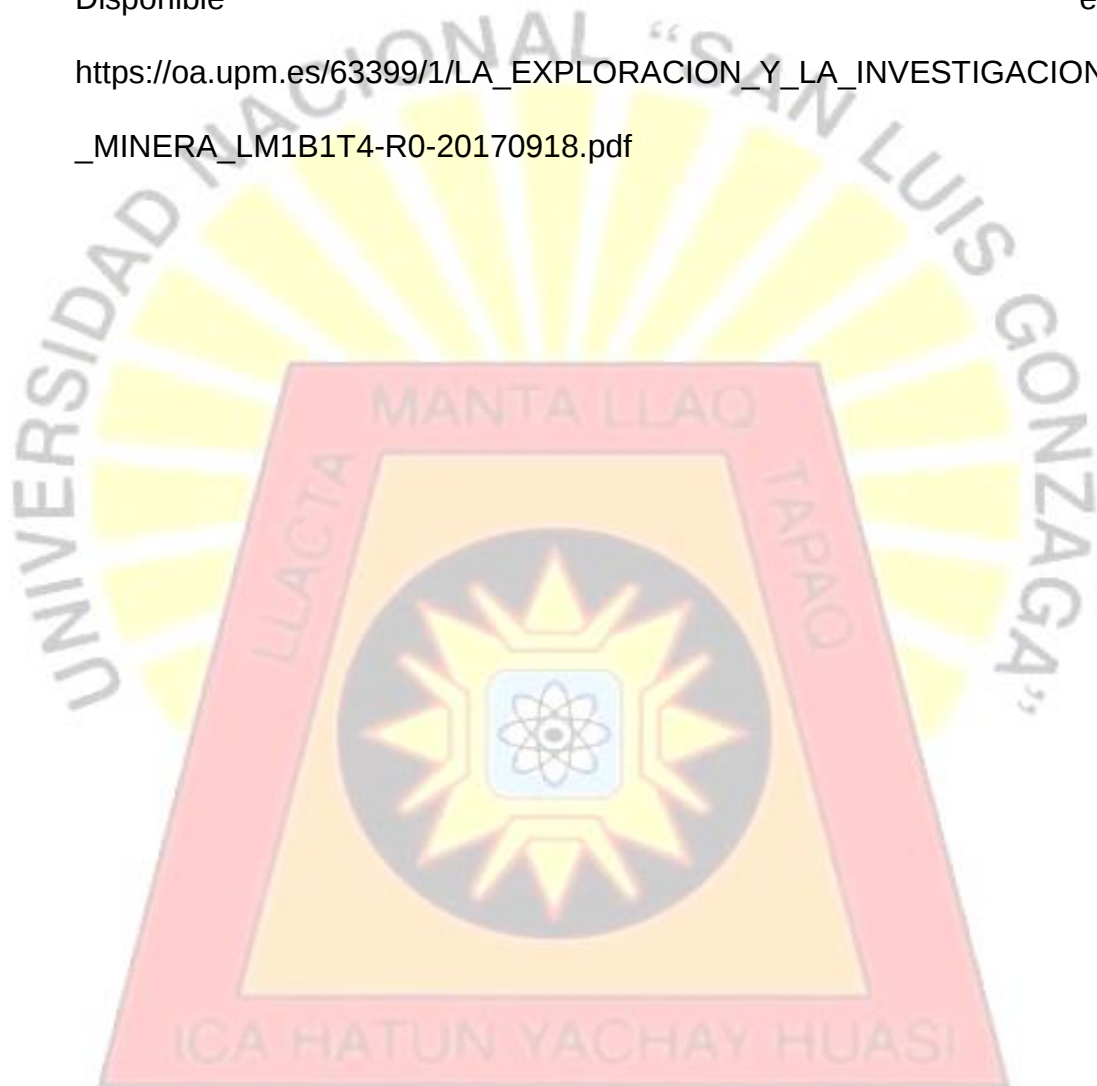
[8] H. Comun, “La influencia del método corte y relleno ascendente con taladros largos en la producción de la Mina Animón - Volcan (Tesis de pregrado)”, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2018.

- [7] F. Cuadros, “Optimización de producción aplicando tajeo por subniveles con taladros largos en veta Gavia - Unidad Minera Huarón”, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2020. Consultado: el 22 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6833/T010_70416754_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [8] H. Comun, “La influencia del método corte y relleno ascendente con taladros largos en la producción de la Mina Animón - Volcan (Tesis de pregrado)”, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2018.

2018. [En línea]. Disponible en:
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/8198>
- [20] J. Avalos y J. Juro, “Aplicación del Método de Explotación por Subniveles con Taladros Largos en Vetas Angostas, para Mejorar la productividad en la Unidad Minera Yauliyacu- 2018 (Tesis de pregrado)”, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, Abancay, 2022. Consultado: el 20 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en:
<https://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1156>
- [21] R. Suarez, “Evaluación del método de explotación por subniveles con taladros largos para optimizar la producción en la Compañía Minera Chalhuane S.A.C (Tesis de pregrado)”, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2019. Consultado: el 29 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en:
<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5405>
- [22] J. Olivera, “Minado mecanizado en vetas angostas, Mina Huarón”, Revista Minería. Consultado: el 8 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://revistamineria.com.pe/raiz/minado-mecanizado-en-vetas-angostas,-mina-huaron#:~:text=Nuestro%20objetivo%20principal%2C%20es%20mejorar,de%20minado%20y%20los%20equipos>
- [23] S. Palella y F. Martins, *Metodología de la investigación cuantitativa*, 3era ed. Caracas: FEDUPEL, 2012. Consultado: el 30 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w23578w/w23578w.pdf>

- [24] C. Salgado-Lévano, *Manual de investigación. Teoría y práctica para hacer la tesis según la metodología cuantitativa*. Lima (Perú): Universidad Marcelino Champagnat, 2018. Consultado: el 17 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://atarazana.files.wordpress.com/2020/07/manual-tesis-cuantitativa.pdf>
- [25] R. Hernández, C. Fernández, y P. Baptista, *Metodología de la Investigación*, 5ta ed. México D.F: Mc Graw Hill, 2010. Consultado: el 2 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/8832042/Metodolog%C3%ADa_de_la_investigaci%C3%B3n_5ta_edici%C3%B3n
- [26] T. Cueva, O. Jara, J. Arias, F. Flores, y C. Balmaceda, *Métodos mixtos de investigación para principiantes*. Lima: Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú, 2023. Consultado: el 30 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.35622/inudi.b.106>
- [27] P. López-Roldán y S. Fachelli, *Metodología de la Investigación Social Cuantitativa*. Barcelona: Creative Commons, 2015. Consultado: el 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://ddd.uab.cat/pub/caplli/2016/163567/metinvsoccua_a2016
- [28] M. Medina, D. Hurtado, J. Muñoz, D. Ochoa, y G. Izundegui, *Método mixto de investigación: Cuantitativo y cualitativo*, 1era ed. Lima: Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C., 2023. Consultado: el 30 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.35622/inudi.b.105>

- [29] G. Baena, *Metodología de la Investigación*, 3era ed. México D.F: Grupo Editorial Patria, 2017.
- [30] J. Herrera, "Introducción minera. La exploración e investigación minera", Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía - Universidad Politécnica de Madrid. Consultado: el 10 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en:
https://oa.upm.es/63399/1/LA_EXPLORACION_Y_LA_INVESTIGACION_MINERA_LM1B1T4-R0-20170918.pdf





VII. ANEXOS

Anexo N°1: Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	INDICADORES	TIPO DE VARIABLE
VARIABLE X: MINADO POR TALADROS LARGOS	Se trata de una técnica de explotación subterránea diseñada para extraer mena en vetas estrechas, que consiste en perforar taladros de gran longitud en distintos subniveles, realizar voladuras precisas y luego evacuar el material. Su objetivo es garantizar la máxima recuperación del mineral, reducir al mínimo la dilución y elevar la productividad en yacimientos con condiciones geomecánicas particulares [4].	• Análisis geológico geomecánico • Diseño del ciclo de minado • Análisis técnico económico	CUALITATIVA
VARIABLE Y: EXPLOTACIÓN MINERA DE VETAS	Hace alusión a la remoción de menas en un yacimiento subterráneo formado por filones angostos y alargados, llamados vetas. Este tipo de explotación se centra en extraer los minerales contenidos en dichas estructuras utilizando métodos de minado adaptados a su geología y a las propiedades específicas del depósito [30].	• Extracción de minerales • Costos operativos • Rentabilidad económica	CUANTITATIVA

Anexo N° 2: Matriz de consistencia

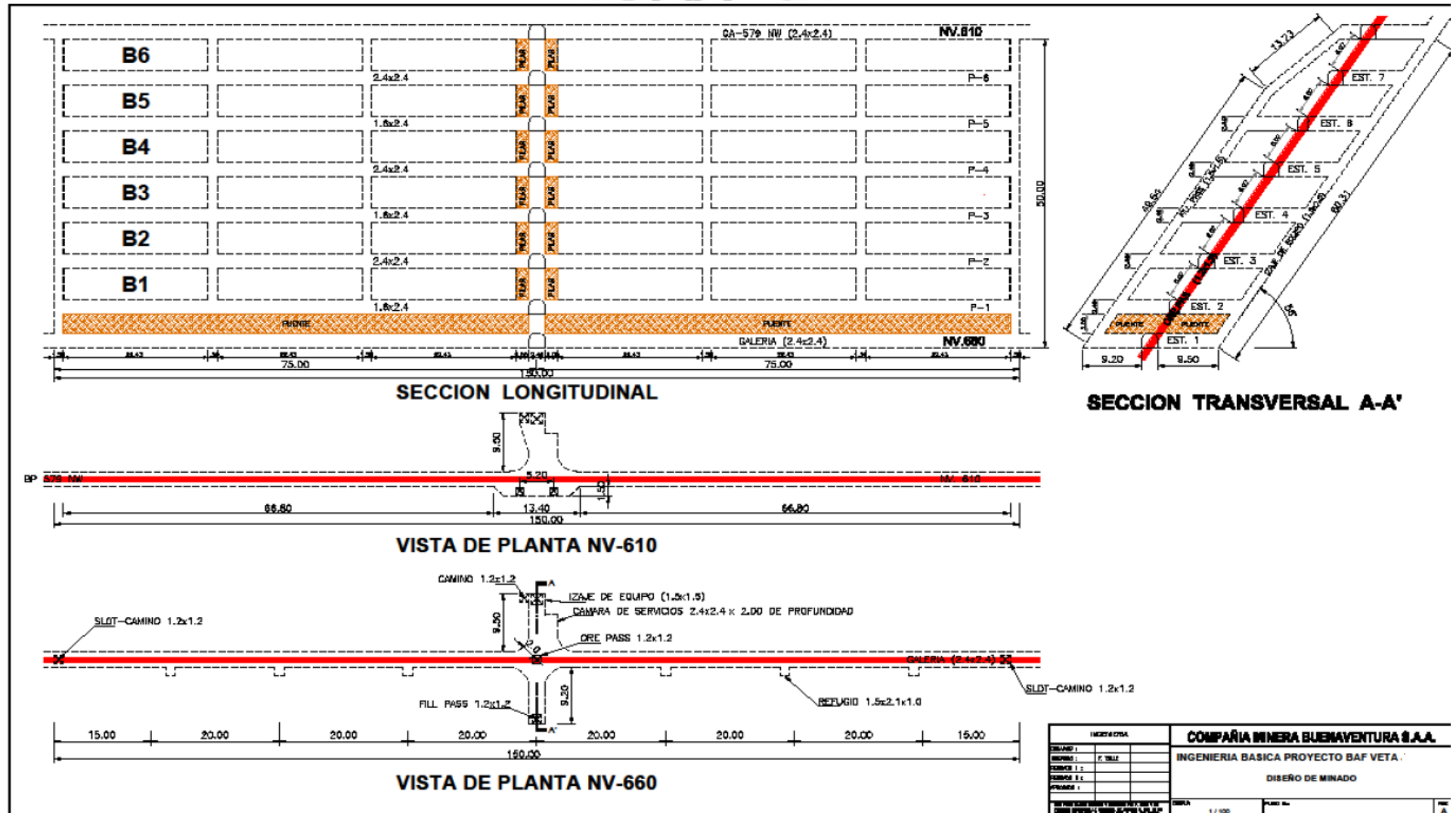
PROPUESTA DE MINADO POR TALADROS LARGOS EN LA MEJORA DE EXPLOTACIÓN DEL PROYECTO VETA

MARY – CIA MINERA BUENAVENTURA S.A.A. 2022

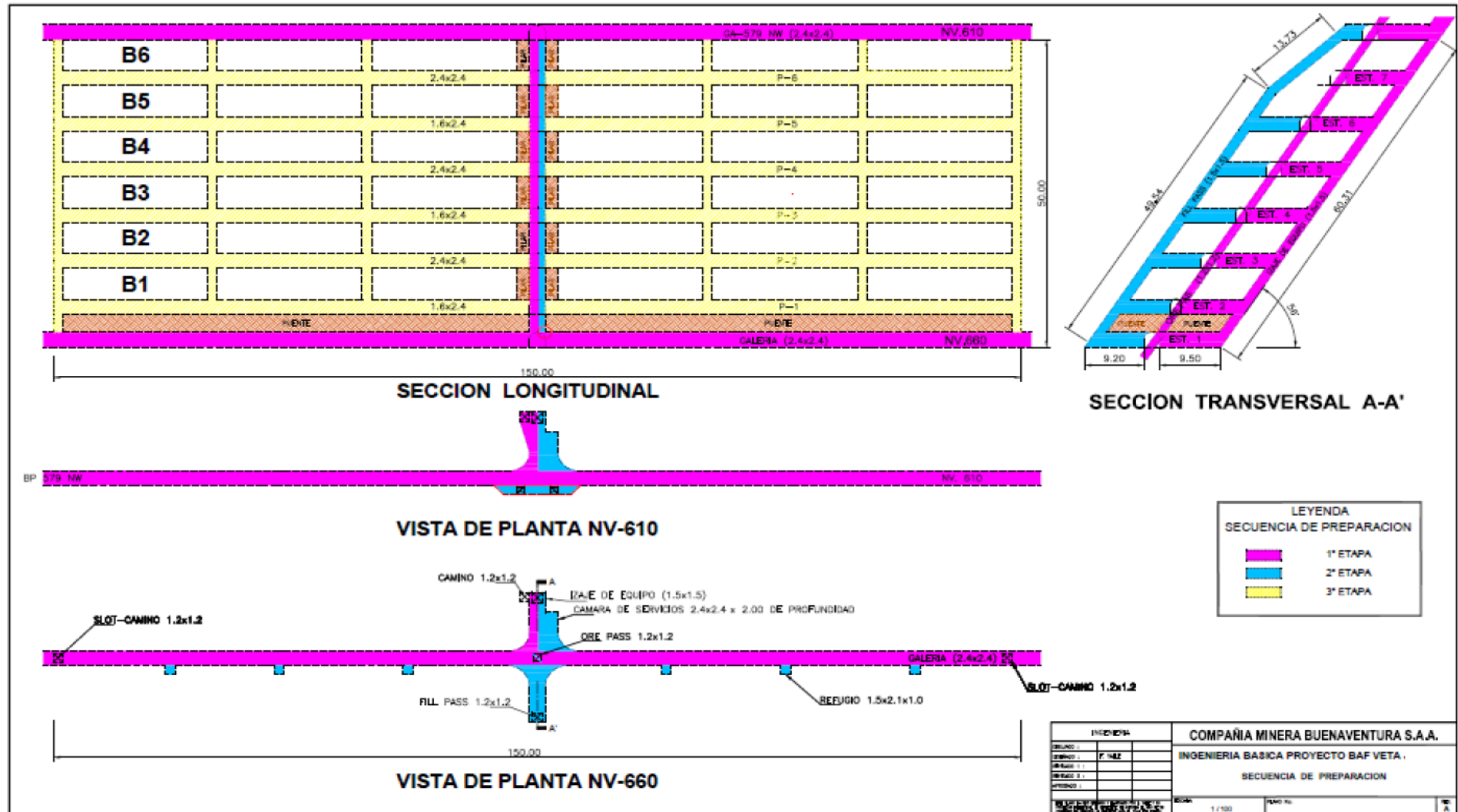
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable X: MINADO POR TALADROS LARGOS	- Análisis geológico geomecánico - Diseño del ciclo de minado - Análisis técnico económico	Enfoque: Cuantitativo Tipo: Aplicado Nivel: Descriptivo Diseño: No experimental Población: La población estará conformada por todas las vetas de las minas pertenecientes a Cía. Minera Buenaventura S.A.A., en el año 2022. Muestra: La muestra estará constituida por la Veta Mary del Nivel 610
¿De qué manera la propuesta de minado por taladros largos influye en la explotación del proyecto Veta Mary – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022?	Determinar si la propuesta de minado por taladros largos influye en la explotación del proyecto Veta Mary – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022.	La propuesta de minado por taladros largos mejora la explotación del proyecto Veta Mary – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022			
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable Y: EXPLOTACIÓN MINERA DE VETAS	- Extracción de minerales - Costos operativos - Rentabilidad económica	
PE1: ¿De qué manera la propuesta de minado por taladros largos influye en la extracción de minerales – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022? PE2: ¿De qué manera la propuesta de minado por taladros largos influye en los costos operativos – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022?	OE1: Determinar si la propuesta de minado por taladros largos influye en la extracción de minerales – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022. OE2: Determinar si la propuesta de minado por taladros largos influye en los costos operativos – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022.	HE1: La propuesta de minado por taladros largos mejora la extracción de minerales – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022. HE2: La propuesta de minado por taladros largos reduce los costos operativos – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022.			

PE3: ¿De qué manera la propuesta de minado por taladros largos influye en la rentabilidad económica – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022?	OE3: Determinar si la propuesta de minado por taladros largos influye en la rentabilidad económica – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022.	HE3: La propuesta de minado por taladros largos mejora la rentabilidad económica – Cía. Minera Buenaventura S.A.A. 2022.		de la Mina Julcani, en el año 2022. Técnicas: La observación y el análisis documental Instrumentos: Fichas de seguimiento de diseño de método de minado
---	--	--	--	---

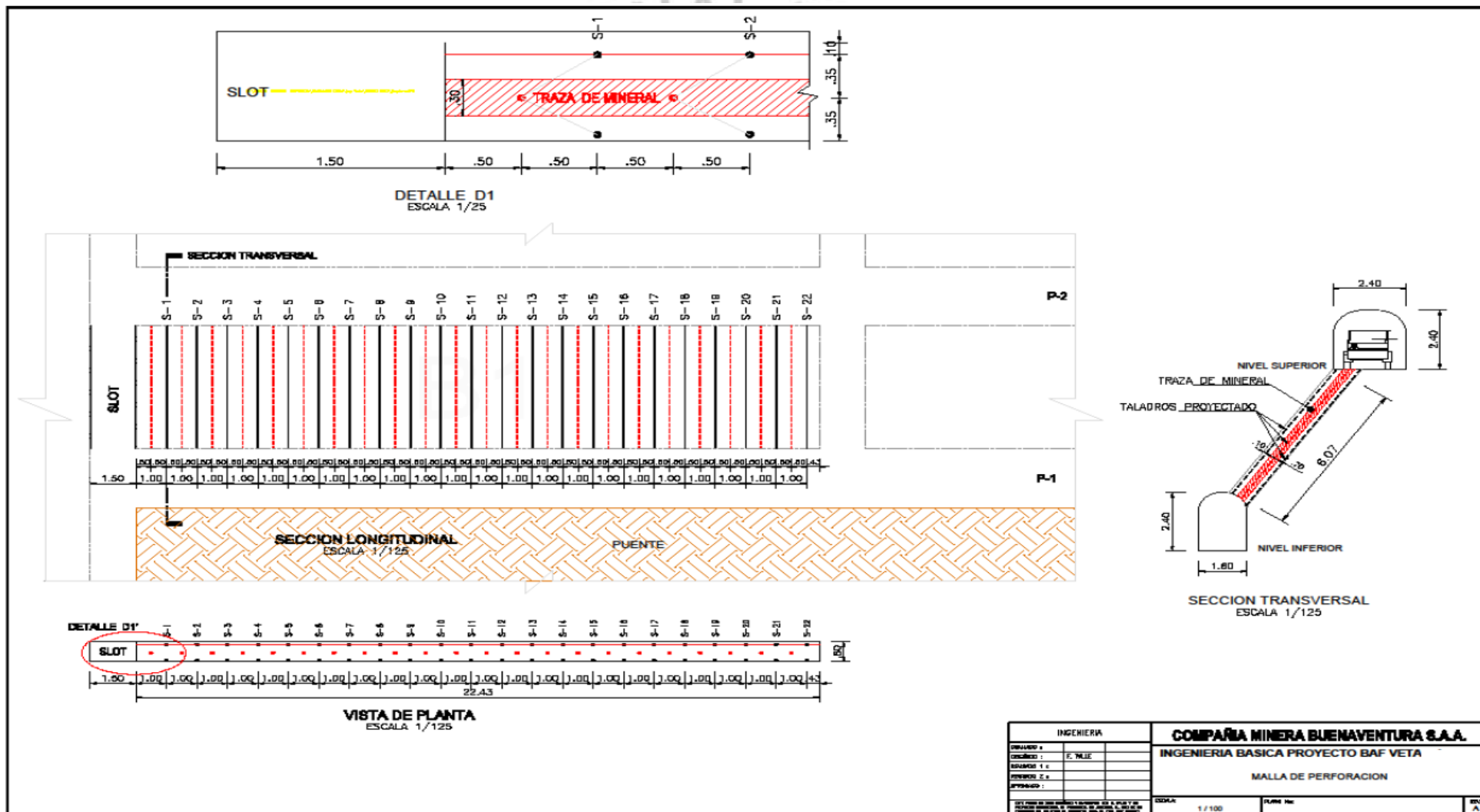
Anexo N° 3: Método de explotación BAF



Anexo N° 4: Secuencia de minado BAF



Anexo N° 5: Plano malla de perforación



Anexo N° 6: Programa de avances

TIPO DE LABOR	LABOR	SECCION (mxm)		LONGITUD (m)									
		ANCHO	ALTO		mes 1	mes 2	mes 3	mes 4	mes 5	mes 6	mes 7	mes 8	mes 9
GALERIAS	GA Base	2.4	2.4	60	60								
	GA Cabeza	2.4	2.4										
ORE PASS, CH SERVICIOS (CAMINO E IZAJE EQUIPOS)	Ch. Ore Pass	1.2	1.2	57	22	22	13						
	Ch. Fill Pass	1.2	1.2	60	22	22	16						
	Ch. Camino	1.2	1.2	57	22	22	13						
	Ch. Izaje	1.8	1.8	57	22	22	13						
	Estocada Base	2.4	2.4	8	8								
	Estocada (1)	2.4	2.4	8		8							
	Estocada (2)	2.4	2.4	8		8							
	Estocada (3)	2.4	2.4	8				8					
	Estocada (4)	2.4	2.4	8				8					
	Estocada (5)	2.4	2.4	8						8			
	Estocada (6)	2.4	2.4	8						8			
	Estocada Cabeza	2.4	2.4	8	8								
	Estocada Fill Pass base	2.4	2.4	7	7								
	Estocada Fill Pass(1)	2.4	2.4	7		7							
	Estocada Fill Pass(2)	2.4	2.4	7		7							
	Estocada Fill Pass(3)	2.4	2.4	7					7				
	Estocada Fill Pass(4)	2.4	2.4	7					7				
	Estocada Fill Pass(5)	2.4	2.4	7							7		
	Estocada Fill Pass(6)	2.4	2.4	7							7		
	Camara servicio (8)	1.6	2.4	16	4	4			4		4		
PREPARACIONES SUBNIVELES, SLOTS Y REFUGIOS	Slot (36)	1.5	0.8	219					24	24	36	36	97
	Sub. Nivel (1)	1.6	2.4	150			60	80	10				
	Sub Nivel (2)	2.4	2.4	150			60	80	10				
	Sub. Nivel (3)	1.6	2.4	150					60	80	10		
	Sub Nivel (4)	2.4	2.4	150					60	80	10		
	Sub. Nivel (5)	1.6	2.4	150							60	80	10
	Sub. Nivel (6)	2.4	2.4	150							60	80	10
	Refugios (36)	1.5	2.1	36			4	8	4	8	4	8	
				1575	175	122	179	184	186	208	198	204	117

Anexo N° 7: Programa de producción

TIPO DE LABOR	LABOR	SECCION (mxm)		LONGITUD (m)	AM	Tms	mes 1 mes 2 mes 3 mes 4 mes 5 mes 6 mes 7 mes 8 mes 9 mes 10 mes 11 mes 12 mes 13 mes 14 mes 15 mes 16 mes 17 mes 18 mes 19 mes 20 mes 21 TOTAL																				
		ANCHO	ALTO																								
GALERIAS	GA Base	2.4	2.4	60	0.8	311	311																				311
	GA Cabeza	2.4	2.4		0.8																						
ORE PASS, CH SERVICIOS (CAMINO E IZAJE EQUIPOS)	Ch. Ore Pass	1.2	1.2	57	0.8	148	57	57	34																		148
	Ch. Fill Pass	1.2	1.2	60																							
	Ch. Camino	1.2	1.2	57																							
	Ch. Izaje	1.8	1.8	57																							
	Estocada Base	2.4	2.4	8																							
	Estocada (1)	2.4	2.4	8																							
	Estocada (2)	2.4	2.4	8																							
	Estocada (3)	2.4	2.4	8																							
	Estocada (4)	2.4	2.4	8																							
	Estocada (5)	2.4	2.4	8																							
	Estocada (6)	2.4	2.4	8																							
	Estocada Cabeza	2.4	2.4	8																							
	Estocada Fill Pass base	2.4	2.4	7																							
	Estocada Fill Pass(1)	2.4	2.4	7																							
	Estocada Fill Pass(2)	2.4	2.4	7																							
	Estocada Fill Pass(3)	2.4	2.4	7																							
	Estocada Fill Pass(4)	2.4	2.4	7																							
	Estocada Fill Pass(5)	2.4	2.4	7																							
	Estocada Fill Pass(6)	2.4	2.4	7																							
	Camara servicio (8)	1.6	2.4	16																							
PREPARACIONES SUBNIVELES, SLOTS Y REFUGIOS	Slot (36)	1.5	0.8	219	0.8	378					42	42	63	63	168												378
	Sub. Nivel (1)	1.6	2.4	150	0.8	778				311	415	52															778
	Sub. Nivel (2)	2.4	2.4	150	0.8	778				311	415	52															778
	Sub. Nivel (3)	1.6	2.4	150	0.8	778					311	415	52														778
	Sub. Nivel (4)	2.4	2.4	150	0.8	778					311	415	52														778
	Sub. Nivel (5)	1.6	2.4	150	0.8	778						311	415	52													778
	Sub. Nivel (6)	1.6	2.4	150	0.8	778						311	415	52													778
	Refugios (36)	1.5	2.1	36																							
EXPLOTACION	TJ P(1-0)	0.8	7		0.8										1353	451											1,804
	TJ P(1-2)	0.8	7		0.8											1353	451										1,804
	TJ P(2-3)	0.8	7		0.8												1353	451									1,804
	TJ P(3-4)	0.8	7		0.8													1353	451								1,804
	TJ P(4-5)	0.8	7		0.8														1353	451							1,804
	TJ P(5-6)	0.8	7		0.8																1353	451					1,804
				1575		5503	368	57	656	829	768	871	789	892	1625	1804	1804	1804	1804	1804	451					16327	

Anexo N° 8: Flujo de fondos

1. Producción																	
	Und	mes-1	mes-2	mes-3	mes-4	mes-5	mes-6	mes-7	mes-8	mes-9	mes-10	mes-11	mes-12	mes-13	mes-14	mes-15	Total
Min. Preparación	tms	368	57	656	829	768	871	789	892	272							5,502
Min. Explotación	tms									1353	1804	1804	1804	1804	1804	451	10,825
Total tms	tms	368	57	656	829	768	871	789	892	1625	1804	1804	1804	1804	1804	451	16,327
2. Leyes																	
ozAg/tms	ozAg/tms	21.87	21.87	21.87	21.87	21.87	21.87	21.87	21.87	21.87	21.87	21.87	21.87	21.87	21.87	21.87	
%Pb	%	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
%Cu	%	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	
US\$/tms	US\$/tms	358.04	358.04	358.04	358.04	358.04	358.04	358.04	358.04	358.04	358.04	358.04	358.04	358.04	358.04	358.04	
3. Ingresos																	
Ventas	US\$	131,782	20,417	234,794	296,973	274,873	311,995	282,384	319,506	581,664	645,940	645,940	645,940	645,940	645,940	161,485	5,845,573
4. Egresos																	
4.1. Opex																	
Preparación	US\$	56,250	35,371	51,878	56,860	60,270	66,425	36,013	28,248	39,997							431,314
Minado	US\$	44,185	6,845	78,723	99,571	92,161	104,608	94,679	107,126	228,406	261,084	261,084	261,084	261,084	261,084	65,271	2,226,996
Total Opex	US\$	100,435	42,217	130,601	156,431	152,431	171,033	130,693	135,374	268,403	261,084	261,084	261,084	261,084	261,084	65,271	2,658,310
4.2. Capex																	
Inversiones	US\$																
4.3. Gastos Administrativos																	
G. Administrativos	US\$																
Total Egresos	US\$	100,435	42,217	130,601	156,431	152,431	171,033	130,693	135,374	268,403	261,084	261,084	261,084	261,084	261,084	65,271	2,658,310
Flujo	US\$	31,347	-21,800	104,193	140,542	122,442	140,962	151,691	184,132	313,261	384,856	384,856	384,856	384,856	384,856	96,214	3,187,264
Evaluacion Flujo Anual																	
	1	2															
FLUJO DE CAJA	2,321,337	865,926	3,187,264														
WACC (Anual)	12.00%																
VNA	2,762,934																
PAYBACK (años)	1.00																

Anexo N° 9: PU de explotación

COSTO DEL METODO DE EXPLOTACION BENCH AND FILL IN VEINS NARROW				
LONGITUD	150 mts	Longitud de Barra.3 pies	0.91 r	
ANCHO	0.8 mts	Longitud de taladro	7.16 r	
ALTURA DEL BLOCK	57.36 mts	Ton rotas/taladro	4.63 t	
EFICIENCIA PERFORACION	90%	Efic. Scooptram 1.0yd3	12.00 t	
EFICIENCIA DISPARO	90%	Rendimiento	12.00 r	
P.E.	2.7 Tm/m3	Ton rotas/taladro	37.1 t	
TONELAJE TOTAL DEL BLOCK PARA TALADROS L	16327 Tms	Ratio-Perforación	0.66 t	
ALTURA - LONGITUD DE BLOCK REAL A 56°	57.36 mts	Numero de Taladros 36 block	2484	
TONELAJE de los 36 block de LHD	12766.54 Tms	Total de mts. Perforados 90'	19742	
KGS DE EXPLOSIVO/CORTE	21539.7 Kgs	Núm. secc.disp/raund.pro	11	
FACTOR DE POTENCIA	1.52 Kgs/Tms	Número de disparos	75	
MALLA DE PERFORACION: 2 : 1	0.7 x 0.50	Total de Secciones	828	
N° DE TAL/block	69 Tal	Tipo cambio\$	3.42	
COSTO DE MINADO BAF				
PERFORACION	Rend	Unid	Tarifa \$/.	Sub Total
MALLA PERFO 0.70 x 1.0, 2:1	0.65			
No taladros	0	2484		
Metros perforados	0	19742	11.5	227031.14
Tubería de PVC de 2" diametro	0	6580.61	2.35	4836.0
Subtotal			US\$/Tm	231867.14
Costo /tonelada			US\$/Tm	14.20
VOLADURA	Rend	Cant.	Tarifa \$/.	Sub Total
Emulex de 1 1/2" x 12", peso unid: 0.403kg		53448	0.69	36879.41
Exanel de 6 mts		2484	1.27	3154.88
Carmex 7 pies		151	0.61	91.83
Cordon detonante 5p		2258	0.19	429.05
Mecha rapida		151	0.39	58.71
Subtotal				40613.89
Maestro cargador, Soles/mes: 2,799.9, 2 mese		3	818.68	2456.05
Ayudante cargador, Soles/mes,1999.8, 2 meses		3	584.74	1754.21
Subtotal				4210.26
Costo /tonelada			US\$/Tm	2.75
LIMPIEZA - RELLENO	Cantidad	Unid	Tarifa US\$/Hr	Sub Total \$
Horas Scoop Limpieza Mineral-Desmonte Extraido	1360.58	hr	40	54423.33
Horas Scoop relleno	1088	hr	40	43538
COSTO RELLENO POR TONELADA			US\$/Tm	6.00
MATERIALES			US\$/Tm	1.72
COSTO MINA			US\$/Tm	24.67