

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LOS MÉTODOS VCR Y RAISE
BORING PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CHIMENEAS SLOT EN
LA ZONA OB1 DE LA UNIDAD MINERA CERRO LINDO – ICA**

PRESENTADO POR:

Br. JHOEL LEANDRO MUÑOZ HUAMANI

**PARA OPTAR AL TITULO
PROFESIONAL DE INGENIERO DE
MINAS**

ASESOR:

ING. MÁXIMO VICTOR MAYTA LINO

CUSCO - PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** Ing. Máximo Victor Mayta Lino
 quien aplica el software de detección de similitud al
 trabajo de investigación/tesis titulada: Evaluación comparativa de los métodos
uCR y Raise Boring para la construcción de chimeneas slot en la
zona OB1 de la unidad minera Cerro Lindo - Ica

Presentado por: Dr. Joel Leandro Muñoz Huamani..... DNI N° 70683288.....;
 presentado por: DNI N°:
 Para optar el título Profesional/Grado Académico de Ingeniero de Minas.....

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 03 veces, mediante el
 Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de
 Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 10

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 22 de enero de 2026.....

Jul

 Firma

Post firma Ing. Máximo Victor Mayta Lino

Nro. de DNI 23956885

ORCID del Asesor 0000-0002-9939-5754

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259-548411190

JHOEL LEANDRO MUÑOZ HUAMANI

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LOS MÉTODOS VCR Y RAISE BORING PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CHIMENEAS SLOT EN ...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:548411190

Fecha de entrega

22 ene 2026, 2:30 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

22 ene 2026, 2:37 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LOS MÉTODOS VCR Y RAISE BORING PARA LA CONSTRUCCIÓN DE....pdf

Tamaño del archivo

5.9 MB

159 páginas

29.174 palabras

169.669 caracteres

10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...




Filtrado desde el informe

- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 20 palabras)
- ▶ Trabajos entregados

Exclusiones



- ▶ N.º de fuentes excluidas

Fuentes principales

- 10%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
159 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
73 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

A Dios, por darme el valor y la fuerza para continuar y hacer las cosas bien, por poner en mi camino a personas maravillosas y permitirme ser parte de sus vidas.

A mis queridos padres, Cosme Muñoz Meléndez y Yanet Huamani Zevallos y a mis hermanos, quienes me han enseñado el valor del esfuerzo, la perseverancia y la honestidad. Su amor y apoyo han sido mi guía en cada momento difícil, y su confianza en mí me ha permitido alcanzar mis metas. Gracias por ser mis pilares y por estar siempre ahí para mí.

AGRADECIMIENTOS

A mi alma máter y a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas por haberme brindado los conocimientos necesarios para la elaboración de este trabajo de investigación.

Al Dr. Francisco Meléndez Nina y a mi asesor de tesis, Ing. Máximo Mayta Lino, cuya guía y conocimiento han sido pilares fundamentales para el desarrollo de la presente investigación.

A todo el equipo de trabajo, supervisores y colaboradores de la empresa minera TUMI RAISE BORING S.A.C., y de manera especial al Ing. Leonid Gallegos Saldívar, cuya colaboración fue fundamental para la ejecución de este trabajo de investigación.

INTRODUCCIÓN

La minería subterránea moderna exige soluciones técnicas que incrementen la productividad y, al mismo tiempo, reduzcan los riesgos para el personal y los costos asociados a la explotación. En este contexto, la construcción de chimeneas SLOT constituye una operación clave, pues condiciona el desarrollo de métodos de explotación por rebaje y la eficiencia global del sistema de producción. Entre los métodos más empleados para la ejecución de este tipo de labores destacan el Vertical Crater Retreat (VCR) y el Raise Boring (RB), cada uno con ventajas y restricciones en términos de costo por metro, tiempo de ejecución, requerimientos operativos y nivel de seguridad.

En la Unidad Minera Cerro Lindo, ambos métodos se han utilizado en distintos sectores del cuerpo de mineral OB1; sin embargo, la selección entre VCR y Raise Boring suele basarse principalmente en la experiencia operacional y en criterios de corto plazo, más que en una evaluación comparativa sistemática de sus resultados. Esta situación genera incertidumbre al momento de definir el método constructivo más conveniente para nuevas chimeneas SLOT, especialmente cuando se busca optimizar simultáneamente costos, plazos y condiciones de seguridad operativa.

Frente a esta problemática, el presente trabajo de investigación desarrolla un análisis comparativo del desempeño de los métodos VCR y Raise Boring en la construcción de chimeneas SLOT en la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo. Se evalúan indicadores técnicos y económicos tales como el costo unitario por metro ejecutado, el tiempo total de construcción, la productividad por guardia y los factores asociados a la seguridad y exposición del personal.

El estudio se organiza en cinco capítulos. En el Capítulo I se presenta la problemática, los objetivos, la hipótesis y la justificación de la investigación. El Capítulo II desarrolla el marco

teórico y el estado del arte sobre métodos de construcción de chimeneas y criterios de evaluación técnico-económica. En el Capítulo III se describe la metodología empleada, el tipo y diseño de investigación, así como las técnicas de recolección y procesamiento de datos. El Capítulo IV expone el procedimiento de análisis, los resultados obtenidos y la comparación detallada entre los métodos VCR y Raise Boring. Finalmente, en el Capítulo V se formulan las conclusiones y recomendaciones orientadas a la selección óptima del método de construcción de chimeneas SLOT en la zona OB1 y en operaciones con condiciones similares.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo comparar el desempeño de los métodos VCR (Vertical Crater Retreat) y Raise Boring en la construcción de chimeneas SLOT, con el fin de determinar cuál resulta más conveniente en términos técnicos, económicos y de seguridad en la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo. Las chimeneas SLOT son fundamentales para la continuidad del método de explotación, la rotura del mineral y la ventilación en un contexto geomecánico complejo.

El estudio tuvo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, con un diseño no experimental y de corte transversal. Se analizaron seis chimeneas SLOT ejecutadas en la zona OB1, tres construidas mediante el método VCR y tres mediante Raise Boring. La información se obtuvo de reportes oficiales de las áreas de Perforación y Voladura, Geomecánica, Planeamiento y Seguridad, considerando indicadores como costo por metro, tiempo de ejecución, sobrerotura, desviación geométrica, número de incidentes y horas-hombre expuestas.

Los resultados muestran que el método VCR presentó un menor costo promedio, de 1 250 USD por metro, frente a 1 480 USD por metro en Raise Boring. No obstante, Raise Boring redujo el tiempo de ejecución en aproximadamente 31 %, disminuyó la sobrerotura de 22 % a 9 % y presentó menores incidentes operativos y horas-hombre expuestas. Se concluye que, si bien el método VCR resulta más económico, Raise Boring ofrece mejores condiciones de estabilidad geomecánica y seguridad, constituyéndose como una alternativa más favorable para chimeneas SLOT en condiciones similares a la zona OB1.

Palabras clave: Chimenea slot, VCR, Raise Boring, Metros perforados, Costos unitarios.

ABSTRACT

The objective of this research was to compare the performance of the VCR (Vertical Crater Retreat) and Raise Boring methods in the construction of SLOT raises, in order to determine which method is more suitable in technical, economic, and safety terms in the OB1 zone of the Cerro Lindo Mining Unit. SLOT raises are essential for ensuring the continuity of the mining method, effective ore fragmentation, and underground ventilation under complex geomechanical conditions.

The study followed a quantitative and applied approach, with a non-experimental, cross-sectional design. Six SLOT raises constructed in the OB1 zone were analyzed, three using the VCR method and three using Raise Boring. Data were obtained from official reports of the Drilling and Blasting, Geomechanics, Planning, and Safety departments, considering indicators such as cost per meter, execution time, overbreak percentage, geometric deviation, number of incidents, and exposed man-hours.

The results indicate that the VCR method presented a lower average cost, at USD 1,250 per meter, compared to USD 1,480 per meter for Raise Boring. However, Raise Boring reduced execution time by approximately 31%, decreased overbreak from 22% to 9%, and showed fewer operational incidents and lower exposed man-hours. It is concluded that although the VCR method is more economical per meter excavated, Raise Boring provides better geomechanical stability and higher safety levels, making it a more favorable alternative for SLOT raises under conditions similar to those of the OB1 zone.

Keywords: Slot raise, VCR, Raise Boring, Drilled meters, Unit costs.

ÍNDICE

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INTRODUCCIÓN	iv
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
LISTA DE ACRONIMOS	1
1. CAPÍTULO I	2
PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2.1. Problema General De La Investigación	3
1.2.2. Problemas Específicos De La Investigación	3
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1.4.1. Objetivo General	6
1.4.2. Objetivos Específicos.....	6
1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.5.1. Delimitación Geográfica	6
1.5.2. Delimitación Temporal	7
2. CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN	9

2.1.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	9
2.1.1.	Antecedentes Internacionales.....	9
2.1.2.	Antecedentes Nacionales.....	10
2.2.	BASES TEÓRICAS	12
2.2.1.	Labores Mineras Subterráneas	12
2.2.2.	Tipos De Labores Subterráneas.....	12
2.2.3.	Diseño Y Prácticas De Perforación Y Voladura De Chimeneas.....	14
2.2.4.	Chimeneas En Minería	22
2.2.5.	Mecánica De Rocas	38
2.2.6.	Geología Y Su Impacto En Operaciones De Voladura	40
2.2.7.	Geomecánica	41
2.3.	MARCO CONCEPTUAL	44
2.4.	HIPÓTESIS	45
2.4.1.	Hipótesis General	45
2.4.2.	Hipótesis Específicas.....	46
2.4.3.	Variables e Indicadores	46
2.5.	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	47
3.	CAPÍTULO III.....	48
	METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN	48
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	48

3.2.	NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	48
3.3.	POBLACIÓN	48
3.4.	MUESTRA	48
3.5.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE CAPTURA DE INFORMACIÓN.....	49
3.5.1.	Técnicas De Recolección De Datos	49
3.5.2.	Instrumentos De Recolección De Datos.....	50
3.5.3.	Procesamiento y Análisis De Datos	50
4.	CAPÍTULO IV CONSTRUCCIÓN DE LA CHIMENEA SLOT POR EL MÉTODO VCR Y RAISE BORING EN LA ZONA OB1	53
4.1.	ANÁLISIS DE PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DE LA ZONA OB1... 53	
4.1.1.	Mapeo Geomecánico De Las Labores Subterráneas.....	53
4.2.	ANALISIS OPERACIONAL DE LA UNIDA MINERA CERRO LINDO... 62	
4.2.1.	Método de Explotación Aplicado en la Zona Ob1	62
4.2.2.	Características del Yacimiento y Selección del Método.....	65
4.3.	CONSTRUCCIÓN DE LA CHIMENEA SLOT POR EL MÉTODO VCR .. 70	
4.3.1.	Construcción de Chimenea de Cara Libre.....	70
4.3.2.	Ejecución del Slot del Tajeo.....	73
4.4.	CONSTRUCCIÓN DE LA CHIMENEA SLOT POR EL MÉTODO RAISE BORING	79
4.4.1.	Máquina Empleada – SBM400SR	79

4.4.2.	Traslado de Máquina.....	81
4.4.3.	Instalación de Máquina	83
4.4.4.	Dimensiones y Capacidades de la Maquina SBM 400 SR.....	84
4.4.5.	Dimensiones de la Cámara de Instalación.....	86
4.4.6.	Traslado de Barras de Perforación	88
4.4.7.	Parámetros a Considerar para Aplicar el Método Raise Boring	90
4.4.8.	Parámetros Operaciones del Proceso de Perforación Raise Boring.....	91
4.4.9.	Avance de Perforación por la Máquina RB	91
4.4.10.	Resumen De Distribución De Tiempos Al Día.....	92
4.4.11.	Total De Días En Ejecutar Chimenea Slot.....	95
4.4.12.	Costos Asociados A La Construcción De La Chimenea Mediante El Método Raise Boring	95
5.	CAPÍTULO V ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	97
5.1.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	97
5.1.1.	Comparación de Tiempos de Ejecución.....	98
5.1.2.	Comparación de Costos Unitarios.....	99
5.1.3.	Análisis de Seguridad Operativa	99
5.2.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	100
5.2.1.	¿Cuál es el rendimiento en tiempo de ejecución de los métodos vcr y raise boring?	100

5.2.2. ¿Qué diferencias existen en los costos unitarios de construcción entre ver y raise boring? 101

5.2.3. ¿Cómo influyen los métodos en la seguridad y calidad geométrica de las chimeneas? 102

CONCLUSIONES 104

RECOMENDACIONES 106

BIBLIOGRAFÍA 107

6. ANEXOS 111

ANEXO 1 111

1. ÁMBITO DE ESTUDIO Y GEOLOGÍA 111

1.1. UBICACIÓN 111

1.2. ACCESIBILIDAD 112

1.3. CLIMA Y VEGETACIÓN 112

1.4. TOPOGRAFÍA Y DRENAJE 112

1.5. GEOMORFOLOGÍA 113

PAMPA COSTANERA 113

SUPERFICIE PUNA 113

ETAPA CAÑÓN 113

ETAPA VALLE 114

1.6. GEOLOGÍA GENERAL 114

1.7.	GEOLOGIA REGIONAL	114
	FORMACIÓN HUARANGUILLO (Kis-hu).....	115
	FORMACIÓN TANTARÁ (PTT-AN).....	117
	CUATERNARIO.....	119
	ROCAS INTRUSIVAS	119
1.8.	GEOLOGIA LOCAL	122
	FORMACIÓN HUARANGUILLO (Kis-hu).....	123
	ROCAS INTRUSIVAS	124
1.9.	GEOLOGIA ESTRUCTURAL.....	125
1.10	. GEOLOGIA ECONÓMICA	126
	ALTERACIÓN.....	126
	MINERALIZACIÓN.....	128
	ANEXO 2: PARÁMETROS DE PRESIÓN.....	132
	ANEXO 3: REGISTRO FOTOGRÁFICO	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Coeficiente de roca y distancia entre taladros	20
Tabla 2	Fórmula para el burden y espaciamiento	20
Tabla 3	Factor de carga.....	21
Tabla 4	Ventajas y desventajas del método Raise - Borer.....	37
Tabla 5	Calidad de Roca Basada en RQD.....	42
Tabla 6	Clasificación Geomecánica RMR	43
Tabla 7	Operacionalización de variables.....	47
Tabla 8	Tabla de Valoración de RMR.....	56
Tabla 9	Registro estructural según estaciones de levantamiento geomecánico.	57
Tabla 10	Evaluación RMR Tipo IIIA - Regular A	58
Tabla 11	Evaluación RMR Tipo IIIB - Regular B.....	59
Tabla 12	Parámetros que acondicionan el Método Sublevel Stopping.....	66
Tabla 13	Dimensiones del Tajo T-1010B	67
Tabla 14	Especificaciones Técnicas del SIMBA H1354.....	70
Tabla 15	Dimensiones y parámetros de chimenea construida mediante VCR	72
Tabla 16	Resumen de la construcción final de la chimenea	78
Tabla 17	Costos asociados a la Construcción de la Chimenea mediante el método V.C.R. .	79
Tabla 18	Especificaciones Técnicas – SBM 400 SR	80
Tabla 19	Dimensiones y Capacidades de la Máquina SBM 400 SR	85
Tabla 20	Dimensiones Estándar de la Cámara de Instalación	86
Tabla 21	Personal requerido en la construcción de chimeneas por Raise Boring	91

Tabla 22	Secuencia de actividades, duración y observaciones en la ejecución de chimenea por Raise Boring 92	
Tabla 23	Tabla de resultados – Rendimiento por actividad Raise Boring.....	95
Tabla 24	Composición de costos de construcción de chimenea Raise Boring	96
Tabla 25	Tabla Comparativa de ambos métodos	97
Tabla 26	Mineralización en la zona de la Unidad Minera Cerro Lindo	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Labores Mineras Subterráneas.....	12
Figura 2	Construcción de banqueo de chimeneas.....	15
Figura 3	Construcción de chimeneas en espiral.....	15
Figura 4	Construcción de chimeneas en sección completa.....	16
Figura 5	Método de corte relleno.....	17
Figura 6	Método de corte en “V”.....	17
Figura 7	Método de construcción en sección completa.....	19
Figura 8	Excavación manual de chimeneas Mediante Jaula Alimak.....	23
Figura 9	Técnicas mecanizadas de perforación para construcción de chimeneas: “Raise boring”	23
Figura 10	Método de Cráteres Invertidos VCR.....	30
Figura 11	Construcción de chimenea con un equipo Raise Borer.....	34
Figura 12	Esquema de operación de un equipo Raise Borer en un sistema convencional.....	34
Figura 13	Excavación de la perforadora de un equipo Raise-Borer.....	36
Figura 14	Excavación de chimenea con equipo Raise Borer.....	37
Figura 15	Excavación descendente.....	38
Figura 16	Modelo de Bloques Geomecánicos de la Chimenea Slot RB TUMI en el Tajeo T-101, Zona OB1 (Niveles 1520 y 1490).....	61
Figura 17	UM Cerro Lindo.....	63
Figura 18	Diagrama del Método de Explotación Sublevel Stopping.....	64
Figura 19	División de bloques en el Minado de Tajeos del OB1.....	65
Figura 20	Ciclo de Minado en UM Cerro Lindo.....	67
Figura 21	Plano de Diseño y Dimensionamiento del Tajo T-101B.....	68

Figura 22	SIMBA H1354 EPIROC.....	69
Figura 23	Esquema de voladura de la chimenea con el Método V.C.R.....	71
Figura 24	Diseño de malla de perforación para slot con disposición de 23 taladros	74
Figura 25	Ejecución del taladro guía y los taladros de escariado o alivio.	74
Figura 26	Distribución y carguío de taladros en los disparos del sistema VCR	76
Figura 27	Resultados después de la primera y segunda voladura	77
Figura 28	Máquina Raise Boring SBM400SR.....	80
Figura 29	Traslado de la máquina mediante sus Orugas.....	82
Figura 30	Ancho del Equipo	85
Figura 31	Altura del Equipo.....	86
Figura 32	Cámara de Instalación SBM 400 SR	87
Figura 33	Herramientas y disposición para el manipuleo seguro de tuberías de perforación	89
Figura 34	Registro de actividades ejecutadas en la construcción de chimenea por Raise Boring – Zona OB1	94
Figura 35	Comparación de Tiempos según el método de construcción.....	98
Figura 36	Ubicación de la Unidad Minera Cerro Lindo	111
Figura 37	Representación de los tipos de alteración	127

LISTA DE ACRONIMOS

- VCR: Vertical Crater Retreat (Retiro por Cráter Vertical)
- RB: Raise Boring (Perforación de chimeneas)
- OB1: Ore Body 1 (Cuerpo de mineral 1)
- RMR: Rock Mass Rating (Clasificación del macizo rocoso)
- GSI: Geological Strength Index (Índice de resistencia geológica)
- CMS: Cavity Monitoring System (Sistema de monitoreo de cavidades)
- ROP: Rate of Penetration (Velocidad de penetración)
- RPM: Revolutions Per Minute (Revoluciones por minuto)
- KPI: Key Performance Indicator (Indicador clave de desempeño)
- MINEM: Ministerio de Energía y Minas
- USD: United States Dollar (Dólar estadounidense)
- TM: Tonelada métrica
- m³: Metro cúbico

CAPÍTULO I

PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la Unidad Minera Cerro Lindo se busca determinar la alternativa más adecuada para la construcción de chimeneas SLOT mediante la comparación entre el método VCR y el método Raise Boring, con el propósito de incrementar la eficiencia operativa, disminuir los costos y los tiempos de ejecución, y reforzar la seguridad durante el proceso constructivo. En la situación actual, el método VCR presenta limitaciones importantes, tales como un costo elevado por metro lineal desarrollado, mayores plazos de construcción y un impacto desfavorable en la seguridad operativa, debido a la mayor exposición del personal a condiciones de riesgo.

En la zona OB1, donde se proyecta la construcción de las chimeneas, se han identificado desafíos vinculados con la calidad geomecánica del macizo rocoso. Estos aspectos inciden directamente en la estabilidad de las estructuras, lo que se traduce en incrementos de costos y tiempos cuando se emplea el método VCR. Asimismo, los incidentes registrados durante la ejecución de estas labores evidencian la necesidad de considerar alternativas que reduzcan la exposición del personal y los riesgos asociados. En este contexto, el método Raise Boring se plantea como una opción técnica favorable, capaz de mejorar la eficiencia de las operaciones al reducir el costo global del proyecto y acortar la duración de las construcciones, además de ofrecer mejores estándares de calidad en las chimeneas terminadas y disminuir la ocurrencia de incidentes y retrabajos.

Por ello, para seleccionar el método de construcción de chimeneas SLOT en la Unidad Minera Cerro Lindo, se propone realizar una evaluación integral de los métodos VCR y RB, considerando la calidad del macizo rocoso, las características del equipamiento disponible y la

experiencia del personal. De esta manera, se busca garantizar una toma de decisiones sólida, orientada a la sostenibilidad, la seguridad y la eficiencia de las operaciones en la Unidad Cerro Lindo.

1.2.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema General De La Investigación

- ¿Cuál es el método que ofrece mejores resultados para la construcción de chimeneas SLOT en la Unidad Minera Cerro Lindo, considerando las técnicas VCR y Raise Boring en la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo?

1.2.2. Problemas Específicos De La Investigación

- ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de los métodos VCR y Raise Boring en la construcción de chimeneas SLOT en la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo?
- ¿Qué factores técnicos, económicos y de seguridad influyen en la elección entre los métodos VCR y Raise Boring en la construcción de chimeneas Slot en la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo?
- ¿Qué método permite una mayor eficiencia operativa en términos de tiempo y recursos en la construcción de chimeneas slot en la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo?

1.3.JUSTIFICACIÓN

La construcción de chimeneas SLOT en minería subterránea no es solo una actividad rutinaria del ciclo de minado, sino una operación que concentra una parte importante del riesgo, del costo y de la continuidad productiva. En la Unidad Minera Cerro Lindo, y en particular en la zona OB1, la elección entre el método VCR (Vertical Crater Retreat) y el método Raise Boring se

ha venido realizando de forma práctica, apoyada en la experiencia operativa, pero sin contar con un estudio comparativo específico que cuantifique sus diferencias en términos de costo por metro, tiempos de ejecución, estabilidad geomecánica y seguridad del personal. Esta ausencia de análisis sistemático genera incertidumbre al momento de definir el método constructivo para cada nueva chimenea SLOT, pudiendo derivar en sobreroturas elevadas, retrabajos, incremento de horas-hombre expuestas y desviaciones respecto al plan de minado.

Desde el punto de vista económico, la justificación se sustenta en el impacto directo que tiene la elección del método sobre el costo unitario de desarrollo vertical y sobre los costos indirectos asociados a la estabilidad de la excavación. Registros operativos de Cerro Lindo muestran que los costos de construcción de chimeneas SLOT pueden variar significativamente entre un método y otro, tanto por el consumo de explosivos y materiales de sostenimiento, como por el uso de equipo especializado y la cantidad de horas de equipo requeridas. Un método con mayor sobrerotura o con mayores desviaciones puede incrementar el volumen de fortificación, los tiempos de limpieza y las demoras en la habilitación de los tajos, afectando el costo global del proyecto. Por ello, cuantificar y comparar el costo por metro ejecutado entre VCR y Raise Boring en OB1 permite a la empresa tomar decisiones que optimicen el presupuesto de desarrollo, reduzcan la variabilidad de los costos y mejoren la rentabilidad del método de explotación en el mediano plazo.

En el ámbito técnico, la construcción de chimeneas SLOT en la zona OB1 está condicionada por una geología compleja, con variaciones de calidad de roca, presencia de contactos mineral-mineral y roca estéril, así como sistemas de discontinuidades que influyen directamente en la estabilidad de excavaciones verticales. Cada método responde de manera distinta a estas condiciones: mientras VCR depende fuertemente del diseño de perforación y de la

secuencia de voladura, Raise Boring se basa en la perforación de un taladro piloto y el escariado controlado. Evaluar comparativamente parámetros como sobrerotura, desviación del eje, sección resultante de la chimenea y comportamiento geomecánico posterior a la excavación permite determinar en qué rangos de calidad de roca y en qué configuraciones de OB1 resulta más conveniente un método u otro. De este modo, la investigación aporta criterios técnicos concretos para el diseño y selección del método de construcción, disminuyendo la dependencia exclusiva de la experiencia empírica y fortaleciendo la toma de decisiones basada en evidencia.

En cuanto a la seguridad y gestión del riesgo, la justificación se basa en que la construcción de chimeneas es una de las actividades de mayor exposición para el personal, por la presencia de caída de rocas, gases residuales, trabajo en altura y manipulación de explosivos. El método VCR implica una mayor intervención directa del personal en las labores de perforación, carga de explosivos y limpieza de la chimenea, mientras que Raise Boring, al ser un método principalmente mecanizado, reduce significativamente la permanencia de trabajadores en zonas de alto riesgo. Comparar indicadores como número de incidentes, cuasi accidentes, horas-hombre expuestas en interior de chimenea y condiciones de ventilación durante la ejecución permite demostrar en qué medida la elección del método contribuye a reducir la probabilidad de accidentes y a cumplir con los estándares de seguridad exigidos por la normativa y por la propia política de la empresa. Así, la investigación no solo tiene un propósito técnico, sino también un impacto directo en la protección de la vida y salud de los trabajadores.

Finalmente, la investigación se justifica porque sus resultados tienen un alcance práctico inmediato para Cerro Lindo y un potencial de replicabilidad en otras minas con condiciones geológicas similares. Al establecer, con datos cuantitativos de la zona OB1, cuál método resulta más eficiente y seguro bajo determinadas condiciones, se entrega a la operación una herramienta

de decisión que puede ser incorporada en los criterios de diseño de chimeneas, en los planes de minado y en la estandarización de procedimientos. Además, el estudio aporta al conocimiento académico en ingeniería de minas, al documentar de manera ordenada la experiencia comparativa entre VCR y Raise Boring en un yacimiento polimetálico de alta producción, generando una referencia que puede ser utilizada en futuras investigaciones y proyectos de optimización de métodos de explotación subterránea.

1.4.OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo General

- Comparar los métodos VCR y Raise Boring y determinar el más adecuado en la construcción de chimeneas slot en la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Identificar y caracterizar las ventajas y desventajas operativas de los métodos VCR y Raise Boring en la construcción de chimeneas slot en la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo.
- Determinar los factores técnicos, económicos y de seguridad que influyen en la elección entre los métodos VCR y Raise Boring en la construcción de chimeneas slot en la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo.
- Medir la eficiencia operativa al aplicar los métodos Raise Boring y VCR en la construcción de chimeneas slot en la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo.

1.5.DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Delimitación Geográfica

La presente investigación se desarrolla en la Unidad Minera Cerro Lindo, ubicada en la quebrada Topará, perteneciente al distrito de Chavín, provincia de Chincha, departamento de Ica,

en la costa sur del Perú. Políticamente, el área de influencia directa de la operación se emplaza dentro de la jurisdicción de la Región Ica, y se accede principalmente desde la carretera Panamericana Sur a la altura del km 177, continuando por una vía afirmada hacia el interior de la quebrada. La mina opera a una altitud aproximada entre 1 820 y 2 130 m s.n.m., en un relieve fuertemente escarpado típico de laderas costeras andinas.

Geográficamente, la Unidad Minera Cerro Lindo se localiza en el sistema de coordenadas UTM, datum WGS 84, zona 18S. El punto de referencia principal de la operación se sitúa aproximadamente en las coordenadas UTM N 8 554 400 m y E 993 100 m, que corresponden al centro operativo de la mina y sus principales accesos subterráneos. Estas coordenadas se encuentran dentro del polígono concesionado a Nexa Resources Perú S.A.A., que engloba las labores subterráneas, la planta concentradora, los depósitos de desmonte y demás instalaciones auxiliares.

El ámbito específico de la investigación se delimita al interior de la zona OB1 de Cerro Lindo, donde se ubican las chimeneas SLOT analizadas en este estudio. Dichas chimeneas se desarrollan en el dominio geológico correspondiente al cuerpo mineralizado OB1 y en los niveles de trabajo donde se ejecutan las labores de explotación, aproximadamente entre las cotas 1 680 y 1 800 m s.n.m., al interior del mismo polígono UTM antes descrito. De este modo, la delimitación geográfica del estudio comprende exclusivamente las chimeneas SLOT construidas mediante los métodos VCR y Raise Boring en OB1, descartándose otras zonas de la unidad minera y sin abarcar instalaciones superficiales ajenas al proceso de explotación subterránea.

1.5.2. Delimitación Temporal

La investigación abarca el período comprendido entre enero y julio de 2025, intervalo en el cual se recopilaron y analizaron los registros operativos de construcción de chimeneas SLOT en

la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo. Este rango de tiempo incluye tanto la parte final de la temporada de lluvias (enero–marzo) como el inicio y consolidación de la estación seca (abril–julio) en el distrito de Chavín, provincia de Chincha, donde el yacimiento se emplaza. De acuerdo con los informes climáticos de la operación, la mina se ubica en un clima árido frío–templado, con precipitaciones concentradas principalmente entre diciembre y marzo y muy escasas el resto del año; en la temporada húmeda se pueden presentar acumulados mensuales del orden de 100 a 150 mm, mientras que durante la estación seca la precipitación tiende a ser mínima o prácticamente nula.

Esta delimitación temporal es relevante porque permite evaluar el desempeño de los métodos VCR y Raise Boring bajo condiciones climáticas contrastantes pero representativas de la realidad anual de Cerro Lindo: por un lado, los meses de enero a marzo, en los que se pueden registrar mayores niveles de humedad ambiental, presencia ocasional de lluvias y eventuales afectaciones en las vías de acceso y en las labores superficiales; por otro lado, los meses de abril a julio, caracterizados por un ambiente mayormente seco y estable que favorece la continuidad de las operaciones subterráneas durante todo el año. De esta manera, los datos analizados reflejan el comportamiento técnico, económico y de seguridad de la construcción de chimeneas SLOT en un ciclo climático completo de transición de temporada húmeda a seca, sin que las variaciones meteorológicas lleguen a interrumpir la operación, pero sí proporcionando un contexto realista de las condiciones bajo las que se toman las decisiones de método constructivo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. *Antecedentes Internacionales*

- **Medina (2020)** “*Estudio comparativo técnico-económico de diseño de chimenea, caso chimenea Mina Pajonales (Manual-Alimak-Raise Boring)*” Tesis para optar al grado de Ingeniero Civil de Minas presentada en la Universidad Andrés Bello–Concepción.

El principal objetivo de esta tesis es realizar un estudio comparativo técnico-económico para el diseño de una chimenea en la Mina Pajonales, ubicada en la IV Región de Coquimbo, provincia del Elqui, localidad de Algarrobito. Su acceso se encuentra en el kilómetro 15 de la ruta 41, que conecta las localidades de La Serena y Algarrobito, y contempla la recuperación de minerales de cobre. Este análisis busca determinar la mejor metodología para la construcción de la chimenea, considerando las alternativas: Alimak, Raise Boring y el método Convencional, con el fin de implementar una tecnología innovadora, eficiente y segura, adaptada al tipo de yacimiento.

La metodología del estudio evaluó las diferentes técnicas para excavaciones verticales bajo condiciones geomecánicas similares, tomando en cuenta aspectos clave como el tiempo de ejecución, la seguridad del personal y los costos involucrados. El análisis permitió descartar el método Convencional, ya que no cumple con las especificaciones técnicas requeridas para esta chimenea (52 metros de profundidad).

En cuanto a los costos calculados, la metodología Alimak demostró ser la opción más económica, con un costo estimado de 2.279,43 US\$/m, en comparación con la metodología Raise

Boring, que implica un costo de 2.570,16 US\$/m. Sin embargo, tras evaluar factores técnicos y de seguridad, se concluyó que la metodología Raise Boring es la más recomendable, ya que, a pesar de su costo ligeramente superior, ofrece un menor tiempo de ejecución y reduce significativamente los riesgos para el personal involucrado en el proceso.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

- **Rivera (2015)** “*Construcción de chimeneas Raise Borer para optimizar el proceso de minado y los costos de explotación en el tajo 355 de Reina Leticia en Compañía Minera Raura S.A.*” Tesis para optar al grado de Ingeniero de Minas presentada en la Universidad Nacional del Centro del Perú – Huancayo.

El principal objetivo de este estudio es evaluar alternativas técnico-económicas para maximizar el sistema de minado y minimizar los costos en el tajo 355 de la zona Reina Leticia, perteneciente a la Compañía Minera Raura S.A. Este trabajo se centra en la construcción de dos chimeneas Raise Borer como solución para mejorar la producción y disminuir los costos de explotación en la mencionada área.

La investigación se originó a partir de la siguiente interrogante: ¿Cómo optimizar el proceso de minado y los costos unitarios de explotación en el tajo 355 de la zona Reina Leticia? Para responder a esta pregunta, se formuló la hipótesis de que la construcción de dos chimeneas Raise Borer permitirá alcanzar dichos objetivos. La investigación se clasifica como científica, de tipo experimental, con un diseño descriptivo. La población de estudio está compuesta por todos los tajos de la zona Reina Leticia, mientras que la muestra específica se limitó al Tajo 355 de esta área.

El desarrollo del trabajo incluyó un análisis detallado de los costos unitarios, la capacidad de producción y los beneficios técnicos asociados al uso de chimeneas Raise Borer. Este enfoque

permitió identificar cómo esta tecnología optimiza el proceso de minado, reduce tiempos de operación y mejora la seguridad en el tajo 355. Adicionalmente, se evaluaron las implicaciones económicas de implementar este sistema, demostrando su viabilidad frente a otros métodos tradicionales.

- **Estacio (2015)** “*Aplicación del Método de Explotación Minera V.C.R. para Optimizar la Producción en Mina Melisa de la Compañía Minera Catalina Huanca S.A.C.*” Tesis para optar al grado de Ingeniero de Minas presentada en la Universidad Nacional del Centro del Perú – Huancayo.

El principal objetivo de este estudio es verificar la aplicabilidad del método de explotación Vertical Crater Retreat (VCR) para optimizar la producción de mineral en la Mina Melisa, perteneciente a la Compañía Minera Catalina Huanca S.A.C. La investigación se centra en la implementación de este método como una solución técnica para mejorar la eficiencia en la extracción y garantizar una operación más segura.

La investigación tiene el objetivo de determinar si la aplicación del método de explotación VCR optimizará la producción de mineral en la Mina Melisa de la Compañía Minera Catalina Huanca S.A.C. La investigación se clasifica como científica, de tipo experimental, con un diseño descriptivo. La población de estudio está compuesta por todas las unidades de explotación de la mina Melisa, mientras que la muestra específica se limitó a las zonas seleccionadas donde se implementó este método.

El desarrollo del trabajo incluyó un análisis detallado de la producción, la seguridad y los beneficios técnicos asociados al uso del método VCR. Este enfoque permitió identificar cómo la implementación de este sistema mejora la eficiencia en la extracción de mineral, reduce la exposición del personal a riesgos operacionales y optimiza los tiempos de minado.

Adicionalmente, se evaluaron las implicaciones económicas de su aplicación, demostrando su viabilidad frente a otros métodos convencionales de explotación.

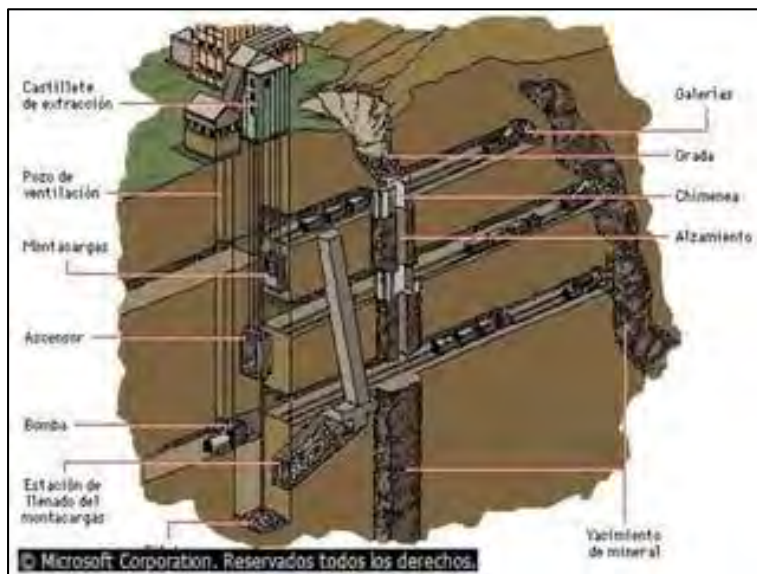
2.2.BASES TEÓRICAS

2.2.1. *Labores Mineras Subterráneas*

Son excavaciones diseñadas con distintos propósitos y configuraciones, cuyo objetivo principal es acceder a un yacimiento específico, establecer comunicación con la superficie y fragmentarlo en secciones previamente definidas en tamaño y forma. Este proceso permite extraer el material de interés de manera estructurada, garantizando seguridad en las operaciones y optimizando los costos de producción. (Herrera, 2019).

Figura 1

Labores Mineras Subterráneas



Fuente: Microsoft Corporation

2.2.2. *Tipos De Labores Subterráneas*

2.2.2.1. **Labores De Exploración.**

La extracción de minerales implica una serie de procedimientos estructurados. Inicialmente, se lleva a cabo la prospección, un análisis preliminar del área con el fin de detectar posibles indicios de mineralización. Posteriormente, se desarrolla una exploración más exhaustiva,

cuyo propósito es determinar la composición del yacimiento, evaluar su rentabilidad y establecer si su explotación resulta viable desde el punto de vista técnico y económico. (Herrera, 2019).

2.2.2.2. Labores De Acceso.

Estas operaciones mineras subterráneas desempeñan un papel clave en la vinculación del yacimiento con la superficie. Su ejecución se extiende a lo largo del tiempo e involucra la construcción de diversas infraestructuras, como túneles, chimeneas, rampas y accesos inclinados, que permiten un acceso eficiente al depósito mineral desde el exterior. (Herrera, 2019).

2.2.2.3. Labores De Desarrollo.

El objetivo de estas operaciones es habilitar accesos y redes internas dentro de las zonas mineralizadas, segmentando el yacimiento en unidades que faciliten una extracción óptima. Estas tareas se agrupan en desarrollo productivo y desarrollo improductivo, según su impacto directo en el proceso de explotación del mineral. (Herrera, 2019).

2.2.2.4. Labores De Preparación.

Estas labores están orientadas a mejorar la eficiencia en la extracción del yacimiento tras la finalización de las etapas de acceso y desarrollo. Para ello, se implementan estrategias adaptadas a las condiciones geológicas y geotécnicas del depósito, teniendo en cuenta su orientación y ángulo de inclinación. Este enfoque busca optimizar la recuperación de recursos, reducir los costos operativos y garantizar una explotación sostenible a largo plazo, asegurando así una operación rentable y ambientalmente responsable. (Herrera, 2019).

2.2.2.5. Labores De Explotación.

Estas operaciones comprenden la remoción, tratamiento y almacenamiento de los minerales dentro del área concesionada en minería subterránea. Además, abarcan el cierre y

desmantelamiento de las instalaciones asociadas a la actividad extractiva una vez finalizada la explotación. (Herrera, 2019).

2.2.2.6. Labores Auxiliares.

Se trata de actividades auxiliares que tienen como propósito respaldar las labores principales de extracción. Su objetivo es mantener condiciones óptimas de seguridad, eficiencia y productividad, permitiendo que el proceso de explotación minera se desarrolle de manera continua y sin contratiempos. (Herrera, 2019).

2.2.3. Diseño Y Prácticas De Perforación Y Voladura De Chimeneas

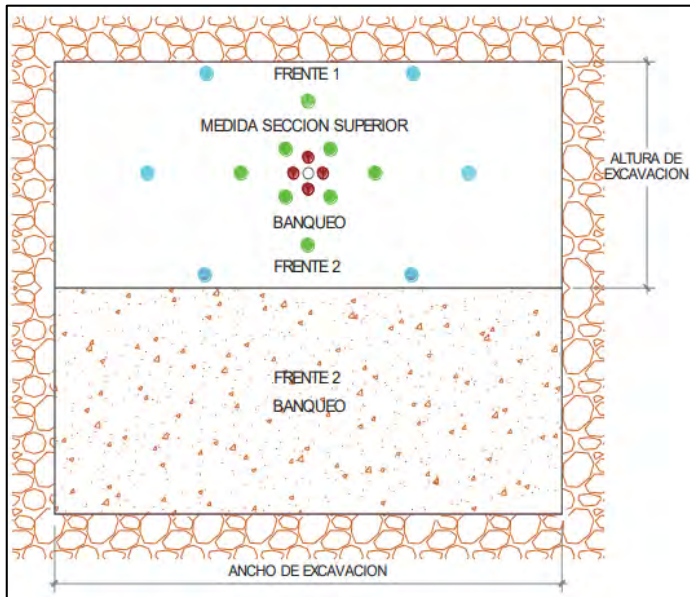
La perforación, siendo la primera etapa del proceso, tiene como finalidad generar aberturas cilíndricas en la roca, denominadas taladros, barrenos o perforaciones, las cuales sirven para alojar los explosivos y sus respectivos accesorios de iniciación (López y otros, 2003, pág. 15).

2.2.3.1. Métodos de Realización de chimeneas.

a) Método de Banqueo

Este método, utilizado en chimeneas con secciones rectangulares o cuadradas, consiste en perforar únicamente la mitad del piso en cada fase de avance. Durante el proceso, se mantiene un desnivel entre ambos lados, lo que favorece la formación de una cara libre y facilita el drenaje del agua cuando su presencia es considerable (López y otros, 2003).

Figura 2
Construcción de banqueo de chimeneas

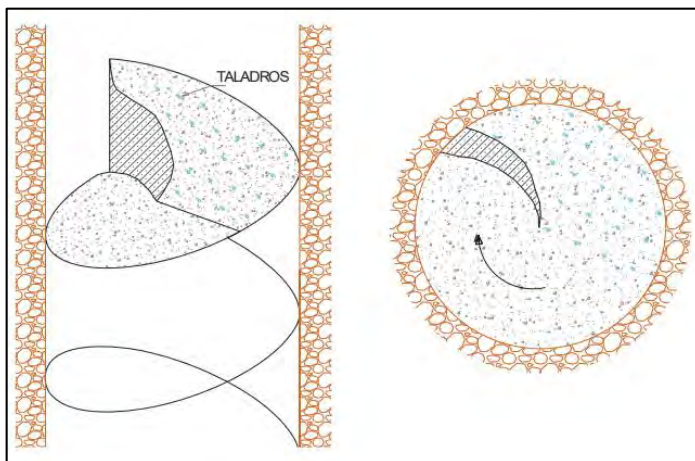


Fuente: (López y otros, 2003)

b) Método Espiral.

Frecuentemente utilizado en secciones circulares, este método consiste en la formación de una espiral en el piso. La altura de cada nivel dentro de la espiral depende tanto del diámetro de la sección como de las propiedades geotécnicas del terreno.

Figura 3
Construcción de chimeneas en espiral



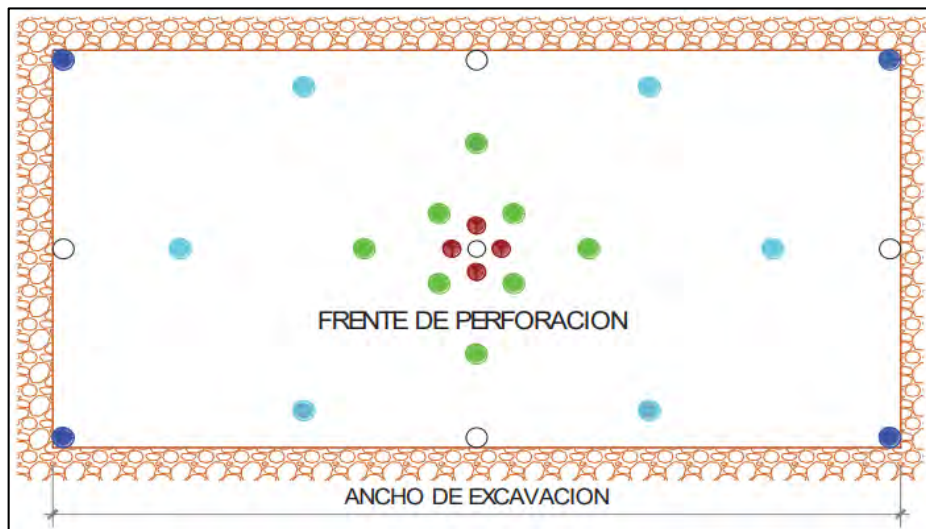
Fuente: (López y otros, 2003)

c) Método de Sección Completa.

Este método, aplicable tanto a secciones rectangulares como circulares, comparte características con la excavación de túneles o galerías. Su ejecución comienza con la generación de una cara libre, la cual se logra mediante cortes en forma de "V" o paralelos, empleando taladros de alivio para facilitar la fragmentación del material (López y otros, 2003, págs. 225 - 227).

Figura 4

Construcción de chimeneas en sección completa



Fuente: (López y otros, 2003)

2.2.3.2. Métodos de arranque.

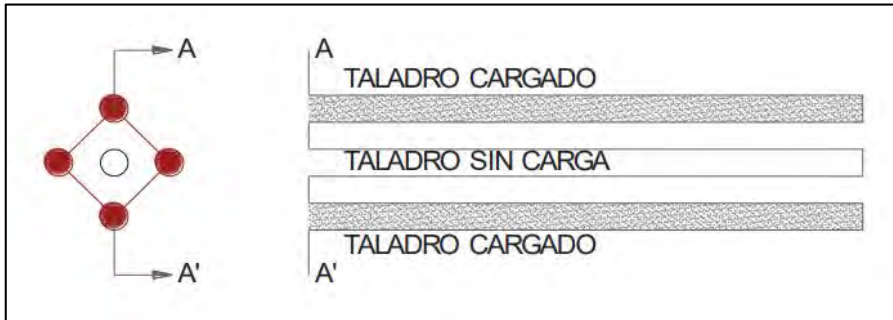
a) Método de Corte Quemado (Burn Cut).

Este método, recomendado para formaciones rocosas de alta resistencia, consiste en la perforación de taladros paralelos orientados perpendicularmente a la cara libre y dispuestos a una distancia reducida entre sí y la distribución de los taladros se organiza de manera alternada, combinando perforaciones de pequeño diámetro cargadas con explosivos y otras vacías, también puede implementarse un taladro central de mayor diámetro rodeado por taladros más pequeños, en cuanto el espaciamiento óptimo entre

perforaciones varía entre 3 y 6 pulgadas, dependiendo de las características de la roca. Este procedimiento mejora la eficiencia del avance en la perforación, optimizando la fragmentación del material. (EXSA S.A., 2021).

Figura 5

Método de corte relleno



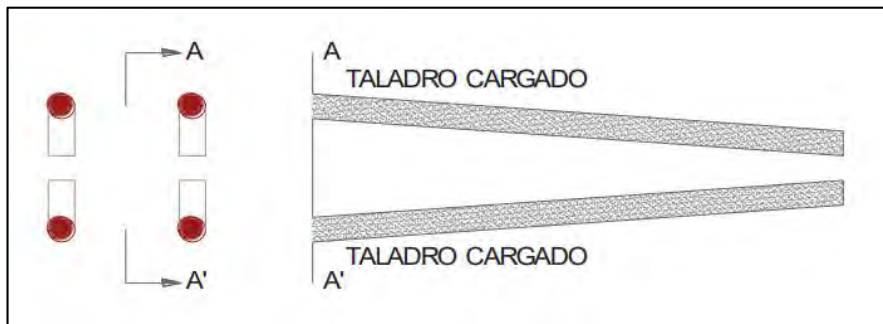
Fuente: (EXSA S.A., 2021)

b) Corte en "V" o Cuña.

Este método consiste en la perforación de dos taladros complementarios que convergen en el fondo, ambos cargados con explosivos. La inclinación de los taladros puede oscilar entre 60° y 70° en relación con la superficie del frente de trabajo. Es una técnica eficaz para formaciones rocosas de textura suave a intermedia, aunque su alcance en términos de avance es relativamente limitado (EXSA S.A., 2021).

Figura 6

Método de corte en "V"



Fuente: (EXSA S.A., 2021)

c) Corte en Pirámide.

Este método se utiliza en escenarios que exigen perforaciones de alta precisión, aunque su implementación en frentes horizontales presenta dificultades y es especialmente eficaz en rocas duras y tenaces, destacándose en la excavación de chimeneas y piques, debido a su complejidad y los desafíos que implica su aplicación, este enfoque se reserva para situaciones específicas donde la exactitud es fundamental, siendo particularmente útil en entornos de explotación vertical (EXSA S.A., 2021).

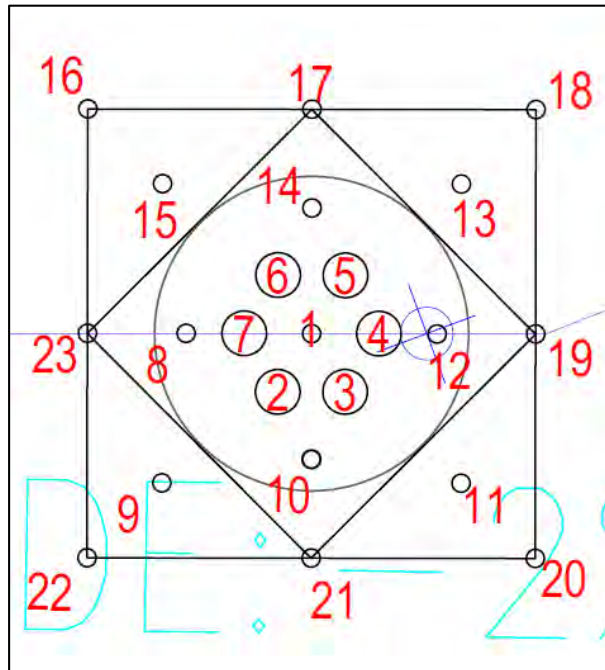
2.2.3.3. Distribución y Nomenclatura de Taladros.

En el diseño de voladuras subterráneas, los taladros se disponen de forma concéntrica, ubicando aquellos destinados al corte o arranque en la parte central de la voladura, esta distribución responde a la clasificación de los taladros según su función en el proceso de fragmentación del macizo rocoso. Los taladros de arranque son los primeros en detonar y generan la cavidad inicial, para lo cual requieren una carga explosiva entre 1.3 y 1.5 veces mayor que la del resto de los taladros, a continuación, se activan los taladros de ayuda, situados alrededor de los de arranque, cuya función es ampliar la cavidad inicial.

Los taladros cuadradores posicionados en los laterales del túnel, se encargan de definir los hastiales o flancos de la excavación, los taladros de alza o de corona, ubicados en la parte superior, dan forma a la bóveda del túnel y los taladros de arrastre, situados en el piso del túnel o galería, son los últimos en detonar, permitiendo completar la excavación (EXSA S.A., 2021, págs. 185-186).

Figura 7

Método de construcción en sección completa



Fuente: Departamento de Planeamiento de Minado – UM Cerro Lindo.

Objetivo: Representar esquemáticamente la disposición y función de los diferentes tipos de taladros en el frente de avance (arranque y ayudas), con el fin de optimizar la fragmentación del macizo rocoso y garantizar un avance controlado y seguro de la labor.

2.2.3.4. Cantidad de Taladros.

La cantidad de taladros requeridos en un frente de voladura subterránea está determinada por diversos factores, entre ellos, la naturaleza de la roca a fragmentar, el nivel de confinamiento, el grado de fragmentación requerido y el diámetro de las brocas de perforación disponibles. Cada uno de estos elementos puede condicionar la necesidad de ajustar la malla de perforación, lo que podría implicar un incremento o reducción en el número de taladros respecto a los cálculos teóricos. Asimismo, la selección del tipo de explosivo y el sistema de iniciación empleado también inciden en la cantidad y disposición final de los taladros. (EXSA, 2009, págs. 187-188).

Una fórmula precisa para calcular el número de taladros es la siguiente:

$$N^{\circ} \text{taladros} = \left(\frac{P}{dt} \right) + (cxs) \text{ Donde:}$$

P: Perímetro o circunferencia de la sección del túnel (m), calculado por $4 \times \sqrt{A}$

dt: Distancia entre los taladros de la circunferencia.

s: Sección del túnel en m^2 .

c: Coeficiente de roca.

Tabla 1

Coeficiente de roca y distancia entre taladros

Dureza de la roca	Coeficiente de roca (m)	Distancia entre taladros (m)
Dura	2.00	0.50
Intermedia	1.50	0.60
Suave	1.00	0.70

Fuente: (EXSA S.A., 2021)

2.2.3.5. Dimensiones de la Carga y Espaciamento.

La determinación exacta del tamaño de carga y el espaciamento es un aspecto clave para garantizar la eficiencia de una voladura. Para este propósito, una fórmula que facilita el cálculo del número óptimo de secciones necesarias para llevar a cabo el proceso de voladura de manera efectiva.

Tabla 2

Fórmula para el burden y espaciamento

Sección del Corte	Valor del Burden	Valor del Espaciamento
Primera	$B1 = 1.7 \times D2$	$E1 = B1 \times \sqrt{2}$
Segunda	$B2 = B1 \times \sqrt{2}$	$E2 = 1.5 \times B2 \times \sqrt{2}$
Tercera	$B3 = 1.5 \times B2 \times \sqrt{2}$	$E3 = 1.5 \times B3 \times \sqrt{2}$
Cuarta	$B4 = 1.5 \times B3 \times \sqrt{2}$	$E4 = 1.5 \times B4 \times \sqrt{2}$

Fuente: (EXSA S.A., 2021)

Donde:

$B = \text{Burden (m)}$

$E = \text{Espaciamiento}$

$D2 = \text{Diámetro del taladro de alivio}$

2.2.3.6. Cantidad y Distribución de Carga.

La cantidad de explosivo a emplear se define en función de la resistencia de la roca y las dimensiones de las labores mineras. Para determinar el consumo, se calcula el promedio de kilogramos de explosivo por metro cúbico de roca desplazada en cada metro de avance, aplicando la siguiente fórmula:

$$Q_c = FC \times V$$

Donde:

Q_c : Cantidad de carga explosiva por disparo.

FC : Factor de carga.

V : Volumen de material a mover por disparo.

Tabla 3

Factor de carga

Área del túnel en m ²	Kilos de explosivos estimados por m ³ de roca		
	Dura	Intermedia	Blanda o suave
De 1 a 5	3.00 - 2.50	2.20 - 1.80	1.50 - 1.00
De 5 a 10	2.50 - 2.00	1.80 - 1.40	1.00 - 0.80
De 10 a 20	2.00 - 1.70	1.40 - 1.00	0.80 - 0.50
De 20 a 40	1.70 - 1.40	1.00	0.50 - 0.40

Fuente: (EXSA S.A., 2021)

Por lo general, la longitud de la columna explosiva representa entre $1/2$ y $2/3$ del total del taladro, concentrando la mayor cantidad de carga en la parte inferior. Para garantizar una salida de arranque eficiente, se recomienda que los taladros de arranque contengan una carga explosiva entre 1.3 y 1.6 veces el valor promedio calculado, en el caso de los taladros de ayuda, se sugiere aplicar una carga equivalente a 1.1 veces el promedio y la carga en los taladros restantes debe distribuirse equitativamente, ajustándola de manera proporcional para optimizar la eficiencia de la voladura. Por lo general, la longitud de la columna explosiva suele oscilar entre $1/2$ y $2/3$ de la longitud total del taladro, con la carga concentrada en la parte inferior (EXSA, 2021, pág. 189).

2.2.4. Chimeneas En Minería

Las chimeneas son excavaciones subterráneas que pueden ser verticales, subverticales o inclinadas, con secciones circulares, cuadradas o rectangulares. Su función dentro de las operaciones mineras es variada, ya que pueden utilizarse para la ventilación, el acceso del personal, la generación de caras libres de explotación, la exploración y el traspaso de minerales entre distintos niveles. Debido a su importancia, su diseño y construcción deben ajustarse a las condiciones geotécnicas y operativas del yacimiento.

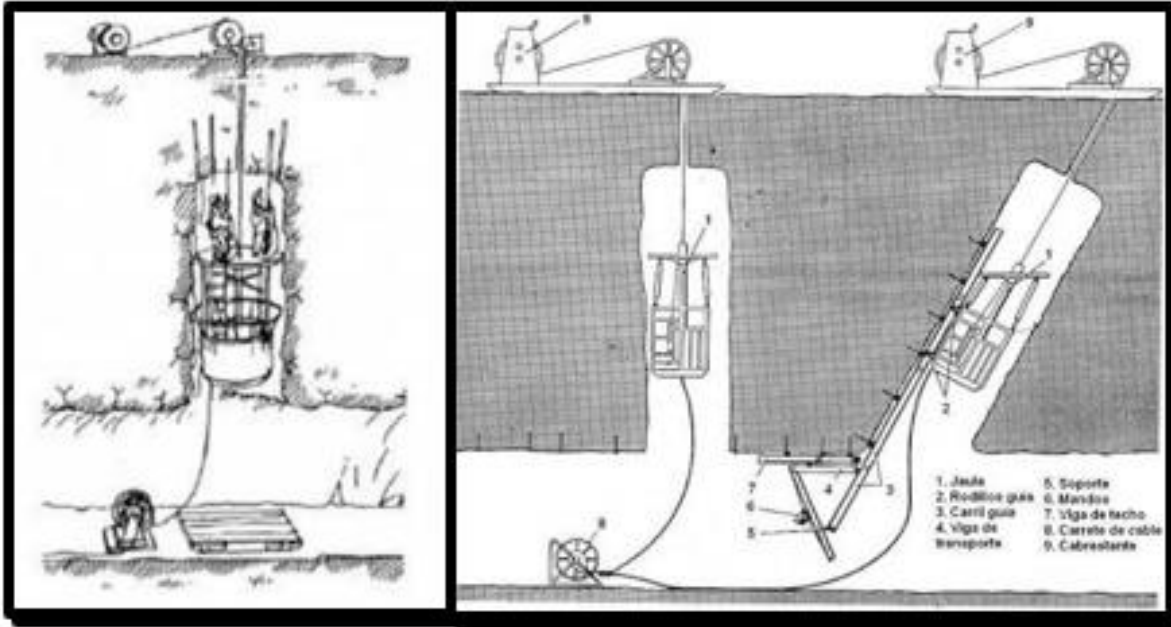
El método de excavación depende de la sección y longitud de la chimenea, así como de las características del terreno. Existen técnicas manuales y mecanizadas, cada una con ventajas y aplicaciones específicas. La excavación manual con explosivos se realiza de manera ascendente, perforando la roca y utilizando andamios o estructuras temporales para conectar distintos niveles. En contraste, la excavación mecanizada emplea equipos especializados que realizan el corte y cizallamiento de la roca, optimizando tiempos y mejorando la seguridad.

El acceso del personal a la chimenea puede llevarse a cabo de forma manual, mediante escaleras instaladas en plataformas temporales, o de manera mecanizada, utilizando sistemas de

ascenso y descenso integrados al equipo de excavación. La elección del método de acceso dependerá de la profundidad y la funcionalidad de la chimenea dentro de la mina (Zou, 2017).

Figura 8

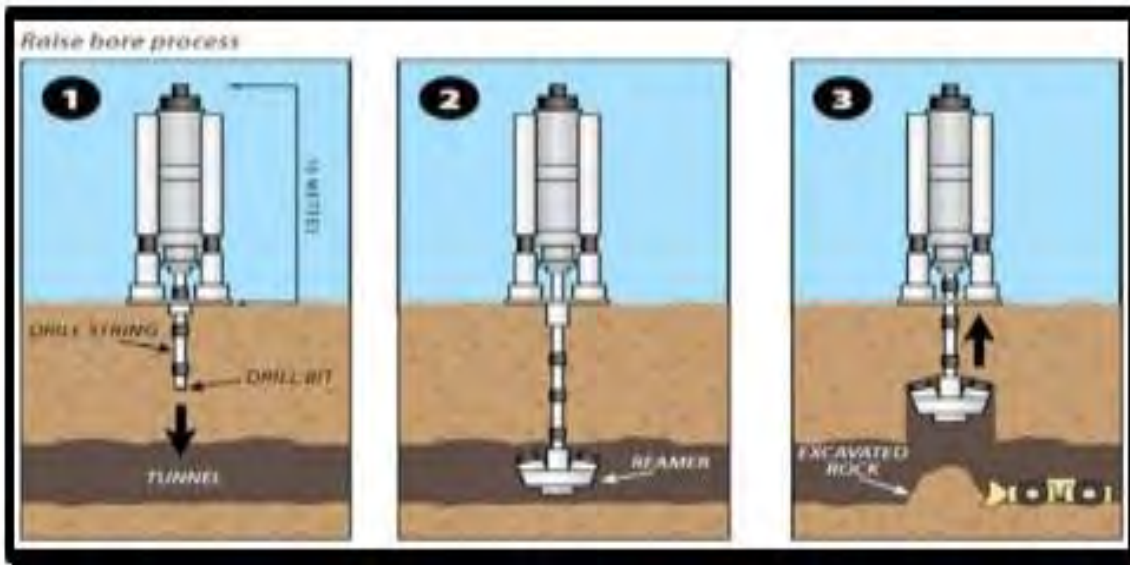
Excavación manual de chimeneas Mediante Jaula Alimak



Fuente: (Zou, 2017)

Figura 9

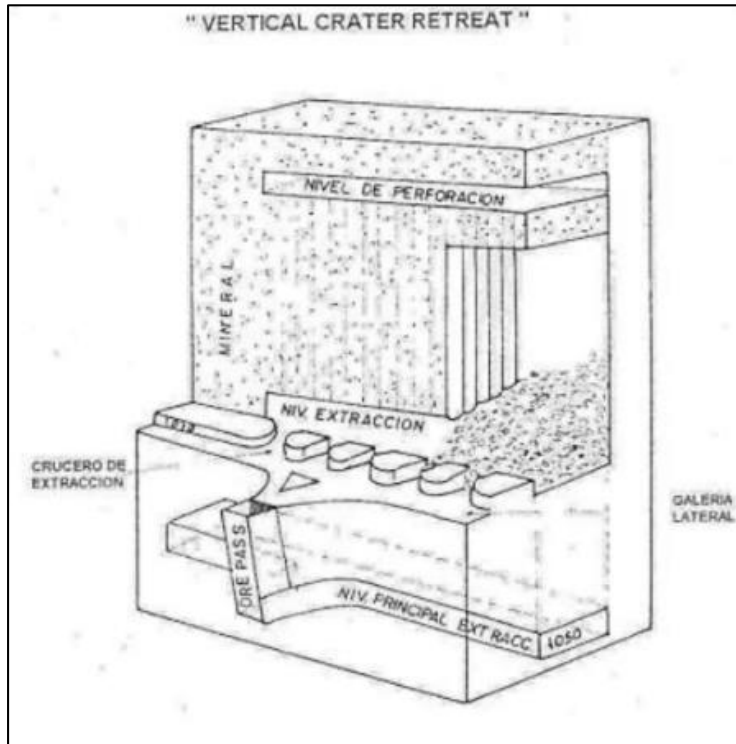
Técnicas mecanizadas de perforación para construcción de chimeneas: “Raise boring”



Fuente: (Tapia, 2016)

Figura 10

Esquema conceptual del método Vertical Crater Retreat (VCR) aplicado a chimeneas SLOT.



Fuente: (Mining Reference Handbook SME, 2020).

La figura muestra la disposición típica de la chimenea SLOT, las galerías de perforación y los puntos de extracción de mineral en el nivel inferior, ilustrando el flujo de rotura y extracción asociado al método Vertical Crater Retreat (VCR). Elaboración propia, adaptado de referencias técnicas especializadas en minería subterránea.

2.2.4.1. CHIMENEAS MANUALES CONVENCIONALES.

El método convencional para la construcción de chimeneas se basa en el uso de escaleras metálicas o de madera que permiten el acceso al frente de trabajo. Durante la excavación, los operarios trabajan sobre una plataforma de madera, la cual se ajusta y eleva progresivamente conforme avanza el proceso. Este sistema es más eficiente en secciones circulares o cuadradas y

se recomienda para alturas de hasta 35 metros, ya que superar este límite aumenta considerablemente los riesgos asociados a la seguridad.

La perforación en este método se realiza con equipos ligeros, como el stoper, cuya masa oscila entre 30 y 40 kg, permitiendo perforaciones en dirección vertical y ascendente. Estas máquinas cuentan con un émbolo fijo, lo que elimina el pivoteo característico de las perforadoras utilizadas en galerías. Su consumo de aire comprimido varía entre 140 y 200 dm³, dependiendo del modelo, entre los que destacan el BBC-16W y el BBD-94W, fabricados por Atlas Copco. La perforación suele seguir un esquema de ranuras en V, mientras que el uso de explosivos depende de la sección de la excavación, empleándose exclusivamente explosivos encartuchados.

Si bien este método garantiza niveles adecuados de seguridad dentro del límite de altura recomendado, la industria minera ha mostrado una creciente inclinación por técnicas mecanizadas, especialmente en chimeneas que se acercan al límite de autonomía del método convencional. Estas alternativas buscan mejorar la eficiencia operativa y la seguridad, reduciendo la exposición del personal a los riesgos asociados a la excavación manual.

Ciclo de construcción: Definiremos los siguientes tiempos en el ciclo de construcción:

Siendo:

n°	:	número de tiros
L	:	largo de perforación (mt.)
v _P	:	velocidad de perforación (mt./min.)
m	:	n° de máquinas perforadoras operando en forma simultánea
e	:	eficiencia por simultaneidad de perforadoras en operación (%)
e	=	0,90 1 máquina
		0,80 2 máquinas
		0,75 3 máquinas

Entonces el tiempo de perforación estará dado por:

$$t = (n * L) / (v * m * e) \text{ (min.)}$$

t^P : operaciones de carguío del explosivo (1,5 a 2,0 min./tiro)
 t^C : tronadura del disparo.
 t^{TR} : ventilación $12 * (L)^{0,5}$, siendo L el largo de la chimenea, y válido hasta 180 mt.
 t^V : fortificación, a definir dependiendo del tipo de sostenimiento a colocar.

De lo anterior podemos escribir que el tiempo del ciclo estará dado por:

$$T_c = t_{PL} + t_A + t_D + t_P + t_C + t_{TR} + t_v + t_F \text{ (min.)}$$

y el número de ciclos por día estará dado por:

$$N_c = 1.440 * f_{op} / T_c \text{ (ciclos/día)}$$

El coeficiente f_{op} representa el factor de utilización del tiempo, el cual depende de las condiciones operativas específicas en cada proyecto minero. Su valor varía generalmente entre 0.75 y 0.83, reflejando la eficiencia del proceso de excavación considerando interrupciones operativas y otros factores que afectan el desempeño, el rendimiento de construcción R estará dado por:

$$R = N_c * A \text{ (mt./día)}$$

Ventajas del método convencional:

- No requiere instalaciones ni infraestructura previa antes de iniciar la excavación propiamente dicha, lo que reduce tiempos y costos de preparación. Además, durante el desarrollo de la chimenea, es posible realizar ajustes en su rumbo e inclinación, asegurando que se mantenga el ángulo adecuado para facilitar el flujo del material fragmentado resultante de las voladuras.

- El control estructural que se puede lograr a través de la perforación. Utilizando explosivos adecuados según la calidad de la roca encontrada, se optimiza la estabilidad de las paredes de la chimenea. La aplicación de tronadura amortiguada en el contorno contribuye a mejorar la precisión de la excavación y la calidad final de la estructura.
- Este método permite realizar operaciones de sostenimiento de manera inmediata, lo que incrementa la seguridad en el proceso. Su diseño también posibilita la inspección visual continua del estado del macizo rocoso, permitiendo una evaluación constante de sus condiciones a lo largo de toda la excavación.

Desventajas del método convencional:

- Alto nivel de riesgo asociado a las operaciones en altura, lo que exige una supervisión constante de los procedimientos y el cumplimiento riguroso de las medidas de seguridad para minimizar la posibilidad de accidentes.
- El proceso de excavación demanda un tiempo considerable en cada ciclo, ya que la superficie de trabajo del minero debe ser habilitada progresivamente, disparo a disparo, lo que ralentiza el avance en comparación con otros métodos.
- Baja productividad cuando se mide en términos de hombres-día por metro de avance. En comparación con los desarrollos horizontales, este método resulta menos eficiente en términos de rendimiento operativo, lo que puede impactar en los costos y la planificación de la mina.

2.2.4.2. METODO VERTICAL CRATER RETREAT (VCR).

El método Vertical Crater Retreat (VCR) es una técnica de explotación minera desarrollada recientemente, caracterizada por la extracción del mineral en secciones ascendentes mediante el

uso de voladuras en cráter. Una particularidad de este sistema es que el material fragmentado puede permanecer en el espacio generado, similar al método de cámaras almacén, evitando así el colapso de los hastiales. La extracción del mineral se realiza desde el nivel inferior, a través de un sistema de tolvas dispuesto en la galería base.

Uno de los aspectos más distintivos de este método es su técnica de voladura. Los taladros se perforan de manera vertical desde un solo nivel a una distancia adecuada de la cara libre. Posteriormente, tras la habilitación del sistema de tolvas, se introducen cargas de explosivos suspendidas, diseñadas específicamente para comportarse como cargas esféricas. El material fragmentado se acumula dentro de las cámaras, y el solapamiento de los cráteres generados permite avanzar progresivamente hacia niveles superiores mediante detonaciones sucesivas. Finalmente, en la parte superior, se mantiene un pilar de corona, que es detonado en una única voladura para culminar el proceso.

Este método de explotación minera se fundamenta en la teoría de los cráteres y se caracteriza por la fragmentación del material a través de cargas esféricas. Para garantizar su efectividad, dichas cargas deben posicionarse en perforaciones verticales o inclinadas, manteniendo una distancia óptima respecto a la cara libre.

Ventajas y desventajas del VCR.

En el marco del presente estudio, el método Vertical Crater Retreat (VCR) reúne una serie de ventajas que justifican su análisis comparativo frente al Raise Boring en la construcción de chimeneas SLOT en la Unidad Minera Cerro Lindo. Entre sus principales beneficios se pueden señalar:

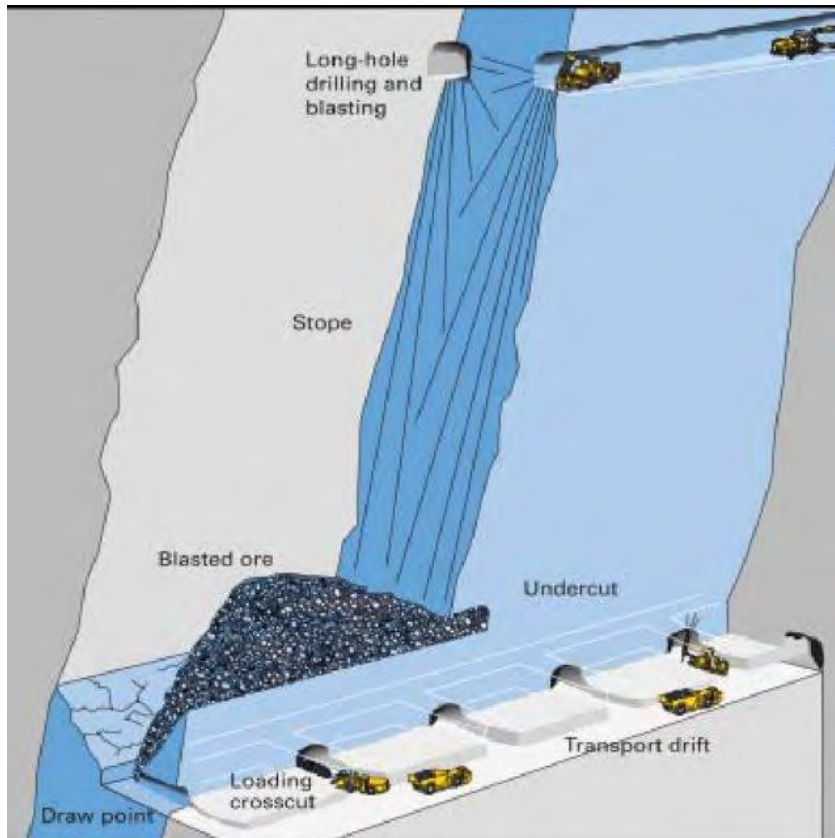
- Permite prescindir de una preparación convencional de la chimenea, reduciendo labores previas y tiempos iniciales de habilitación.

- Mejora la fragmentación del macizo rocoso, favoreciendo el manejo y el flujo del mineral hacia los puntos de extracción.
- Alcanzan altas tasas de recuperación del mineral, lo que contribuye a reducir pérdidas de contenido metálico en el caserón.
- La dilución se mantiene en niveles moderados, lo que ayuda a conservar la ley de cabeza dentro de rangos aceptables.
- Ofrece condiciones de trabajo más seguras que los métodos tradicionales de chimeneas, al disminuir la exposición directa del personal en la zona de disparo.
- Presenta costos unitarios relativamente bajos por metro desarrollado, especialmente cuando se aplica en volúmenes significativos de producción.
- Brinda una flexibilidad operativa moderada para adaptarse a variaciones en el diseño del caserón y en las condiciones del macizo rocoso.
- Facilita una ventilación eficiente y admite un buen nivel de mecanización del ciclo de minado.

En la investigación realizada en la zona OB1 de Cerro Lindo, estas ventajas constituyen la base técnica para contrastar el desempeño del VCR con el método Raise Boring, particularmente en términos de costo por metro de chimenea SLOT, tiempo de ejecución, seguridad operativa y calidad geométrica de las estructuras construidas.

Figura 11

Método de Cráteres Invertidos VCR



Fuente: (Mansilla & Iraizoz, 2012)

Sin embargo, también posee ciertas desventajas, como los costos asociados a las labores de preparación, la dilución en casos donde los hastiales presentan baja competencia y la posibilidad de obstrucciones en los conos tolva debido a la presencia de fragmentos de gran tamaño.

Para su aplicación óptima, los yacimientos deben contar con una potencia mínima de 3 metros, una inclinación mayor a 50° y una limitación clara entre el mineral y el estéril. En este método, se perforan taladros de gran diámetro desde un nivel superior a lo largo de todo el ancho de la cámara. Posteriormente, se procede a la carga y detonación de estos en secciones, permitiendo un avance progresivo desde el nivel inferior hacia el superior.

El método VCR es una aplicación directa de los principios de voladura esférica en minería subterránea, permitiendo el arranque del mineral mediante la detonación en la base de los taladros.

Este proceso aprovecha la propagación de fracturas generadas por las cargas esféricas, logrando un avance progresivo hacia niveles superiores en múltiples etapas.

Sistema del método de VCR.

Después de definir la orientación y el ángulo de inclinación de los taladros, se lleva a cabo la perforación a lo largo de toda la extensión de la chimenea proyectada. Este proceso se repite hasta completar la disposición establecida en la malla de perforación. Finalmente, se ejecuta la voladura.

Los taladros se cargan desde su extremo superior utilizando explosivos de alta potencia en un tramo reducido del taladro de producción. Estas cargas, diseñadas para generar cráteres, se colocan a una distancia previamente determinada sobre la superficie. Los taladros se organizan de manera que las cargas mantengan una alineación uniforme tanto en elevación como en profundidad. Posteriormente, se bloquean los taladros a la altura adecuada.

Una vez insertadas las cargas explosivas, el taladro es sellado con una combinación de arena y agua en la parte superior de la carga. Además, las cargas cercanas se ubican estratégicamente para garantizar una detonación controlada y eficiente, siendo que las cargas adyacentes conducen a un fracturamiento de la roca mejorado.

En la galería inferior, se realiza el carguío de mineral mediante el uso de scooptrams, los cuales transportan el material fragmentado hacia los echaderos instalados en la misma galería. Con una distancia entre ventanas de 10 metros en promedio y una distancia promedio al echadero de 70 metros. El sistema de transporte utilizado para el mineral se basa en scooptrams.

En cuanto al material de relleno utilizado para la recuperación de los pilares se puede emplear como mejor alternativa es el uso de relleno cementado debiendo garantizar la estabilidad

estructural del bloque completo, actuando como una pared autosoportante y el relleno debe ser capaz de resistir la presión ejercida por las cajas laterales en todos los niveles de explotación.

2.2.4.3. MÉTODO CON EQUIPO RAISE-BORER.

El método Raise-Boring para la construcción de chimeneas emplea un equipo especializado que permite excavar sin el uso de explosivos. Este proceso se basa en la perforación de un tiro piloto que conecta dos niveles y su posterior escariado hasta alcanzar la sección deseada.

El método Raise Boring, basado en técnicas mecanizadas de perforación, se lleva a cabo colocando un equipo especializado en la galería superior. Inicialmente, se realiza una perforación en dirección descendente, ensamblando barrenas de manera progresiva hasta alcanzar la galería inferior. Una vez que se ha completado la perforación piloto, se acopla un escariador en la galería inferior, el cual, mediante un proceso de rotación y tracción, excava en sentido ascendente hacia la máquina perforadora. Durante esta fase, el material desprendido cae libremente hacia la galería inferior, permitiendo su posterior remoción. Este método ofrece una alternativa eficiente y segura para la excavación de chimeneas en minería subterránea.

Los antecedentes históricos indican que los primeros equipos Raise-Borer fueron utilizados en minas de Estados Unidos, donde se perforaban tiros piloto de 0,2 metros de diámetro, que luego eran ensanchados hasta 0,9 metros. Actualmente, estos equipos se emplean tanto en minería como en construcción, permitiendo la excavación de chimeneas con diámetros que varían entre 0,7 y 6,4 metros, y alcanzando profundidades de 500 a 600 metros.

La elección del equipo Raise-Borer adecuado dependerá de las características del macizo rocoso. En formaciones blandas, es posible perforar chimeneas de mayor diámetro y longitud, mientras que, en rocas más duras, las dimensiones de excavación pueden estar más limitadas debido a la resistencia del material.

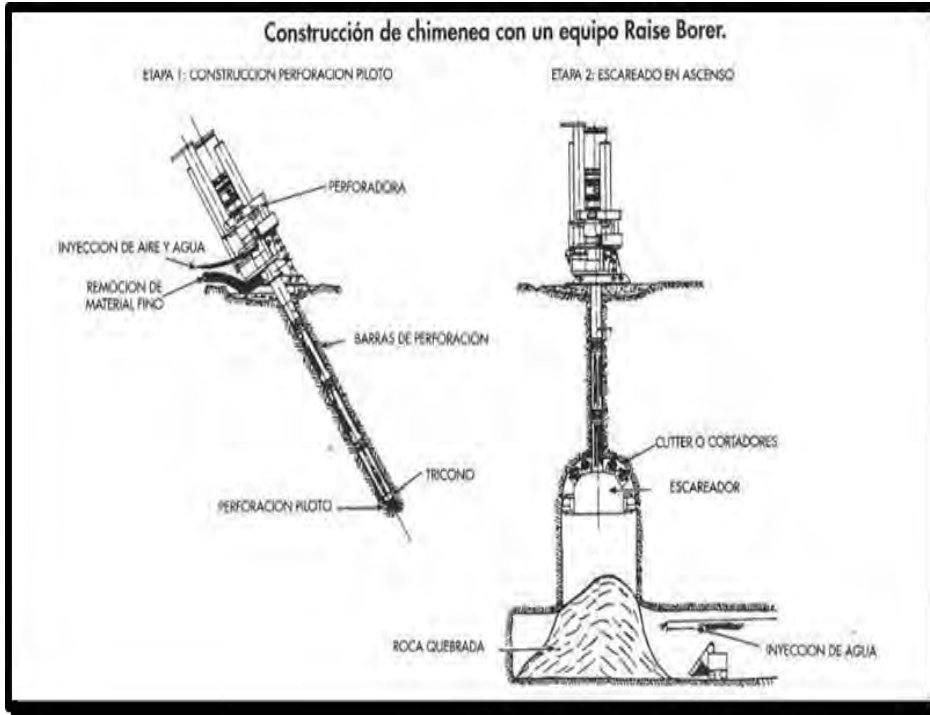
Sistemas del Método Raise-Borer.

El método de construcción de chimeneas mediante Raise-Boring puede ejecutarse a través de distintos sistemas operativos, cada uno adaptado a las condiciones del terreno y los requerimientos del proyecto. Entre las principales variantes se encuentran:

- **Perforación del tiro piloto seguida de escariado en retroceso:** En este sistema, primero se perfora un tiro piloto desde un nivel hasta el otro. Una vez completado, se procede a escariarlo en dirección inversa, ampliándolo hasta alcanzar la sección deseada.
- **Perforación tipo "Box Hole":** En este caso, el escareador está compuesto por un tricono fijado a una base de cortadores. La perforación y el escariado se realizan simultáneamente en dirección ascendente, permitiendo un proceso continuo sin necesidad de retroceso.
- **Perforación ascendente del tiro piloto con escariado posterior en la misma dirección:** A diferencia del sistema convencional, aquí la perforación del piloto se realiza hacia arriba, seguida por el escariado en el mismo sentido, lo que permite un control más preciso de la excavación en ciertos tipos de roca.

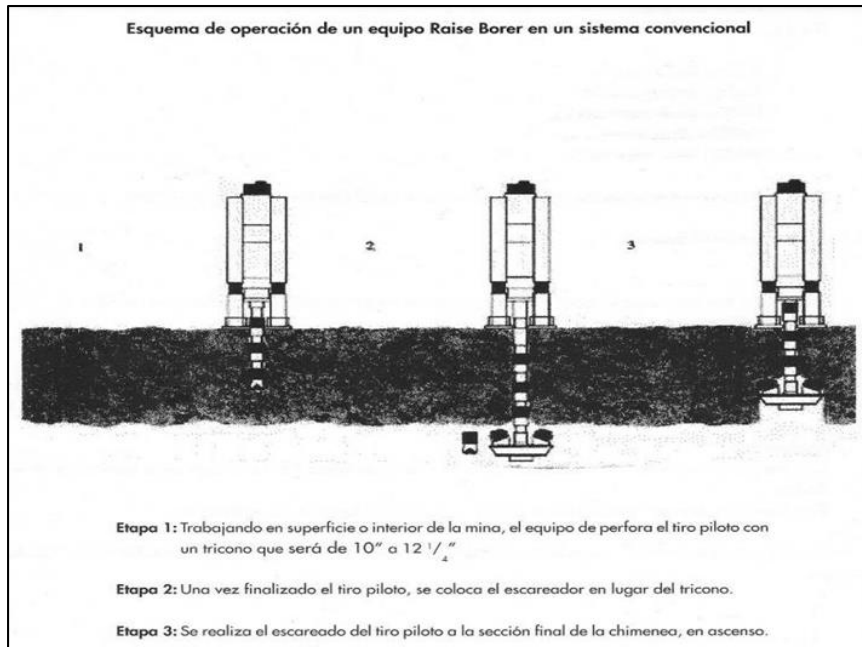
De estos métodos, el más utilizado en la construcción de chimeneas es la perforación de tiro piloto seguida de escariado en retroceso, consolidándose como el enfoque convencional en el uso de Raise-Borer para minería subterránea.

Figura 12
Construcción de chimenea con un equipo Raise Borer



Fuente: (Yepez, 2015)

Figura 13
Esquema de operación de un equipo Raise Borer en un sistema convencional



Fuente: (Yepez, 2015)

Composición del Equipo.

El equipo Raise - Borer está compuesto por varios sistemas esenciales que trabajan de manera coordinada para llevar a cabo la perforación y escariado de chimeneas con eficiencia y precisión. La unidad de fuerza, encargada de suministrar la energía necesaria para el funcionamiento del equipo, impulsando los mecanismos de perforación y escariado. Junto a esta, el equipo de perforación incluye el cabezal de rotación y los sistemas de control, permitiendo la perforación del tiro piloto y su posterior ampliación a la sección deseada. Los elementos de perforación abarcan las barrenas, varillas y el escariador, los cuales determinan el diámetro final de la chimenea. Para garantizar un proceso eficiente, el sistema también cuenta con bombas de agua, cuya función es refrigerar y eliminar los residuos generados durante la perforación, mejorando la evacuación de partículas y optimizando la operación.

Finalmente, la unidad de ventilación juega un papel crucial en la seguridad del proceso, ya que permite la extracción del polvo y gases liberados durante la excavación, asegurando condiciones óptimas para la operación. La elección del equipo Raise-Borer adecuado dependerá de factores como la dureza del macizo rocoso, la profundidad de excavación y el diámetro requerido para la chimenea. Entre los elementos de perforación se comprenden:

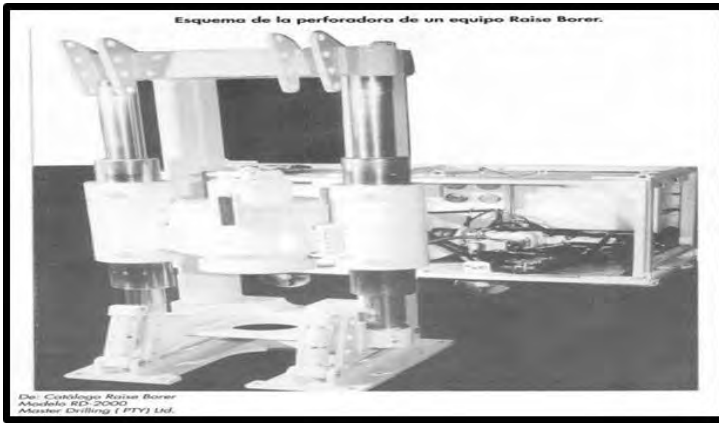
- **Triconos:** Consiste en tres conos con insertos de botón y que perforan normalmente pilotos de 9" a 12".
- **Estabilizadores:** Su función es guiar al tricono evitando el movimiento lateral o "pandeo" de las barras en el extremo.
- **Sub Adaptador:** Un el escariador al elemento estabilizador, constituye la parte más débil de la columna de perforación y funciona como un elemento de o

protección en caso de atascarse el escareado y así poder recuperar toda la columna de barras.

- **Escariador:** Elemento donde se ubican los cortadores y sus diámetros de operación la sección de la labor a construir.
- **Barras:** Son elementos de acero acoplables entre sí y que darán el largo de la perforación, siendo en ejemplo el cálculo de barras de 10", longitud variable de 1,50 a 2,00 metros y un peso aproximado de 140 a 180 kg. cada una.

Figura 14

Excavación de la perforadora de un equipo Raise-Borer



Fuente: (Yepez, 2015)

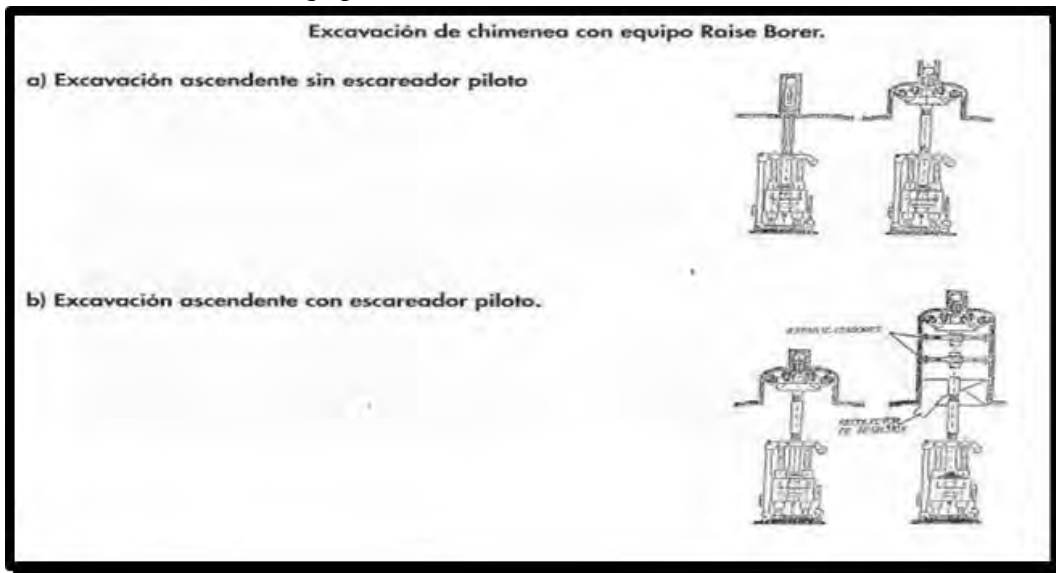
Tabla 4

Ventajas y desventajas del método Raise - Borer

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Alta seguridad.• Mínimo impacto en la roca circundante.• Elevada productividad.	<ul style="list-style-type: none">• Requiere personal altamente especializado.• Necesidad de infraestructura previa.• Falta de flexibilidad en la excavación.• Tiempo adicional en traslado y montaje.• Preparación de la estación del equipo.• Construcción de una plataforma de apoyo.• Alto costo de inversión.

Figura 15

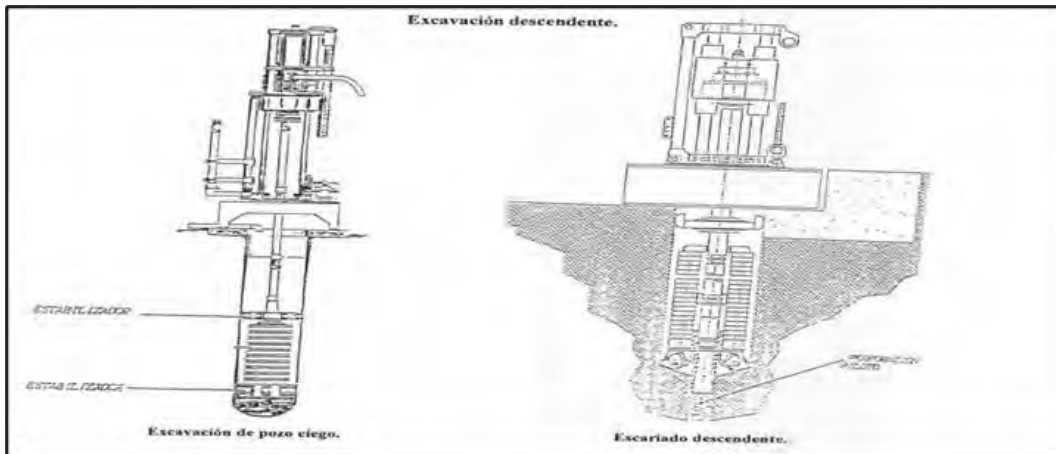
Excavación de chimenea con equipo Raise Borer.



Fuente: (Yepez, 2015)

Figura 16

Excavación descendente



Fuente: (Yepez, 2015)

2.2.5. Mecánica De Rocas

La Mecánica de Rocas constituye una disciplina teórica y práctica que se concentra en analizar la respuesta de las rocas a las fuerzas ejercidas sobre ellas. Esta rama de la ingeniería y la ciencia se dedica a investigar el comportamiento mecánico de estas estructuras naturales, examinando cómo se deforman y reaccionan ante las fuerzas que actúan en su entorno .

2.2.5.1. Propiedades Físicas De Las Rocas.

Las propiedades físicas de una roca se definen como características intrínsecas y mensurables que se utilizan para describir y clasificar el comportamiento y las características mecánicas de las rocas. Entre las propiedades físicas comunes de las rocas se encuentran las siguientes:

- **Densidad:** En el ámbito de las rocas, la densidad se refiere al contenido de masa rocosa por unidad de volumen. Su variabilidad está vinculada a la composición mineral y a la estructura porosa de la roca.

- **Porosidad:** Esta propiedad está relacionada con el volumen de los espacios vacíos o poros presentes en la roca. Su importancia radica en determinar la capacidad de almacenamiento y transporte de fluidos.
- **Permeabilidad:** Se refiere a la medida de la capacidad de la roca para permitir el paso de fluidos a través de ella. Está directamente relacionada con la porosidad y tiene relevancia en la exploración de recursos naturales como el petróleo y el agua subterránea.
- **Resistencia:** La resistencia de una roca se define como su capacidad para soportar cargas sin deformarse permanentemente o fracturarse, y se evalúa mediante pruebas de compresión o tracción.
- **Dureza:** La dureza de una roca representa su capacidad para resistir la abrasión y el desgaste superficial, y puede medirse utilizando la escala de Mohs o pruebas de micro dureza.

2.2.5.2. Propiedades Mecánicas De Las Rocas.

Las propiedades mecánicas de las rocas describen su comportamiento frente a la aplicación de fuerzas externas, determinando su resistencia y deformabilidad. Estas características se evalúan mediante ensayos de laboratorio, proporcionando datos clave para el diseño y análisis de estructuras geotécnicas y mineras (Bernaola y otros, 2013).

- **Resistencia a la Compresión Uniaxial:** Capacidad de la roca para soportar esfuerzos de compresión en una sola dirección, medida a través de pruebas que determinan la carga máxima antes de su fractura (Bernaola y otros, 2013).
- **Resistencia a la Tracción:** Indica la capacidad de la roca para soportar esfuerzos tensionales, siendo generalmente más débil en esta condición.

- **Resistencia a la Flexión:** Evalúa la capacidad de la roca para doblarse sin romperse, relevante en estructuras sometidas a esfuerzos flexionales.
- **Coefficiente de Poisson:** Relación entre la deformación transversal y longitudinal cuando la roca es sometida a compresión uniaxial.
- **Módulo de Elasticidad:** Conocido como módulo de Young, mide la rigidez de la roca y su capacidad para recuperar su forma tras ser deformada.

2.2.6. Geología Y Su Impacto En Operaciones De Voladura

Las rocas presentan diversas estructuras secundarias originadas por su proceso de formación, la edad geológica y los eventos tectónicos a los que han estado sometidas a lo largo del tiempo. Estas estructuras influyen directamente en su comportamiento frente a procesos como fragmentación, perforación y voladura, determinando la eficiencia de las operaciones mineras y su estabilidad estructural. Uno de los principales factores que afectan la fragmentación es la estratificación, la cual divide las rocas sedimentarias en capas o estratos con propiedades similares o diferentes. Esta disposición influye en la dirección y extensión de la fracturación inducida por explosivos. Por otro lado, la esquistosidad, característica de rocas metamórficas de grano fino o medio, provoca una tendencia natural a fracturarse en láminas delgadas, facilitando su rotura durante la excavación.

Las fracturas, que son discontinuidades sin desplazamiento, pueden presentarse alineadas ortogonal o paralelamente a la estratificación, modificando la propagación de ondas de explosión y afectando la estabilidad del macizo rocoso. En contraste, las fallas sí presentan un desplazamiento relativo entre bloques y suelen estar rellenas de materiales como arcilla o minerales valiosos, lo que dificulta la perforación y, en algunos casos, debilita la roca circundante, aumentando su fragilidad. Otro elemento clave en la estructura del macizo son los contactos o

discontinuidades, que separan capas o materiales de distinta composición. Estos planos de división afectan la cohesión y resistencia de la roca, influyendo en la estabilidad del yacimiento y en la planificación de las voladuras (Bernaola y otros, 2013).

2.2.7. Geomecánica

La geomecánica es una disciplina especializada en el estudio del comportamiento del macizo rocoso, enfocándose en su respuesta ante diferentes esfuerzos y presiones generadas por actividades constructivas y mineras. Su aplicación abarca una amplia variedad de proyectos, incluyendo excavaciones subterráneas, explotaciones mineras a cielo abierto, construcción de túneles, carreteras y otras infraestructuras, el objetivo principal de la geomecánica es comprender cómo las masas rocosas reaccionan ante las cargas inducidas por la actividad minera, lo que permite el diseño de excavaciones seguras y eficientes y través de este análisis, se pueden prevenir o mitigar riesgos geotécnicos, optimizando la estabilidad del terreno y garantizando la seguridad de las operaciones (Andrade & Gavilanes, 2004).

2.2.7.1. Clasificación de Deere (RQD).

En 1967, Deere desarrolló un sistema de diseño de soporte basado en el índice RQD (Rock Quality Designation), un parámetro clave para evaluar la calidad del macizo rocoso, el cual se determina midiendo el porcentaje de fragmentos de núcleo de perforación que tienen una longitud igual o superior a 10 cm y han sido recuperados durante un sondeo geotécnico. El objetivo principal del RQD es cuantificar el grado de fracturación presente en la roca, proporcionando información esencial para el diseño de sostenimiento en excavaciones subterráneas y la planificación de obras geotécnicas. Cuanto mayor sea el RQD, menor será la fragmentación y mejor será la calidad del macizo rocoso, lo que influye directamente en la estabilidad y en la necesidad de refuerzos estructurales (Deere & Deere, 1988).

$$RQD = \frac{\sum \text{Testigos} \geq 10\text{cm}}{\text{Longitud del testigo (cm)}} \times 100\%$$

Tabla 5

Calidad de Roca Basada en RQD

RQD (%)	Calidad de la Roca
<25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 – 75	Regular
75 – 90	Buena
90 – 100	Muy buena

Fuente: (Deere & Deere, 1988)

2.2.7.2. Clasificación de Bieniawski (RMR).

La clasificación geomecánica de Bieniawski, comúnmente denominada clasificación RMR (Rock Mass Rating), es un sistema ampliamente utilizado para evaluar la calidad de una masa rocosa. Su aplicación permite analizar las condiciones mecánicas y geológicas de un macizo rocoso, estableciendo una relación directa entre su calidad, el proceso de excavación y las estrategias de sostenimiento requeridas. Este método se basa en la evaluación de diversos factores geomecánicos, los cuales influyen en el comportamiento estructural del macizo rocoso. Entre los principales parámetros considerados se encuentran (Bieniawski, 1989):

- Resistencia a la compresión simple, que determina la capacidad del material para soportar esfuerzos antes de fracturarse.
- Nivel de fracturación, expresado a través del índice RQD (Rock Quality Designation), el cual mide el grado de alteración y fragmentación de la roca.
- Espaciamiento de las juntas, factor clave en la estabilidad del macizo rocoso, ya que influye en la formación de bloques y su susceptibilidad a fallas.

- Características de las juntas, incluyendo aspectos como la apertura de las discontinuidades, su continuidad, la textura superficial, la presencia de relleno y cualquier alteración que pueda afectar su cohesión.
- Presencia de agua subterránea, medida en litros por minuto cada 10 metros de avance, lo que permite evaluar su impacto en la estabilidad del macizo.
- Orientación de las fracturas con respecto a la excavación, aspecto fundamental para prever el comportamiento del terreno y diseñar medidas de sostenimiento adecuadas.

Tabla 6

Clasificación Geomecánica RMR

PARAMETROS		ESCALA DE VALORES							
1	Resistencia de la roca intacta	Bajo carga puntual	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Para estos valores es preferible la resistencia a compresión simple		
		A compresión simple	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	VALOR	15	12	7	4	2	1	0	
2	R.Q.D.	90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%			
	VALOR	20	17	13	8	3			
3	ESPACIADO DE LAS JUNTAS	>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm			
	VALOR	20	15	10	8	5			
4	CONDICION DE LAS JUNTAS		Muy rugosas, sin continuidad, cerradas, roca labios sana.	Ligeramente rugosa separación <1 mm, roca labios ligeramente meteorizada.	Ligeramente rugosa separación <1 mm, roca labios muy meteorizada.	Espejo o falla o relleno de espesor <5 mm, o juntas abiertas 1-5 mm, juntas continuas.	Relleno blando de espesor >5 mm, o juntas abiertas >5 mm, juntas continuas.		
	VALOR		30	25	20	10	0		
5	AGUA	FLUJO EN CADA 10 m DE TUNEL, o bien	Ninguno	<10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min		
		Relación presión del agua en la junta/tensión principal máxima.	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
	CONDICIONES GENERALES	Completamente seco	Manchas de humedad	Muy húmedo.	Goteo.	Flujo de agua.			
	VALOR		15	10	7	4	0		

Fuente: (Bieniawski, 1989)

2.3.MARCO CONCEPTUAL

a) Perforación

La perforación es el proceso mediante el cual se crean cavidades cilíndricas en la roca utilizando maquinaria especializada, como perforadoras manuales o mecanizadas. Estas cavidades, conocidas como taladros o barrenos, sirven para alojar explosivos en operaciones de tronadura o para permitir la instalación de sistemas de sostenimiento. La calidad y precisión de la perforación son fundamentales para garantizar la eficiencia y seguridad en los procesos mineros (López y otros, 2003).

b) Voladura

La voladura es el método de fragmentación controlada de roca mediante el uso de explosivos. Este proceso se realiza en base a un diseño previo que considera parámetros como la malla de perforación, el burden y el espaciado, buscando maximizar la eficiencia y minimizar los efectos secundarios, como la sobrerotura. Es una operación esencial en la minería para liberar material y facilitar su extracción (López y otros, 2003).

c) Chimenea

En minería, una chimenea es una labor subterránea de forma vertical o inclinada que conecta dos niveles o galerías de una mina. Su función principal puede ser la ventilación, el transporte de material, el acceso a servicios o la evacuación en caso de emergencia. Las chimeneas son construidas mediante métodos convencionales o mecanizados, dependiendo de las características del proyecto (EXSA S.A., 2021).

d) Plataforma

La plataforma en minería es una superficie de trabajo temporal, utilizada por los trabajadores durante la construcción de chimeneas u otras labores verticales. Estas plataformas

pueden ser de madera o metal y son ajustables en altura para acompañar el progreso de la excavación. En los métodos mecanizados, suelen estar integradas en sistemas de ascenso y descenso, mejorando la seguridad y eficiencia del proceso (ALIMAK, 2005).

e) Métodos de Construcción

Los métodos de construcción en minería subterránea incluyen técnicas y procesos diseñados para desarrollar labores como galerías, chimeneas y túneles. Pueden clasificarse en convencionales, donde se utilizan herramientas manuales y explosivos, y mecanizados, que emplean equipos automatizados para aumentar la precisión, seguridad y velocidad. La selección del método depende de factores como la geología, la longitud y la sección de la labor (Herrera, 2019).

f) Labores Subterráneas

Las labores subterráneas son todas las actividades y excavaciones realizadas bajo la superficie terrestre con fines mineros. Estas incluyen accesos, galerías, chimeneas, cámaras y túneles, necesarias para la extracción de mineral, ventilación, transporte y sostenimiento de la mina. Su diseño y ejecución requieren un análisis cuidadoso de factores geológicos y geotécnicos para garantizar la seguridad y productividad.

2.4.HIPÓTESIS

2.4.1. Hipótesis General

- El método Raise Boring presenta mejores resultados que el método VCR para la construcción de chimeneas splot en la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo.

2.4.2. Hipótesis Específicas

- El método Raise Boring presenta menores costos y menor exposición del personal, mientras que el método VCR muestra menores costos directos en la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo.
- La elección del método Raise Boring se justifica por su control de desviación, uniformidad de sección y menor exposición del personal, mientras que el método VCR se favorece por sus menores costos directos y logística más simple en la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo.
- La aplicación del método Raise Boring permite reducir los tiempos totales de ejecución y mejorar la continuidad operativa, aunque incrementa el costo por metro en comparación con el método VCR en la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo.

2.4.3. Variables e Indicadores

2.4.3.1. Variable Independiente

X1: Método de construcción (VCR y Raise Boring)

2.4.3.2. Variable Dependiente

Y1: Eficiencia en la construcción de las chimeneas SLOT

2.5. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Tabla 7

Operacionalización de variables

VARIABLES	Dimensiones	INDICADORES
INDEPENDIENTE		
<ul style="list-style-type: none"> • Método de construcción de chimeneas SLOT (VCR y Raise Boring) 	-	<ul style="list-style-type: none"> • Diámetro de la chimenea (m) • Tiempo total de construcción (hrs) • Rendimiento del equipo utilizado. • Nivel de impacto en la seguridad operativa.
DEPENDIENTE		
<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia en la construcción de las chimeneas SLOT 	<ul style="list-style-type: none"> • Condiciones Operativas • Costos asociados • Análisis operacional 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad promedio de avance (m/día) • Desviación de Perforación (%) • Porcentaje de sobreexcavación (%) • Costo total por metro lineal (USD/m) • Consumo de insumos (\$) • Requerimiento de personal • Número de incidentes o accidentes. • Exposición del personal

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es del tipo cuantitativa, ya que se basará en datos cuantitativos que se analizarán utilizando métodos estadísticos que permitan establecer comparaciones entre los dos métodos evaluados (VCR y Raise Boring), cuantificando las ventajas o desventajas de cada uno en términos operativos, económicos y de seguridad.

3.2.NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El nivel de investigación es explicativo y comparativo, dado que se orienta a buscar describir las características y comparar los métodos mediante variables técnicas, económicas y de seguridad para la elección de los métodos de construcción de chimeneas tipo slot (VCR y Raise Boring), en la Unidad Minera Cerro Lindo.

3.3.POBLACIÓN

La población de estudio está constituida por todas las chimeneas tipo SLOT construidas en la Unidad Minera Cerro Lindo durante los últimos cinco años, independientemente del método de ejecución empleado (VCR o Raise Boring). Este conjunto de chimeneas representa el universo de referencia sobre el cual es posible realizar la comparación técnico-económica de los métodos de construcción, ya que agrupa todas las experiencias operativas disponibles en el periodo de análisis.

3.4.MUESTRA

La muestra está conformada por las chimeneas tipo SLOT ejecutadas en la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo mediante los métodos Vertical Crater Retreat (VCR) y Raise Boring (RB). Para la selección se consideró, como criterio mínimo, incluir al menos tres chimeneas construidas con VCR y tres chimeneas construidas con Raise Boring, a fin de contar con casos

suficientes para una comparación representativa de los indicadores técnicos, económicos y de seguridad.

La determinación de la muestra se realizó a través de un muestreo no probabilístico por criterios (muestreo intencional), en función de los siguientes aspectos:

- Disponibilidad de información técnica completa (diseño, parámetros operativos, tiempos de ejecución, métricas de rendimiento).
- Disponibilidad de información económica trazable (costos directos e indirectos asociados a cada chimenea).
- Disponibilidad de registros de seguridad y reportes de incidentes vinculados al proceso constructivo.
- Ubicación de las chimeneas dentro de la zona OB1, de modo que compartan condiciones geomecánicas y operativas comparables.

De este modo, la muestra se define sobre la base de la calidad y completitud de los registros, priorizando aquellas chimeneas cuyos datos permiten calcular de manera confiable el costo por metro, el tiempo total de construcción, la productividad y los indicadores de seguridad. Esto asegura que la comparación entre VCR y Raise Boring se sustente en información consistente y verificable, directamente relacionada con las condiciones reales de operación en la Unidad Minera Cerro Lindo.

3.5.TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE CAPTURA DE INFORMACIÓN

3.5.1. Técnicas De Recolección De Datos

Las principales técnicas que utilizaremos son:

1. Trabajos de Campo y Gabinete

- Observación directa.

- Recolección de datos existentes en la Unidad Minera.
 - Recolección de informes.
2. Trabajos de Tecnología
- Observación mediante videos de lo recolectado en campo.
3. Fuentes bibliográficas
- Planos históricos de la operación.

3.5.2. Instrumentos De Recolección De Datos

El instrumento por utilizar será:

- Parte de Guardia
- Hoja de Control de Perforación y Voladura
- Acta de Disparo y Post-Disparo
- Reporte de Costos Operativos
- Registros de Seguridad

3.5.3. Procesamiento y Análisis De Datos

La información recolectada fue procesada y analizada con el propósito de identificar, cuantificar y comparar los parámetros técnicos, económicos y de seguridad asociados a la construcción de chimeneas SLOT con los métodos VCR y Raise Boring en la Unidad Minera Cerro Lindo. Para ello, se emplearon las siguientes herramientas informáticas, integradas de manera complementaria en el desarrollo de la tesis:

- **Microsoft Excel:** Se utilizó para la elaboración de bases de datos con los registros operativos y económicos de cada chimenea (longitudes, tiempos de ejecución por fase, consumo de insumos, costos directos e indirectos, incidentes de seguridad, entre otros). Con esta herramienta se efectuaron los cálculos de indicadores clave,

tales como costo unitario por metro de chimenea, tiempo total de construcción, productividad por guardia y tasas de incidentes. Asimismo, se generaron tablas y gráficos comparativos que permiten visualizar las diferencias de desempeño entre los métodos VCR y Raise Boring.

- **AutoCAD:** Se empleó para el trazado y revisión de los planos de las chimeneas SLOT y de las labores asociadas (galerías de acceso, puntos de extracción, conexiones entre niveles). A partir de la información de campo y de los planos originales de la operación, se elaboraron esquemas actualizados de la geometría de las chimeneas, lo que facilitó el análisis de su configuración espacial, la verificación de longitudes efectivas y la representación gráfica de los métodos constructivos evaluados.
- **AutoCAD Civil 3D:** Esta herramienta se usó para el modelamiento geométrico más detallado, en particular para la generación de perfiles longitudinales y secciones de las chimeneas y de las galerías relacionadas. Civil 3D permitió obtener cotas, distancias, pendientes y relaciones espaciales con mayor precisión, información que luego fue vinculada con los datos operativos y económicos para interpretar cómo la geometría y las condiciones del macizo rocoso influyen en los tiempos y costos de construcción con cada método.
- **Microsoft Office:** Además de Excel, se utilizaron otros programas del entorno Office, principalmente Word y PowerPoint. En Word se integraron las tablas, gráficos y figuras generadas en las herramientas anteriores, dando forma al cuerpo del documento de tesis, mientras que en PowerPoint se prepararon láminas de

apoyo para la presentación de resultados y la exposición de la comparación entre VCR y Raise Boring.

En conjunto, el uso articulado de estas herramientas permitió depurar los datos, realizar los cálculos necesarios, representar gráficamente la información y sustentar de manera ordenada y consistente el análisis comparativo desarrollado en la investigación.

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN DE LA CHIMENEA SLOT POR EL MÉTODO VCR Y RAISE

BORING EN LA ZONA OB1

4.1. ANÁLISIS DE PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DE LA ZONA OB1

La caracterización geomecánica de la zona OB1 es fundamental para evaluar las condiciones del macizo rocoso en la Unidad Minera Cerro Lindo. Este análisis permite determinar la estabilidad estructural de las labores mineras, el comportamiento mecánico de la roca y su influencia en la selección del método de minado. La recopilación de datos geomecánicos involucra el estudio de discontinuidades, propiedades físicas y mecánicas de la roca, así como la aplicación de clasificaciones geotécnicas estandarizadas.

4.1.1. Mapeo Geomecánico De Las Labores Subterráneas

El mapeo geomecánico es una técnica de evaluación del macizo rocoso que permite registrar la calidad geomecánica de las formaciones geológicas en las labores mineras. Se lleva a cabo mediante inspecciones visuales, toma de datos en estaciones geomecánicas y análisis de discontinuidades. Su importancia radica en la capacidad de identificar zonas de debilidad, fallas estructurales y condiciones de estabilidad del entorno minero.

4.1.1.1. metodología aplicada y Estaciones geomecánicas

En este apartado se describe la metodología aplicada para la caracterización geomecánica del tajeo y la definición de las estaciones de evaluación. Con el fin de sustentar los resultados de estabilidad y control geométrico de la chimenea slot, se determinan los parámetros del macizo (densidad, calidad de testigo, clasificación).

4.1.1.1.1. Determinación del estado tensional in situ y supuestos

- Datos empleados en el cálculo de esfuerzos:

- Cota de superficie de referencia: $Z_{\text{sup}} = 3350$ m.s.n.m.
- Cota de superficie de estación: $Z_{\text{est}} = 1520$ m.s.n.m.
- Densidad global del macizo: $\rho = 2.7$ TM/m³
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0.25$
- Coeficiente tectónico (mayor horizontal): $K = 1.50$

Se fija la referencia y se calcula el recubrimiento:

$$H = z_{\text{sup}} - z_{\text{est}} = 3350 - 1520 = \boxed{1830 \text{ m}}$$

Se adopta la densidad global del macizo y se obtiene el peso unitario:

$$\gamma \approx \rho \cdot g \Rightarrow \gamma \approx 2.70 \text{ t/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \approx \boxed{26.49 \text{ kN/m}^3}$$

Se calcula el esfuerzo vertical por sobrecarga:

$$\sigma_v = \gamma \cdot H \Rightarrow \sigma_v [\text{MPa}] \approx \frac{\gamma [\text{kN/m}^3] \cdot H [\text{m}]}{1000}$$

Sustituimos lo valores en:

$$\sigma_v \approx \frac{26.49 \times 1830}{1000} = \boxed{48.4767 \text{ MPa}} \approx \boxed{48.48 \text{ MPa}}$$

Se estima el esfuerzo horizontal - en reposo:

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu} = \frac{0.25}{0.75} = \boxed{0.33}$$

$$\sigma_h \approx K_0 \cdot \sigma_v = 0.33 \times 48.4767 = \boxed{16.1589 \text{ MPa}} \approx \boxed{16.16 \text{ MPa}}$$

Se acota el esfuerzo horizontal mayor con criterio tectónico local:

$$\sigma_H = K \cdot \sigma_v$$

Lo calculamos con un $K=1.50$

$$\sigma_H = 1.50 \times 48.4767 = \boxed{72.7151 \text{ MPa}} \approx \boxed{72.72 \text{ MPa}}$$

Y se concluye que los valores son los siguientes como esfuerzo vertical y esfuerzo horizontal:

$$\sigma_v = 48.48 \text{ MPa}$$

$$\sigma_h = 16.16 \text{ MPa}$$

4.1.1.1.2. *Cálculo del RQD mediante el Método Poisson*

Cuando no se dispone de testigo continuo, el índice RQD puede estimarse indirectamente a partir del espaciamiento promedio de discontinuidades medido en una línea de mapeo, suponiendo un proceso de juntas tipo Poisson (distribución aleatoria de intersecciones). Este enfoque es estándar en geomecánica para obtener un RQD.

$$\boxed{\text{RQD} = 100 e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1)}, \quad \lambda = \frac{1}{x}$$

Se realizó el mapeo de discontinuidades en el tramo de evaluación del tajeo, identificando familias, conteos por metro y longitudes de intersección; a partir de estos registros se estimó el espaciamiento promedio de juntas del tramo.

Aplicación al tramo evaluado: con el valor de $x = 0.06\text{m}$ (6cm)

$$\lambda = \frac{1}{x}$$

$$\lambda = 16.67$$

Se sustituye en la fórmula:

$$\text{RQD} = 100 e^{-0.1 \cdot 16.67} (0.1 \cdot 16.67 + 1)$$

$$\text{RQD} = 50.4\%$$

4.1.1.1.3. Cálculo del índice RMR (Bieniawski)

Se estimará el RMR por estación como criterio operativo para parametrizar la construcción del slot: define las ventanas de penetración, empuje y torque del raise borer en pilotaje y reaming, y delimita las tolerancias de alineamiento y control de sobreexcavación; asimismo, sirve de referencia para la explotación con criterio VCR al fijar rangos consistentes de burden-spacing, concentración de carga y control perimetral durante el corte y la apertura de la cara libre. Dado que el slot no es perdurable y no llevará sostenimiento, el RMR se aplicará con foco en la estabilidad inmediata requerida en la ejecución y en la preparación de la voladura subsiguiente.

Tabla 8

Tabla de Valoración de RMR

Parámetro	Sub-Parámetro	Valoración
Resistencia a compresión simple	-	7
RQD	-	6
Espaciamiento	-	8
	Persistencia	6
	Apertura	3
Condición de Juntas	Rugosidad	0
	Relleno	4
	Intemperización	1
Agua Subterránea	-	7
Valor de RMR		42
Ajuste por orientación		0
Valor RMR Total		42

Fuente: Elaboración Propia

El índice obtenido es $RMR = 42$, que ubica al macizo en Clase III (calidad regular). Este resultado indica estabilidad inmediata moderada para la construcción de la chimenea slot sin sostenimiento, pero exige control operativo: avance y torque contenidos en el raise borer,

verificación de alineamiento y, en VCR, burdens/espaciamientos conservadores con buena confinación. En síntesis, el entorno es manejable si se aplican dichas medidas de control.

Las estaciones geomecánicas son puntos de muestreo estratégicamente ubicados dentro de las labores mineras para evaluar parámetros de la roca. La metodología aplicada incluye la toma de datos de RQD (Rock Quality Designation), caracterización de discontinuidades y aplicación del sistema de clasificación RMR (Rock Mass Rating). Esta información es esencial para el diseño de sostenimiento y la selección del método de minado más adecuado.

Tabla 9

Registro estructural según estaciones de levantamiento geomecánico.

Zona de estudio	Litología predominante	Estación estructural	Familia de Diaclasas 01	Familia de Diaclasas 02	Familia de Diaclasas 03
OB1	SPP	EG – 01	81/101	64/176	79/306
OB1	SPP	EG – 02	83/061	67/182	36/216
OB1	SPP	EG – 03	84/323	47/247	85/052
OB1	SPP	EG – 04	78/271	66/256	59/294
OB1	Volcánico	EG – 05	63/236	31/224	63/317
OB1	SPP	EG – 06	57/239	83/297	77/227
OB1	SPP	EG – 07	69/066	81/171	89/318
OB1	Volcánico	EG – 08	71/296	35/044	83/239
OB1	Volcánico	EG – 09	65/309	41/051	86/221
OB1	SPP	EG – 10	82/289	59/311	39/043

Fuente: Contratista SVS Ingenieros (2016)

4.1.1.2. Caracterización Geomecánica por Estaciones Tipo del Macizo Rocoso en el Tajeo T-101B

Durante el estudio geomecánico del tajeo T-101B se identificó la presencia de dos dominios diferenciados del macizo rocoso, ambos correspondientes a la litología SPP, pero con comportamientos mecánicos distintos. Estas variaciones estructurales y geotécnicas, observadas durante el mapeo y los análisis previos, permiten reconocer la coexistencia de sectores con características de roca tipo Regular A (IIIA) y Regular B (IIIB).

Ante esta condición, se procede a realizar una caracterización técnica individual de cada tipo de roca mediante la metodología RMR de Bieniawski, utilizando estaciones representativas de cada clasificación. Esta evaluación detallada permitirá definir adecuadamente los criterios de diseño para excavaciones verticales en función de la calidad geomecánica local.

4.1.1.2.1. *Macizo Rocoso Tipo IIIA - Regular A*

Este caso representa el dominio de roca más competente dentro del tajeo T-101B, donde las condiciones estructurales son más favorables y estables. La calidad del macizo permite considerar métodos de excavación vertical con menores requerimientos de sostenimiento.

Condiciones observadas:

- Resistencia a la compresión simple: 35 MPa
- RQD: 60%
- Separación de diaclasas: entre 0.6 - 2 m
- Diaclasas ligeramente rugosas, bordes sanos, sin relleno
- Agua freática: ligeramente húmedo

Tabla 10

Evaluación RMR Tipo IIIA - Regular A

Parámetro	Rango observado	Valoración asignada
Resistencia de la roca sana	500–1000 Kp/cm ² (≈35 MPa)	7
RQD	50% – 75%	13
Separación entre diaclasas	0.6 – 2.0 m	15
Estado de las diaclasas	Ligeramente rugosas, bordes sanos	20
Agua freática	Ligeramente húmedo	5

Fuente: Departamento de Geomecánica - UM Cerro Lindo

Se aplicó el sistema RMR de Bieniawski para evaluar la calidad del macizo rocoso, obteniéndose un valor total de 79, correspondiente a una clasificación Tipo IIIA (Regular A).

$$\text{RMR: } 7 + 13 + 15 + 20 + 5 = 60 \rightarrow \text{Clasificación: Tipo III-A (Roca Regular III-A)}$$

4.1.1.2.2. **MACIZO ROCOSO TIPO IIIB - REGULAR B**

Este caso representa una zona con condiciones estructurales menos favorables, caracterizada por mayor densidad de fracturas y menor resistencia de la roca. Esto genera una necesidad de aplicar sistemas de sostenimiento más intensivos y controles geotécnicos más estrictos durante la excavación.

Condiciones observadas:

- Resistencia a la compresión simple: 20 MPa
- RQD: 45%
- Separación de diaclasas: entre 0.2 y 0.6 m
- Diaclasas ligeramente rugosas, bordes meteorizados
- Agua freática: húmedo, 10–25 L/min

Tabla 11

Evaluación RMR Tipo IIIB - Regular B

Parámetro	Rango observado	Valoración asignada
Resistencia de la roca sana	250–500 Kp/cm ²	4
RQD	25% – 50%	6
Separación entre diaclasas	0.2 – 0.6 m	10
Estado de las diaclasas	Ligeramente rugosas, bordes meteorizados	20
Agua freática	Húmedo	7

Fuente: Departamento de Geomecánica - UM Cerro Lindo

Se aplicó el sistema RMR de Bieniawski para evaluar la calidad del macizo rocoso, obteniéndose un valor total de 47, correspondiente a una clasificación Tipo IIIB (Regular B).

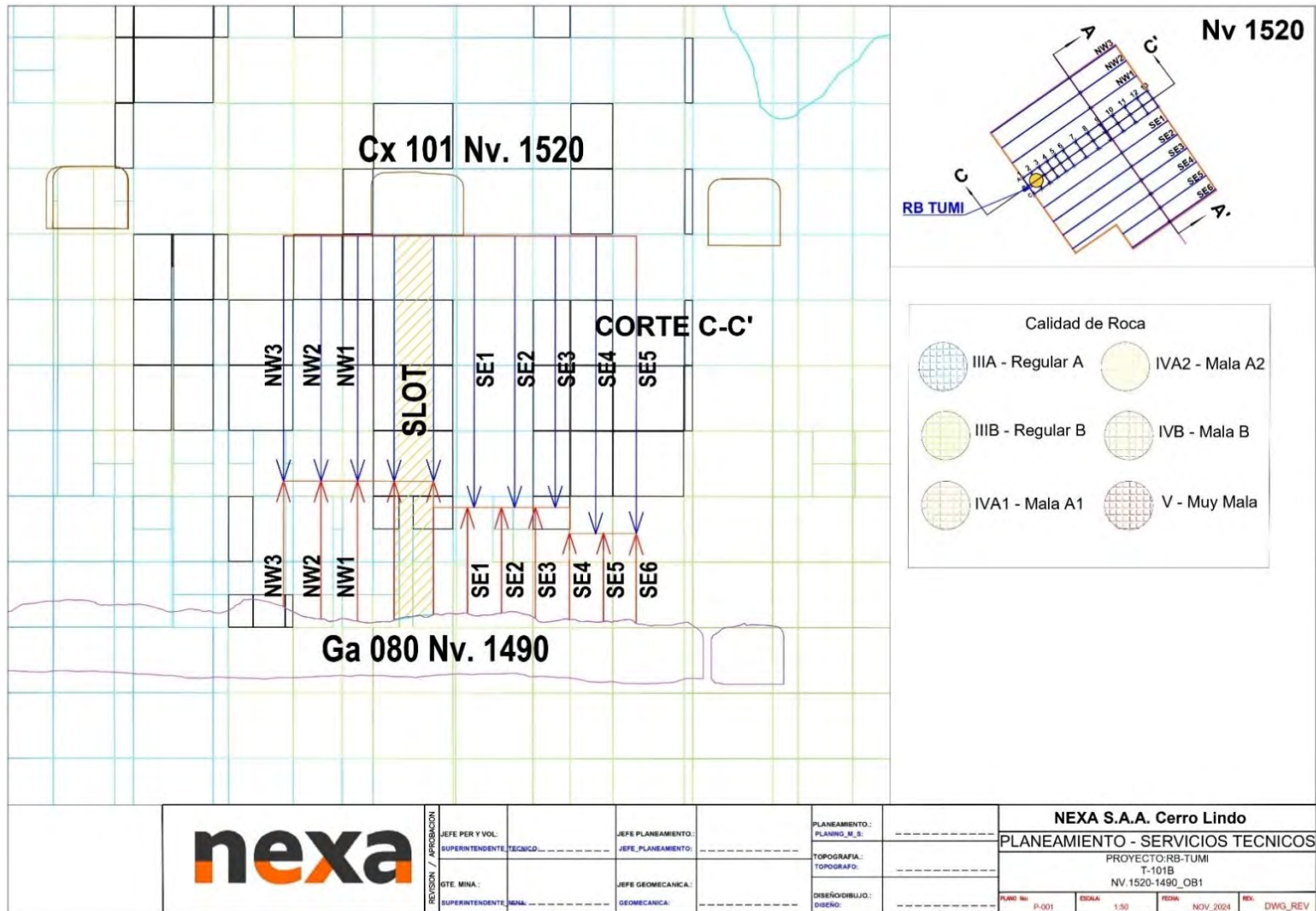
RMR: $4 + 6 + 10 + 20 + 7 = 47 \rightarrow$ Clasificación: Tipo III-B (Roca Regular III-B)

4.1.1.3. Integración de Resultados Geomecánicos en el Modelo de Bloques del Tajeo T-101B

Con el propósito de representar espacialmente la calidad del macizo rocoso evaluado en el tajeo T-101B, se desarrolló un modelo de bloques geomecánicos utilizando los valores obtenidos mediante el sistema de clasificación RMR. Esta integración permite visualizar la distribución de zonas con diferentes condiciones estructurales, clasificadas como roca regular A (III A) y roca regular B (III B), las cuales fueron determinadas a partir de estaciones tipo. El modelo constituye una herramienta clave para el planeamiento técnico de excavaciones verticales, ya que facilita la toma de decisiones respecto al método de ejecución (Raise Boring o VCR), la definición de sostenimiento, y el control de riesgos operacionales en función de la estabilidad local del macizo.

Figura 17

Modelo de Bloques Geomecánicos de la Chimenea Slot RB TUMI en el Tajeo T-101, Zona OB1 (Niveles 1520 y 1490)



Fuente: Departamento de Geomecánica – UM Cerro Lindo (2024)

4.2. ANALISIS OPERACIONAL DE LA UNIDA MINERA CERRO LINDO

Este apartado presenta una visión integral del funcionamiento operativo de la Unidad Minera Cerro Lindo, abordando su sistema de producción, los métodos de minado utilizados y los procedimientos técnicos aplicados en la zona OB1. Se enfoca en comprender cómo se estructura el flujo de mineral desde su extracción hasta su traslado, así como los factores que inciden en la eficiencia de las operaciones subterráneas.

4.2.1. Método de Explotación Aplicado en la Zona Ob1

En la zona OB1 de Cerro Lindo se ha implementado un método de explotación subterránea que responde a la geometría del yacimiento y a los objetivos de producción diaria superiores a 22,500 (veintidós mil quinientas) toneladas métricas. Esta área opera bajo un enfoque mecanizado que prioriza la eficiencia en la extracción y el control de dilución, integrando el Sub Level Stopping como técnica principal, junto con sistemas de acarreo y transporte adaptados a las condiciones operativas del sector.

4.2.1.1. Escala y producción de la unidad minera

Cerro Lindo es una operación subterránea de gran envergadura cuya producción diaria supera las 22,500 (veintidós mil quinientas) toneladas métricas de mineral, lo que refleja su consolidación como uno de los complejos mineros más importantes del país. Esta escala de explotación permite mantener un flujo continuo hacia planta, con rendimientos metalúrgicos estables y una gestión planificada de los cuerpos minerales. La operación se caracteriza por su eficiencia operativa, resultado de una combinación de infraestructura moderna, control de calidad en los procesos, y una planificación minera de mediano y largo plazo que asegura la continuidad del proyecto.

Figura 18
UM Cerro Lindo



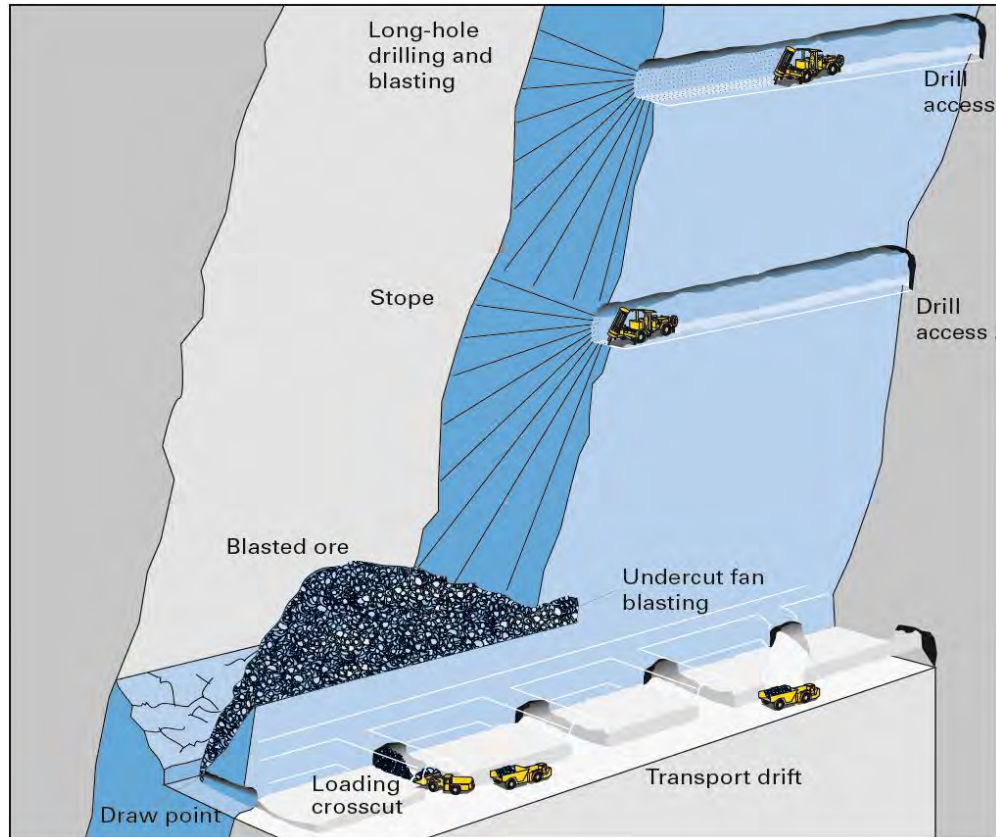
Fuente: Tecnología Minera (2022).

4.2.1.2. Minado por sub level stoping

El método utilizado en Cerro Lindo es el Sub Level Stopping, el cual consiste en la habilitación de subniveles dentro del cuerpo mineralizado, desde donde se realizan taladros de producción hacia cámaras previamente diseñadas. Este esquema de minado permite una extracción secuencial, aprovechando la gravedad para facilitar el colapso del mineral y su recolección con equipos LHD. En promedio, cada stope permite recuperar entre 25,000 (veinticinco mil) y 40,000 (cuarenta mil) toneladas por ciclo. La aplicación del Sub Level Stopping responde a las condiciones estructurales del yacimiento, permitiendo alta productividad con bajo nivel de dilución, además de ofrecer un entorno controlado que facilita la automatización de equipos y la reducción de exposición del personal en zonas críticas.

Figura 19

Diagrama del Método de Explotación Sublevel Stopping

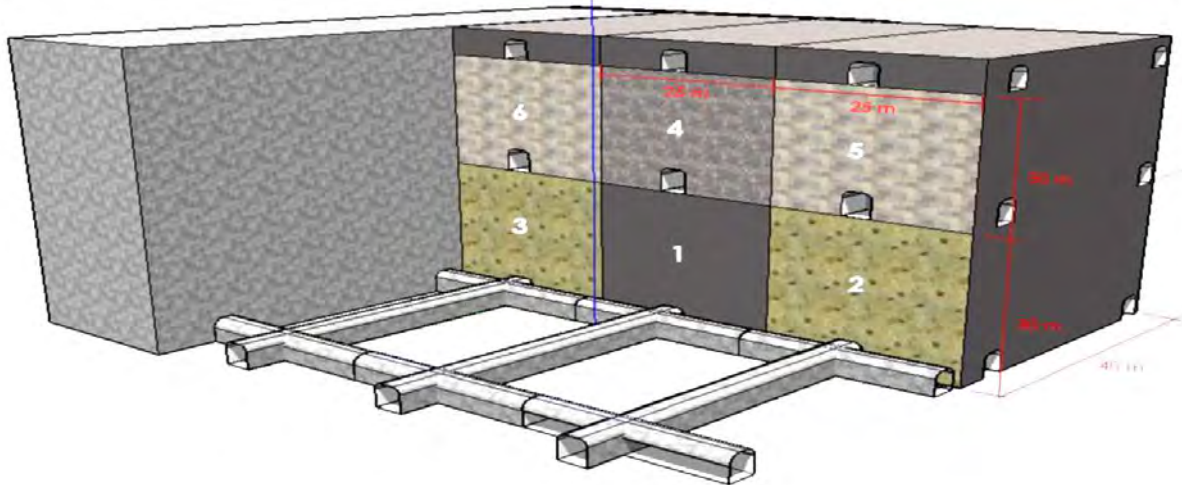


Fuente: Hustrulid, W. A. & Bullock, R. L. (2001)

En la tesis esta figura se utiliza para contextualizar el método de explotación empleado en el cuerpo mineral OBI, mostrando la disposición de los subniveles, los frentes de perforación y los puntos de extracción. Permite visualizar el rol que cumplen las chimeneas SLOT dentro del esquema de Sublevel Stopping, como elementos de comunicación y flujo de mineral entre los niveles superiores de perforación y el nivel de producción donde se realiza la comparación entre los métodos VCR y Raise Boring.

Figura 20

División de bloques en el Minado de Tajeos del OB1



Fuente: Departamento de Planeamiento de Minado – UM Cerro Lindo

En la tesis esta figura se emplea para ilustrar la forma en que se subdivide el cuerpo OB1 en bloques y tajeos de explotación, definiendo las zonas donde se ubican las chimeneas SLOT analizadas. Sirve de referencia para entender la geometría de los paneles, la secuencia de minado y la localización de las chimeneas seleccionadas como muestra para la evaluación técnico-económica de los métodos VCR y Raise Boring.

4.2.2. Características del Yacimiento y Selección del Método

Se explican las condiciones físicas del yacimiento que influyen directamente en la selección del método de explotación que se realiza en la zona OB1, considerando aspectos como geometría de las vetas, dirección del cuerpo mineralizado y sus dimensiones.

4.2.2.1. Parámetros geomecánicos del método

Se presentan los parámetros técnicos esenciales que condicionan la selección del método de explotación, considerado los parámetros geométricos del yacimiento.

Tabla 12*Parámetros que condicionan el Método Sublevel Stopping*

Nº	Parámetro Geomecánico	Detalle	Valor
1	Inclinación del cuerpo mineralizado	Referencia General	Mayor a 60°
		Valores en Cerro Lindo	Entre 65° y 70°
2	RMR del mineral	Referencia General	60
		Valores en Cerro Lindo	Entre 50 y 60
3	RQD del mineral	Referencia General	60
		Valores en Cerro Lindo	Entre 55 y 62
4	RMR en la caja piso	Referencia General	75
		Valores en Cerro Lindo	Entre 60 y 70
5	RMR en la caja techo	Referencia General	50
		Valores en Cerro Lindo	Entre 40 y 50

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.2. Secuencia de minado

Se expone la organización de las labores productivas, precisando la secuencia de avances, tajos y chimeneas, y su integración dentro del cronograma de producción de la mina.

Figura 21

Ciclo de Minado en UM Cerro Lindo



Fuente: Departamento de Planeamiento – UM Cerro Lindo

4.2.2.3. Diseño y dimensionamiento DEL TAJO T-101B

Aquí se detallan las configuraciones estructurales del Tajo T-101B, incluyendo sus dimensiones estándar, espaciamiento entre niveles y su adecuación al método de explotación empleado.

Tabla 13

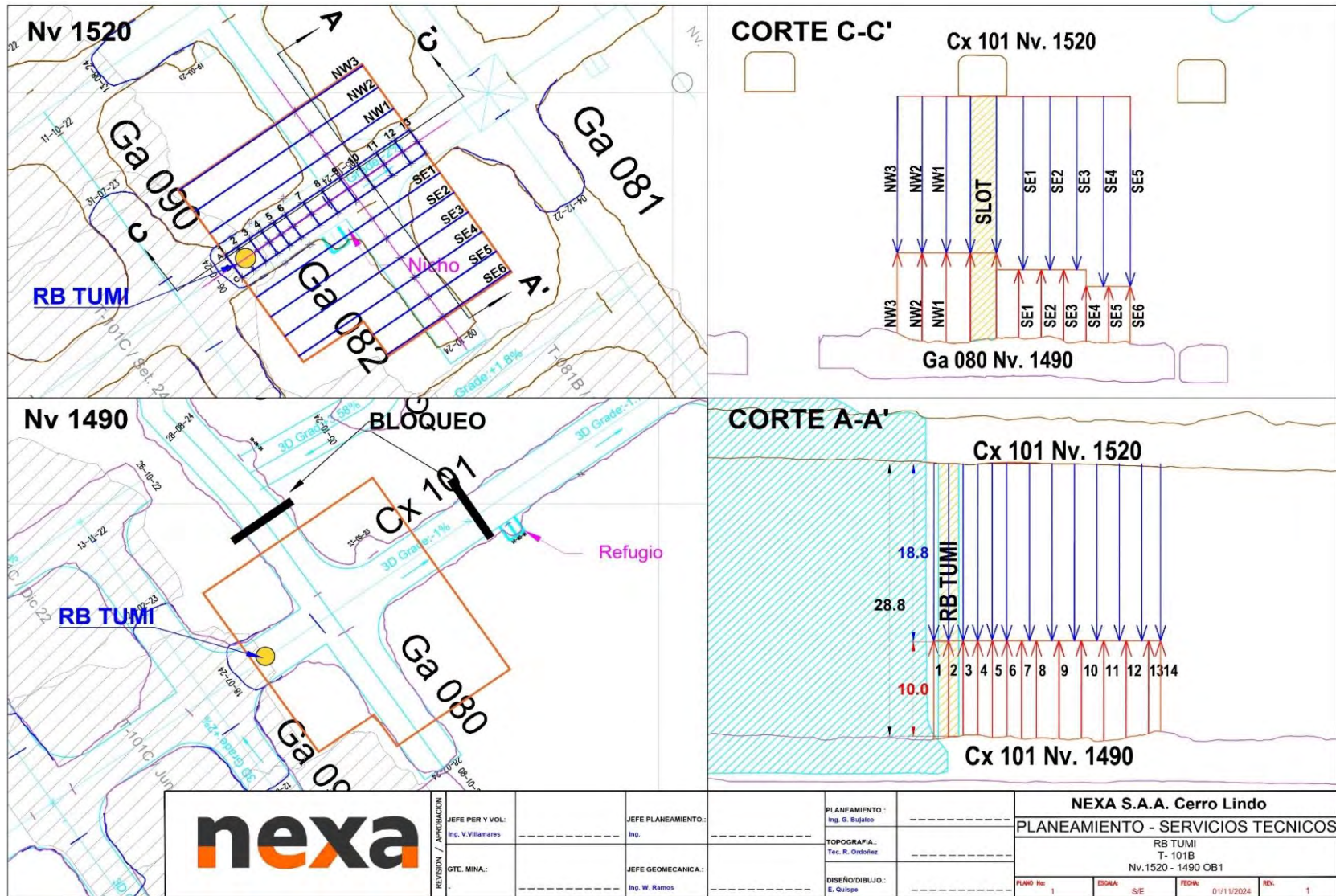
Dimensiones del Tajo T-1010B

Descripción	Dimensión
Ancho de Explotación	15 m
Altura de Tajo	28.8 m
Ancho de Tajo	25 m
Sección de Subnivel superior	5m x 5m
Sección Subnivel Inferior	5m x 5m

Fuente: Departamento de Planeamiento Cerro Lindo

Figura 22

Plano de Diseño y Dimensionamiento del Tajo T-101B



Fuente: Planeamiento y Servicios Técnicos – UM Cerro Lindo

4.2.2.4. Equipos utilizados en LA explotación

Se describen los equipos mecánicos utilizados en las labores de producción:

4.2.2.4.1. *SIMBA H1354 EPIROC*

La Simba H1354 es una perforadora hidráulica diseñada para labores de producción en minería subterránea, destacando por su precisión, automatización y capacidad de operar en tajeos de sección media a grande. Su aplicación mejora la eficiencia operativa, reduce la exposición del personal y garantiza barrenos de alta calidad en perforación de largo alcance.

Figura 23

SIMBA H1354 EPIROC



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 14

Especificaciones Técnicas del SIMBA H1354

Ítem	Dato
Diámetro de taladros	76 – 178 mm
Tipo de perforación	Paralela y en anillos (360°)
Potencia de perforación	Hasta 25 kW (COP 2550UX+)
Extensión de alimentación	Hasta 1.2 m
Cobertura de frente	3 m de ancho
Sistema de barras	Manipulación mecanizada (rod handling)
Flushing	Agua-neblina (water-mist)
Seguridad operativa	Canopy FOPS + panel de control móvil
Peso operativo	17 500 kg

Fuente: Ficha Técnica – Epiroc

4.3.CONSTRUCCIÓN DE LA CHIMENEA SLOT POR EL MÉTODO VCR

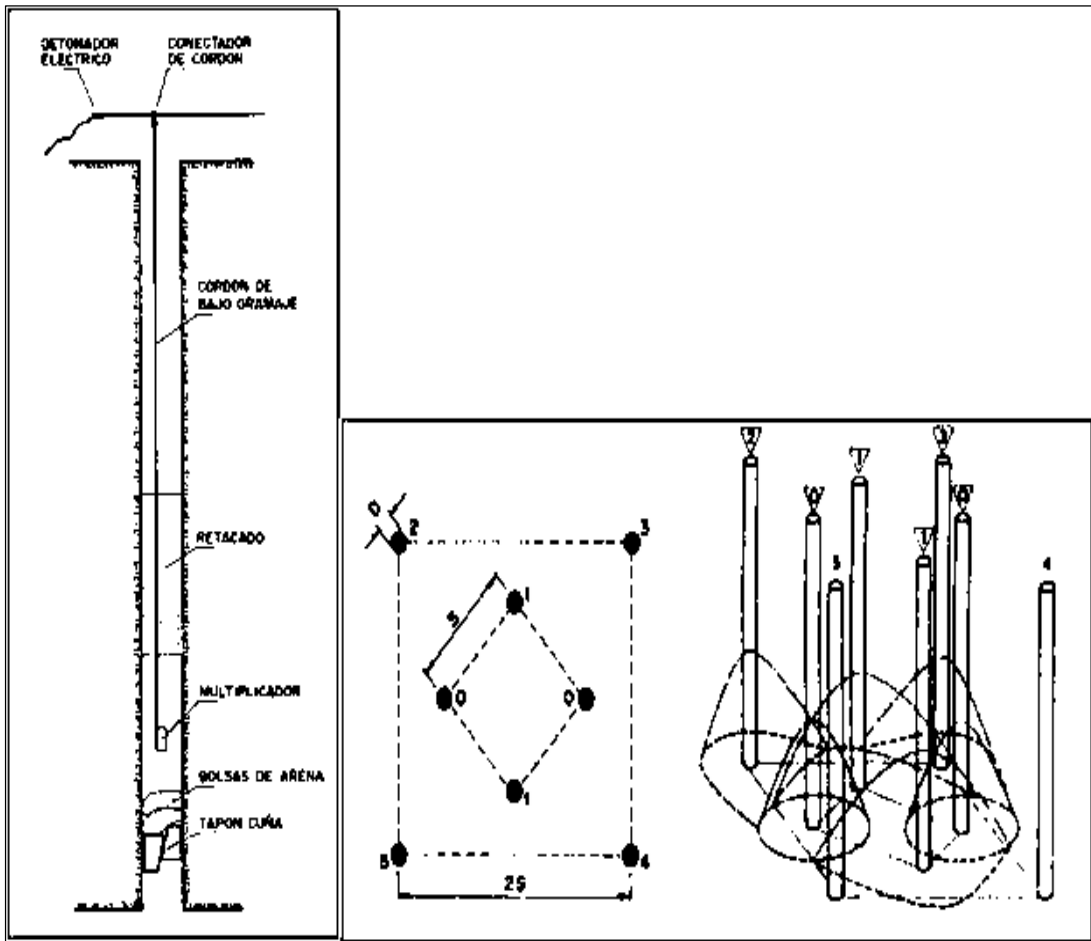
En este apartado se presenta la metodología constructiva de chimeneas slot mediante el método Vertical Crater Retreat (VCR), explicando de manera general sus principios y etapas de aplicación.

4.3.1. Construcción de Chimenea de Cara Libre

Se describe el proceso de habilitación de una chimenea inicial que sirve como frente de trabajo en el desarrollo de voladuras bajo el método VCR.

Figura 24

Esquema de voladura de la chimenea con el Método V.C.R.



Fuente: Construcción de túneles, piques y chimeneas (Camilo Salinas T., 1° edición)

4.3.1.1. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA CHIMENEA

La sección cuadrada 3×3 m se define para asegurar un área útil de 9 m^2 que genere cara libre continua con buen control de contorno en un macizo de calidad regular ($\text{RMR} \approx 42$), evitando sobreexcavación y sin requerir sostenimiento. La altura de tajeo de 20 m coincide con la longitud operativa máxima por ciclo del equipo y limita desviaciones acumuladas. Los diámetros responden a función: 76 mm en producción (compatibles con carga y confinamiento) y 127 mm en escariado/alivio (ventanas de liberación y control perimetral). Con esta configuración, la malla (13

+ 6) y el burden de 0.41 m equilibran energía y confinamiento, priorizando estabilidad inmediata y geometría del slot sobre el metraje perforado (Tabla 15).

Tabla 15

Dimensiones y parámetros de chimenea construida mediante VCR

Parámetro	Valor	Observación
Tipo de sección	Cuadrada	Geometría usual para chimeneas VCR
Dimensiones de la sección	3 m x 3 m	Lado de la sección cuadrada
Altura de tajeo	20 m	Corresponde a la longitud de avance por etapa
Diámetro de broca de producción	76 mm	Taladros principales de carga
Diámetro de broca escariadora	127 mm	Taladros de alivio/ensanche

Fuente: Elaboración Propia

4.3.1.2. PARÁMETROS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA

Se detallan los parámetros técnicos de perforación y de carga de explosivos que intervienen en la aplicación del VCR.

Categoría	Indicador	Valor / Unidad
Operación	Tipo de perforadora	Radial – Paralelo Vertical
	Profundidad máxima de avance	20 m
	Rendimiento promedio	16.5 m/h
Diseño de malla	Sección proyectada	3 m × 3 m
	Taladros de producción	13
	Taladros de escariado	6
	Burden	0.41 m
Dimensiones de perforación	Diámetro de taladros producción	76 mm y 89 mm
	Diámetro de taladros escariados	127 mm
Rendimiento por turno	Metros perforados	123.75 m/guardia
Eficiencia de utilización	Porcentaje de uso	85%

Fuente: Elaboración Propia

4.3.2. Ejecución del Slot del Tajeo

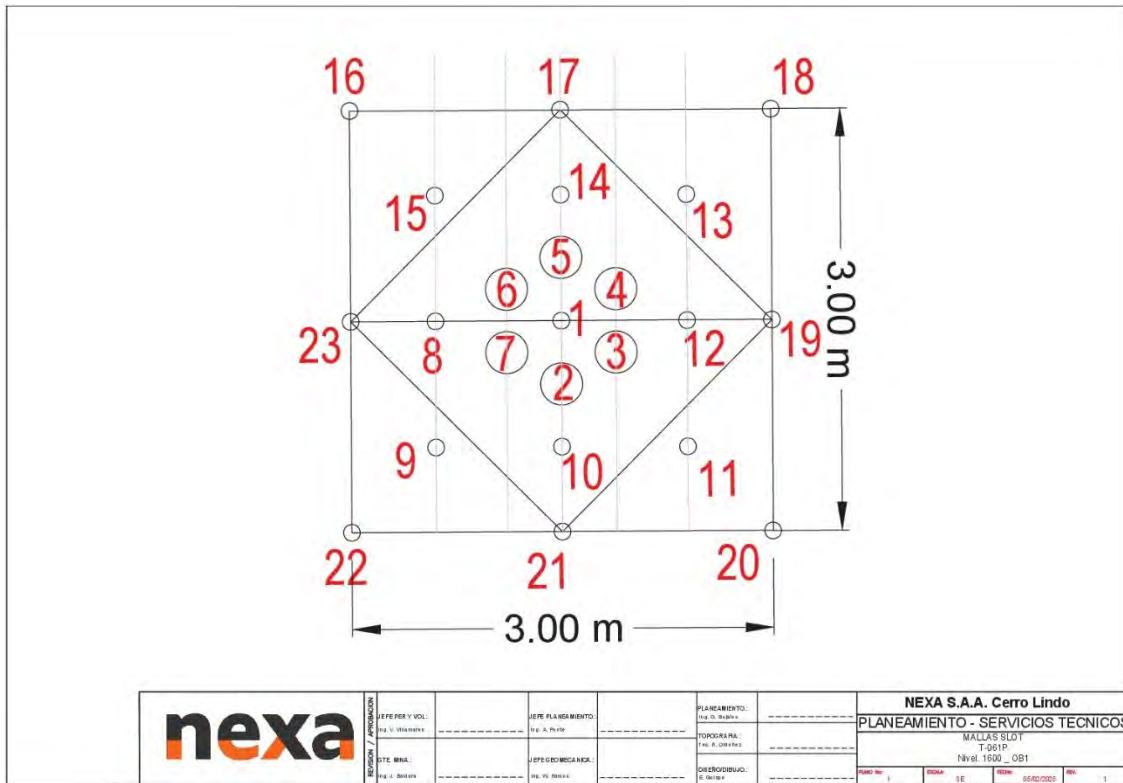
La construcción de la chimenea slot a través del método VCR implica una serie de etapas técnicas que buscan generar una abertura continua y estable, que funcione como cara libre para el minado. Este procedimiento combina perforación, carguío de explosivos y detonación en ciclos controlados, garantizando que el avance sea seguro y eficiente.

4.3.2.1. PROCEDIMIENTO DE PERFORACIÓN

En primer lugar, se realiza la perforación del taladro piloto, un barreno central que actúa como eje de referencia y superficie de alivio para el resto de la voladura. A continuación, se ejecuta la perforación de los taladros de producción y escariado, dispuestos alrededor del taladro piloto en una malla previamente diseñada. Estos taladros se caracterizan por tener diámetros que varían entre 76 mm y 127 mm, dependiendo de su función, y profundidades que suelen alcanzar los 20 metros por etapa o banco.

Figura 25

Diseño de malla de perforación para slot con disposición de 23 taladros



Fuente: Planeamiento y Servicios Técnicos – UM Cerro Lindo

Figura 26

Ejecución del taladro guía y los taladros de escariado o alivio.



Fuente: Elaboración Propia

4.3.2.2. DETONACIÓN DEL SLOT PARA TAJEO

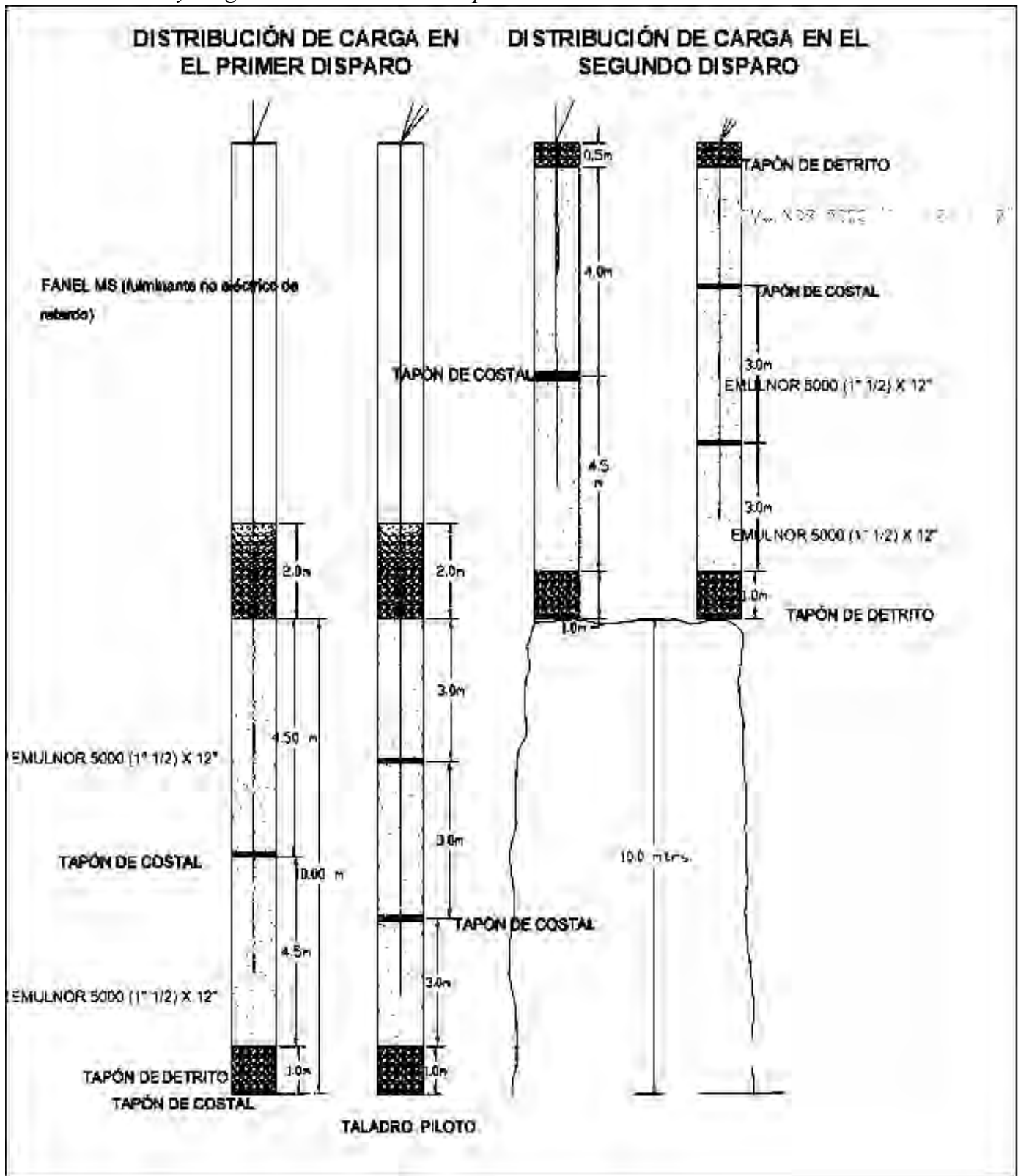
Una vez realizada la perforación, se procede al carguío de los taladros de producción empleando cartuchos de emulsión explosiva (EMULNOR 5000 de 1 ½” x 12”), los cuales se disponen en columnas alternadas con tapones de costal o de detrito. Estos materiales inertes cumplen la función de confinar la energía generada durante la detonación, orientándola hacia el interior de la chimenea y evitando pérdidas de energía al exterior. Para garantizar una secuencia controlada y progresiva, se utilizan detonadores no eléctricos de retardo (FANEL MS), que permiten coordinar el encendido de los barrenos de manera precisa.

La ejecución de la chimenea se desarrolla en ciclos de disparo sucesivos. En la primera voladura se produce el arranque inicial del slot, generando un hueco piloto que actúa como cara libre. Posteriormente, tras la evacuación del material fragmentado, se efectúa un segundo disparo en el que la sección de la chimenea se amplía mediante un nuevo carguío dispuesto en tramos alternados de explosivo y tapones de confinamiento. Este procedimiento puede repetirse en etapas adicionales hasta alcanzar la longitud prevista, que generalmente coincide con la altura de banco, aproximadamente 20 metros.

Finalmente, la remoción del material volado asegura que la chimenea conserve las dimensiones proyectadas, con una sección cuadrada de 3 m x 3 m. Este proceso garantiza la formación de una cara libre continua, condición indispensable para optimizar la explotación subterránea mediante el método de tajos por subniveles.

Figura 27

Distribución y carguío de taladros en los disparos del sistema VCR



Fuente: Elaboración Propia

Figura 28

Resultados después de la primera y segunda voladura



Fuente: Elaboración Propia

4.3.2.3. ANÁLISIS DE CONSTRUCCIÓN DE LA CHIMENEA POR V.C.R

En el proceso de construcción de chimeneas mediante el método VCR, cada etapa demanda una planificación precisa en cuanto a actividades y tiempos de ejecución. La secuencia de trabajo se organiza en dos fases de disparo, que comprenden labores de acondicionamiento, perforación, carguío, voladura, ventilación y limpieza, tanto en los niveles superiores como en los inferiores. La programación de estas actividades permite estimar la duración total de la construcción de la chimenea, considerando el aporte de cada una de ellas en función de su complejidad operativa y de los recursos involucrados. A continuación, se presenta el detalle de la distribución temporal de estas tareas, donde se observa el tiempo requerido en cada fase hasta completar la ejecución final de la chimenea.

La minera trabaja dos guardias por día y están distribuidos en turno día y turno noche en el siguiente horario:

- Turno día: 7:00 a.m. – 6:00 p.m.
- Turno noche: 7: 00 p.m. – 6:00 a.m.

Tabla 16

Resumen de la construcción final de la chimenea

Tipo de actividad	Etapa de ejecución	Tiempo (días)
Preparación de áreas de trabajo	Nivel superior – 1er disparo	0.5
	Nivel superior – 2do disparo	0
Perforación	Simba H-1354 Atlas Copco (1er disparo)	1.5
	Repasado de taladros (2do disparo)	1
Carguío y voladura	1er disparo	1.25
	2do disparo	1.25
Ventilación y limpieza del frente inferior	1er disparo	1.25
	2do disparo	1.25
TIEMPO TOTAL ACUMULADO		8

Fuente: Elaboración Propia

4.3.2.4. COSTOS asociados a LA CONSTRUCCIÓN DE LA CHIMENEA mediante el MÉTODO V.C.R.

La construcción de una chimenea mediante el método VCR no solo implica la planificación técnica de perforación, voladura y ventilación, sino también una estimación precisa de los costos asociados. Estos se dividen en costos directos, que comprenden personal, aceros, explosivos, equipos y materiales, y costos indirectos, que incluyen gastos generales, imprevistos y utilidades. La evaluación económica permite dimensionar el impacto financiero del procedimiento en función de los recursos empleados y el número de taladros ejecutados. En la siguiente tabla se detallan los costos calculados para la construcción de la chimenea, expresados en dólares americanos y considerando tanto el total general como el costo unitario por metro ejecutado.

Tabla 17*Costos asociados a la Construcción de la Chimenea mediante el método V.C.R.*

	Descripción	Monto (US\$)
Costos Directos	Costo total de personal involucrado	872.32
	Costo total de aceros	1653.13
	Costo de explosivos y accesorios	2094.56
	Costo total de equipos	2485.02
	Costo total de materiales	581.6
	Subtotal costos directos	7586.63
Costos Indirectos	Gastos generales (15 %)	1137.99
	Imprevistos (7 %)	531.06
	Utilidad (10 %)	758.66
	Subtotal costos indirectos	2427.71
COSTO TOTAL (US\$)		10,014.34
COSTO UNITARIO (US\$/m)		417.26

Fuente: Elaboración Propia

4.4.CONSTRUCCIÓN DE LA CHIMENEA SLOT POR EL MÉTODO RAISE BORING**4.4.1. Máquina Empleada – SBM400SR**

La SBM 400 SR es una perforadora raise boring de bajo perfil, especialmente diseñada para la construcción de chimeneas tipo slot raise en minería subterránea. Su diseño compacto y autónomo le permite operar en galerías reducidas, integrando funciones automatizadas de perforación y manipulación de tuberías con control remoto, lo que reduce riesgos y mejora la productividad en tareas críticas de escariado y perforación piloto.

Figura 29

Máquina Raise Boring SBM400SR



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 18

Especificaciones Técnicas – SBM 400 SR

Categoría	Especificación Operativa
Tipo de trabajo	Perforación de chimeneas tipo Slot Raise
Diámetro máximo de chimenea	2.1 m (7 pies)
Longitud máxima de perforación	250 m (800 pies)
Torque máximo	81 kN·m (60,000 lbf·pie)
Fuerza de escariado	1,700 kN (384,000 lbf) a 35 MPa
Rango de ángulos de trabajo	De 45° a 90° (vertical e inclinada)
Velocidad de desplazamiento	3 km/h (1.9 mph)
Dimensiones máquina (retraída)	Largo: 5.6 m – Ancho: 2.3 m – Altura: 3.2 m
Peso total (con oruga)	18,500 kg (40,700 lb)
Tipo de alimentación	Eléctrica (150 kW) + sistema hidráulico + uso de agua o aire
Sistema de posicionamiento	Brazo hidráulico con llaves automáticas – control remoto

Fuente: TUMI Raise Boring

4.4.2. Traslado de Máquina

El presente apartado describe el procedimiento de traslado de la máquina perforadora SBM 400 SR, conforme a lo establecido en el Procedimiento Escrito de Trabajo Seguro (PETS) N.º TUMI-CEL-PETS-01, aplicado en la Unidad Minera Cerro Lindo. Este documento técnico define las pautas operativas, controles de seguridad necesarios para garantizar una ejecución segura y eficiente del traslado de maquinaria pesada en labores subterráneas. El desplazamiento se realiza mediante operación autónoma con control remoto y bajo estricta supervisión.

4.4.2.1. Coordinación y Documentación Previa

Previo al inicio de la tarea, se requiere la elaboración y validación de documentación técnica: orden de trabajo, liberación de área, IPERC, cuaderno de relevo, checklist de pre-uso e inspección de cámara. Además, se efectúa el monitoreo de gases en el área de trabajo, considerando los límites permisibles: $CO \leq 25$ ppm, $NO_2 \leq 3$ ppm, $CO_2 \leq 5000$ ppm y $O_2 \geq 19.5\%$. Estas actividades deben ser coordinadas por el supervisor con las áreas involucradas.

4.4.2.2. Verificación Técnica del Equipo

El operador, con validación del área de mantenimiento, debe verificar el estado de los componentes críticos del equipo. Entre estos destacan: nivel de combustible (mayor a $\frac{3}{4}$ del tanque), niveles de aceite y refrigerante, tensado adecuado de los crawlers, estado de los damper del soporte superior, luces operativas y cilindros de inclinación retraídos. Asimismo, la ruta debe ser planificada considerando radios de curvatura y pendientes no mayores a 15° en tramos de 5 metros.

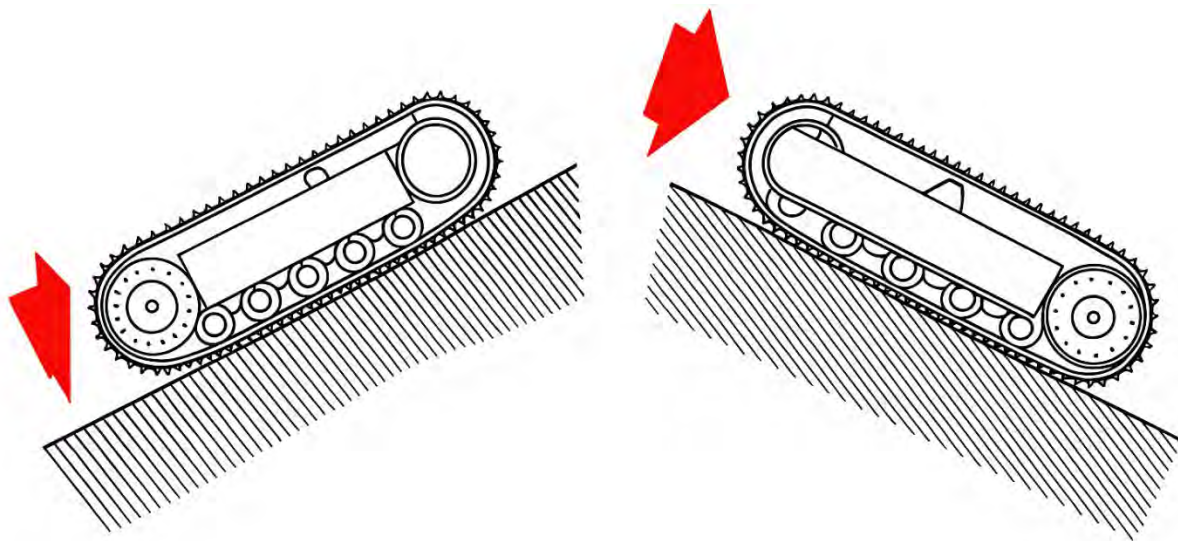
4.4.2.3. Procedimiento de Traslado

El encendido de la máquina debe realizarse según el manual de operaciones Deutz. La velocidad máxima de traslado es de 3 km/h, permitiendo un giro de 360° sobre su eje. El traslado

se realiza con control remoto, acompañado por un vigía con chaleco LED o bastón luminoso, quien guía al operador, especialmente en curvas. Una camioneta de ploteo precede a la máquina, despejando la vía. En pendientes, la máquina no debe inclinarse hacia adelante, y debe respetarse el límite de inclinación de 35°. En caso necesario, se asignará un segundo vigía en la parte posterior.

Figura 30

Traslado de la máquina mediante sus Orugas



4.4.2.4. Gestión de Contingencias

Ante cualquier inconveniente, el operador deberá estacionar el equipo en una zona segura que no obstruya el tránsito, aplicando las medidas de seguridad correspondientes y notificando de inmediato al supervisor. El terreno debe ser nivelado con pico y pala si presenta irregularidades, y las superficies resbalosas deben cubrirse con material detritus.

4.4.2.5. Restricciones Operacionales

Está prohibido operar la máquina sin capacitación y autorización. Solo el operador debe ubicarse dentro del radio de acción del equipo, manteniéndose el resto del personal a una distancia

mínima de 5 metros. Toda maniobra debe estar dirigida por un solo líder. No se permite el uso de equipos defectuosos, y es obligatorio retirar las extensiones superiores antes del traslado.

4.4.3. Instalación de Máquina

El presente apartado describe el procedimiento técnico de instalación de la máquina perforadora SBM 400 SR, desarrollado conforme al Procedimiento Escrito de Trabajo Seguro (PETS) N.º TUMI-CEL-PETS-02 aplicado en la Unidad Minera Cerro Lindo. Este documento normativo detalla las etapas previas, operativas y de control para garantizar la correcta instalación del equipo, en condiciones seguras y con respeto a los estándares ambientales y de ventilación subterránea.

4.4.3.1. Documentación y Condiciones Previas

La instalación requiere la elaboración de formatos obligatorios: orden de trabajo, IPERC, liberación de área, cuaderno de relevo, y checklist de preuso. Se incluye la verificación de condiciones de ventilación en la cámara mediante medición de gases con los siguientes valores límite permisibles: $CO \leq 25$ ppm, $NO_2 \leq 3$ ppm, $CO_2 \leq 0.5\%$, y $O_2 \geq 19.5\%$. Solo tras su validación por el supervisor y residente, se autoriza el ingreso del personal técnico.

4.4.3.2. Evaluación Técnica y Preparación del Área

Se debe verificar el raspado del piso, disponibilidad de servicios de agua y energía, y correcta iluminación (luces LED o lámparas mineras). El área de trabajo debe estar señalizada, limpia y ordenada. La manga de ventilación debe ubicarse a menos de 15 m del punto de perforación, y debe asegurarse el funcionamiento del ventilador instalado en la cámara.

4.4.3.3. Proceso de Instalación del Equipo

Una vez posicionada la máquina en el punto inicial, se evalúa el anclaje superior. Con apoyo del botcat, se instalan barandas y extensiones en la parte superior del equipo, siguiendo

estrictamente los planos topográficos. Es obligatorio el uso de arnés y bloque retráctil para trabajos en altura. El operador y su ayudante colocan las extensiones engrasadas, nivelan la máquina con actuadores hidráulicos, y definen su orientación según el plano geomecánico.

El operador debe mantenerse a una distancia mínima de 3 m mientras el equipo esté en movimiento. La presión máxima de los cilindros de fijación es de 1500 psi (10.3 MPa), valor predeterminado de fábrica. Se conectan líneas de enfriamiento con mangueras de 1" y sistemas de seguridad tipo whipcheck en cada empalme.

La alimentación eléctrica debe encontrarse a no más de 15 metros de la máquina y contar con señalización visible. El acceso a la cámara queda restringido una vez fijado el equipo.

4.4.3.4. Pruebas Operativas y Seguridad

Tras la instalación, se realizan pruebas de funcionamiento para verificar la operatividad de todos los componentes, con aprobación final por parte del área de mantenimiento. Cualquier incidente debe ser reportado inmediatamente al supervisor. Se realiza limpieza integral del área al término de los trabajos.

4.4.3.5. Restricciones Operativas

Queda prohibida la instalación en cámaras con deficiencias geomecánicas o sin ventilación adecuada. No se permite el trabajo sobre la máquina sin equipos de protección contra caídas, ni realizar instalaciones eléctricas con energía activa. El operador no debe realizar maniobras si no se mantienen los 3 m de distancia de seguridad, y el equipo no debe utilizarse si presenta fallas mecánicas sin reportar.

4.4.4. Dimensiones y Capacidades de la Máquina SBM 400 SR

Equipo de perforación Raise Boring para desarrollo de chimeneas. Cuenta con potencia instalada de 150 HP, rango de perforación nominal de hasta 330 m y diámetros de hasta 2.10 m.

Requiere 440 V de tensión y 60 Hz de frecuencia. A continuación, se detallan sus principales especificaciones:

Tabla 19

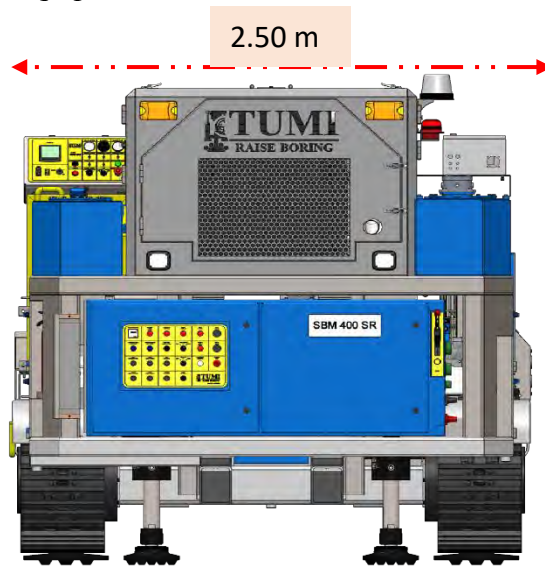
Dimensiones y Capacidades de la Máquina SBM 400 SR

Categoría	Especificación Técnica
Longitud de Perforación	Nominal: 330 m Máxima: 250 m
Diámetro de Perforación	Nominal: 1.5 m Máximo: 2.10 m
Dimensiones del Equipo	
Extensión	3.8 m
Retracción	3.2 m

Fuente: TUMI Raise Boring

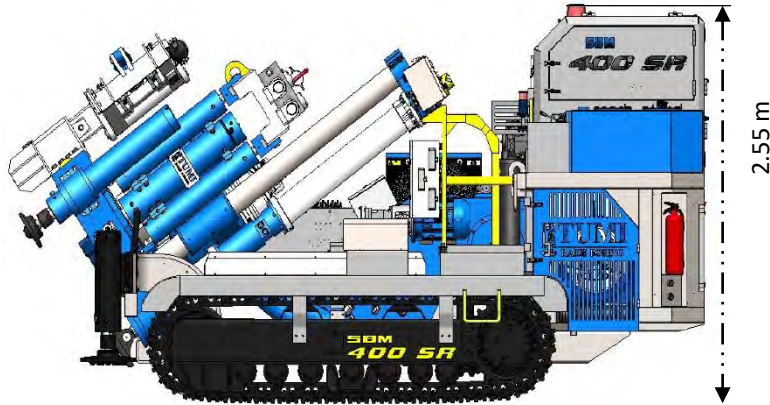
Figura 31

Ancho del Equipo



Fuente: TUMI Raise Boring

Figura 32
Altura del Equipo



Fuente: TUMI Raise Boring

4.4.5. Dimensiones de la Cámara de Instalación

La instalación segura y funcional de la máquina SBM 400 SR requiere una cámara con dimensiones mínimas estandarizadas que permitan el posicionamiento del equipo, su operación, inspección y mantenimiento. Estas dimensiones aseguran la estabilidad geotécnica y la accesibilidad del entorno de trabajo.

Tabla 20

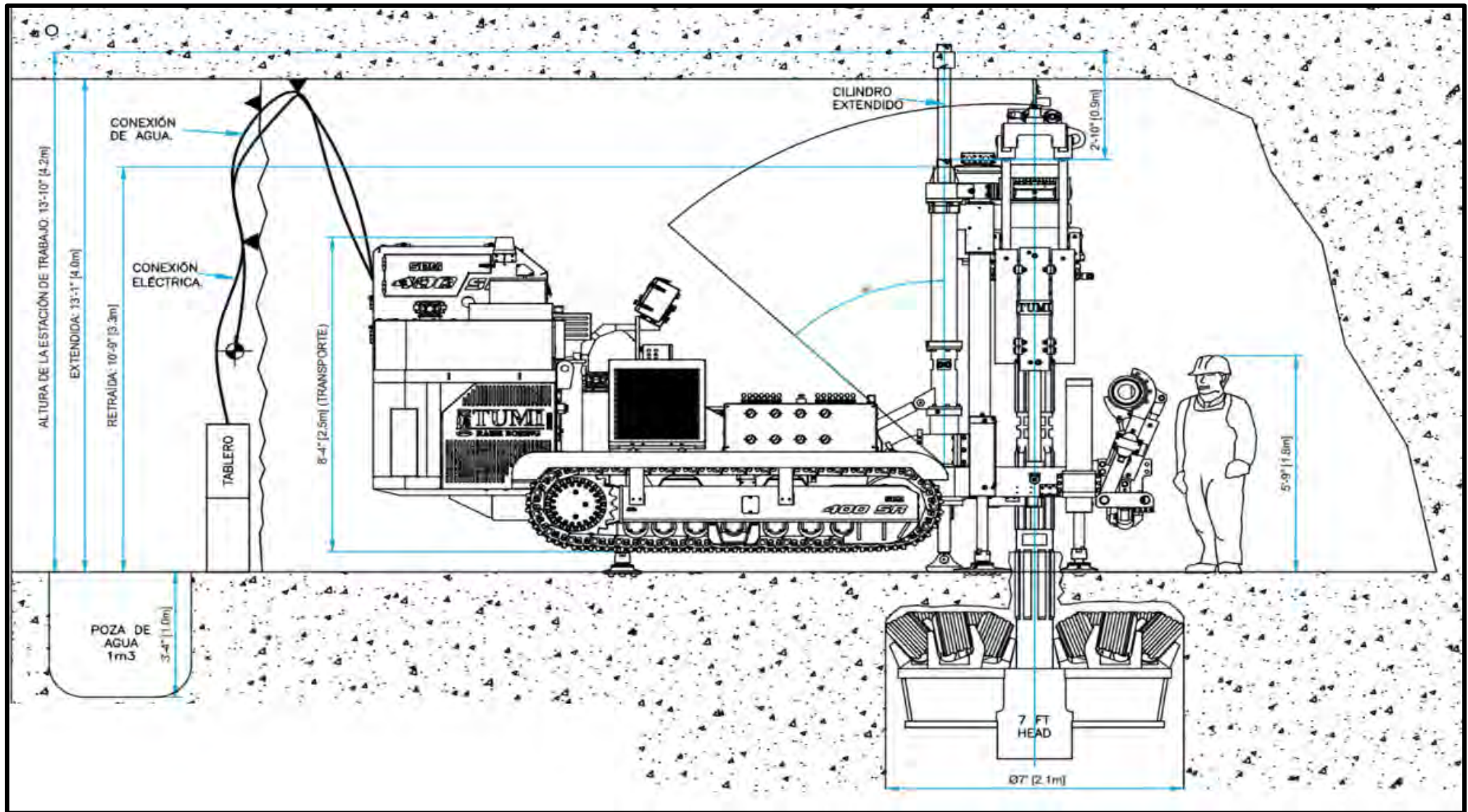
Dimensiones Estándar de la Cámara de Instalación

Parámetro	Dimensión
Altura	4.2 m
Ancho	4.9 m
Largo	8.9 m

Fuente: TUMI Raise Boring

Figura 33

Cámara de Instalación SBM 400 SR



Fuente: TUMI Raise Boring

4.4.6. Traslado de Barras de Perforación

Este procedimiento se basa en el PETS N.º TUMI-CEL-PETS-03 implementado en la Unidad Minera Cerro Lindo, y establece las pautas operativas, condiciones de seguridad y medidas ambientales para el traslado seguro de tuberías de perforación tipo Raise Boring. El proceso incluye actividades desde la evaluación del área hasta el transporte y manipulación con scooptram o minicargador, asegurando condiciones adecuadas para evitar riesgos operativos, ergonómicos o de atrapamiento.

4.4.6.1. Coordinación y Documentación Previa

Se inicia con la elaboración de los formatos obligatorios: orden de trabajo, liberación de área, IPERC, checklist de pre-uso, charla de cinco minutos y monitoreo de gases con límites permisibles de: $\text{CO} \leq 25$ ppm, $\text{NO}_2 \leq 3$ ppm, $\text{CO}_2 \leq 5000$ ppm, y $\text{O}_2 \geq 19.5\%$.

4.4.6.2. Carga y Descarga de Tuberías

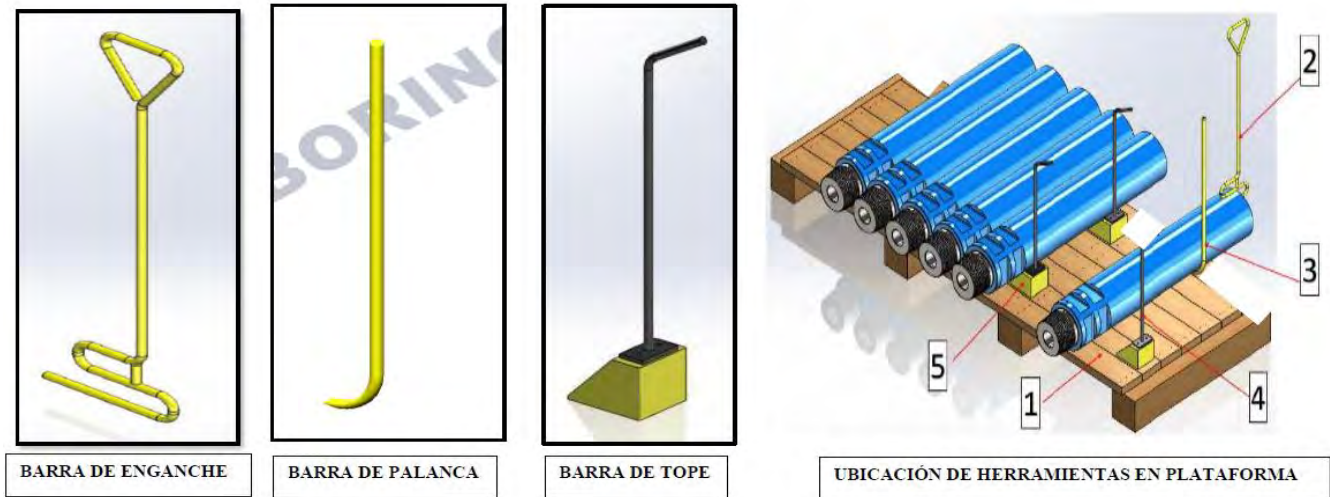
La zona de carga y descarga debe estar iluminada, limpia y señalizada. El scooptram realiza la carga de tuberías; si hay limitaciones operativas, se apoya con un minicargador. Se deben evitar atrapamientos y golpes con aceros, manteniendo siempre distancia segura y comunicación con el operador.

4.4.6.3. Manipulación Manual

La manipulación sobre plataforma se realiza con dos barras de palanca y una de enganche, permitiendo el rodado controlado de tuberías hacia el minicargador. Las tareas deben ejecutarse en equipo de dos personas, con coordinación efectiva y uso obligatorio de EPP.

Figura 34

Herramientas y disposición para el manipuleo seguro de tuberías de perforación



Fuente: TUMI Raise Boring

4.4.6.4. Transporte

El traslado con scooptram se realiza escoltado por una camioneta. El operador debe verificar que el volumen transportado no exceda la capacidad del equipo y que el material esté correctamente asegurado.

4.4.6.5. Seguridad Operativa

El operador debe evitar puntos ciegos, mantener comunicación constante y no levantar cargas mayores a 25 kg sin ayuda. Se debe evitar el contacto con grasa o piezas móviles y verificar que el scooptram esté detenido antes de intervenir manualmente.

4.4.6.6. Restricciones

No se ejecutará la tarea si el personal no está autorizado, si se realiza con una sola persona, si no hay herramientas adecuadas o si las tuberías no están bien aseguradas. Se prohíbe apilar tuberías en doble fila y manipularlas mientras el equipo esté en movimiento.

4.4.7. Parámetros a Considerar para Aplicar el Método Raise Boring

La correcta aplicación del método Raise Boring depende del cumplimiento de parámetros técnicos y organizativos fundamentales, que aseguran una ejecución eficiente y segura. Estos parámetros se agrupan en tres ejes clave que deben ser evaluados antes del inicio de la perforación:

4.4.7.1. Evaluación del proyecto

Esta etapa preliminar considera la revisión detallada de planos, tanto topográficos como estructurales, y la interpretación del terreno a partir de datos geotécnicos disponibles. Esto permite establecer la viabilidad del trazado de la chimenea, identificar restricciones naturales y definir las dimensiones requeridas para la cámara de instalación.

4.4.7.2. Condición de máquina y elementos de perforación

Antes de iniciar las labores, es esencial verificar el estado operativo del equipo Raise Boring, así como la calidad de los aceros de perforación (barras, brocas, estabilizadores). Una inspección rigurosa previene fallos durante el proceso, garantiza la alineación del reaming y extiende la vida útil de los componentes principales.

4.4.7.3. Capacitación del personal

Finalmente, es indispensable que el equipo operativo esté capacitado en los estándares técnicos, procedimientos específicos del método y técnicas seguras de manipulación y operación del equipo. Esto incluye tanto operadores como supervisores, quienes deben conocer los riesgos asociados y las buenas prácticas que aseguren la continuidad de la perforación sin interrupciones ni accidentes.

4.4.8. Parámetros Operaciones del Proceso de Perforación Raise Boring

4.4.8.1. Personal requerido para la ejecución

La ejecución de una chimenea por el método Raise Boring requiere de un equipo de trabajo especializado y debidamente organizado, ya que cada función cumple un rol clave en la seguridad y continuidad de las operaciones. El número de trabajadores no es elevado, pero sí altamente calificado, dado que se manejan equipos de gran potencia y condiciones operativas de alto riesgo. De acuerdo con los Procedimientos Escritos de Trabajo Seguro (PETS), el personal mínimo está compuesto por un supervisor, encargado de la planificación, control de riesgos y coordinación con la operación; un operador RB, responsable de la conducción y control de la máquina Raise Boring; un ayudante, quien asiste en la manipulación de tuberías, estabilizadores y componentes auxiliares; y un conductor, destinado al transporte del equipo y apoyo logístico en superficie. Esta organización asegura que las actividades se realicen de manera eficiente y bajo los estándares de seguridad establecidos.

Tabla 21

Personal requerido en la construcción de chimeneas por Raise Boring

Cargo	Función principal
Supervisor	Planificación, coordinación con el cliente, control de seguridad y riesgos.
Operador RB	Manejo, control y monitoreo de la máquina Raise Boring durante piloto y rimado.
Ayudante	Apoyo en el armado de la columna de perforación, manipulación de tuberías y EPP.
Conductor	Transporte del equipo, abastecimiento de insumos y apoyo logístico en superficie.

Fuente: Elaboración Propia

4.4.9. Avance de Perforación por la Máquina RB

El proceso de perforación con la máquina Raise Boring comprendió las etapas de traslado e instalación, estandarización, perforación piloto, rimado y limpieza de la labor. La secuencia se

ejecutó de forma continua y planificada, permitiendo completar la construcción de la chimenea en 5 días y medio, alcanzando una longitud final de 28.8 metros habilitada para el tajeo.

Tabla 22

Secuencia de actividades, duración y observaciones en la ejecución de chimenea por Raise Boring

Actividad	Duración (días efectivos)	Observaciones
Traslado e instalación	1.0 días (2 guardias)	–
Estandarización	0.5 días (1 guardia)	–
Perforación Piloto	1.0 días (2 guardias)	Se perforaron 28.80 m de taladro piloto, habilitando la base de la chimenea.
Rimado y Limpieza	2.0 días (4 guardias)	Se ejecutó el rimado de la chimenea, consolidando su sección final. Asimismo, se realizaron labores de limpieza posterior al rimado, con una duración aproximada de 1 a 2 horas, consideradas dentro de este proceso. Durante esta etapa también se atendieron incidencias de mantenimiento, como fugas de aceite en el equipo, las cuales fueron solucionadas sin afectar el avance del trabajo.
Total	4.5 días (9 guardias)	La chimenea quedó construida con una longitud total de 28.80 m, lista para su utilización en el tajeo.

Fuente: Elaboración Propia

4.4.10. Resumen De Distribución De Tiempos Al Día

El resumen de distribución de tiempos al día constituye una herramienta fundamental para comprender la dinámica operativa durante la construcción de la chimenea mediante Raise Boring en la zona OB1. A través de este análisis se detalla la organización de las actividades en cada jornada, diferenciando los turnos de trabajo, las máquinas empleadas y la ubicación específica de las labores. Este seguimiento permite evidenciar la secuencia real de ejecución, desde los traslados e instalaciones iniciales hasta los procesos de perforación piloto, rimado, estandarización,

mantenimiento y resolución de contingencias. Asimismo, facilita la identificación de los tiempos destinados a cada etapa, lo que posibilita evaluar la productividad diaria, el cumplimiento de las metas programadas y la incidencia de eventos no planificados. De esta manera, el registro de distribución de tiempos se convierte en un insumo clave para la planificación futura, la optimización de recursos y la mejora continua de las operaciones asociadas al Raise Boring.

Figura 35

Registro de actividades ejecutadas en la construcción de chimenea por Raise Boring – Zona OBI

Fecha	Turno	Maquina	Ubicación	Actividad Ejecutada	OBSERVACIONES GENERALES
7/11/2024	Dia	SR 083	NV 1520 T-101B OB1	TRASLADO	Se trasladan accesorios y componentes del NV 1740 CX860 al NV 1520 TJ 101. Se plotea el equipo scoop del NV 1550 al NV 1520 y se hace raspar el piso de la cámara. Se mueve la máquina RB a la cámara del TJ 101 y se deja presentada. Inicia la estandarización de cámara RB. FALTA DE MINICARGADOR.
	Noche	SR 083	NV 1520 T-101B OB1	INSTALACION	Se ingresa a las 10:30 p.m. por las demoras en la llegada a la unidad, debido al cierre de la vía por accidente. Se trasladan extensiones para nivelar máquina y se colocan con apoyo de manitou. Se traslada la bomba del NV 1740 al NV 1520. Culmina la estandarización de cámara RB. Se trasladan tablas y durmientes del NV 1740 al NV 1520. Se recupera el cable 440 del NV 1740 y se traslada al NV 1520. FALTA DE MINICARGADOR.
8/11/2024	Dia	SR 083	NV 1520 T-101B OB1	ESTANDARIZACIÓN	Se trasladan tuberías, estabilizador, bit sub y broca del NV 1740 CX 610 con apoyo de scoop. Se realiza la plataforma de tuberías y se colocan manualmente las tuberías junto con la broca y el estabilizador, por falta de minicargador. Se estandariza poza de agua y se mejora la estandarización de cámara RB. Confipetrol prolonga cable 440V hasta el nicho.
	Noche	SR 083	NV 1520 T-101B OB1	MANTENIMIENTO / PILOTO	Se culmina la instalación del cable 440V y se coloca la caja eléctrica a las 12:00 a.m. Se realizan pruebas de máquina, conexión de broca tricónica. Se tiene fuga de aceite y se reporta a la 1:00 a.m. se da solución. Inicia la perforación piloto. FALTA DE MINICARGADOR
9/11/2024	Dia	SR 083	NV 1520 T-101B OB1	PILOTO	Se bloquea el pie RB en el NV 1490. Se evacúa agua del pie RB. Continúa la perforación piloto y se comunica. Se descargan tuberías del taladro piloto y se retiran extensiones. Se cargan 21 tuberías al taladro piloto.
	Noche	SR 083	NV 1520 T-101B OB1	RIMADO	Culmina el cargado de tuberías para embone. Continúa la evacuación de agua del pie RB. Se embona la cabeza rimadora con apoyo de scoop. Inicia la perforación rimado.
10/11/2024	Dia	SR 083	NV 1520 T-101B OB1	RIMADO	Continúa la perforación rimado. Se realiza orden y limpieza.
	Noche	SR 083	NV 1520 T-101B OB1	RIMADO	Se desconecta tubería de servicio en el acceso del NV 1520 para delimitar la labor. Continúa la perforación rimado a las 22:00 p.m. Falta de agua de 23:20 p.m. a 00:20 a.m.
11/11/2024	Dia	SR 083	NV 1520 T-101B OB1	RIMADO	Se verifica el pie RB. Continúa la perforación rimado y se comunica. Se lava y se cuelga la cabeza rimadora, se recupera la cabeza rimadora por la RP 050 NV 1520. Se trasladan accesorios. Se traslada la máquina a una estocada en el CX 101.
	Noche	SR 083	NV 1520 T-101B OB1	FALLA DE MAQUINA	Se trasladan accesorios y componentes al almacén Tumi. Fuga de aceite por el empaque en el motor diesel. Máquina inoperativa.
12/11/2024	Dia	SR 083	NV 1520 T-101B OB1	MANTENIMIENTO / TRASLADO	Se da solución a la fuga de aceite a las 15:30 p.m. Se traslada máquina del NV 1520 al NV 1740 RP 678 / CX 061.
	Noche	SR 083	NV 1520 T-101B OB1	TRASLADO	Se abastece combustible a la máquina y se traslada del NV 1740 al NV 1800 TJ 019. Se trasladan accesorios y componentes a la cámara RB.

Fuente: Elaboración Propia

4.4.11. Total De Días En Ejecutar Chimenea Slot

La ejecución de la chimenea slot mediante Raise Boring comprendió las fases de traslado e instalación, estandarización, perforación piloto, rimado y limpieza final. Cada etapa se desarrolló en jornadas específicas contabilizadas en guardias (turnos), lo que permitió calcular con precisión el tiempo total de construcción. En conjunto, la chimenea se concluyó en 5.5 días efectivos (11 guardias), alcanzando una longitud final de 28.8 metros.

Tabla 23

Tabla de resultados – Rendimiento por actividad Raise Boring

Actividad	Metros ejecutados	Guardias	Rendimiento (m/guardia)
Perforación piloto	28.8 m	2	14.4 m/guardia
Rimado	28.8 m	4	7.2 m/guardia
Total	28.8 m (chimenea completa)	9	

Fuente: Elaboración Propia

4.4.12. Costos Asociados A La Construcción De La Chimenea Mediante El Método Raise

Boring

El análisis de costos unitarios de construcción de la chimenea mediante Raise Boring considera un desglose detallado de los principales rubros que intervienen en el proceso. En primer lugar, se incluyen los costos de supervisión, que abarcan al personal clave como el ingeniero residente, el responsable de seguridad y el administrador de obra, cuya presencia resulta esencial para garantizar la correcta ejecución técnica y el cumplimiento de las normativas de seguridad. Posteriormente, se consideran los costos de mano de obra directa, donde destacan el supervisor de turno, el operador de Raise Boring, el mecánico especializado y los ayudantes, quienes ejecutan de manera operativa cada una de las fases de perforación y rimado.

En cuanto a los costos de perforación, se contemplan el uso de la máquina SBM 400 SR, los aceros de perforación, la bomba de agua y el mantenimiento de la máquina junto con sus accesorios, todos ellos necesarios para asegurar continuidad y eficiencia en el ciclo de avance. A

ello se suman los costos complementarios relacionados con transporte, alimentación, servicios de campamento, herramientas, fletes y materiales de oficina, que proporcionan soporte logístico y operativo a la obra. Finalmente, dentro de los otros gastos se consideran los equipos de protección personal, el control y seguimiento de SSOMA, capacitaciones, exámenes médicos y seguros, que constituyen elementos indispensables para garantizar la seguridad integral de los trabajadores y la sostenibilidad de la operación.

Este desglose no solo permite identificar los componentes técnicos y administrativos que influyen en la construcción de la chimenea, sino que también facilita una visión integral del impacto de cada rubro en el costo total, asegurando una evaluación más precisa de la inversión requerida bajo el método Raise Boring.

Tabla 24

Composición de costos de construcción de chimenea Raise Boring

	Descripción	\$/m	Monto (US\$)
	Perforación Piloto 11"	267.00	7689.60
Costos	Rimado 2.1 m	489.00	14083.20
	Costo de Personal		947.00
Directos	Costo epps		989.8
	Subtotal costos directos		23709.60
Costos	Gastos generales (15 %)		3556.44
Indirectos	Imprevistos (7 %)		1825.6392
	Subtotal costos indirectos		5382.08
COSTO TOTAL (US\$)			29,091.68
COSTO UNITARIO (US\$/m)			1010.13

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. ANALISIS DE RESULTADOS

El análisis comparativo entre los métodos Vertical Crater Retreat (VCR) y Raise Boring (RB) aplicado en la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo permitió establecer diferencias significativas en términos de tiempos de ejecución, costos unitarios, seguridad operativa y calidad geométrica de las chimeneas construidas. Los resultados obtenidos en campo y gabinete se discuten a continuación, contrastándolos con los antecedentes técnicos y los parámetros establecidos en la literatura minera internacional.

Tabla 25

Tabla Comparativa de ambos métodos

Criterio de análisis	Método VCR	Método Raise Boring (RB)	Observación técnica
Tiempo de ejecución	8 días (rendimiento de 3.6 m/día)	4.5 días (rendimiento de 6.4 m/día)	RB reduce en aproximadamente de 43.75 % el tiempo total gracias a mecanización continua.
Costo unitario	417.26 US\$/m	1,010.13 US\$/m	RB cuesta 2.42 veces más; diferencia asociada al alto costo de equipo y energía.
Consumo principal	Explosivos, accesorios de voladura	Energía eléctrica, barras y brocas	VCR depende de logística de explosivos; RB de recursos eléctricos e hidráulicos.
Seguridad operativa	Alta exposición a explosivos y altura	Baja exposición (operación remota)	RB minimiza riesgos de accidentes laborales y exposición a gases.
Requerimientos de sostenimiento	Shotcrete y pernos adicionales	Mínimos o nulos	VCR exige refuerzo posterior, RB deja paredes lisas y estables.
Productividad global	Moderada	Alta	RB mejora continuidad de minado, clave en operaciones intensivas.
Aplicabilidad	Menor inversión, adecuado en minas medianas	Ideal en minas de gran escala	La elección depende del balance costo–seguridad–tiempo según la escala productiva.

Fuente: Elaboración Propia

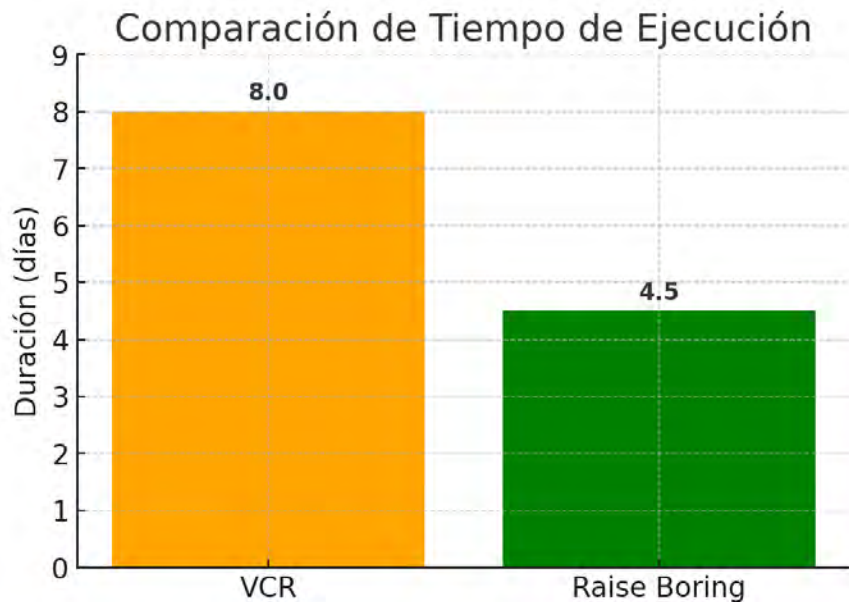
5.1.1. Comparación de Tiempos de Ejecución

Los resultados operativos muestran que el método VCR demandó aproximadamente 8 días para completar una chimenea de 28.8 m de altura, con un rendimiento promedio de 3.6 m/día. En contraste, el método Raise Boring alcanzó la construcción de la misma altura en 4.5 días efectivos (9 guardias), con un rendimiento promedio de 4.4 m/día, incluyendo fases de traslado, instalación, perforación piloto, rimado y limpieza.

Esta diferencia de casi 43.75 % menos en el tiempo total evidencia la capacidad del Raise Boring de acelerar la ejecución gracias a su mecanización continua, reduciendo retrasos asociados a ventilación, limpieza y reacomodo de equipos que son frecuentes en el método VCR.

Figura 36

Comparación de Tiempos según el método de construcción



Fuente: Elaboración Propia

5.1.2. Comparación de Costos Unitarios

El análisis económico indica que el costo unitario del VCR alcanzó los 417.26 US\$/m, mientras que el método Raise Boring registró un costo de 1,010.13 US\$/m, es decir, 2.42 veces mayor. La diferencia se explica principalmente por:

- Alto costo de operación de la SBM 400 SR, que incluye componentes de perforación, escariado y mantenimiento.
- Especialización del personal requerido, con mayor inversión en seguridad, EPP y soporte técnico.
- Consumo elevado de energía eléctrica e hidráulica, frente al consumo de explosivos y accesorios en el caso del VCR.

Si bien el Raise Boring representa una inversión mayor, la reducción del tiempo de ejecución y los beneficios en seguridad pueden justificar económicamente su aplicación en minas de gran escala, donde el costo por metro no es el único factor determinante. En operaciones de alta producción como Cerro Lindo, la disponibilidad rápida de chimeneas impacta directamente en la continuidad del ciclo de minado, lo que compensa el mayor costo unitario.

5.1.3. Análisis de Seguridad Operativa

En términos de seguridad, el Raise Boring presenta ventajas claras:

- Exposición mínima del personal: la operación se controla de forma remota, reduciendo la permanencia de trabajadores en el frente de la chimenea.
- Reducción de riesgos en altura: se eliminan andamios y trabajos en plataforma, comunes en el VCR.
- Control de ventilación y gases: el sistema de perforación mecanizada disminuye la generación de humos tóxicos, en contraste con las voladuras repetitivas del VCR.

- Durante la ejecución con Raise Boring no se reportaron incidentes relevantes, mientras que el método VCR, por su naturaleza de perforación y voladura manual, expone al personal a un mayor riesgo de accidentes relacionados con manipulación de explosivos, caídas de roca y ventilación deficiente.

Estos resultados son coherentes con lo reportado en Rivera (2015), donde el Raise Boring se adoptó principalmente como una estrategia de seguridad operativa, aun con costos superiores.

5.2.DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.2.1. ¿Cuál es el rendimiento en tiempo de ejecución de los métodos vcr y raise boring?

Los resultados obtenidos en Cerro Lindo demuestran que el Raise Boring completó una chimenea de 28.8 m en 5.5 días, mientras que el método VCR requirió 8 días, lo que representa una mejora del 32 % en tiempo. Este hallazgo es consistente con lo reportado por Medina (2020) en la Mina Pajonales, donde al comparar los métodos Manual, Alimak y Raise Boring se concluyó que, a pesar de su mayor costo, el Raise Boring garantiza menor tiempo de ejecución y mayor continuidad operativa. La discusión confirma que el factor tiempo es un criterio decisivo en minas de gran escala, ya que la reducción de días de ejecución acelera la disponibilidad de infraestructura crítica como las chimeneas slot.

Tabla 26

Comparación del tiempo de ejecución de chimeneas SLOT en Cerro Lindo y relación con antecedentes

Ítem	Método	Longitud chimenea (m)	Tiempo de ejecución (días)	Mejora relativa RB vs. VCR	Relación con antecedente
Resultados en UM Cerro Lindo – OB1	VCR	28,8	8,0	—	—
	Raise Boring	28,8	5,5	32 % menos tiempo	Coincide con menor tiempo y mayor continuidad operativa reportados para RB por Medina (2020) en Mina Pajonales.

Fuente: Elaboración Propia

Con este cuadro se evidencia que el Raise Boring reduce en aproximadamente 32 % el tiempo de ejecución respecto al VCR para una misma longitud de chimenea, lo que refuerza la importancia del factor tiempo en minas de gran escala.

5.2.2. ¿Qué diferencias existen en los costos unitarios de construcción entre vcr y raise boring?

En Cerro Lindo se verificó que el VCR registró un costo unitario de 417.26 US\$/m, mientras que el Raise Boring alcanzó 1,010.13 US\$/m, es decir, más del doble. Este contraste coincide con el antecedente de Estacio (2015) en la Mina Melisa, donde el uso del VCR se justificó como una opción económicamente viable para mantener bajos costos unitarios y mejorar la producción. La comparación refleja que, si bien el Raise Boring aporta ventajas técnicas, el VCR mantiene competitividad económica en escenarios donde el factor costo directo es prioritario. De esta manera, los resultados reafirman que la elección del método depende de un balance entre economía y eficiencia operativa.

Tabla 27*Tabla Comparativa de ambos métodos*

Ítem	Método	Costo unitario (US\$/m)	Relación de costos	Relación con antecedente
Resultados en UM Cerro Lindo – OB1	VCR	417,26	Referencia (100 %)	VCR se mantiene como opción económicamente competitiva.
	Raise Boring	1 010,13	2,42 veces el costo de VCR	Coincide con Estacio (2015), quien justifica VCR como alternativa viable para mantener bajos costos unitarios.

Fuente: Elaboración Propia

El cuadro muestra que, si bien Raise Boring presenta ventajas técnicas, su costo unitario más que duplica al de VCR, por lo que la selección del método depende del equilibrio entre economía y eficiencia operativa.

5.2.3. *¿Cómo influyen los métodos en la seguridad y calidad geométrica de las chimeneas?*

El análisis en Cerro Lindo evidenció que el Raise Boring ofrece mejores condiciones de seguridad y calidad geométrica, con secciones más uniformes y menor exposición del personal al frente de trabajo. En contraste, el VCR, por depender de perforación y voladura, genera sobreexcavaciones del orden del 8 % y exige mayores medidas de sostenimiento. Este resultado guarda relación con lo planteado por Rivera (2015) en la mina Reina Leticia, donde la introducción del Raise Boring permitió reducir riesgos operativos y mejorar la estabilidad de las chimeneas en comparación con métodos convencionales. La discusión demuestra que, más allá de los costos, la seguridad del personal y la calidad estructural son determinantes para definir la conveniencia de Raise Boring en operaciones de gran escala como Cerro Lindo.

Tabla 28*Tabla Comparativa de ambos métodos*

Criterio	VCR	Raise Boring (RB)	Relación con antecedentes
Seguridad operativa	Menor: mayor exposición del personal al frente de perforación y voladura.	Mayor: mínima presencia de personal en la zona de rotura.	Rivera (2015) reporta reducción de riesgos operativos con RB frente a métodos convencionales.
Calidad geométrica	Secciones menos uniformes; sobreexcavación $\approx 8\%$.	Secciones más uniformes, alineamiento y diámetro más controlados.	RB mejora la estabilidad y la calidad de las chimeneas.
Requerimientos de sostenimiento	Mayores, por sobreexcavaciones y zonas de debilidad.	Menores, por mejor control geométrico y estabilidad.	Coincidente con mejoras estructurales observadas por Rivera (2015).

Fuente: Elaboración Propia

En este cuadro se resume que el Raise Boring ofrece mejores condiciones de seguridad y calidad geométrica que el VCR, lo cual respalda su conveniencia en operaciones de gran escala como Cerro Lindo, especialmente cuando la prioridad es la reducción de riesgos y la estabilidad estructural de las chimeneas.

CONCLUSIONES

- Se Se concluyó que, en términos de tiempo de ejecución, el método Raise Boring alcanza un mejor rendimiento que el método VCR en la construcción de chimeneas SLOT en la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo. Para un tramo típico de 100 m de chimenea, el tiempo promedio de construcción con VCR fue de 16 días, mientras que con Raise Boring se redujo a 11 días, lo que representa una disminución del tiempo de ejecución del orden del 31 %. Esta mejora se traduce en una mayor velocidad de habilitación de tajos y en una mejor continuidad del ciclo de minado.
- Se concluyó que, desde el enfoque económico directo, el método VCR presenta menores costos unitarios que el Raise Boring. Los registros analizados muestran que el método VCR alcanza un costo promedio de alrededor de 1 250 USD por metro de chimenea, mientras que el método Raise Boring registra aproximadamente 1 480 USD por metro, generando una diferencia cercana al 18 % a favor del VCR en costo directo por metro ejecutado. No obstante, esta ventaja económica debe interpretarse considerando los mayores tiempos de ejecución y las condiciones de estabilidad y seguridad asociadas a cada método.
- Se concluyó que el Raise Boring ofrece mejores condiciones de seguridad operativa y calidad geométrica de la chimenea que el método VCR. En la zona OB1, las chimeneas ejecutadas con Raise Boring presentaron una sobrerotura promedio cercana al 9 %, mientras que las construidas con VCR registraron valores cercanos al 22 %, lo que implica una reducción aproximada del 59 % en el volumen de sobreexcavación. Asimismo, los registros de seguridad evidencian que los incidentes operativos pasaron de 4 eventos con VCR a 1 evento con Raise Boring, y las horas-hombre expuestas se redujeron de aproximadamente 320 horas a 120 horas, es decir, una disminución cercana al 62,5 % en la exposición del personal a zonas de alto riesgo.

- Se concluyó de manera general que, para las condiciones geológicas y operativas de la zona OB1 de la Unidad Minera Cerro Lindo, el método Raise Boring es la alternativa más conveniente cuando se priorizan la seguridad, la estabilidad geomecánica y la reducción de tiempos, mientras que el VCR resulta más favorable cuando el criterio principal es el costo directo por metro ejecutado. Raise Boring permite reducir alrededor de un 31 % el tiempo de construcción, disminuir la sobrerotura de 22 % a 9 %, bajar los incidentes de 4 a 1 y las horas-hombre expuestas de 320 a 120, mientras que el VCR mantiene costos directos aproximadamente 18 % menores, por lo que la selección final del método debe basarse en un balance cuantitativo entre costo, tiempo y seguridad según las prioridades estratégicas de la operación

RECOMENDACIONES

- Se recomienda al Área de Operaciones y Planeamiento priorizar el uso del método Raise Boring en la construcción de chimeneas estratégicas, dado que demostró una reducción significativa en los tiempos de ejecución respecto al VCR, con el propósito de asegurar la continuidad del ciclo de minado y el cumplimiento de los objetivos de producción en la Unidad Minera Cerro Lindo.
- Se recomienda al Área de Costos y Presupuestos, en coordinación con Planeamiento, evaluar el método Raise Boring considerando el costo total (directos e indirectos) e incluir beneficios como menor sostenimiento, reducción de sobreexcavaciones y optimización operativa, con el fin de sustentar técnica y económicamente su aplicación en proyectos de mayor escala en la unidad minera.
- Se recomienda al Área de Operaciones Subterráneas promover la implementación de tecnologías mecanizadas como el Raise Boring en contextos con elevada complejidad y riesgo asociado a explosivos y trabajos en altura, con el objetivo de reducir tiempos de ejecución y variabilidad operativa, fortaleciendo la eficiencia global del proceso.
- Se recomienda al comité técnico conformado por las áreas de Operaciones, Geomecánica, Topografía y Costos establecer criterios de selección integrales para la construcción de chimeneas que contemplen tiempo, calidad geométrica, continuidad operativa y sostenibilidad, a fin de garantizar decisiones técnicas alineadas con la productividad y competitividad de la Unidad Minera Cerro Lindo.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguero Marcelo, F. J., & Ramirez Gonzales, G. (2020). *"APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA LEAN SIX SIGMA PARA REDUCIR EL TIEMPO IMPRODUCTIVO EN LAS ETAPAS DE ACARREO Y TRANSPORTE EN MINA CANTA"*. Tesis de Pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Programa Académico de Ingeniería de Gestión Minera, Lima.
- ALIMAK. (2005). *Equipos y métodos para minería y obras subterráneas*.
- Amable Salazar, J. B. (2017). *"INFLUENCIA DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN LA DISPONIBILIDAD DEL CARGADOR FRONTAL CATERPILLAR 966 - C DE LA MUNICIPALIDAD DE HUANCAYO"*. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Mecánica, Huancayo.
- Anchiraico Giraldo, A. L., & Rojas Oré, K. R. (2020). *"OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE ACARREO Y TRANSPORTE EN LABORES DE PREPARACIÓN DE LAS ZONAS DE PROFUNDIZACIÓN MEDIANTE LA METODOLOGÍA SIX SIGMA OPERADA POR LA E.C.M. ZICSA EN LA UNIDAD MINERA INMACULADA. TESIS DE PREGRADO, UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS, PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA DE GESTIÓN MINERA, LIMA.*
- Andrade, B., & Gavilanes, H. (2004). *Introducción a la ingeniería de túneles: caracterización, clasificación y análisis geomecánico de macizos rocosos*. Quito - Ecuador.
- Arenas Ramos, A. B. (2021). *Propuesta de plan de mejora del proceso de transporte de concentrado de cobre para incrementar la eficiencia de las unidades de transporte medido a través del cuadro de mando integral en una empresa minera en arequipa*. Tesis de

- pregrado, Universidad Católica de Santa María, Facultad de Ingeniería Industrial, Arequipa.
- Barreto Taipe, L. (2017). *"OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE CAMIONES 785C CAT Y CARGADOR FRONTAL 992K CAT MEDIANTE EL MATCH FACTOR EN LA RUTA MINERAL - STOCK PILE ANTAPACCAY - CHANCADORA TINTAYA SAN MARTÍN CONTRATISTAS GENERALES S.A."*. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de Geología, Geofísica y Minas, Arequipa.
- Bernaola, J., Castilla, J., & Herrera, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Madrid.
https://oa.upm.es/21848/8/20131007_PERFORACION_Y_VOLADURA.pdf
- Besio Fernandez, J. F. (2014). *"Caracterización del transporte de pulpa de cobre en tuberías, mediante simulación"*. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Mecánica, Santiago de Chile.
- Bieniawski, Z. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications* (Vol.). John Wiley & Sons.
- Bustamante Morales, M. A. (2022). *"INCREMENTO DE LA PRODUCCIÓN A PARTIR DE LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE PLATAFORMAS Y SU NÚMERO RESPECTIVO DE BAHÍAS DE CAMBIO EN CALIENTE EN LA MINA CERRO VERDE - AREQUIPA -2019"*. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Facultad de Ingeniería Geológica , Minas y Metalúrgica, Cusco.
- Deere, D., & Deere, D. (1988). *The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice*.
[https://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge341/The%20Rock%20Quality%20Designation%20\(RQD\)%20in%20Practice.pdf](https://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge341/The%20Rock%20Quality%20Designation%20(RQD)%20in%20Practice.pdf)
- Estacio, G. (2015). *Aplicación del método de explotación minera V.C.R. para optimizar la producción en mina Melisa de la Compañía Minera Catalina Huanca S.A.C.* [Universidad

Nacional del Centro del Peru, Tesis de Grado].
<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/3849>

EXSA S.A. (2021). Manual Practico de Voladura. <https://minedeskcorp.com/libro-manual-practico-de-voladura-exsa/>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta ed.). Ciudad de Mexico, México: Mc Graw Hull Education.

Herrera, J. (2019). *Introducción a la Minería Subterránea Vol. II: Construcción de accesos* (Vol. II). Madrid. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/24513>

López, C., López, E., & García, P. (2003). *Manual de perforación y voladura de rocas*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=202303>

Mamani Rodriguez, Z. E. (2015). "*Aplicación de la minería de datos distribuida usando algoritmo de clustering K-means para mejorar la calidad de servicios de las organizaciones modernas*". Tesis de Posgrado, UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARCOS, Facultad de Ciencias Matemáticas, Lima.

Mansilla, L., & Iraizoz, J. (2012). APROXIMACIÓN AL LABOREO DE MINAS Y A LA METALURGIA EN LAS MINAS DE ALMADEN (CIUDAD REAL). *Re Metalica*, 79-93.

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F4151362.pdf&psig=AOvVaw2SN4WTgsqXq9vsjKS89Lfs&ust=1738622401586000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBcQjhXqFwoTCJC146eHposDFQAAAAAdAAAAABAJ>

- Medina, C. (2020). *Estudio comparativo técnico-económico de diseño de chimenea, caso chimenea Mina Pajonales (Manual-Alimak-Raise Boring)*. [Universidad Andrés Bello, Tesis de Grado], Concepción.
- ÑAUPAS PAITAN, H., VALDIVIA DUEÑAS, M. R., PALACIOS VILELA, J. P., & ROMERO DELGADO, H. E. (2018). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA . CUALITATIVA Y REDACCIÓN DE LA TESIS*. EDICIONES DE LA U.
- Rivera, M. (2015). *Construcción de chimeneas Raise Borer para optimizar el proceso de minado y los costos de explotación en el tajo 355 de Reina Leticia en Compañía Minera Raura S.A.* [Universidad Nacional del Centro del Peru, Tesis de Grado], Huancayo.
<http://hdl.handle.net/20.500.12894/1349>
- Tapia Carrasco, C. A. (2018). *"Evaluación experimental del transporte e infiltración de concentrado de cobre sobre un lecho mixto de gravas y arenas"*. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago de Chile.
- Yopez, V. (2015). *Sistema de Excavación: Raise - Boring*.
<https://victoryepes.blogs.upv.es/files/2015/06/RAISE-BORING-pedraplus.pdf>
- Zou, D. (2017). *Introduction to Underground Excavation by Drilling and Blasting*.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-1989-0_16#citeas

ANEXOS

ANEXO 1

1. ÁMBITO DE ESTUDIO Y GEOLOGÍA

1.1. UBICACIÓN

La mina Cerro Lindo es una mina polimetálica subterránea ubicada en el distrito de Chavín, provincia de Chincha, departamento de Ica, Perú, aproximadamente a 268 km al sureste de Lima y a 60 km de la costa, ubicada en la quebrada de Topara. Tiene las siguientes coordenadas UTM (WGS84-18S): 392,200 E, 8'554,600 N y una altitud que varía entre los 1,800 y 2,130 msnm. La mina Cerro Lindo es el área de desarrollo de las operaciones de la compañía minera NEXA RESOURCES S.A.A.

Figura 37

Ubicación de la Unidad Minera Cerro Lindo



Fuente: El Comercio

1.2.ACCESIBILIDAD

Para llegar a la Unidad Minera, se debe viajar por tierra desde la ciudad de Lima. Se toma la carretera Panamericana Sur asfaltada hasta el kilómetro 180, donde se encuentra la quebrada Jahuay. Desde ahí, se continúa por una carretera afirmada de 60 kilómetros hasta la Unidad Minera Cerro Lindo.

1.3.CLIMA Y VEGETACIÓN

El clima de esta ecorregión es variado, con temperaturas cálidas en las zonas bajas y temperaturas más frescas en las zonas altas. Según la clasificación climática de Köppen, la región del proyecto se caracteriza por un clima seco, donde la evaporación del agua supera la cantidad de lluvia que cae.

En cuanto a la vegetación la forma de vida más representativa es la herbácea, la cual se encuentra extendida principalmente en la parte baja. Existen en el área especies silvestres de importancia comercial como el pacay, el algarrobo y la tara. Se encontraron un total de 50 especies, pertenecientes a 46 géneros y 24 familias botánicas. Un aspecto importante es la presencia de especies reconocidas como parientes silvestres de plantas utilizadas para alimentación como es el caso de los géneros Oxalis (oca silvestre) y Lycopersicon (tomate silvestre). Las especies arbóreas no constituyen agregaciones y su número no es representativo.

1.4.TOPOGRAFÍA Y DRENAJE

Queda delimitado por una franja territorial que atraviesa la costa peruana desde las cercanías de la playa Jahuay en Chincha, hacia el noreste en el distrito de Chavín también ubicada en la provincia de Chincha, circunscrita a la quebrada Topará. El área presenta una elevación entre 1,800 msnm a 2,000 msnm y se caracteriza por una topografía accidentada y altas pendientes. Se

aprecia barrancos (quebradas) desarrollados como parte del drenaje dendrítico que alimenta al río Topará.

1.5.GEOMORFOLOGÍA

PAMPA COSTANERA

Esta unidad se desarrolla a lo largo de la faja paralela a la costa, limitada al oeste por la ribera litoral y al este por una cadena de cerros bajos que tienen una altitud que alcanza los 200 m aproximadamente. Presenta una superficie relativamente plana y amplia que se extiende a lo largo del frente oceánico, con algunas colinas y cerros que se presentan de forma local. La anchura de esta unidad varía según la cadena de cerros bajos o las estribaciones andinas se aproximen o alejen de la ribera litoral, siendo esta de aproximadamente 10 km.

SUPERFICIE PUNA

Esta superficie de erosión se formó durante el Mio-Plioceno, después del emplazamiento de los plutones y de la serie volcánico-sedimentaria plegada del Terciario Inferior a Superior. La denudación ocurrida en esta época produjo una superficie de erosión madura semejante a una penillanura de altitud moderada con respecto al nivel del mar, con relieve suave y ligeramente ondulado, que luego fue rejuvenecida por el levantamiento de los Andes; y disectado intensamente en el curso del Cuaternario por la erosión glacial, fluvio-glacial y fluvial. Esta superficie morfológica sucede en la parte alta de los contrafuertes occidentales, es decir, entre los 4000 a 4800 m.s.n.m.

ETAPA CAÑÓN

Ha sido modelado como parte del proceso erosivo del sistema de los ríos de la vertiente del Pacífico, esta unidad guarda relación con el levantamiento de la Superficie Puna desde casi el nivel

del mar hasta aproximadamente 5000 m.s.n.m. A esta unidad se asocian depósitos aluviales y fluvio-glaciares dispuestos en terrazas.

ETAPA VALLE

Se reconoce a esta etapa como un ciclo de erosión juvenil a maduro que ha disectado la Superficie Puna dando resultado penillanuras y cumbres concordantes que descienden aproximadamente 3000 m en distancias que varían 40 y 60 km, que son disectadas por ríos o tributarios de ellos y quebradas, con una tendencia de este a oeste, los cuales han labrado valles profundos y encañonados, como se observa con el río Topará ubicada en la zona de estudio.

1.6.GEOLOGÍA GENERAL

Cerro Lindo está clasificado como un depósito de sulfuro masivo volcanogénico (“VMS”). La mineralización consta de al menos 10 zonas mineralizadas discretas. El depósito de Cerro Lindo comprende cuerpos masivos en forma de lente, compuestos de pirita (50,0% a 90,0%), esfalrita amarilla, esfalrita marrón, calcopirita y galena menor. Hay una cantidad significativa de barita presente principalmente en las partes superiores del depósito. Una zona de enriquecimiento secundario, compuesta de calcocita y covelita, se ha formado cerca de la superficie donde se han oxidado sulfuros masivos. La barita en polvo rica en plata permanece en la superficie como una reliquia de la oxidación y lixiviación de sulfuros.

1.7.GEOLOGIA REGIONAL

La serie volcano-sedimentaria del Grupo Casma alberga varios depósitos de sulfuros masivos en el Perú. Los depósitos peruanos han sido catalogados del tipo Kuroko, basados en su ambiente de formación, edad y presencia de baritina. Los depósitos más conocidos y mejor estudiados son Tambo Grande en el departamento de Piura, Perubar, Palma y Colquisiri en el

departamento de Lima y Cerro Lindo en el departamento de Ica; adoptando el modelo metalogénico de SMV (Sulfuros masivos volcanogénicos).

FORMACIÓN HUARANGUILLO (Kis-hu)

Se denomina así a una gruesa secuencia volcánica a sedimentaria, cuyo afloramiento se distribuye con un rumbo NO-SE. Su localidad tipo se describe en el paraje Huaranguillo ubicado al noreste de la hacienda Lunche en el río San Juan donde tiene una potencia estimada de 3,000 metros. El yacimiento de Cerro Lindo está ubicado dentro de esta secuencia, cuya edad es del Cretáceo Medio, esta Formación es parte del Grupo Casma. Es una secuencia volcánica dominada principalmente por andesitas porfiríticas. Los cuales se depositaron en un ambiente de Back arc como resultado de la extensión de la Cuenca durante la subducción. Se divide en tres miembros:

Miembro Inferior (Kis-hu1)

Secuencia de volcanitas grises macizas con cierto grado de estratificación, con un rumbo NO-SE, no se observa el contacto inferior al estar intruida por el Batolito de la Costa; por el noroeste la super unidad Tiabaya, al noreste la super unidad Catahuasi y por el sur la super unidad Incahuasi, su afloramiento se encuentra restringido a la quebrada Topara, cerros Campanario, Cullco, Palta Rumi, Mesa Rumi, infrayace concordante con la unidad media. Litológicamente está compuesta por andesitas grises con tonos verdosos metamorfizados (esquistos) producto de la tectónica Mochica, existe alteración hidrotermal en el contacto con la super unidad Catahuasi, asimismo se puede observar similar alteración en la Qda. Huatiana en el contacto de las volcanitas con la super unidad Incahuasi. La esquistocidad tiene un rumbo NO-SE buzando al NE y SO respectivamente. Esta zona alberga la mayor zona de interés económico como depósitos de tipo volcanogénico de sulfuros masivos con mineralización de Zn, Cu, Ag (en la Qda. Topará se ubica el proyecto minero Cerro Lindo).

Miembro Medio (Kis-hu2)

Secuencia de areniscas y pelitas delgadas intercaladas con algunos niveles de volcanitas y cenizas delgadas, sobreyacen e infrayacen concordantes al miembro inferior y superior respectivamente. Litológicamente, está compuesta por areniscas grises y pardas de grano medio a fino en sectores calcáreos con intercalación de pelitas muy delgadas laminares, se encuentra cortado por diques subvolcánicos de composición dacítica, porfiríticos, de color verdoso. Se presentan formando anticlinales y sinclinales amplios manteniendo un rumbo NO-SE, con buzamientos variados. Sus afloramientos en la zona noroeste están restringidos a los cerros Ancoquishca, Pata, Hoya, Atoc Sayco, Silla Pite, hacia el Sur en los cerros Conta Grande y Santa Catalina en este sector sobreyacen concordantes a la Formación Atocongo, así mismo aflora en los cerros Huaranguillo, hacia la base y en las quebradas La Mejorada hasta el valle del río San Juan, extendiéndose hacia el suroriente por los cerros Cahuay Pata, Marcas Pata, Buena Vista, Jatun Convento, infrayace a la unidad superior en concordancia.

Miembro Superior (Kis-hu3)

Es una secuencia calcárea silicificada en capas medianas a delgadas, intercalada con pelitas en la base, hacia el techo varían de grosor y estructura, ocasionalmente se puede observar niveles de volcanitas concordante a los estratos y cortado por diques sub-volcánicos porfiríticos forman anticlinales y sinclinales amplios y pliegues en chevron a la base y techo respectivamente. Son calizas bandeadas de grano fino muy silicificadas, con una estratificación laminar, grosores que varían desde 0,02 m hasta 2,5 m, tal como se observa en los afloramientos próximos al distrito de San Juan de Castrovirreyña, también se observan algunos niveles de areniscas cuarzosas gris claras subordinadas hacia el techo presentando estructuras heterolíticas formando en algunos casos pliegues chevron. Sus afloramientos más resaltantes están en los cerros Silla Pite, Chapaca,

Rajuilla Pata, y cerros de Lomas Yanalucac, asimismo en los sectores de cerros Infiernillo, Minasniyoc, Señal Huamanai, Quitasol, Huaytapata, Lomas Arcopunco, extendiéndose hacia el cuadrángulo de Guadalupe, sobreyace concordante a la Formación Pariatambo en el sector suroriental e infrayace en discordancia angular a los volcánicos de la Formación Tantará y Sacsaquero, a la vez son intruídos por el Batolito de la Costa.

FORMACIÓN TANTARÁ (PTT-AN)

Descrita como una secuencia volcánica en su conjunto, en su localidad tipo, en los alrededores del distrito de Tantará, ubicado en el curso superior del río del mismo nombre o San Juan. En este trabajo subdividimos a la Formación Tantará en cuatro unidades; Ignimbritas, Brechas, Sedimentitas y Volcánitas.

Unidad de Ignimbritas (Ptt-an-ig)

Son facies de ignimbritas rosadas riolíticas muy coherentes (soldadas), con presencia de cristales de plagioclasa, cuarzo, presenta textura de fiame moderado. Su afloramiento se encuentra ubicado en el valle del río Lambras, al sur de Liscay, infrayace disconforme a secuencias de volcánitas de la misma Formación.

Unidad de Brechas (Ptt-an)

Esta unidad se le aprecia en farallones del río Tantará, sectores de Charapunca, Lucuma, Anta y Amailla, con un grosor aproximado de 150 m, litológicamente está conformada por brechas volcánicas de diferente tamaño, con clastos de hasta 80 cm de diámetro, composición andesítica predominantemente, tanto en clastos como matriz, color gris con tonos verdosos y azulados. Se puede observar algunas secuencias de lavas grises muy delgadas. Infrayace conforme a la secuencia sedimentaria-volcánica superior.

UNIDAD SEDIMENTARIA (PTT-AN)

Es una secuencia volcano-sedimentaria conformada por areniscas grises y pelitas pardo rojizas en estratos gruesos con algunas intercalaciones de volcanitas. Litológicamente, está compuesta por areniscas feldespáticas grises de grano medio a grueso, con intercalación de pelitas rojas, presencia de volcanitas restringidas, en su conjunto presentan un afloramiento lenticular con un rumbo de NO-SE y buzamiento de 15° al NE, su afloramiento está restringido al valle del río Tantará, estando mejor expuesta en el sector intermedio del cerro Marcalla (con algunos sub-volcánicos que la intruyen formando placolitos), extendiéndose hacia el norte hasta el pueblo de Tantará y por el sur hasta la quebrada Apate.

Unidad de Volcanitas (Ptt-an)

Es una secuencia de volcanitas gris oscuras, de composición andesítica, en sectores riolítica, con tonos verdosos y rojas porfiríticos, con cristales de plagioclasa y cuarzo libre respectivamente, se observan algunas secuencias de tobas lapilli riolíticas, bien soldadas de color gris claro con tonos verdosos (próximo a Tantará), estratificados moderadamente, esta secuencia es la más extensa de esta formación, tenemos afloramientos en forma paralela al río San Juan, hacia el occidente se extiende por los cerros Cacrillo, Jatun Cancha, Huamatambo, Chilcapuquio, Chilca Rumi, por el oriente se extiende por los alrededores de la Villa de Arma, Huachos, Santa Rosa de Quilca, Pichuta, y el cerro Tocino, sobreyace disconforme a los intrusivos del Batolito de la Costa y la Formación Hualhuani en los alrededores de la Villa de Arma y Cotas e infrayacen en disconformidad a la Formación Sacsacero. Al noroeste del cuadrángulo afloran en los cerros Campanayoc, Jatun Punta, Huayllamarca, Pitecancha, Palmadera, al límite con la hoja de Tupe en los cerros Chihui Punta, Cochahuana, Ripicancha, extendiéndose hacia el norte, en este sector sobreyacen disconforme a las super unidades del Batolito de la Costa y es intruida por la super

unidad Catahuasi. En el sector de la quebrada del río Lambras, en el paraje San José y Liscay están intruidos por unidades no asignadas, perteneciente al Paleógeno. Se correlaciona con las secuencias similares de los cuadrángulos de Castrovirreyna donde se tiene dataciones entre $40,9 \pm 0,9$, $40,9 \pm 1,20$, $41,2 \pm 1,20$ Ma.

CUATERNARIO

Está formado por depósitos que se hallan distribuidos en la zona de estudio en forma muy irregular, los cuales se han diferenciado de acuerdo a su composición y tiempo depositacional.

Depósitos Aluviales 1 (Qh-al1)

Estos depósitos están constituidos con mayor amplitud donde se ubican la mayor parte de las poblaciones andinas, están ubicados en las laderas, ya que en su mayoría son productos de piedemonte por meteorización y acumulaciones de gravas, arenas y arcillas. En su mayoría son cultivados aprovechando su suave pendiente con andenerías a lo largo de los valles.

Depósitos Aluviales 2 (Qh-al2)

Depósitos ubicados en las márgenes de los ríos y quebradas (zonas intermedias y altas), conformadas principalmente por conglomerados de arenas, arcillas y limos. En su mayoría son cultivados, forman pequeñas terrazas, manteniéndose en muchos casos como activas de acuerdo a la variación del cauce y caudal de los ríos.

ROCAS INTRUSIVAS

Super Unidad Tiabaya (Ks-ti)

Esta super unidad es el componente más joven y grande del segmento Arequipa y en la zona de estudio se caracteriza por su naturaleza leucócrata, composicionalmente varía desde tonalitas hasta monzogranitos, se ha diferenciado en cinco pulsos magmáticos con tendencia a formar una estructura centrada a lo largo del valle del río San Juan, donde tiene una edad promedio

de 80 ± 8 Ma. Intruye casi a todas las unidades cretáceas tanto volcánicas, sedimentarias como intrusivas.

Monzodioritas (Ks-ti/mzd)

Considerada como uno de los primeros pulsos magmáticos, aflora en los sectores marginales del plutón, hacia el oriente en los cerros Chitia Pucro, alrededores de Huachos, Miraflores extendiéndose hasta Capillas del Norte, pasando por las quebradas Chilcani, Liochuncho, Cajamarca, y Yahuar Puquio, en el sector occidental del valle aflora en los alrededores de Sihuay y al suroeste de San Juan de Cacrillo. Composicionalmente, varían de monzodioritas a dioritas mesócratas a leucócratas, con tonos verdosos granulares, de grano medio a fino con abundancia de plagioclasa como mineral esencial y feldespato potásico, piroxenos, cuarzo, arcillas, biotita como accesorios, con cloritas y óxidos de hierro como secundarios.

Granodioritas Tonalitas (Ks-ti/gd-to)

Este pulso magmático aflora en el sector oriental, norte y sur occidental del valle, en las quebradas de los ríos Tantará, Arma, Huachos y por la zona intermedia de los cerros Tocino, Chipanto, Oqueranta, Pichana, Inya Pampa, Maray Pata, Jatun Ichu, extendiéndose hacia el lado sur occidental con variaciones en granulometría y composición, aumentando presencia de biotita y hornblenda, aflorando en los cerros Abra Pata, Chipanacancha, en el río San Juan en los sectores Huachinga, Hda. Luchumarca, extendiéndose hacia el noroeste hasta la hoja de Chíncha por los cerros Luchumarca, Qdas. Ayoque, Almacén, y Cerro Chiripampa. Litológicamente es una roca gris clara (leucócrata), con tonos rosados, compuesta por plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo (variando este último en sectores), se observa la presencia de xenolitos gris oscuros, posiblemente sean de los pulsos anteriores.

Monzogranitos (Ks-ti/mzg)

Pulso magmático central ubicado al centro del valle del río San Juan, aflora desde el paraje Planta de Bombeo sector Soncco y en los cerros Chipanto, Muge, Puca Pata, Chilca Puquio, Mirador, Las Petacas; son mesócratas a leucócratas, con tonos rosados, granulares, de grano medio a grueso, hipidiomórfica, con minerales esenciales de plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo, con minerales accesorios de biotita, anfíboles, arcillas, serpentinas, cloritas. Sus afloramientos son macizos y conspicuos y escarpados hacia el valle del río San Juan, otra característica es la presencia de xenolitos de los pulsos anteriores.

Cuarzo monzogranitos (Ks-ti/cmz)

Pulso magmático que aflora en el sector de Mosquitoyoc, en la Qda. Las Petacas, sus afloramientos se hallan intruyendo a la Formación Huaranguillo. Son rocas mesócratas a melanócratas granular de grano medio, con plagioclasa, feldespato potásico cuarzo y máficos.

Sienogranito (Ks-ti/sgr)

Aflora en la zona occidental del plutón, en los cerros Jatun Junco, en los alrededores de Cusicancha y Sihuay Chico, son rocas mesócratas con tonos rosados y verdes, granular de grano medio, holocristalinos con feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo.

Super Unidad Incahuasi (Ks-in)

Es un plutón de composición tonalítica y cuarzomonzodiorita predominante incluyendo algunos cuerpos de dioritas, monzonitas y granodioritas. Es un plutón grande, de suave morfología (aparición de lomadas suaves), se extiende de sur a norte y de este a oeste, desde la Qda. Huatiana hasta el cerro Campanario y desde la Qda. Maraypata con dirección este, se extiende hasta el cuadrángulo de Chíncha por el oeste. Intruye a secuencias cretáceas, formaciones Atocongo y Huaranguillo. Se considera que tiene una edad radiométrica de emplazamiento en 78 ± 1 Ma.

Tonalitas (Ks-in/to)

Son rocas mesócratas granulares de grano medio a grueso con variaciones de tonalita y cuarzomonzodiorita a dioritas cuyos contactos son poco cartografiados. La composición modal presenta plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo y biotita. Afloran principalmente en los cerros Huachanan, Jatun Casa, Guanaquillo, Huacarume, Llamacancha, León Rumi, Pabellón, Campana, Rondalla y Pahuaypite.

Granodioritas (Ks-in/gr-bt)

Estos afloramientos se encuentran restringidos a la Qda. Huatiana y al este del cerro Rondalla, su característica principal es la presencia de biotita en forma hexagonal y forma de libros, en la Qda. Huatiana son cortados por diques porfiríticos y afaníticos con una dirección de sur a norte.

Monzonitas (Ks-in/mz)

Se encuentran aflorando a los extremos del plutón, específicamente en la Qda. Almacén (Proyecto Almacén), sus afloramientos están alterados hidrotermalmente aunque algunas rocas algo frescas dan una composición modal próxima a las monzonitas, estos cuerpos son los principales almacenes de yacimientos metálicos.

1.8.GEOLOGIA LOCAL

El depósito de Cerro Lindo se aloja en rocas volcánicas félsicas de composición riolítica a riodacítica, tanto en la caja piso como en la caja techo. La roca es mayormente de color blanca grisácea con algo de tonos rosado, azulino y verdusco. Contiene texturas primarias que incluyen amígdalas, bandeamiento de flujo y estratificación en tufos. En la mina se encuentra dentro de un edificio volcánico félsico en un ambiente bimodal (riolita-andesita)

FORMACIÓN HUARANGUILLO (Kis-hu)

La secuencia volcánica de la Formación Huaranguillo en la zona tiene una edad de Cretáceo Medio a superior, las rocas que afloran en la zona son:

Riolita (Kis-hu/ri)

La roca se encuentra en Cerro Lindo es la riolita potásica donde uno de los principales constituyentes es la biotita de color marrón oscuro y, la hornblenda marrón y verde con el feldespatos tipo ortoclasa. Simultáneamente se presenta la riolita sódica compuesta por anfíboles en ambas biotitas ocurre el cuarzo, también se presenta ópalo y calcedonia estos minerales están rellenando las amígdalas. Presenta textura afanítica, la roca generalmente es de color gris claro a blanquecino generalmente se le conoce como volcánico félsico. La riolita en general se observa en el campo, pero es difícil diferenciar los tipos de Riolitas. El emplazamiento tiene una afiliación genética con la actividad hidrotermal y la depositación de sulfuros.

Andesita (Kis-hu/an)

Andesita Moteada: Ocurre en contacto con la riolita y la andesita, es una roca muy peculiar por la presencia de pequeños nódulos silicificados y algunas veces contiene chert y calcedonia; estos nódulos son de diferentes tamaños donde predominan los pequeños que varían de 0.5cm a 1 cm, estos nódulos son los que componen la roca volcánica andesítica moteada Volcánico Andesítico: Color gris oscuro a gris verdoso con fenocristales de plagioclasa y biotita con una matriz afanítica con débil cloritización y propilitización

ROCAS INTRUSIVAS

Super Unidad Incahuasi (Ks-in)

Dioritas – Horblenditas (Ks-in/di)

Constituyen los intrusivos más antiguos del Batolito de la Costa y muestran su mejor afloramiento al este y noreste de la mina Cerro Lindo, esta roca es intruida por intrusivos posteriores y de naturaleza más ácida. Macroscópicamente se caracterizan por su textura fanerítica gruesa sus componentes principales son plagioclasas y horblenda-biotita con calcita, epidota y cuarzo en venillas o concentraciones irregulares.

Granodioritas – Tonalitas (Ks-in/to-gd)

Intrusivo Granodiorítico: Es el que ocupa la mayor parte del área estudiada quedando en su mayor parte las unidades sedimentarias como roof pendants sobre este intrusivo. Se caracteriza por ocupar áreas topográficamente bajas. Afloran ampliamente en el área rodeando las unidades volcánica- sedimentarias. Macroscópicamente son de color gris-claro, se caracterizan por su textura equigranular, holocristalina de grano grueso, entre sus minerales esenciales se reconocen a simple vista plagioclasa, cuarzo, algo de ortosa y abundante horblenda y escasa biotita.

Granodiorita – Tonalita (Ks-in/to-gd) Patahuasi

Es una roca de color gris claro está intruyendo a la secuencia volcánica de Cerro Lindo se puede considerar que esta roca ha cortado a otros cuerpos mineralizados que existían en el sector este del yacimiento, posiblemente el afloramiento (anomalía) de Patahuasi o fue parte de la cuenca de la Fm. Huaranguillo dentro la cual los cuerpos mineralizados actuales se extendían hacia el este hasta la anomalía de Patahuasi, el intrusivo aflora a 500 metros al noreste de la mina Cerro Lindo (Boca Mina 1875) por la quebrada Topará aguas arriba, donde está el contacto, aflora en la dirección este-oeste a sur-este en una longitud aproximada de 3.5 Km por 500 a 600m de ancho,

esta intruyendo (cortando) a la secuencias volcánicas e intrusivos graníticos (granodioritas-dioritas). Macroscópicamente son de color gris-claro con textura equigranular, holocristalina de grano medio, entre sus minerales esenciales se reconocen plagioclasas, cuarzo y biotitas, con poca ortosa y anfíboles (horblenda), débilmente cloritizados. La edad de este intrusivo es más reciente que el Batolito de la Costa.

Super unidad Catahuasi (PN-ca/to)

Super unidad mayormente de composición tonalítica, color gris con tonalidad azul, maciza y poco resistente a la erosión. Se encuentra ubicada entre las quebradas Puquio, y Chicuy al NO de la hoja, tiene una longitud de más de 15 km con dirección NO-SE. Intruye a las volcanitas de la Formación Huaranguillo 1 y en igual relación a las secuencias volcánicas de la Formación Tantara. Esta unidad está tectonizada en sistemas de cizalla en su extremo occidental próximo al contacto con las secuencias cretáceas y es posible su origen con sistemas de transcurrencias con dirección NO-SE y que hayan favorecido el emplazamiento elongado de este cuerpo. La edad promedio es de 24 ± 1 Ma.

1.9.GEOLOGIA ESTRUCTURAL

La zona presenta plegamientos y bloques estructurales limitados por fallas. Durante la evolución del depósito de mineralización de sulfuro masivo, la Formación Huaranguillo sufrió fuerte plegamiento y fallamiento, lo que generó grandes bloques, originando un graben de intracuenca donde se depositaron los sulfuros masivos. Se han reconocido tres grandes estructuras de este graben, las que han desarrollado tres sistemas de fallas regionales con características muy determinantes. El primer sistema de fallas regionales tiene orientación NW, es la más antigua, anterior a la depositación de los sulfuros masivos, que originó la forma del paleorelieve y creó un ambiente propicio en el cual se depositaron los sulfuros masivos. El segundo sistema de fallas

regionales tiene orientación NE, estas permitieron el paso de la mineralización, la depositación, y condicionaron la cantidad de sulfuro depositado. En estas estructuras actualmente se han emplazado diques andesíticos porfiríticos recientes. El tercer sistema de fallas regionales tiene orientación NS, estas fallas son inversas, que se originaron posteriores a la depositación.

1.10 . GEOLOGIA ECONÓMICA

ALTERACIÓN

En la zona de Cerro Lindo lo más resaltante es la alteración supergena que aflora y está directamente relacionada con los cuerpos en profundidad, ella se manifiestan en varios niveles o intensidades de la oxidación. Para fines prácticos se ha diferenciado tres tipos de alteraciones Tipo (A) en la base cercano al cuerpo; Tipo (B) intermedia y Tipo (C) en la parte superior, sobreyaciendo a ellas se tiene los halos de silicificación y blanqueamiento, principalmente de la riolita.

Alteración Tipo A

Seria la alteración más cercana a los cuerpos mineralizados y/o es parte del cuerpo oxidado. Su característica principal es la fuerte oxidación, con presencia de baritina⁺⁺ y grandes cavidades en las zonas oxidadas, producto de la lixiviación de los óxidos (Ox Fe⁺⁺⁺), presentan coloración rojiza y amarillenta debido a la oxidación de la galena. Las cavidades se han generado debido a que la oxidación de sulfuros masivos originó espacios vacíos. En algunos casos con colores marrón, rojizo y amarillento. Se observan pocos óxidos de cobre y sulfuros secundarios como covelita, calcosina y bornita en menos cantidad. En las partes superiores y periféricas en contacto con los cuerpos la presencia del OxFe⁺⁺⁺ es más intensa. Existen evidencias prácticas para inferir de la posible cercanía a los cuerpos principalmente por la ocurrencia de la oxidación tipo A, y el incremento de piritita con baritina y puntos de sulfuros de Zn, Pb.

Alteración Tipo B

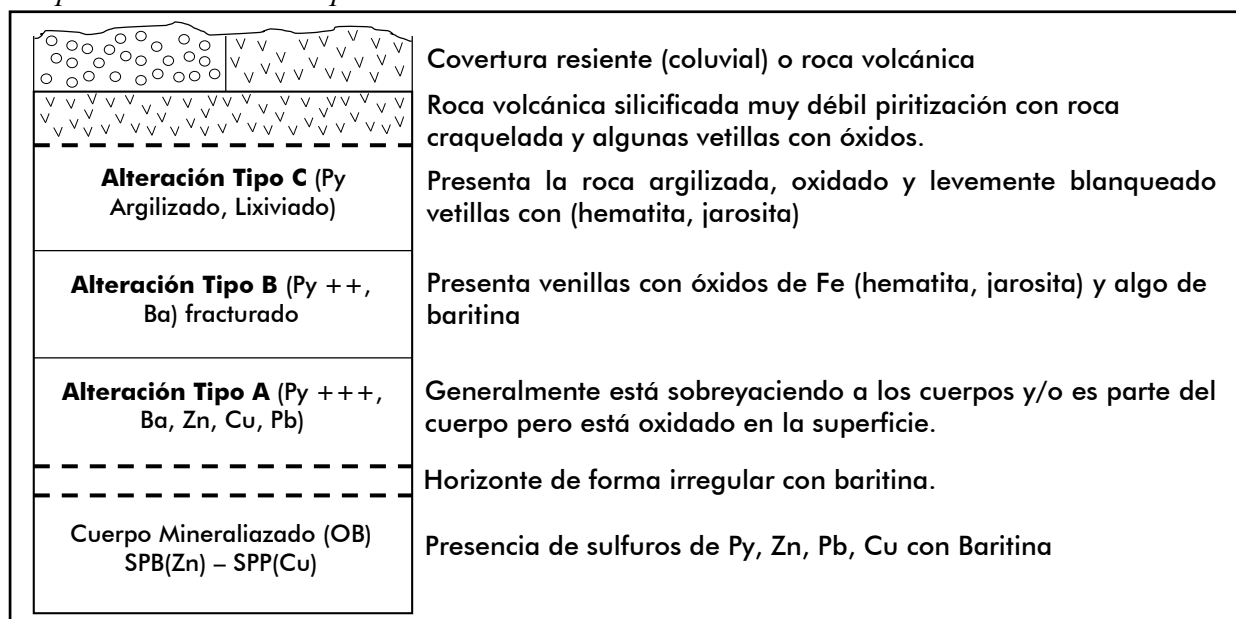
Presenta óxidos sueltos, terrosos con varios colores. En algunas zonas esta caolinizado y contiene algo de baritina y Ox Fe⁺⁺ moderado, hematita, roca craquelado, blanqueada. En algunos casos se incrementa el fracturamiento y se rellena con hematita, gohetita; un caso típico de un buen ejemplo es el afloramiento en una de las quebradas en la zona de Campanario. En el campo también se observa que el afloramiento tipo B está sobreyaciendo al tipo A la cual generalmente contiene baritina.

Alteración Tipo C

Generalmente presenta coloración rojiza de la roca, fracturamiento relleno con óxidos de varios colores principalmente rojizo y marrón en las fracturas están rellenas con gohetita, hematita y presenta silicificación, además de blanqueamiento de la roca, la presencia de Ox Fe⁺ es débil. Se ha preparado una sección vertical representativa que muestra los tipos de alteraciones respecto a la ocurrencia de un cuerpo mineralizado en profundidad.

Figura 38

Representación de los tipos de alteración



Fuente: Tomado de (Velasquez, 2019)

MINERALIZACIÓN

En la Unidad minera Cerro Lindo, se identificó determinada mineralogía en cada unidad litológica, que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 29

Mineralización en la zona de la Unidad Minera Cerro Lindo

LITOLOGÍA	ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN
Sulfuro Masivo	SM	Material o litología que contiene más de 50% de sulfuros incluyendo la baritina
Sulfuro Primario Piritoso	SPP	Sulfuro Primario de Pirita (Sulfuros masivos > 50% presenta mayor contenido de Cu que el SPP y está compuesto por pirita, calcopirita, y baritina < 10%) con textura homogénea de grano grueso, medio y fino, en ocasiones presentan parches de Cp y puntos de pirrotina.
Sulfuro Primario Barítico	SPB	Sulfuro Primario de Baritina rico en Zn. (Sulfuros masivos > 50 Esfalerita, Pirita, Galena, Calcopirita, incluido el sulfato de Bario = Baritina) presenta un bandeamiento muy notorio con una textura granular de grano grueso-medio.
Sulfuros Semimasivos	SSM	Sulfuro Semimasivo 20% < SSM < 50% de sulfuros incluido la Baritina, en ocasiones presnetan leyes favorables para su extracción, donde incluso se desarrollan zonas de stringers acompañados por intensa silificación. El contenido en sulfuros decrece gradualmente con la distancia a los cuerpos masivos.
Enclave	E	Fragmentos de roca que fueron absorbido y ahora están englobados por sulfuros masivos, tienen diferentes dimensiones desde pocos centímetros hasta varios metros.
Caja Techo o Hanging Wall	HW	Unidades volcánicas que se encuentran al techo de los sulfuros masivos, estratigráficamente hablando y tienen características que las diferencian de la caja piso.
Caja Piso o Foot Wall	FW	Unidades volcánicas que se ubican al piso de los sulfuros masivos, estratigráficamente hablando.

Fuente: (Velasquez, 2019)

A continuación se hace una descripción de las características físicas de los diferentes minerales reconocidos en Cerro Lindo, tomando en cuenta observaciones del logueo de testigos y mapeo de galerías.

Pirita

La pirita viene a constituir gran parte de todo el yacimiento, determinando su contenido junto con el de la barita. La pirita acompañando a SPB, presenta textura granular piritocrítica y su tamaño oscila de 0.3mm a 3.0mm, presentando mayormente bandeamiento con la barita y esfalerita. La pirita en SPP se encuentra con mayor definición de los granos, conformando piritocristales que en algunos casos no tienen matriz y llegan a ser muy disgregables. Los tamaños son muy variables, desde 0.1 hasta 8.0 milímetros, predominando los cristales de 1 a 2 milímetros. Se ha reconocido en las galerías que la pirita estéril (con escaso o sin minerales en la matriz) sería el último evento de la mineralización, habiéndola reconocido cortando y seccionando las unidades de SPB utilizando seguramente algunas fallas que no son fáciles de detectar en los sulfuros masivos. En SSM se encuentra cristalizado de grano fino a medio (excepcionalmente grano grueso). Cuando se trata de SSM producto del predominio de la sedimentación está acompañado principalmente por sílica y en mucho menor contenido barita (caja techo). Cuando se trata de SSM producto de la invasión vertical o lateral en volcánicos debajo del fondo marino la pirita se encuentra diseminada y en venillas generalmente delgadas (caja piso).

Baritina

La baritina es el segundo mineral más abundante en el depósito, su contenido determina la clasificación de litologías. Normalmente se encuentra granular y con fuerte presencia en SPB (más del 10%), pero puede encontrarse también en SPP como rezagos de antiguos SPB embebidos por el SPP y también en la caja techo, a veces acompañado de mineralización de zinc. Los granos de baritina en SPB tienen diámetros menos de 1 milímetro, hasta 2 milímetros, conformando las bandas de mineralización que caracteriza esta unidad.

Esfalerita

El mayor contenido de esfalerita se encuentra en los Sulfuros Primarios Baríticos (SPB) donde tiene generalmente una textura granular masiva y bandeada, presentando un color castaño (blenda rubia). Los granos de esfalerita oscilan entre 0.2 a 1.5 milímetros de diámetro, aunque por lo general predominan los diámetros de 0.8 milímetros. También es posible encontrar esfalerita asociada a la calcopirita remplazando a las unidades SPP y SPB donde tiene formas irregulares que pueden tener de 0.2 a 15mm, presentando un color marrón oscuro (variedad marmatítica). En general se tiene mayor contenido de esta variedad de esfalerita en la unidad SPB comparándola con la unidad SPP, por lo que se supone que viene a ser la removilización de la esfalerita original y redepositación a mayor temperatura con el consiguiente incremento en el contenido de fierro. En las unidades SSM es posible encontrarlas de forma granular diseminada e incluso granular bandeada con baritina y sílica, alcanzando incluso concentraciones económicas; en algunos casos se puede deducir que estas unidades serian la gradación lateral de las unidades SPB. Es posible también encontrar diseminación de esfalerita de grano fino 0.1 a 0.3 milímetros dentro de la caja techo (HW), en poco contenido (hasta 3% de toda la roca), presentando una coloración amarillenta e incluso verdosa.

Calcopirita

Se la encuentra generalmente llenando intersticios intergranulares y en formas irregulares en ambas unidades SPP y SPB. Sus dimensiones son variadas y dependen del grado de reemplazamiento de la unidad original, llegando incluso a cortar corridas de hasta 6 metros de corrida con contenidos de 15 a 60% de calcopirita (CL-00-69), en donde la pirita ha sido fuertemente remplazada y la baritina muy poco o nada comparándola con el contenido promedio de barita en SPB. Hay una tendencia de incrementar la concentración de calcopirita alrededor de

los enclaves y unidades volcánicas (que viéndolos desde una perspectiva más global podrían ser enclaves muy grandes) con incremento en la concentración de calcopirita al acercarse hacia la roca. Estas concentraciones tienen una potencia variada pudiendo ser desde 15 centímetros hasta 80 centímetros y rara vez son mayores a 1 metro. En SSM, de la caja piso, la calcopirita se presenta diseminada en el volcánico y como relleno de las venillas, estando acompañada casi siempre por pirita, a veces por pirrotita y muy rara vez por esfalerita.

Galena

Dentro de los Sulfuros Masivos se encuentra galena en SPB en granos de 0.3 a 1.5 milímetros y su abundancia, al parecer, está relacionado a la abundancia de la esfalerita clara o blenda rubia (se ha encontrado mayor concentración de galena relacionado a altas concentraciones de esfalerita). También se ha reconocido galena en la caja techo (HW), donde se presenta diseminada y en muy escasa cantidad (menos de 1%) que no llega a ser económica.

Pirrotita

La pirrotita se presenta masiva, con formas irregulares alargadas, remplazando a los minerales anteriores, con fuerte asociación con la calcopirita y la esfalerita marmatítica. Es posible también encontrarla diseminada o como relleno de intersticios en unidades SPP.

Calcita

Se ha reconocido calcita principalmente dentro de las unidades SPB y en menor cantidad en la unidad SPP. En SPB se encuentra calcita como concentraciones irregulares alargadas de diferentes dimensiones, con corridas en el taladro de 1 a 15 centímetros, pero que en forma vertical (tomando en cuenta la posición original de los SM) no abarca mucha potencia y sus ocurrencias no tienen mucha continuidad. En SPP la calcita es más rara y se la reconoce relleno de intersticios y fracturas.

ANEXO 2: PARÁMETROS DE PRESIÓN

Machine:	400SR							
Tubería:	10							
400SR	PRESIÓN DE RC							
Dureza (MPa)	100	120	140	160	180	200	220	250
(RPM)	20	24	28	32	36	40	44	50
ROP (m/h)	7.2	6.8	6.3	5.6	5.0	4.4	3.8	3.0
Pull down (Lb)	34,800	41,760	48,720	55,680	62,640	69,600	76,560	87,000
0	515	426	338	249	161	72	-17	-150
2	532	443	355	266	177	89	0	-133
4	549	460	371	283	194	106	17	-116
6	565	477	388	300	211	122	34	-99
8	582	494	405	316	228	139	51	-82
10	599	510	422	333	245	156	67	-66
12	616	527	439	350	261	173	84	-49
14	633	544	455	367	278	190	101	-32
16	649	561	472	384	295	206	118	-15
18	666	578	489	400	312	223	135	2
20	683	594	506	417	329	240	151	18
22	700	611	523	434	345	257	168	35
24	717	628	539	451	362	274	185	52
26	733	645	556	468	379	290	202	69
28	750	662	573	484	396	307	218	86
30	767	678	590	501	413	324	235	102
35	809	720	632	543	455	366	277	144
40	851	762	674	585	496	408	319	186
45	893	804	716	627	538	450	361	228
50	935	846	758	669	580	492	403	270
55	977	888	800	711	622	534	445	312
60	1,019	930	842	753	664	576	487	354
65	1,061	972	884	795	706	618	529	396
70	1,103	1,014	926	837	748	660	571	438
75	1,145	1,056	968	879	790	702	613	480
80	1,187	1,098	1,010	921	832	744	655	522
85	1,229	1,140	1,052	963	874	786	697	564
90	1,271	1,182	1,094	1,005	916	828	739	606
95	1,313	1,224	1,136	1,047	958	870	781	648
100	1,355	1,266	1,178	1,089	1,000	912	823	690
110	1,439	1,350	1,261	1,173	1,084	996	907	774
120	1,523	1,434	1,345	1,257	1,168	1,080	991	858
130	1,607	1,518	1,429	1,341	1,252	1,164	1,075	942
140	1,691	1,602	1,513	1,425	1,336	1,248	1,159	1,026
150	1,775	1,686	1,597	1,509	1,420	1,331	1,243	1,110
160	1,859	1,770	1,681	1,593	1,504	1,415	1,327	1,194
170	1,942	1,854	1,765	1,677	1,588	1,499	1,411	1,278
180	2,026	1,938	1,849	1,761	1,672	1,583	1,495	1,362
190	2,110	2,022	1,933	1,845	1,756	1,667	1,579	1,446
200	2,194	2,106	2,017	1,929	1,840	1,751	1,663	1,530
220	2,362	2,274	2,185	2,096	2,008	1,919	1,831	1,698
240	2,530	2,442	2,353	2,264	2,176	2,087	1,999	1,866
260	2,698	2,610	2,521	2,432	2,344	2,255	2,166	2,034
280	2,866	2,777	2,689	2,600	2,512	2,423	2,334	2,201

Fuente: TUMI RAISE BORING

ANEXO 3: REGISTRO FOTOGRÁFICO

Proceso de perforación piloto



Instalación de parrilla metálica



Proceso de perforación rimado



Bocamina Nv. 1800



SBM400 SR-083



SBM400 SR-084



Malla de perforación 3x3 metros para VCR



Verificación de próximas labores



Actualización de PETS



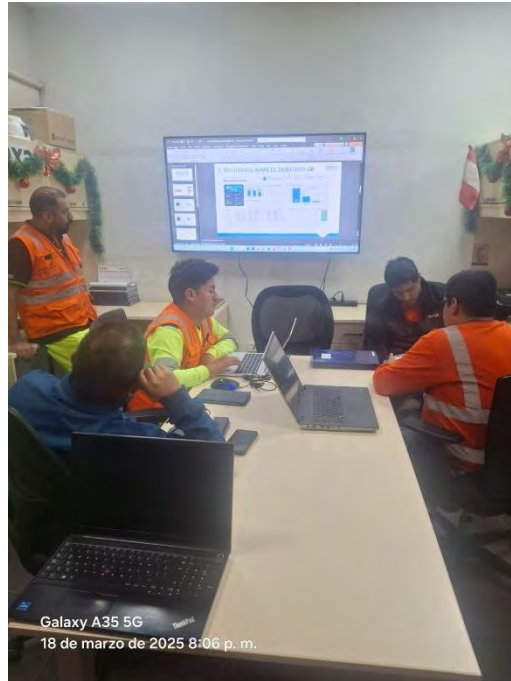
Coordinación con P&V y Planeamiento Mina



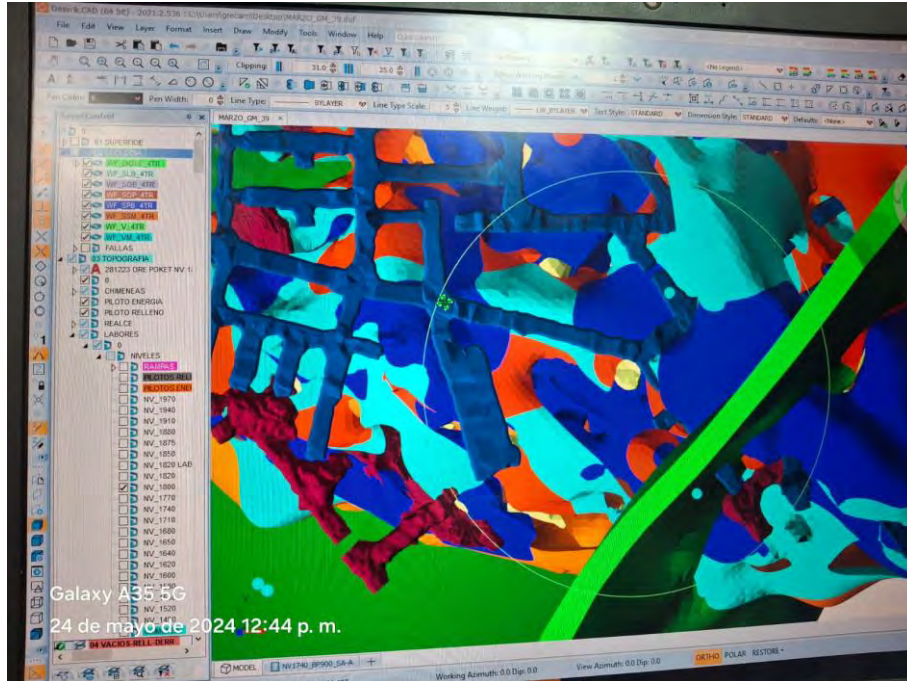
Perforación con Taladros largos



Coordinación con Nexa y Socios estratégicos



Verificación de proyectos con Planeamiento Mina



ROBBINS 73R



Brocas tricónicas



Cortadores de rimadora

