UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS:

ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DE PERFORACIÓN CON BROCAS DE 76MM EN LAS OPERACIONES DEL TJ-777 DEL NIVEL -175, EN LA CIA MINERA CONDESTABLE, DEPARTAMENTO DE LIMA 2024

PRESENTADO POR:

Br. PAUL EDWAR CLAROS GALLEGOS

PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

ASESOR:

MGT. ODILON CONTRERAS ARANA

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** ODILON CONTRERAS ARANA quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada: ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DE PERFORACIÓN CON BROCAS DE 76MM EN LAS OPERACIONES DEL TJ-777 DEL NIVEL -175, EN LA CIA. MINERA CONDESTABLE, DEPARTAMENTO DE LIMA 2024.

Presentado por: PAUL EDWAR CLAROS GALLEGOS DNI N° 70457319;
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, 03 de Setiembre de 2026.

Firma

Post firma Odilon Contreras Arana

Nro. de DNI 23823356

ORCID del Asesor 0000-0002-9164-1705

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259:620059715

PAUL EDWAR CLAROS GALLEGOS

TESIS_PAUL_CLAROS_REP.pdf

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::27259:620059715

Fecha de entrega
3 sep 2026, 12:46 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
3 sep 2026, 1:08 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
TESIS_PAUL_CLAROS_REP.pdf

Tamaño del archivo
5.8 MB

159 páginas

25.713 palabras

140.796 caracteres

ASESOR

10% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

Fuentes principales

10% Fuentes de Internet
1% Publicaciones
5% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.° de alertas de integridad para revisión

Caracteres reemplazados
29 caracteres sospechosos en N.° de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Texto oculto
10 caracteres sospechosos en N.° 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.

Asesor.

DEDICATORIA

A Dios, por brindarme vida, salud y fortaleza para superar las dificultades y permitirme culminar esta etapa de mi formación profesional.

A mis padres, Claudio Claros Loayza e Isabel Gallegos Pilares, por ser mi principal fortaleza, por su apoyo constante y por motivarme a seguir adelante en cada etapa de mi vida.

A mis hermanos, Dick Claros Gallegos, Franz Claros Gallegos y Karla Claros Gallegos, por su apoyo, confianza y palabras de aliento durante este proceso.

A mi familia y amigos, por acompañarme y brindarme su apoyo incondicional en los buenos y difíciles momentos.

Finalmente, a la memoria de mis familiares que hoy me acompañan desde el cielo, cuyos consejos y enseñanzas permanecen presentes en mi vida y me dieron la fortaleza necesaria para continuar y alcanzar esta meta.

Paul Edwar Claros Gallegos

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi gratitud a mi alma mater, la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, y a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, por los conocimientos y experiencias brindados durante mi formación profesional.

A mi asesor, Mgt. Odilón Contreras Arana, por su orientación, apoyo y aporte durante el desarrollo de la presente investigación.

A la empresa RESEMIN, por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente y permitirme adquirir experiencia en el ámbito minero.

A los profesionales de la Unidad Minera Condestable que contribuyeron al desarrollo de esta investigación, en especial al Ing. Omar Mayorga, Gerente de Epiroc Perú S.A.; al Ing. José Sánchez, Jefe de Contratos de Epiroc Perú; y al Ing. Hugo Cajahuanaca, Jefe de Operaciones de RESEMIN, por compartir sus conocimientos y experiencia profesional.

Asimismo, agradezco a mis amigos Ing. Luycin y Jonatan, así como a los trabajadores de la Unidad Minera Condestable, por su colaboración y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

Paul Edwar Claros Gallegos

INTRODUCCIÓN

El incremento de las exigencias productivas en minería subterránea demanda la evaluación continua de alternativas que permitan optimizar los procesos unitarios involucrados en la extracción de mineral. En este contexto, el presente estudio examina el comportamiento técnico y económico asociado al empleo de brocas de 76 mm en las labores de perforación de taladros largos del Tajo 777, ubicado en el Nivel –175 de la Unidad Minera Condestable. La evaluación considera la comparación entre el esquema operativo convencional y la alternativa propuesta, analizando variables relacionadas con la productividad, el rendimiento de perforación, la fragmentación obtenida y los costos generados durante la operación. A partir de ello, se busca determinar la conveniencia de incorporar este diámetro de perforación como una opción para incrementar la eficiencia operativa y fortalecer el abastecimiento de mineral hacia la planta de procesamiento.

La investigación toma como base información proveniente de reportes operativos, registros históricos de producción y observaciones efectuadas en campo. Mediante el procesamiento y evaluación de dichos datos, se analiza la influencia de las brocas de 76 mm sobre los indicadores técnicos y económicos de la operación, considerando las características geomecánicas del macizo rocoso y las condiciones reales de trabajo presentes en el Tajo 777 del Nivel –175.

CAPÍTULO I. Se exponen los aspectos fundamentales que dan origen a la investigación, incluyendo la problemática identificada, los objetivos planteados, las hipótesis formuladas, la justificación del estudio, las delimitaciones consideradas y las variables que intervienen en la evaluación desarrollada.

CAPÍTULO II. Se recopilan y analizan investigaciones previas vinculadas con la temática abordada, complementándose con los fundamentos conceptuales relacionados con la geomecánica

aplicada, los métodos de explotación subterránea, los sistemas de perforación y los criterios técnicos empleados en el diseño de labores con taladros largos.

CAPÍTULO III. Se describe el procedimiento metodológico seguido durante la investigación, precisando el enfoque adoptado, el nivel y diseño de estudio, la población y muestra evaluadas, los instrumentos utilizados para la recopilación de información y las técnicas aplicadas para su procesamiento y análisis.

CAPÍTULO IV. Se desarrolla la evaluación de las condiciones operativas analizadas y la comparación de resultados obtenidos con la aplicación de brocas de 76 mm en el Tajo 777 del Nivel –175. Asimismo, se examinan los parámetros de perforación, la planificación de la producción, los indicadores de desempeño, la productividad alcanzada y los costos asociados a cada alternativa evaluada.

CAPÍTULO V. Se presentan la interpretación y discusión de los resultados obtenidos, estableciendo los criterios técnicos y económicos que sustentan la selección del diámetro de perforación más favorable para las condiciones de estudio, así como los beneficios generados en términos de productividad, eficiencia operativa y reducción de costos.

RESUMEN

La presente investigación evalúa el desempeño técnico–económico de la implementación de brocas de 76 mm en la perforación de taladros largos del Tajo 777 del Nivel −175 de la Unidad Minera Condestable, en comparación con brocas de 64 mm. El objetivo fue demostrar que la aplicación de brocas de 76 mm y el cambio del equipo Simba Epiroc S7D por el Raptor 55-2R permitieron mejorar el aporte productivo del Tajo 777 mediante el incremento de la productividad y la reducción del tiempo y los costos de perforación. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de nivel descriptivo y explicativo, mediante el análisis comparativo de registros operacionales y económicos del periodo enero–diciembre de 2024. Los resultados muestran que el burden se incrementó de 1.80 m a 2.00 m y el espaciamiento de 2.00 m a 2.20 m, reduciendo el número de taladros por disparo y el tiempo de perforación de 64.0 h a 49.2 h. Asimismo, la productividad aumentó de 6.69 TM/m a 8.18 TM/m y los metros perforados por guardia de 172.95 a 189.20 m/guardia. El costo unitario disminuyó de 1.026 USD/TM a 0.824 USD/TM, equivalente a una reducción de 19.7 %. La broca de 76 mm presentó un P80 de 28.55 cm frente a 20.30 cm con la broca de 64 mm, manteniéndose dentro de rangos operacionales aceptables. Se concluye que la implementación de brocas de 76 mm incrementó la productividad y redujo los tiempos y costos de perforación.

Palabras clave: Perforación, Taladros largos, Broca de 76 mm, Costos operativos, Productividad minera.

ABSTRACT

This research evaluates the technical and economic performance of implementing 76 mm drill bits in long-hole drilling at Stope 777, Level −175, of the Condestable Mining Unit, compared with 64 mm drill bits. The objective was to demonstrate that the use of 76 mm drill bits and the replacement of the Simba Epiroc S7D equipment with the Raptor 55-2R improved the productive contribution of Stope 777 by increasing productivity and reducing drilling time and costs. The research was conducted under a quantitative approach, with a descriptive and explanatory level, through the comparative analysis of operational and economic records corresponding to the January–December 2024 period. The results show that the burden increased from 1.80 m to 2.00 m and the spacing from 2.00 m to 2.20 m, reducing the number of holes per blast and the drilling time from 64.0 h to 49.2 h. Likewise, productivity increased from 6.69 MT/m to 8.18 MT/m, while drilled meters per shift increased from 172.95 to 189.20 m/shift. The unit drilling cost decreased from 1.026 USD/MT to 0.824 USD/MT, representing a reduction of 19.7%. The 76 mm drill bit achieved a P80 of 28.55 cm compared with 20.30 cm for the 64 mm drill bit, remaining within acceptable operational ranges. It is concluded that the implementation of 76 mm drill bits increased productivity and reduced drilling time and costs.

Keywords: Drilling, Long hole stoping, 76-mm bit, Operational costs, Mining productivity.

ÍNDICE

DEDICATORIA ii

AGRADECIMIENTOS iii

INTRODUCCIÓN iv

RESUMEN vi

ABSTRACT vii

ÍNDICE DE ABREVIATURAS xviii

CAPÍTULO I: PROBLEMA OBJETO DE INVESTIGACIÓN 1

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 2

1.2.1. Problema general de la investigación 2

1.2.2. Problemas específicos de la investigación 2

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 3

1.3.1. Objetivo general 3

1.3.2. Objetivos específicos 3

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 3

1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 4

1.5.1. Delimitación temporal 4

1.5.2. Delimitación geográfica 4

1.6. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN 4

1.6.1. Hipótesis general 4

1.6.2. Hipótesis específicas 4

1.7. VARIABLES E INDICADORES 5

1.7.1. Identificación de variables 5
1.7.2. Operacionalización de variables 6
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO 7
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN 7
2.1.1. Antecedentes internacionales 7
1.1.1. Antecedentes nacionales 9
2.2. BASES TEÓRICAS 10
2.2.1. Características geomecánicas de la mina 10
2.2.2. Métodos de explotación 12
2.2.3. Equipos y Brocas de Perforación 19
2.2.4. Operación de perforación 31
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 46
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN 46
3.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN 46
3.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN 47
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA 47
3.4.1. Población 47
3.4.2. Muestra 47
3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS 47
3.5.1. Técnicas de recolección de datos 47
3.5.2. Instrumentos de recolección de datos 48
3.6. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS 48

CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DE BROCAS DE PERFORACIÓN DE 76 MM EN EL TAJO 777 DEL NIVEL-175 49
4.1. MAPEO GEOMECÁNICO DE LA ZONA DE ESTUDIO 49
4.1.1. Datos de la zona de estudio 49
4.1.2. Datos tomados con el martillo de Schmidt 49
4.2. PROGRAMACIÓN DE PRODUCCIÓN DEL TAJO 777 DEL NIVEL-175 50
4.3. APLICACIÓN DE TALADROS LARGOS 51
4.4. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES OPERATIVAS INICIALES 54
4.4.1. Condiciones operativas iniciales 54
4.4.2. Parámetros operativos de la línea base 55
4.4.3. Descripción de la voladura por secciones en el Tajo 777 55
4.4.4. Indicadores de rendimiento operacional de la línea base 56
4.4.5. Capacidad de producción de la línea base 57
4.4.6. Costos operacionales de la línea base 58
4.5. ANÁLISIS DE EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA BROCA DE 76MM 58
4.5.1. Asignación de equipos de perforación del tajo 777 del nivel-175 con broca de 76mm 58
4.5.2. Programación de operación del equipo de perforación con brocas de 76 mm en la perforación del tajo 777 del nivel-175 59
4.5.3. Cálculo de rendimiento de brocas 71
4.5.4. Costo operacional con brocas de 76mm 80
4.6. CUADRO COMPARATIVO DE LOS RENDIMIENTOS DE PERFORACIÓN ENTRE LA LÍNEA BASE Y LA BROCA DE 76 MM 83

4.6.1. Contribución de la mejora de perforación a la producción 84
4.7. IMPACTO TÉCNICO EN VOLADURA 85
4.7.1. Estimación del consumo potencial de explosivo según diámetro de perforación 86
4.7.2. Análisis del P80 88
CAPITULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 95
5.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS 95
5.1.1. Resultados técnicos comparando la línea base y la broca de 76 mm 95
5.1.2. Resultados económicos de la broca 76 mm 97
5.1.3. Interpretación de resultados para la elección del diámetro de broca 99
5.1.4. Beneficios del diámetro seleccionado (76 mm) 100
5.1.5. Alternativas de optimización del rendimiento de broca 101
5.1.6. Cuadro resumen comparativo de resultados 102
5.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 103
5.2.1. Estudio técnico económico de la broca de 76 mm 103
5.2.2. Sustitución del equipo Simba Epiroc S7D por la Raptor 55-2R 104
5.2.3. Aplicación de brocas de 76 mm en la perforación del tajo 777 104
5.2.4. Reducción de costos unitarios de perforación mediante brocas de 76 mm 105
CONCLUSIONES 106
RECOMENDACIONES 107
BIBLIOGRAFÍA 108
ANEXOS 111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cuadro de Operacionalización de Variables 6

Tabla 2 Criterios para la clasificación de la masa de Roca 11

Tabla 3 Clasificación de la masa de Roca 11

Tabla 4 Rendimientos garantizados por CMC 29

Tabla 5 Resumen de la calidad RMR de la masa rocosa Tajeo 777 Nivel -175 50

Tabla 6 Parámetros operativos de la línea base en la labor TJ 777 del nivel −175 55

Tabla 7 Indicadores de rendimiento operacional de la línea base en la labor TJ 777 del nivel −175 57

Tabla 8 Indicadores de producción de la línea base en la labor TJ 777 del nivel −17557

Tabla 9 Costo consolidado de perforación de la línea base en la labor TJ 777 del nivel −175 58

Tabla 10 Metros perforados de Análisis 59

Tabla 11 Parámetros Utilizados en el Diseño de Malla con Broca de 76 mm 64

Tabla 12 Parámetros operativos y de rendimiento con broca de 76 mm 67

Tabla 13 Registro de tiempos de perforación en taladros largos utilizando broca de 76 mm 68

Tabla 14 Registro de rendimiento diario de brocas utilizadas en el Juego 1 (76mm) .. 73

Tabla 15 Registro de rendimiento diario de brocas utilizadas en el Juego 2 (76mm) .. 75

Tabla 16 Registro de metros perforados y horas de operación por guardia 77

Tabla 17 Consumo mensual de shanks, barras y brocas durante el periodo octubre 2024 – enero 2025 80

Tabla 18 Costo de Accesorios de Perforación para Operación con Broca de 76 mm .. 81

Tabla 19 Costos del Equipo para la Perforación RAPTOR 55-2R 81

Tabla 20 Costo por Mano de Obra para Perforación con Broca de 76 mm 82

Tabla 21 Costo Total de Perforación con Broca de 76 mm 83

Tabla 22 Indicadores de perforación de la línea base y la broca de 76 mm 84

Tabla 23 Estimación del número de tajeos requeridos para el cumplimiento de la producción diaria..... 85

Tabla 24 Comparación de parámetros técnicos de voladura entre la línea base y la broca de 76 mm 85

Tabla 25 Estimación comparativa de la capacidad potencial de carga explosiva..... 88

Tabla 26 Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 1 (Broca de 76 mm) ... 89

Tabla 27 Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 2 (Broca de 76 mm) ... 90

Tabla 28 Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 3 (Broca de 76 mm) ... 91

Tabla 29 Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 4 (Broca de 76 mm) ... 92

Tabla 30 Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 5 (Broca de 76 mm) ... 93

Tabla 31 Resultados del análisis granulométrico combinado (P80 promedio = 28.55 cm) - broca de 76 mm..... 94

Tabla 32 Comparación técnica entre la línea base y la aplicación de brocas de 76 mm96

Tabla 33 Comparación económica entre la línea base y la aplicación de brocas de 76 mm 98

Tabla 34 Resumen comparativo de resultados entre brocas de 64 mm y 76 mm 102

Tabla 35 Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 1 (Broca de 64 mm) . 134

Tabla 36 Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 2 (Broca de 64 mm) . 135

Tabla 37 Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 3 (Broca de 64 mm) . 136

Tabla 38 Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 4 (Broca de 64 mm) . 137

Tabla 39 Resultados del análisis granulométrico combinado (P80 promedio = 20.3 cm) - Broca de 64 mm..... 138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Guía para el mapeo geo mecánico 12

Figura 2 Método de explotación subterránea Shrinkage Stoping..... 14

Figura 3 Método de explotación por Sublevel Stoping con taladros largos..... 15

Figura 4 TJ 777 del nivel –175 mediante el método Sublevel Stoping..... 16

Figura 5 Esquema Bench and Fill 17

Figura 6 RAPTOR 55-2R Equipo para perforación de taladros largos para secciones medianas 20

Figura 7 Sistema BAL (Boom Alignment Laser)..... 20

Figura 8 Dimensiones del Equipo Simba Raptor 55-2R RESEMIN..... 21

Figura 9 SIMBA S7D de EPIROC..... 22

Figura 10 Dimensiones SIMBA S7D – Epiroc 24

Figura 11 Broca de botón 25

Figura 12 Broca de cincel..... 25

Figura 13 Shank Adapter..... 26

Figura 14 Barras 27

Figura 15 Brocas..... 27

Figura 16 Tipos de insertos en las brocas..... 30

Figura 17 Equipo Simba S7D realizando perforación positiva en galería 32

Figura 18 Perforación en Negativo de la Forma Abanico..... 33

Figura 19 Labores de preparación Sublevel Stoping..... 34

Figura 20 Rebotes con el martillo Schmidt del Tajeo 50

Figura 21 Rebotes con el martillo Schmidt del Tajeo 50

Figura 22 Plano de diseño de malla de perforación y ubicación de ejes en la labor minera 52

Figura 23 Plano de diseño de taladros largos y geometría del TJ 777 (Nivel – 175)..... 53

Figura 24 Simba S7D equipo de perforación de taladros largos 54

Figura 25 Operación de equipo de perforación RAPTOR 55-2R en labores subterráneas del Nivel –175 60

Figura 26 Plano de diseño de taladros largos del Tajo 777 – Sección SE21 (Nivel –175 / –205), perforación con broca de 76 mm..... 66

Figura 27 Comparación del tiempo de movimiento, tiempo de perforación y tiempo acumulado 76mm 69

Figura 28 Barras de perforación con broca instalada en interior mina..... 70

Figura 29 Brocas de perforación desgastadas utilizadas 71

Figura 30 Rendimiento de las brocas de 76mm 72

Figura 31 Distribución del rendimiento de brocas en el Juego 1 (76mm) 74

Figura 32 Rendimiento individual de brocas utilizadas en el Juego 1 (76mm) 74

Figura 33 Distribución del rendimiento de brocas en el Juego 2 (76mm) 76

Figura 34 Rendimiento individual de brocas utilizadas en el Juego 2 (76mm) 76

Figura 35 Rendimiento promedio por juego y causa de cambio de brocas..... 78

Figura 36 Comparación del rendimiento de shanks según condición operativa: sin regulación de presiones vs. regulación optimizada..... 79

Figura 37 Análisis del P80 de voladura – Foto 1 (Broca de 76 mm) 89

Figura 38 Análisis del P80 de voladura – Foto 2 (Broca de 76 mm) 90

Figura 39 Análisis del P80 de voladura – Foto 3 (Broca de 76 mm) 91

Figura 40 Análisis del P80 de voladura – Foto 4 (Broca de 76 mm) 92

Figura 41 Análisis del P80 de voladura – Foto 5 (Broca de 76 mm) 93

Figura 42 Análisis del P80 de voladura – Foto 6 y 7 (Broca de 76 mm) 94

Figura 43 Ubicación geográfica de la Unidad Minera Condestable..... 111

Figura 44 Plano de Ubicación U.M. Condestable 114

Figura 45 Vista del relieve y morfología del área de la Unidad Minera Condestable . 116

Figura 46 Imagen del Relieve Característico de la Zona 117

Figura 47 Imagen de clima característico de la zona 118

Figura 48 Cuencas de Minera Condestable..... 119

Figura 49 Imagen de Flora de las Lomas de Mala 120

Figura 50 Imagen de Fauna de las Lomas de Mala 121

Figura 51 Formaciones Sedimentarias Regionales..... 123

Figura 52 Columna Litoestratigráfica 125

Figura 53 Esquema de alteración hidrotermal y zonificación litológica del yacimiento127

Figura 54 Zonalidad de alteración en yacimientos de pórfidos cupríferos 128

Figura 55 Mapeo de zonas de concentración de Metal cuprífero..... 131

Figura 56 Análisis del P80 de voladura – Foto 1 (Broca de 64 mm) 134

Figura 57 Análisis del P80 de voladura – Foto 2 (Broca de 64 mm) 135

Figura 58 Análisis del P80 de voladura – Foto 3 (Broca de 64 mm) 136

Figura 59 Análisis del P80 de voladura – Foto 4 (Broca de 64 mm) 137

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

KPI: Key Performance Indicators (Indicadores utilizados para medir y evaluar el desempeño de un proceso o actividad).

InSAR : Interferometric Synthetic Aperture Radar (Tecnología de radar empleada para analizar deformaciones superficiales mediante imágenes satelitales obtenidas en diferentes periodos).

DORIS: Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (Sistema satelital diseñado para el posicionamiento geodésico y la determinación precisa de órbitas).

MDT : Modelo Digital del Terreno (Representación digital de la superficie terrestre obtenida a partir de datos topográficos).

LIDAR: Light Detection and Ranging (Tecnología de teledetección basada en pulsos láser para la medición de distancias y generación de modelos tridimensionales).

ALTM: Airborne Laser Terrain Mapper (Sistema aerotransportado de escaneo láser empleado para el levantamiento topográfico de alta precisión).

RMR: Rock Mass Rating (Sistema de clasificación geomecánica utilizado para evaluar la calidad y competencia del macizo rocoso).

ERI: Electrical Resistivity Imaging (Método geofísico que permite determinar la distribución de resistividades eléctricas en el subsuelo).

HP: Horse Power, capacidad efectiva de potencia de los motores de los equipos Diésel.

DM: Disponibilidad mecánica de los equipos Diésel, expresada en porcentaje (%).

EPIROC: Acrónimo de Epi-Roc («En la roca»), empresa multinacional sueca fabricante de equipos de perforación y minería.

RESEMIN: Acrónimo de Representaciones y Servicios Mineros S.A, empresa multinacional peruana fabricante de maquinaria para minería subterránea.

CAPÍTULO I:

PROBLEMA OBJETO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En octubre de 2023, la Compañía Minera Condestable incrementó la capacidad de procesamiento de su planta concentradora de 7,000 a 8,400 TM/día, equivalente a un aumento del 20 %. Este incremento generó una mayor exigencia sobre las operaciones de minado, las cuales deben asegurar un abastecimiento continuo de mineral para sostener la nueva capacidad de procesamiento.

El cumplimiento de esta producción no depende únicamente del Tajo 777, sino del aporte conjunto de los diferentes tajeos y frentes de producción de la unidad minera. Sin embargo, en el Tajo 777 del Nivel −175 se identificó un rendimiento promedio de 6.69 TM por metro perforado, además de una elevada cantidad de metros perforados y taladros requeridos para completar cada ciclo de perforación. Estas condiciones incrementan el tiempo necesario para disponer del tajeo para las etapas posteriores de voladura y extracción.

A ello se suman los tiempos asociados al traslado, posicionamiento del equipo, perforación y movimientos operacionales, los cuales reducen el tiempo efectivo disponible durante la guardia. Como consecuencia, se generan mayores tiempos de ejecución y una menor capacidad para atender oportunamente las labores programadas, afectando el aporte productivo del tajeo dentro de la programación general de la mina.

Frente a esta situación, resulta necesario analizar las condiciones técnicas y económicas de la perforación en el Tajo 777, considerando alternativas que permitan reducir los tiempos operacionales, mejorar el rendimiento de perforación y fortalecer su contribución al cumplimiento de los objetivos de producción de la unidad minera.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general de la investigación

- ¿De qué manera el estudio técnico-económico de la broca de 76 mm en las operaciones de perforación del Tajo 777 del Nivel −175 permitirá mejorar su aporte productivo mediante el incremento de las toneladas por metro perforado y la reducción del tiempo de perforación y los costos unitarios?

1.2.2. Problemas específicos de la investigación

- ¿El cambio del equipo Simba Epiroc S7D por el equipo Raptor 55-2R, para la aplicación de brocas de 76 mm en la perforación del tajo 777 del Nv -175, permitirá reducir el tiempo de perforación?
- ¿La aplicación de brocas de 76 mm en la perforación del tajo 777 del Nv -175, permitirá reducir el tiempo total de perforación requerido para cumplir con la producción programada?

- ¿Con la implementación de las brocas de 76 mm en la perforación del tajo 777 del Nv -175, se reducirán los costos unitarios de perforación?

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo general

- Demostrar que la aplicación de brocas de 76 mm en la perforación del Tajo 777 del Nivel −175 permite mejorar su aporte productivo mediante el incremento de las toneladas por metro perforado y la reducción del tiempo de perforación y los costos unitarios.

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar técnicamente la sustitucción del equipo Simba Epiroc S7D por el equipo Raptor 55-2R para la aplicación de brocas de 76 mm en la perforación del tajo 777 del Nv -175, a fin de reducir el tiempo de perforación.
- Analizar la influencia de la aplicación de brocas de 76 mm en la reducción del tiempo total de perforación requerido para cumplir con la producción programada en el tajo 777 del Nv -175.
- Determinar la reducción de los costos unitarios de perforación mediante la implementación de brocas de 76 mm en la perforación del tajo 777 del Nv -175.

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se justifica debido a la necesidad de optimizar las operaciones de perforación frente al incremento de la demanda de producción en la Unidad Minera Condestable.

- La evaluación del uso de brocas de 76 mm permitirá determinar mejoras en el rendimiento operativo, el volumen de mineral roto y la eficiencia del proceso de perforación.

- La implementación de mayores diámetros de perforación contribuirá a reducir los tiempos operativos y los costos unitarios asociados a las operaciones de minado.
- Los resultados de la investigación servirán como referencia técnica y económica para la optimización de operaciones de perforación en minería subterránea.

1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Delimitación temporal

El trabajo de investigación utilizará los datos desde el mes de enero del 2024 hasta el mes de diciembre del 2024.

1.5.2. Delimitación geográfica

La investigación se realizará en las operaciones de Compañía Minera Condestable que se encuentra en el distrito de Mala, en la provincia de Cañete – Departamento de Lima.

1.6. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1. Hipótesis general

- La aplicación de brocas de 76 mm en las operaciones de perforación del Tajo 777 del Nivel −175 mejora su aporte productivo mediante el incremento de las toneladas por metro perforado y la reducción del tiempo de perforación y los costos unitarios.

1.6.2. Hipótesis específicas

- La aplicación del equipo Raptor 55-2R en reemplazo del equipo Simba Epiroc S7D para el uso de brocas de 76 mm en la perforación del tajo 777 del Nv -175, permitirá mantener un adecuado rendimiento de perforación y reducir el tiempo de perforación.
- La aplicación de brocas de 76 mm en la perforación del tajo 777 del Nv -175, permitirá reducir el tiempo total de perforación requerido para cumplir con la producción programada.

- La implementación de brocas de 76 mm en la perforación del tajo 777 del Nv -175, permitirá reducir los costos unitarios de perforación.

1.7. VARIABLES E INDICADORES

1.7.1. Identificación de variables

- Variable independiente (X1): Diámetro de broca
- Variable dependiente (Y1): Desempeño de perforación

1.7.2. Operacionalización de variables

Tabla 1

Cuadro de Operacionalización de Variables

VARIABLE	DIMENSIÓN	DEFINICIÓN	INDICADOR	UNIDAD
X1: Diámetro de broca (Causa)	Diseño de perforación	Parámetro geométrico que define el tamaño del taladro y condiciona la malla de perforación	Diámetro de broca	mm
			Burden	m
			Espaciamiento	m
			Número de taladros	N°
Y1: Desempeño de perforación (Efecto)	Productividad	Nivel de producción obtenido en función del avance de perforación	Rendimiento de perforación	TM/m
			Metros perforados por guardia	m/guardia
			Velocidad de perforación	m/h
	Eficiencia	Relación entre el tiempo efectivo y el tiempo total de operación	Tiempo de perforación	h
			Número de guardias por disparo	N°
	Calidad	Cumplimiento de parámetros de fragmentación del macizo rocoso	P80	cm
	Costos	Recursos económicos empleados en el proceso de perforación	Costo por metro perforado	$/m
			Costo unitario	$/TM

Fuente: Elaboración Propia

CAPITULO II:

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Antecedentes internacionales

- **Valdez Soto (2016)** *"Metodología de Cálculo de Productividad de Perforación y Mejoras de Gestión en Minas a Cielo Abierto, Aplicado a Rdt" - Tesis para optar al grado de Ingeniero Civil de Minas presentada en la Universidad de Chile.*

El estudio establece que la perforación, aunque no representa el componente de mayor costo dentro de la operación minera, tiene una influencia significativa en el desempeño global de la mina debido a su relación directa con la continuidad de las actividades posteriores. El autor señala que las deficiencias en esta etapa pueden ocasionar retrasos en la obtención de información geológica para la planificación de corto plazo, modificaciones en las secuencias de extracción, incumplimientos en la programación de polígonos de perforación y demoras en los procesos de

voladura. Asimismo, recomienda que futuras investigaciones incorporen en las bases de datos variables relacionadas con el tipo de taladro perforado, con la finalidad de analizar su incidencia en el rendimiento operativo y en las medidas de seguridad aplicadas durante la perforación.

- **Hidalgo Polanco (2016)** *"Mejoras de la Gestión de Perforación Mina Chuquicamata" - Tesis para optar al grado de Ingeniero Civil de Minas presentada en la Universidad de Chile.*

Los resultados de la investigación evidencian que las mayores pérdidas de tiempo en la operación se originan por demoras no programadas, situación que repercute directamente en la utilización efectiva de los equipos de perforación. El autor indica que el cumplimiento de los rendimientos operativos constituye un factor fundamental para alcanzar las metas de producción establecidas. En ese sentido, las acciones de mejora se orientan a identificar las principales causas de las interrupciones no planificadas, las cuales concentran aproximadamente el 80 % del total de estas demoras, planteándose medidas vinculadas con la optimización de la planificación, la gestión operativa y la adecuada asignación de equipos para maximizar su desempeño.

- **Salvador Cobo (2020)** *"Evaluación de Automatización de Operaciones Unitarias en Minería Subterránea" - Tesis para optar al grado de Ingeniero Civil de Minas presentada en la Universidad de Chile.*

La investigación concluye que las operaciones unitarias asociadas directamente a la etapa de producción presentan mejores condiciones para la incorporación de tecnologías de automatización debido a la menor variabilidad de sus áreas de trabajo y a los reducidos requerimientos de interacción entre sistemas. Por el contrario, las actividades relacionadas con la preparación minera y los servicios auxiliares demandan un mayor tiempo de desarrollo tecnológico, debido a la constante interacción entre equipos, operadores y condiciones cambiantes

del entorno de trabajo. Dentro de estas últimas, las labores vinculadas al desarrollo de infraestructura y mantenimiento de equipos son identificadas como las más complejas para alcanzar procesos de automatización en el corto plazo.

1.1.1. Antecedentes nacionales

- **Aparco Huillcas & Garcia de la Cruz (2019)** *"Optimización de la Vida Útil de los Aceros de Perforación para la Reducción de Costos en Mina San Vicente - Cia. San Ignacio de Morococha S.A.A. Año 2018" - Tesis para optar al grado de Ingeniero de Minas presentada en la Universidad Nacional de Huancavelica-Perú.*

Los autores determinaron que la optimización de la vida útil de los aceros de perforación mantiene una relación positiva y significativa con la reducción de los costos operativos de la unidad minera. Entre los principales resultados obtenidos se evidenció que las brocas de 45 mm incrementaron su vida útil en 35 %, alcanzando un rendimiento de 11 241.15 pies perforados por broca. De manera similar, las barras de perforación de 12 pies registraron un aumento de 31 % en su vida útil, equivalente a 3 914.16 pies adicionales perforados por barra. Como consecuencia de estas mejoras, se logró reducir el costo asociado al consumo de aceros de perforación en 1 435.04 US$/mes, generando un ahorro proyectado de 17 220.48 US$/año para la operación minera.

- **Ruelas Alpaca (2020)** *"Optimización de Vida Útil de los Aceros de Perforación para Disminuir Costos en Unidad Minera Santa Filomena - Sotrami S.A" - Tesis para optar al grado de Ingeniero de Minas presentada en la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa – Perú.*

La investigación evidenció beneficios económicos derivados de la optimización de la vida útil de los aceros de perforación en distintas labores mineras. Los mayores ahorros fueron obtenidos en chimeneas, con un valor de 12.95 US$ por disparo, seguidos por galerías con 12.60

US$, subniveles con 10.09 US$ y piques con 5.53 US$. Estos resultados fueron complementados mediante la aplicación de un programa de mantenimiento preventivo orientado a las perforadoras y al control del desgaste de brocas y barrenos. Asimismo, el seguimiento de los rendimientos permitió mejorar la planificación logística y la disponibilidad de materiales, contribuyendo a reducir tiempos improductivos dentro de la operación minera.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Características geomecánicas de la mina

La geomecánica tiene por objetivo estudiar las particularidades geológicas y mecánicas de la roca, de las estructuras y labores del yacimiento mineral, el cual nos ayudara a conocer el comportamiento de este para determinar el método de minado más adecuado y seguro. (Maldonado Álvarez, 2022)

2.2.1.1. Evaluación y clasificación de la calidad de rocas asociados al yacimiento.

El sistema Rock Mass Rating (RMR) constituye uno de los métodos geomecánicos más utilizados para evaluar la calidad de un macizo rocoso. Su determinación se basa en la valoración conjunta de parámetros como la resistencia de la roca intacta, las características de las discontinuidades, el grado de fracturamiento, las condiciones de presencia de agua y la influencia de la orientación estructural respecto a la excavación. La puntuación obtenida permite clasificar el macizo rocoso en diferentes categorías de calidad para fines de diseño y operación minera.

De acuerdo con la propuesta desarrollada por Bieniawski (1989), los valores del índice RMR permiten agrupar la masa rocosa en categorías de comportamiento geomecánico, las cuales se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2

Criterios para la clasificación de la masa de Roca

Calidad geomecánica	Clase	Rango RMR
Buena	II	> 60
Regular A	IIIA	51 – 60
Regular B	IIIB	41 – 50
Mala A	IVA	31 – 40
Mala B	IVB	21 – 30
Muy mala	V	< 21

Fuente: Elaboración propia con base en Bieniawski (1989).

La distribución de la calidad geomecánica del macizo rocoso fue determinada para las diferentes zonas mineralizadas y para las rocas encajonantes presentes en cada sector del yacimiento. Los resultados de la clasificación RMR obtenidos para los sectores Norte y Sur se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

Clasificación de la masa de Roca

Sector	Unidad geológica	Categorías RMR identificadas
Norte	Roca caja superior	IIIB, IVA
Norte	Zona mineralizada	IIIB, IVA y IVB
Norte	Roca caja inferior	IIIB, IVA y IVB
Sur	Roca caja superior	IIIA, IIIB y IVA
Sur	Zona mineralizada	IIIA y IIIB
Sur	Roca caja inferior	IIIA y IIIB

Fuente: Elaboración propia basada en los criterios de clasificación geomecánica propuestos por Bieniawski (1989). Tj 777

Con la finalidad de caracterizar las condiciones geomecánicas del macizo rocoso, se realizó el respectivo mapeo geomecánico en campo. El procedimiento empleado para la recopilación y evaluación de la información se ilustra en la Figura 1.

Figura 1

Guía para el mapeo geo mecánico

Persistenc.	Descripción	Símbolo
	No se ve las terminaciones de la estructura	0
	Se ve una terminación de la estructura	1
	Se ve dos terminaciones de la estructura	2
Tipo de estructura	Descripción	Símbolo
	Junta	J
	Falla (o zona de corte)	FA
	Foliación	FO
Rugosidad a pequeña escala	Descripción	Símbolo
	Pulida - espejo de falla (slickensided)	SS
	Lisa (smoth)	SM
	Rugosa (rough)	R
	Relleno de panizo (gouge-filled)	G
Rugosidad a gran escala	Descripción	Símbolo
	Plana	P
	Ondulada	U
	Discontinua	D
Meteoriz.	Descripción	Símbolo
	Fresca	F
	Cubierta dispersa de mineral	SC
	Descompuesta	D
Panizo (gouge)	Descripción	Símbolo
	Sin panizo	N
	Panizo arcilloso (clay)	C
	Panizo limoso (silt-mud)	M
	Panizo arenoso (sand)	S
Agua	Descripción	Símbolo
	Seco (dry)	DR
	Húmedo (damp)	DA
	Mojado (wet)	W

	Gran escala	Plana	Ondulada	Discontinua
Pequeña escala	Jr (Critical Set)			
Pulida - Espejo de falla		0.5	1.5	2.0
Lisa		1.0	2.0	3.0
Rugosa		1.5	3.0	4.0
Rellena de panizo		1.0	1.0	1.5

Descripción típica (set de juntas crítico)	Ja
Hermeticamente sellada	0.75
Sólo manchas superficiales	1
Paredes de las juntas ligeramente alteradas: cubierta dispersa de mineral	2 - 3
Cubierta de baja fricción (clorita, mica, talco, arcilla): < 1 mm de espesor	3 - 6
Panizo, arcilla de baja fricción o arcilla expansible delgada: 1-5 mm de espesor	6 - 10
Panizo, arcilla de baja fricción o arcilla expansible gruesa: > 5 mm de espesor	10 - 20

Fuente: Adaptado de la clasificación geomecánica RMR de Bieniawski (1989).

2.2.2. Métodos de explotación

La selección de un método de explotación minera depende de diversos factores técnicos y económicos relacionados con las características del yacimiento. Entre los aspectos más relevantes se encuentran la geometría del cuerpo mineralizado, las condiciones geomecánicas del mineral y de las rocas encajonantes, así como los requerimientos de producción y rentabilidad de la operación.

En la Unidad Minera Condestable se emplean principalmente los métodos Shrinkage Stoping, Sublevel Stoping con taladros largos y, en determinadas zonas, el método de cámaras y pilares (Room and Pillar).

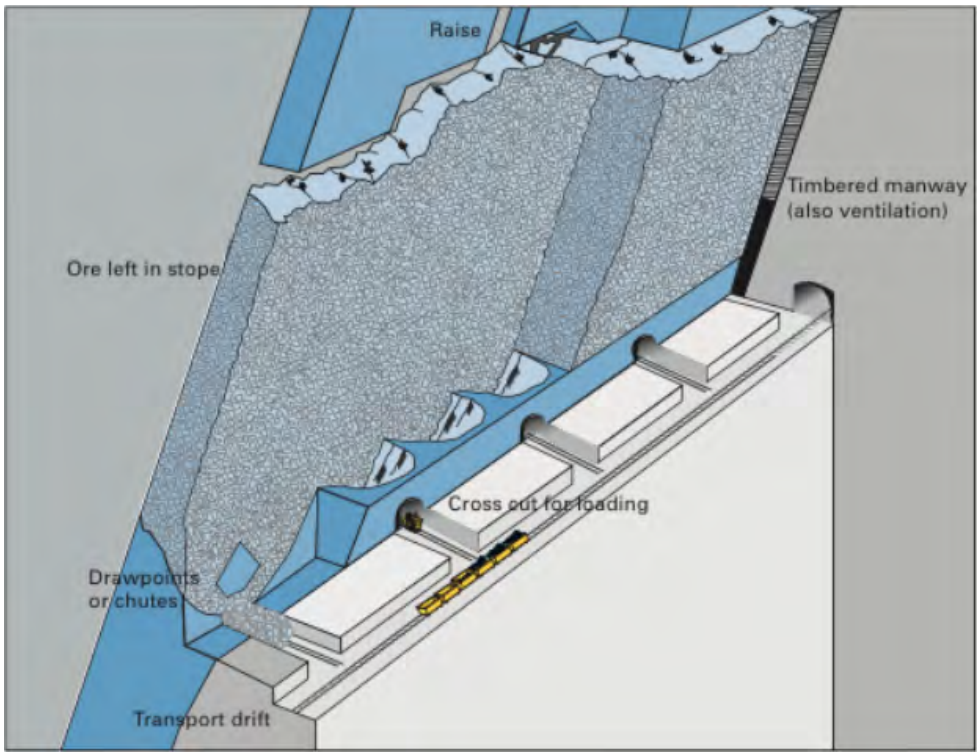
El método Shrinkage Stoping se aplica principalmente en vetas de buzamiento pronunciado y potencias reducidas a medianas. Su principio operativo consiste en utilizar parte del mineral fragmentado como plataforma de trabajo temporal durante el avance ascendente de la explotación. Esta característica permite brindar soporte provisional a las paredes del caserón hasta concluir la extracción del mineral.

Para su aplicación se requieren cuerpos mineralizados continuos, con adecuada estabilidad geomecánica y condiciones que permitan el desplazamiento gravitacional del mineral fragmentado sin problemas de colgamiento o cementación. Durante la explotación se extrae únicamente una fracción del material roto correspondiente al esponjamiento generado por la voladura, mientras que el volumen restante permanece almacenado dentro del tajeo hasta la culminación de las labores.

En la Compañía Minera Condestable este método es utilizado en vetas con potencias comprendidas entre 1.0 y 5.0 m. Los tajeos pueden alcanzar longitudes de hasta 100 m y alturas cercanas a 30 m, realizándose la limpieza del mineral mediante equipos scoop a través de ventanas de extracción.

Figura 2

Método de explotación subterránea Shrinkage Stoping



Fuente: Manual de operación Atlas Copco

El método Sublevel Stoping con taladros largos es uno de los sistemas de explotación más utilizados para cuerpos mineralizados tabulares o masivos con buzamiento pronunciado y buenas condiciones geomecánicas. La recuperación del mineral se realiza mediante perforaciones largas ejecutadas desde subniveles previamente desarrollados, permitiendo que el material fragmentado fluya por gravedad hacia los puntos de extracción.

Su aplicación requiere estabilidad en los caserones y en las rocas encajonantes, ya que normalmente se generan aberturas de gran dimensión durante la explotación. Dependiendo de la geometría del yacimiento, los tajeos pueden desarrollarse de forma longitudinal o transversal respecto al rumbo de la mineralización. Entre sus principales ventajas destacan el elevado nivel de

mecanización, la alta productividad y la reducción de personal expuesto en las zonas de producción.

En la Unidad Minera Condestable este método se aplica en cuerpos mineralizados de gran dimensión, con longitudes cercanas a 100 m, potencias del orden de 30 m y alturas comprendidas entre 40 y 70 m. La perforación se realiza mediante diseños en abanico desde los subniveles de producción, utilizando taladros de hasta 30 m de longitud. Para aberturas de gran magnitud se contempla posteriormente el empleo de relleno con la finalidad de controlar posibles problemas de estabilidad.

Figura 3

Método de explotación por Sublevel Stoping con taladros largos.

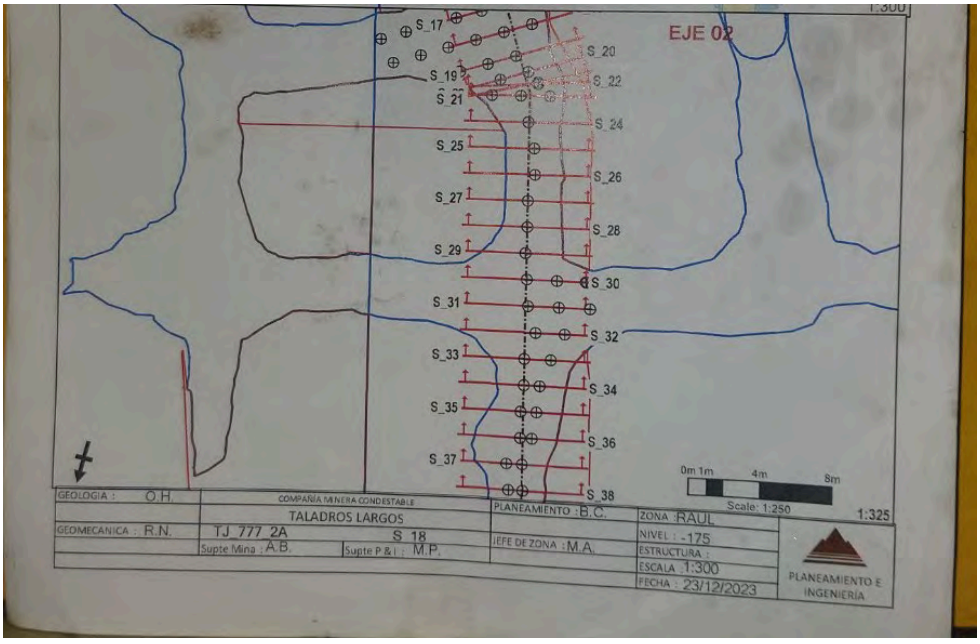
Fuente: Propia

Para el caso específico del Tajo 777 del Nivel –175, el método de explotación corresponde al Sublevel Stoping mediante perforación de taladros largos en abanico. El cuerpo mineralizado presenta una geometría tabular, buzamiento pronunciado y condiciones geomecánicas favorables para una explotación mecanizada. El ancho promedio de minado es de 14.5 m y la distancia vertical entre subniveles es aproximadamente de 31 m.

La perforación de producción se ejecuta mediante equipos Simba utilizando brocas de 64 mm y 76 mm, siendo estas últimas el objeto de evaluación técnico-económica de la presente investigación. El diseño de perforación considera abanicos de taladros largos distribuidos desde los subniveles de producción, permitiendo cubrir eficientemente el ancho del caserón y optimizar la secuencia de explotación.

Figura 4

TJ 777 del nivel –175 mediante el método Sublevel Stoping



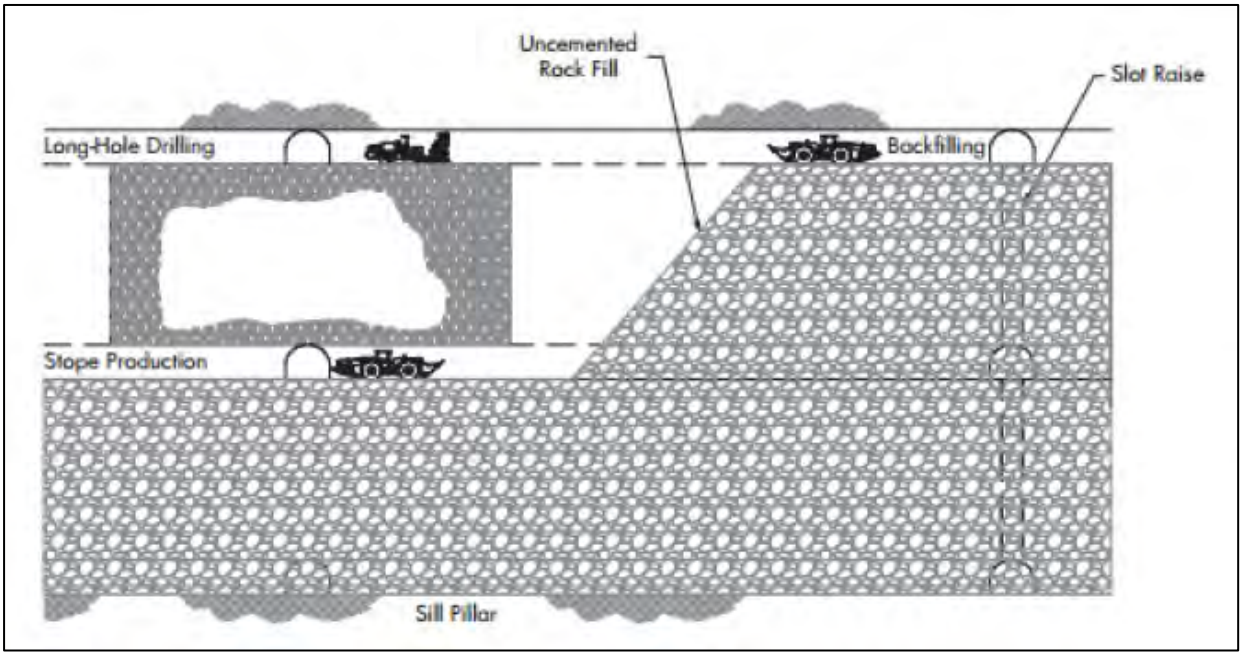
Fuente: C.M. Condestable

2.2.2.1. Método Bench and Fill

Según Villaroel Miguel (2015), el método de bench and fill corresponde a una variante del cut and fill, donde se obtiene una mejora en la productividad y una reducción de los costos de producción (Véase Figura 5).

Figura 5

Esquema Bench and Fill



Fuente: Villaroel Miguel (2015)

2.2.2.1.1. Labores de Preparación Bench and Fill

Las labores de preparación en el método Bench and Fill comprenden el desarrollo de niveles de producción, niveles de perforación y accesos que permiten la explotación segura y eficiente del mineral.

a) **Nivel de producción:** Está conformado por galerías de transporte y estocadas de extracción, diseñadas para garantizar la continuidad operativa y facilitar el desplazamiento de los equipos de carguío. Las dimensiones de las estocadas dependen

de la geometría del cuerpo mineralizado y de las características de las cámaras de explotación.

b) **Nivel Superior de Perforación:** Corresponde a la labor desde donde operan los equipos de perforación para la ejecución de taladros descendentes. Generalmente se desarrolla de forma paralela al nivel de producción y mantiene criterios de diseño similares.

c) **Pivotes de Acceso:** Son labores desarrolladas en roca estéril que permiten la comunicación con los niveles de explotación. Su inclinación puede variar entre −12 % y +12 %, dependiendo de las condiciones geométricas y de la ubicación de los niveles mineros.

2.2.2.1.2. Secuencia de Explotación

La explotación del bloque se realiza de manera secuencial, iniciando con la extracción de las cámaras primarias. Posteriormente, las áreas explotadas son rellenadas para proporcionar estabilidad al macizo rocoso y permitir la recuperación de las cámaras remanentes. De manera general, la secuencia operativa comprende las siguientes etapas:

- Perforación descendente.
- Explotación de cámaras primarias.
- Relleno de los espacios explotados.
- Voladura de cámaras adyacentes contra relleno.
- Relleno final del caserón.

2.2.2.1.3. Perforación y Voladura

En el método Sublevel Stoping, la producción del mineral se realiza mediante taladros largos perforados desde los subniveles hacia el cuerpo mineralizado. El diseño de perforación

considera parámetros como el diámetro de perforación, burden, espaciamiento y longitud de los taladros, los cuales son definidos de acuerdo con las características geomecánicas del macizo rocoso y la geometría del tajeo.

La voladura se desarrolla mediante secuencias de iniciación que permiten obtener una fragmentación adecuada y favorecer el flujo gravitacional del mineral hacia los puntos de extracción. Para el diseño de la malla de perforación y la determinación de los parámetros de burden y espaciamiento se consideran los criterios de Langefors, complementados con los fundamentos de diseño y optimización de voladuras propuestos por López Jimeno, con la finalidad de lograr una distribución eficiente de la energía explosiva y una adecuada fragmentación del mineral.

2.2.3. Equipos y Brocas de Perforación

2.2.3.1. Máquina perforadora y accesorios del equipo Raptor 55-2R RESEMIN

Según RESEMIN (2024), la Raptor 55-2R es un equipo electrohidráulico diseñado para la ejecución de taladros largos en minería subterránea. El equipo incorpora un sistema de paralelismo automático, dos unidades de rotación y una viga serie 8000 con doble stinger, características que contribuyen a mejorar la precisión y estabilidad durante la perforación. Asimismo, está equipada con una perforadora Montabert HC112 de 24 kW, carrusel de barras, mordaza hidráulica y un sistema de extracción de barras atascadas, montados sobre un chasis articulado de tracción 4WD para su operación en labores subterráneas (Véase Figura 6).

Figura 6

RAPTOR 55-2R Equipo para perforación de taladros largos para secciones medianas

Fuente: RESEMIN (2024)

2.2.3.1.1. Sistema BAL (Boom Alignment Laser)

Según RESEMIN (2024)**,** el sistema de alineamiento láser de Boom Alignment Laser o BAL) es un sistema de ayuda electrónica en los equipos de taladros largos. Tiene como principales sistemas lo siguiente:

- Posicionamiento de la viga con referencia a las marcas del túnel usando el láser.
- Medición de ángulos de rotación, inclinación y paralelismo de viga (AMLH).
- Medición de metros perforados y control electrónico del carrusel.

Todo el sistema está conectado por protocolo CAN-BUS y cables analógicos, lo que simplifica la cantidad de cables. Es robusto, con protección IP67 en adelante. El sistema va de la mano con la implementación del tablero de control, con válvulas pilotadas hidráulicamente, simplificando el número de palancas en la cabina (Véase Figura 7 y 8).

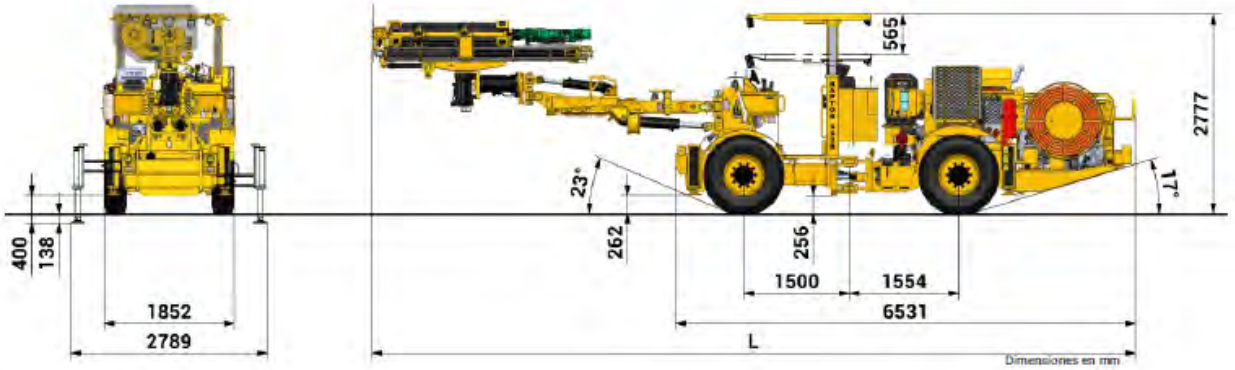
Figura 7

Sistema BAL (Boom Alignment Laser)

Fuente: RESEMIN (2024)

Figura 8

Dimensiones del Equipo Simba Raptor 55-2R RESEMIN



Vigas	4'	5'	6'
Longitud de equipo (L)	10,846	10,846	10,846

Peso del equipo
14,830 kg

Fuente: RESEMIN (2024)

2.2.3.2. Máquina perforadora y accesorios del equipo SIMBA S7D de EPIROC

La SIMBA S7D es una perforadora utilizada en minería subterránea para la ejecución de taladros largos de producción. Su configuración permite desarrollar perforaciones en diferentes

condiciones operativas, incorporando sistemas de posicionamiento, control y automatización que contribuyen a mejorar la precisión del trabajo y la eficiencia del proceso. Asimismo, el equipo puede complementarse con diversos accesorios orientados a optimizar las actividades de perforación y reducir la exposición del personal durante las operaciones de minado (Epiroc, 2024) (Véase Figura 9).

Figura 9

SIMBA S7D de EPIROC

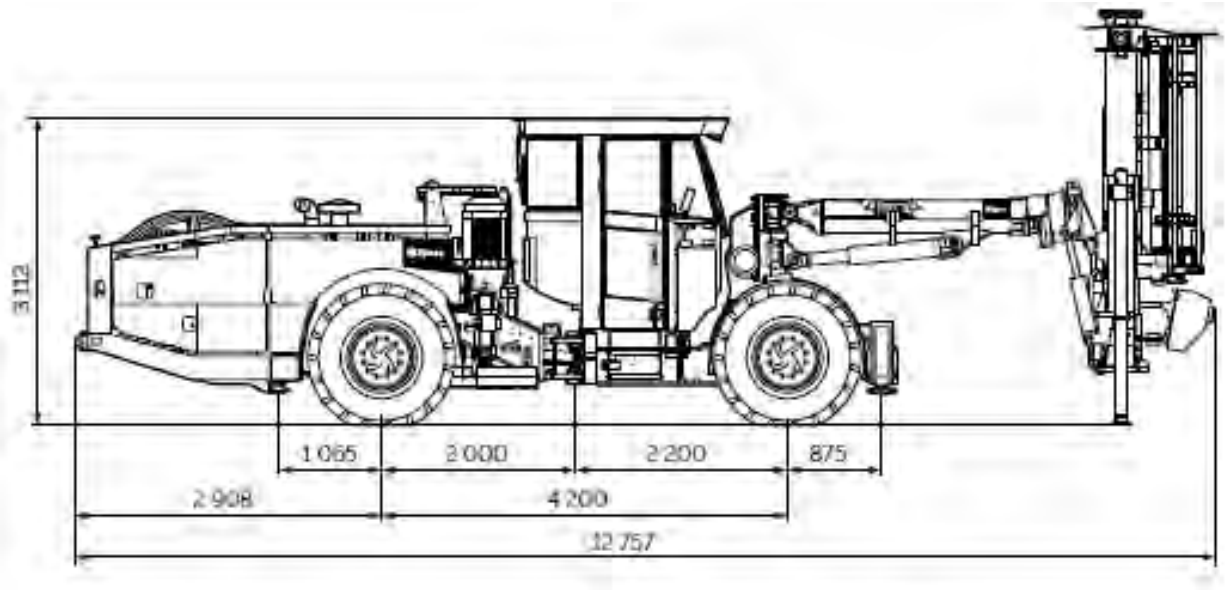
Fuente: Elaboración Propia

El equipo SIMBA S7D de Epiroc tiene muchas cualidades, entre las cuales tenemos según (EPIROC, 2024):

- **Seguridad:** El operador se sienta en una cabina con certificación ROPS y FOPS, con excelente visibilidad y comodidad. El control remoto opcional mejora aún más la seguridad al alejar al operador de la máquina y de las áreas potencialmente peligrosas. Los sensores de barrera protegen al operador y al personal de mantenimiento de las piezas giratorias durante la perforación automática.
- **Automatización:** Una mayor disponibilidad del equipo y una mayor productividad general son beneficios que se obtienen con las funciones de automatización inteligente de la Simba. La eficiencia operativa aumenta al permitir la perforación durante los cambios de turno y los descansos. El equipo se puede operar por control remoto para aumentar la productividad, la seguridad y la comodidad del operador.
- **Sistema de Control de Equipos Epiroc:** Presentamos la primera versión de nuestro sistema computarizado de control de equipos de perforación en 1998, que conquistó el mercado. A lo largo de los años, el Sistema de Control de Plataformas (RCS) se ha perfeccionado y desarrollado para incluir funciones cada vez más sofisticadas gracias al diálogo continuo con los clientes. Actualmente, más de 3000 plataformas equipadas con RCS operan en todo el mundo. En Epiroc, seguimos impulsando el desarrollo innovador en la industria de la minería y la construcción de túneles.

Figura 10

Dimensiones SIMBA S7D – Epiroc



Fuente: EPIROC (2024)

2.2.3.3. Tipos de brocas de perforación

Las brocas constituyen uno de los principales elementos de corte utilizados en las operaciones de perforación de roca, ya que permiten transmitir la energía de impacto y rotación hacia el macizo rocoso para generar la fragmentación requerida. Su selección depende de factores como la resistencia de la roca, el diámetro de perforación y las condiciones operativas de trabajo. Debido a la diversidad de aplicaciones en minería, construcción, túneles y obras de infraestructura, actualmente existe una amplia variedad de diseños de brocas adaptados a diferentes requerimientos de perforación (Button Bits Rock Drilling, 2020).

- **Brocas de Botón:** Este tipo de brocas es adecuado para perforaciones en seco y húmedas de rocas duras y semi duras. Su uso es principalmente en todo tipo de minería, aunque también tiene aplicación en excavación de túneles, ingeniera de extracción, construcción, etc. (Véase Figura 11).

Figura 11

Broca de botón

Fuente: Button Bits Rock Drilling (2020)

- **Brocas de Cincel:** Este tipo de brocas es usado en perforaciones de taladros de roca ligeras y de diámetro reducido, perforando agujeros de roca con un diámetro menor a 50mm, adecuada para rocas con baja dureza. Este tipo de brocas es usado en minas de carbón, minas artesanales de hierro, oro, plomo, zinc, etc.; es eficiente para trabajos en vetas, presenta una alta dureza y resistencia al desgaste, así como una alta eficiencia de producción a un abajo costo. (Véase Figura 12).

Figura 12

Broca de cincel

Fuente: Button Bits Rock Drilling (2020)

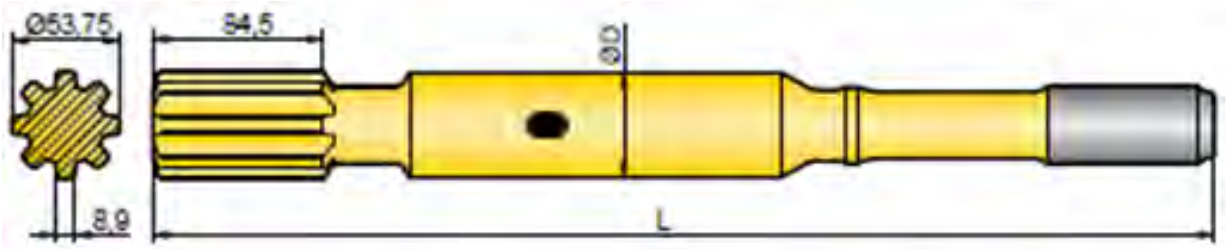
2.2.3.4. Accesorios de perforación

Según LITECHTOOLS (2020) , los accesorios de perforación, también conocidos como columna de perforación es el conjunto de elementos que se acoplan para transmitir la energía mecánica y de rotación hacia la broca, para realizar la perforación. La columna de perforación varía de acuerdo al tipo de equipo de perforación, y tipo de actividades a realizar, para los trabajos de perforación de taladros largos son:

- **Shank Adapter:** Este accesorio cumple la función de transmitir la rotación, la fuerza de avance, la energía de impacto y el medio de lavado a la sarta de perforación, por lo que los shanks están diseñados para soportar la potencia del alto impacto de los taladros. (Véase Figura 13).

Figura 13

Shank Adapter



Fuente: LITECHTOOLS (2020)

- **Barras:** Las barras de perforación de taladros largos son herramientas que permiten la excavación de agujeros de gran profundidad en el terreno, ya sea para la extracción de minerales o para la construcción de túneles y otras obras subterráneas. Estas barras se insertan en equipos de perforación y transmiten la fuerza de rotación o impacto para crear el agujero. (Véase Figura 14).

Figura 14

Barras

Fuente: LITECHTOOLS (2020)

- **Brocas:** Son herramientas de perforación especializadas diseñadas para crear agujeros de gran longitud en la roca, generalmente en minería subterránea. Estas brocas, a menudo utilizadas con equipos como Simbas y jumbos, permiten la perforación de taladros profundos para la voladura y extracción de mineral, así como para la construcción de túneles y otras labores subterráneas. (Véase Figura 15).

Figura 15

Brocas

Fuente: LITECHTOOLS (2020)

2.2.3.5. Criterios de selección de brocas de perforación

Según LITECHTOOLS (2020), los criterios de selección de brocas de perforación dependen de varios factores y criterios. Entre los que están incluidos las características de la roca (dureza, Abrasividad, fracturas), el tipo de perforación (subterránea o a tajo abierto), el equipo de

perforación con el que se realizaran los trabajos de perforación y los costos asociados; una correcta elección maximiza la eficiencia de la perforación y reduce los costos.

2.2.3.6. Rendimientos de las brocas de perforación

Según LITECHTOOLS (2020), en el mundo minero los rendimientos de las brocas de perforación están relacionados con la eficiencia y durabilidad con la que pueden perforar las rocas, para determinar estos factores se toma en cuenta la longitud de roca perforada por broca antes de ser reemplazada por otra broca, este proceso incluye la actividad de afilado el cual incrementa el rendimiento de las brocas en las de un 30%. Los rendimientos se ven directamente afectados o influenciados por diversos factores, entre los mas importantes podemos considerar la calidad de la broca, propiedades de la roca, las presiones de aire y agua necesarios y las técnicas de perforación, así como la destreza del operador. (Véase Tabla 4).

Para determinar el rendimiento de las brocas de perforación, se empleó la siguiente expresión:

$$R_b = \frac{M_p}{N_b}$$

Donde:

Rb = rendimiento de la broca ($m/broca$)

Mp = metros totales perforados

Nb = número de brocas utilizadas

Esta relación permite determinar cuántos metros perfora en promedio una broca bajo condiciones operativas.

Tabla 4

Rendimientos garantizados por CMC

DESCRIPCIÓN	RENDIMIENTO (m)
Barra MF T45 × 1525 mm	200
Shank HC112 RP D45 T45 670mm	1500
Broca retráctil Litech Tools × 76 mm	400

Fuente: Área de Perforación y Voladura U.M. Condestable

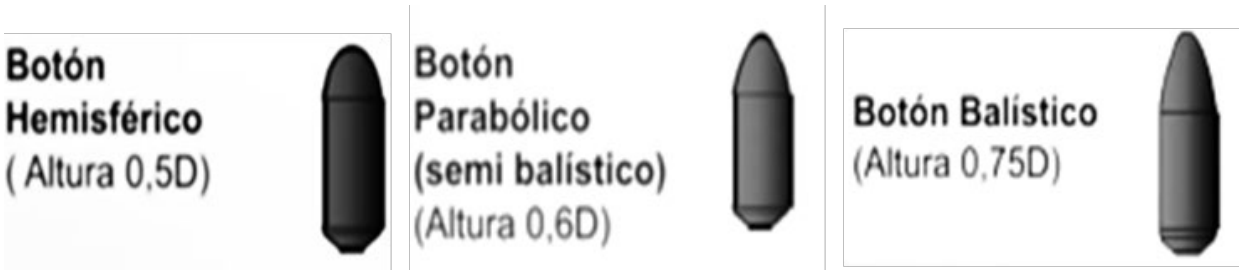
2.2.3.7. Características de las brocas y vida útil.

Las brocas presentan diversas características, entre las más resaltantes podemos considerar el tipo de inserto, mediante esta afirmación podemos decir que una correcta selección del tipo de inserto es determinante para optimizar la eficiencia y la vida útil de la broca en la perforación minera. La elección dependerá de las características específicas de la roca, el método de perforación y las condiciones de trabajo, se tienen los siguientes tipos de insertos: (Véase Figura 16).

- **Botón Esférico:** Su aplicación es como botón universal, es más apropiado para terreno duro, funciona en un rango de 25000 a 45000 PSI
- **Botón Semibalístico:** Su aplicación es para una rápida penetración, es más apropiado para terreno de dureza media, funciona entre un rango de 15000 a 25000 PSI, del mismo modo se usa en terrenos ligeramente abrasivos
- **Botón Balístico:** Su aplicación es para una rápida penetración, es más apropiado para terreno blando, funciona entre un rango de 10000 a 20000 PSI, del mismo modo se usa en terrenos no abrasivos.

Figura 16

Tipos de insertos en las brocas



Fuente: LITECHTOOLS (2020)

Nota: La altura del corte es proporcional al diámetro del cuerpo del inserto, es decir, la altura hemisférica de ½ por el diámetro del cuerpo del inserto.

2.2.3.7.1. Tipo de faldón

Los faldones o cuerpo de las brocas de perforación son la parte que rodea a los insertos de carburo de tungsteno de la broca. Se tienen diversos tipos de faldones que se aplican a los diversos tipos de formaciones rocosas y aplicaciones de perforación.

- **Faldón Recto:** Tal cual su definición presenta un faldón recto y liso, lo que mejora la estabilidad y a la eficiencia en ciertas condiciones.
- **Faldón Retráctil:** Este tipo de faldón está diseñado para formación es rocosas menos consolidadas, este diseño ayuda a mantener la rectitud de los taladros y facilita la recuperación de las brocas, en la mas usada en perforaciones de taladros largos.
- **Faldón resistente:** Este faldón se usa en formaciones rocosas muy abrasivas y duras, donde se requiere mayor resistencia al desgaste, este faldón suele tener un diseño mas robusto para proteger los botones de carburo de tungsteno.

2.2.3.7.2. Tipos de brocas según su diámetro

Para los trabajos de perforación en minería se tienen diversos diámetros de brocas, cada una para cumplir diferentes aplicaciones para perforaciones en minería subterránea:

- Diámetros de brocas entre 33 mm y 127 mm son típicos para perforaciones de producción subterránea y excavaciones de túneles.
- Para trabajos de perforación de taladros de sostenimiento se usan las brocas desde 33mm a 38mm.
- Para perforaciones de taladros de frentes se usan brocas de 45mm (diámetro estándar), 48mm y 51mm; con rimadoras de 102mm.
- Mientras que para perforaciones de taladros largos se usan brocas con diámetros de 64mm (diámetro estándar), 76mm y 89mm con rimadoras de 127mm.

2.2.4. Operación de perforación

La perforación de taladros largos constituye una de las actividades principales dentro del método Sublevel Stoping, debido a que condiciona la fragmentación, recuperación y productividad de la explotación. Este método es ampliamente utilizado en cuerpos mineralizados tabulares o vetiformes con buzamiento pronunciado y buenas condiciones geomecánicas, donde el mineral fragmentado puede desplazarse por gravedad hacia los puntos de extracción. Asimismo, requiere que las rocas encajonantes presenten una adecuada estabilidad para mantener abiertas las excavaciones durante el proceso de minado (Álvarez, 2022).

Si bien la implementación de este método demanda una inversión importante durante la etapa de preparación y desarrollo, dichos costos suelen compensarse por los altos niveles de producción y mecanización que pueden alcanzarse durante la explotación. No obstante, su aplicación resulta más favorable en cuerpos mineralizados de geometría relativamente regular, debido a que presenta una limitada capacidad de selectividad frente a variaciones significativas de la mineralización (Véase Figura 17).

Figura 17

Equipo Simba S7D realizando perforación positiva en galería

Fuente: Propia

2.2.4.1. Explotación de taladros largos en abanico

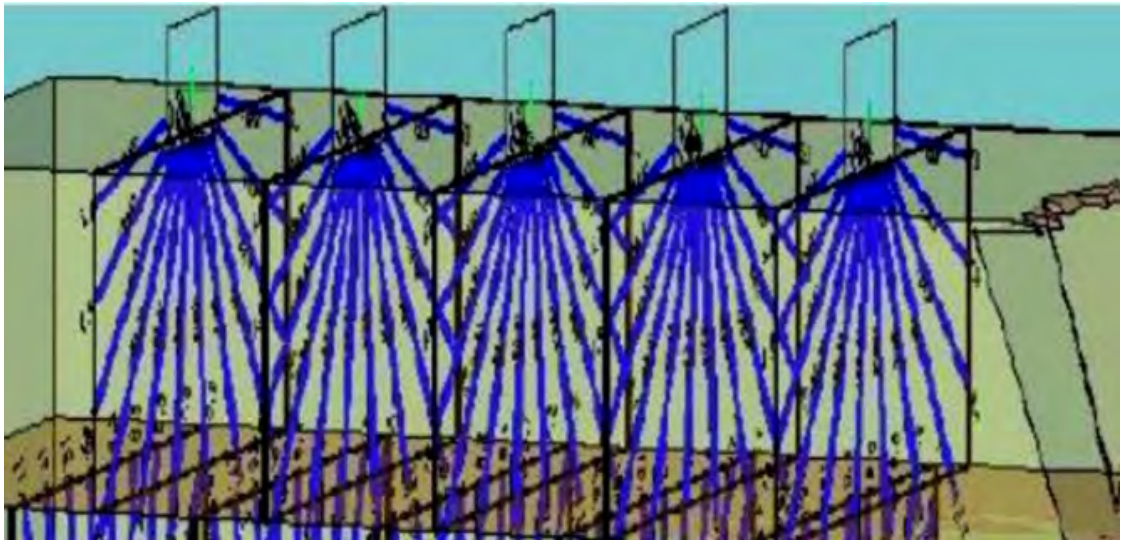
La explotación mediante taladros largos en abanico se desarrolla a partir de perforaciones radiales ejecutadas desde los subniveles de producción, donde los taladros son distribuidos siguiendo una configuración en abanico para cubrir el volumen mineralizado del tajeo. Posteriormente, la rotura del mineral se realiza mediante voladuras por anillos, permitiendo que el material fragmentado se desplace por gravedad hacia los puntos de extracción, desde donde es recuperado mediante equipos scooptram (Huamani, 2020).

La aplicación de este método requiere condiciones geológicas y geomecánicas favorables, entre las que destacan buzamientos superiores a 60°, potencias mineralizadas mayores a 3 m y rocas encajonantes competentes con valores de RMR superiores a 50. Asimismo, resulta más eficiente en cuerpos mineralizados de geometría regular, continuidad adecuada y mineralización competente.

Entre sus principales ventajas destacan los elevados niveles de producción que pueden alcanzarse, la posibilidad de explotar cuerpos mineralizados de gran dimensión y la reducción de costos operativos gracias al alto grado de mecanización que caracteriza al método (Véase Figura 18).

Figura 18

Perforación en Negativo de la Forma Abanico



Fuente: Typical Fan Patterns for Sublevel Stoping - Martinez (2024)

2.2.4.2. Preparación y desarrollo

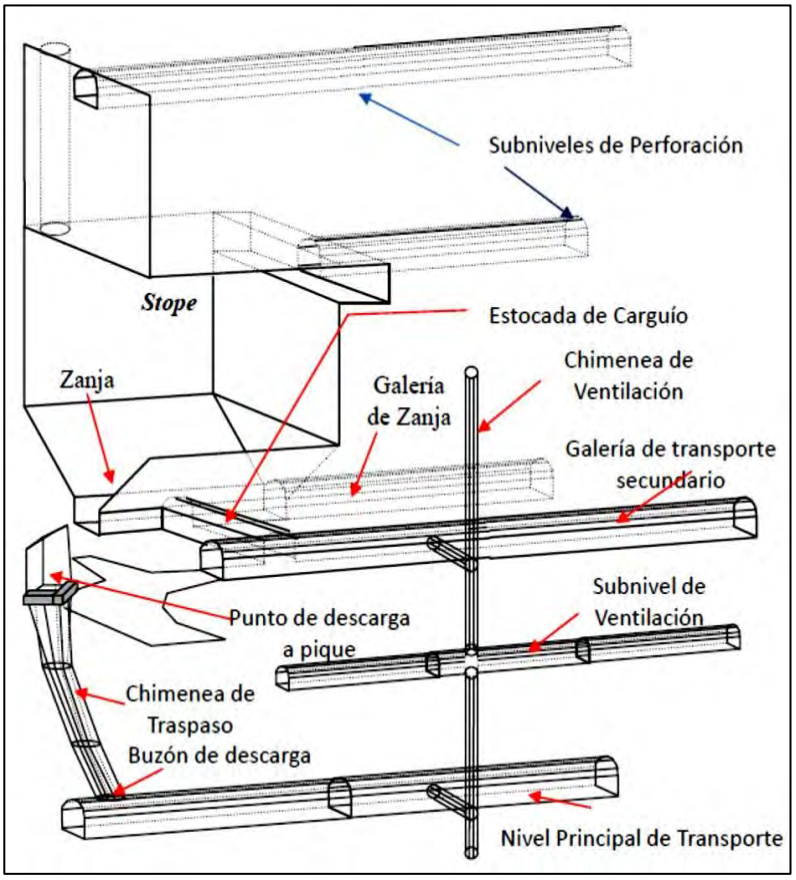
La preparación de un tajeo mediante el método Sublevel Stoping requiere el desarrollo de niveles de producción, subniveles de perforación y labores de acceso que permitan ejecutar las actividades de perforación, voladura y extracción de manera eficiente. Como parte de esta etapa

se construye una excavación inicial o slot, cuya función es generar la cara libre necesaria para el inicio de la voladura de producción (Gutiérrez, 2020) (Véase Figura 19).

Los subniveles de perforación deben contar con las dimensiones adecuadas para facilitar el posicionamiento y operación de los equipos de perforación de taladros largos. Por su parte, el mineral fragmentado producto de la voladura es recuperado en los niveles inferiores y posteriormente transportado mediante equipos scooptram hacia los puntos de descarga. El acceso a los subniveles puede realizarse a través de chimeneas o rampas, dependiendo de la configuración de la explotación y de las condiciones de la mina.

Figura 19

Labores de preparación Sublevel Stoping



Fuente: Hustrulid, W. "Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies" (2001).

2.2.4.3. Perforación de taladros de producción

Según Quispe Roca (2019), los procesos de perforación y voladura se realizan de forma continua e independiente, con la finalidad de tener taladros ya perforados con anticipación los cuales se disparan según los requerimientos programados. La perforación se realiza con equipos electro-hidráulicos, las longitudes varían de acuerdo a la altura del tajo y los diámetros de 2 a más pulgadas según el diseño de la malla de perforación.

2.2.4.4. Programa de mantenimiento de los equipos de perforación

El mantenimiento de los equipos de perforación constituye una actividad fundamental para garantizar la continuidad operativa, mejorar la disponibilidad de los equipos y contribuir al cumplimiento de los estándares de seguridad y protección ambiental establecidos por la organización. Una gestión eficiente del mantenimiento permite reducir tiempos improductivos y optimizar el desempeño de los recursos empleados en las operaciones mineras.

Para evaluar el desempeño de la gestión del mantenimiento se emplean indicadores que permiten medir la disponibilidad y confiabilidad de los equipos de perforación.

2.2.4.4.1. Disponibilidad total

La disponibilidad total expresa la proporción de tiempo en que un equipo se encuentra apto para desarrollar actividades productivas respecto al tiempo total considerado. Este indicador incorpora las horas afectadas por intervenciones de mantenimiento.

$$Disponibilidad = \frac{Horas\ Totales - Horas\ Paradas\ por\ Mantenimiento}{Horas\ Totales}$$

2.2.4.4.2. Disponibilidad por averías

Este indicador evalúa únicamente las pérdidas de tiempo ocasionadas por fallas o averías del equipo, excluyendo las detenciones programadas asociadas al mantenimiento preventivo.

$$Disponibilidad\ por\ Averías = \frac{Horas\ Totales - Horas\ Paradas\ por\ Averías}{Horas\ Totales}$$

2.2.4.4.3. Índice de cumplimiento de la planificación

El índice de cumplimiento de la planificación permite medir el grado de ejecución de las actividades de mantenimiento programadas dentro del periodo previsto.

$$Índice\ de\ Cumplimiento\ de\ la\ Planificación = \frac{N°\ Ordenes\ Acabadas\ en\ la\ Fecha\ Planificada}{N°\ de\ Ordenes\ Totales}$$

2.2.4.4.4. Índice de mantenimiento programado

Este indicador representa la participación del mantenimiento programado respecto al total de horas dedicadas a actividades de mantenimiento.

$$IMP = \frac{Horas\ del\ Mantenimiento\ Programado}{Horas\ Totales\ de\ Mantenimiento}$$

2.2.4.5. Factores que influyen en el proceso de perforación

Los factores que influyen en el proceso de perforación subterránea toman como indicadores las propiedades de la roca (dureza, abrasividad, fracturación), las características del equipo a usar en el proceso de perforación, el diseño de la malla de perforación, el método de voladura, las condiciones ambientales (ventilación para el polvo y gases), y los factores económicos y de planificación del proyecto. La selección del método de perforación adecuado y la optimización de estos factores son cruciales para la fragmentación eficiente de la roca, la seguridad, y la reducción de costos y residuos.

En ese sentido podemos considerar los siguientes factores:

2.2.4.5.1. Factores geológicos y de la roca

- **Dureza y Abrasividad:** Resisten el corte y el desgaste de la broca, afectando la velocidad de penetración y el desgaste del equipo.

- **Fracturación y Estructuras Geológicas:** La presencia de fallas o zonas de debilidad en la roca influye en la estabilidad del taladro y el diseño de la perforación.

2.2.4.5.2. Factores de Ingeniería y Equipo

- **Características del Equipo:** El tipo y la potencia de las perforadoras, las barras y las brocas disponibles limitan el alcance y la orientación de los taladros.
- **Método de Perforación:** La elección entre perforación rotativa, percutiva o rotopercusión depende de las propiedades de la roca y los objetivos.

2.2.4.5.3. Factores de planificación y operación

- **Diseño de Mallas:** La disposición de los taladros (malla) se optimiza para lograr una fragmentación uniforme y eficiente de la roca.
- **Objetivos de Producción:** Las necesidades de producción y los costos operativos influyen en el diseño para balancear la eficiencia y el gasto.
- **Método de Minado:** El método general de explotación, ya sea subterráneo, determina los requerimientos y el diseño de las perforaciones.

2.2.4.5.4. Factores Ambientales y de Seguridad

- **Condiciones del Aire:** En la minería subterránea, la perforación en húmedo se usa para minimizar la generación de polvo y gases, protegiendo la salud de los trabajadores.
- **Estabilidad del Terreno:** Es fundamental mantener la verticalidad y estabilidad de los taladros, así como compactar las zonas de perforación.

2.2.4.5.5. Factores Económicos

- **Costos:** La optimización de la perforación busca lograr la máxima penetración y fragmentación al menor costo posible.

- **Eficiencia:** Una planificación y ejecución eficientes minimizan el desperdicio de explosivos y optimizan el uso de los equipos y la mano de obra.

2.2.4.6. Diseño de mallas de perforación

El diseño de la malla de perforación constituye una etapa fundamental en las operaciones de perforación y voladura, debido a que influye directamente en la fragmentación del macizo rocoso, la recuperación del mineral y la eficiencia de los procesos posteriores. En minería subterránea, especialmente en la perforación de taladros largos, la distribución geométrica de los taladros debe adecuarse a las características geológicas, geomecánicas y operativas de cada tajeo.

Una malla de perforación está conformada por la disposición espacial de los taladros dentro del área a explotar, definiendo parámetros que controlan la distribución de la energía explosiva y el comportamiento de la fragmentación durante la voladura.

2.2.4.6.1. Factores que influyen en el diseño de mallas

El diseño de una malla de perforación depende de diversos factores relacionados con las condiciones del macizo rocoso y los requerimientos de la operación. Entre los principales se encuentran:

- **Características geomecánicas de la roca:** La resistencia, grado de fracturamiento y calidad del macizo influyen en la distribución de los taladros.
- **Explosivos utilizados:** Las propiedades energéticas del explosivo condicionan el burden y espaciamiento de diseño.
- **Diámetro de perforación:** Determina la capacidad de carga explosiva y las dimensiones de la malla.
- **Equipos de perforación:** Las características operativas del equipo influyen en la longitud, orientación y precisión de los taladros.

- **Método de explotación:** La geometría del tajeo y la secuencia de minado condicionan la configuración de la malla.

Los parámetros básicos considerados en el diseño son el burden, definido como la distancia entre filas de taladros; el espaciamiento, correspondiente a la separación entre taladros de una misma fila; la subperforación, que representa la longitud adicional perforada para asegurar la rotura completa de la roca; y el diámetro de perforación, el cual influye directamente en la cantidad de explosivo que puede alojarse en cada taladro.

Un adecuado diseño de malla permite mejorar la fragmentación obtenida, optimizar el consumo de explosivos y contribuir al incremento de la productividad en las operaciones de perforación y voladura.

2.2.4.6.2. Selección del tipo de arranque

En minería, un tipo de arranque se refiere al conjunto de operaciones y técnicas utilizadas para desprender y extraer el material (roca o mineral) de un yacimiento, y que puede ser de dos clases principales: el arranque indirecto, que se realiza con explosivos o medios mecánicos para fragmentar la roca y crear un corte inicial (como en la voladura o los cortes de cuña), y el arranque directo, que se realiza con equipos mecánicos que desprenden el material directamente (como palas mecánicas).

Arranque indirecto (perforación y voladura)

Este tipo de arranque se caracteriza por la fragmentación de la roca para su posterior manejo:

- Perforación: Consiste en hacer tiros o agujeros en la roca con el objetivo de alojar cargas explosivas.

- Voladura: La explosión de estas cargas fragmenta la roca del macizo, separándola de la veta.
- Cortes: Se refiere a la configuración específica de los tiros para iniciar la extracción. Algunos ejemplos son:
  - Corte de cuña o en B: Se realizan tiros en ángulo que convergen formando una cavidad con forma de cuña.
  - Corte piramidal o de diamante: Los tiros convergen hacia un punto central imaginario para crear una cavidad piramidal.
  - Corte en el centro (cueles): Son los taladros que se disparan primero para formar la cavidad inicial, preparando el área de trabajo.

Arranque directo (mecanizado)

Este método implica el desprendimiento y la remoción del material directamente por equipos mecánicos:

- Equipos: Se utilizan equipos como palas mecánicas, cargadores frontales o tuneladoras para arrancar el material del frente de mina o del macizo rocoso.
- Métodos de Arranque y Equipos: La elección del método y el tipo de equipo dependerán de las características del yacimiento:
- Equipos de arranque indirecto: Incluyen equipos de perforación como los jack leg, toyos, jumbos, y herramientas para voladura.
- Equipos de arranque directo: Se emplean palas mecánicas, cargadores frontales, y otros equipos que extraen el material sin necesidad de voladuras.

2.2.4.7. Costo de perforación

El costo de perforación en minería varía considerablemente, pero se calcula típicamente por metro perforado y se obtiene dividiendo el costo o precio del acero entre la longitud perforada ($/Mts). Los factores que influyen en este costo incluyen el costo de la broca y su vida útil, el costo operativo de la perforadora (incluyendo repuestos, lubricantes y energía), los costos laborales, y otros gastos indirectos como mantenimiento y supervisión.

2.2.4.7.1. Componentes del Costo de Perforación

Los costos se pueden agrupar en fijos y variables:

- **Costos fijos:** Son aquellos que no cambian con el volumen de trabajo, como salarios, equipos y mantenimiento**.**
- **Costos variables:** Varían según la producción, incluyendo la mano de obra directa, los materiales y los consumibles.

2.2.4.7.2. Cálculo del Costo por Metro Perforado

La fórmula general para el Costo por Metro (CPM) en aceros es:

$$CPM = \frac{Costo\ Unitario\ de\ la\ Broca\ (\$)}{Vida\ \text{Útil}\ de\ la\ broca\ (m)}$$

Factores que impactan el costo:

- Brocas: El precio de la broca y su vida útil son cruciales.
- Velocidad de penetración: Mayor velocidad reduce el costo por metro.
- Costo horario de la máquina: Un menor costo horario de la máquina, o una mayor vida útil del equipo, también puede reducir el CPM.

2.2.4.8. Fallas en la perforación

Las fallas en la perforación de taladros largos en minería subterránea se deben a la desviación del taladro, la pérdida de circulación, los atascos de barras, y el colapso de las paredes del taladro debido a la inestabilidad del terreno o la presencia de fracturas. Estas fallas son a menudo el resultado de un mantenimiento inadecuado del equipo, condiciones geológicas desfavorables, y errores operativos del personal, lo que puede llevar a demoras, aumento de costos y riesgos de seguridad.

2.2.4.8.1. Tipos de fallas comunes

- Desviación del Pozo: La broca se aleja de la trayectoria planificada, afectando el diseño de la voladura y el rendimiento.
- Pérdida de Circulación: El lodo o fluido de perforación fluye sin control hacia las formaciones rocosas.
- Atascos de Barras: Las barras quedan atrapadas debido a una presión diferencial o a una extracción deficiente de los recortes de roca.
- Colapso de Paredes del Taladro: En terrenos inestables o muy fracturados, las paredes del taladro pueden desmoronarse, dificultando la carga de explosivos.
- Problemas con el Equipo: Fallas mecánicas en las perforadoras o el uso de repuestos no originales pueden causar interrupciones y daños mayores.

2.2.4.8.2. Causas principales

- Geología y Terreno: Condiciones de roca fracturada o la presencia de grandes fallas pueden hacer que el taladro se desvíe o colapse.
- Mantenimiento Inadecuado: La falta de mantenimiento preventivo o el uso de repuestos de baja calidad provocan fallas en el equipo.

- Errores Operacionales: La operación deficiente, la mala limpieza del pozo y la ausencia de un reporte detallado de las fallas por parte del personal agravan los problemas.

2.2.4.8.3. Soluciones y mejoras

- Mejora del Mantenimiento: Implementar un programa de mantenimiento preventivo robusto y utilizar repuestos originales puede reducir significativamente las fallas del equipo.
- Control Geológico: Realizar estudios geológicos y geomecánicos precisos para seleccionar el método de explotación adecuado.
- Capacitación del Personal: Asegurar que el personal cuente con la capacitación adecuada para operar los equipos correctamente y reportar oportunamente las anomalías.
- Implementación de Sistemas de Casing o entubado: En terrenos inestables, el uso de sistemas de revestimiento ("casing") puede mantener los taladros abiertos por más tiempo, facilitando la carga y reduciendo la necesidad de reperforar.

2.2.4.9. Programa de mantenimiento de los equipos de perforación

Los programas de mantenimiento en minería subterránea buscan asegurar la continuidad operativa y la eficiencia de los equipos de perforación, mediante estrategias de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo. Estas actividades incluyen inspecciones, lubricación, ajustes, reemplazo de componentes y seguimiento de parámetros operativos, con la finalidad de reducir fallas y tiempos improductivos.

Asimismo, la gestión del mantenimiento puede apoyarse en programas de control y registro de equipos, permitiendo realizar el seguimiento del historial de mantenimiento, programación de intervenciones e indicadores de desempeño.

2.2.4.9.1. Tipos de mantenimiento

- Mantenimiento preventivo: Se planifica y ejecuta antes de que ocurra una falla, mediante inspecciones, lubricación, ajustes y reemplazo programado de componentes.
- Mantenimiento predictivo: Se basa en el monitoreo de las condiciones del equipo mediante parámetros como vibración, temperatura, presión y comportamiento de los principales sistemas, permitiendo anticipar posibles fallas.
- Mantenimiento correctivo: Se realiza después de producirse una falla, con la finalidad de reparar el equipo y restablecer sus condiciones normales de operación.

2.2.4.9.2. Componentes clave de un programa de mantenimiento

- Gestión de equipos: Comprende el control y mantenimiento de los equipos de perforación de taladros largos, considerando sus sistemas mecánicos, hidráulicos, eléctricos y de percusión.
- Planificación y programación: Consiste en establecer actividades de mantenimiento de acuerdo con las horas de operación, recomendaciones técnicas y condición del equipo.
- Registro de mantenimiento: Permite llevar el control de intervenciones, fallas, cambio de componentes y horas de funcionamiento de cada equipo.
- Análisis de indicadores: Considera indicadores como disponibilidad mecánica, tiempo de inactividad, frecuencia de fallas y cumplimiento del mantenimiento programado.
- Control preventivo: Busca reducir las paradas no programadas mediante inspecciones periódicas y seguimiento de los principales componentes del equipo.

2.2.4.9.3. Beneficios de una buena gestión de mantenimiento

- Reducción de costos: Disminuye las reparaciones no programadas y el consumo innecesario de repuestos.

- Mayor disponibilidad: Incrementa el tiempo en que los equipos de perforación se encuentran disponibles para las operaciones.
- Mayor continuidad operacional: Reduce las interrupciones durante la perforación de taladros largos.
- Mayor vida útil: Permite conservar en mejores condiciones los componentes y sistemas del equipo.

CAPÍTULO III:

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de tipo aplicada, debido a que busca optimizar las operaciones de perforación mediante la implementación de brocas de 76 mm en el tajo 777 del Nv -175 de la Compañía Minera Condestable. Según Hernández Sampieri et al. (2014), la investigación aplicada utiliza el conocimiento científico para resolver problemas específicos, criterio que se relaciona con el propósito técnico y operativo del presente estudio.

3.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de nivel descriptivo, correlacional y explicativo. Es descriptiva porque caracteriza el comportamiento técnico y económico de las brocas de 64 mm y 76 mm; correlacional porque analiza la relación entre el diámetro de broca y el desempeño de perforación; y explicativa porque evalúa la influencia de las brocas de 76 mm y de la perforadora Raptor 55-2R en la reducción del tiempo de perforación y costos unitarios. Según Hernández

Sampieri et al. (2014), estos niveles permiten describir, relacionar y explicar el comportamiento de las variables de estudio.

3.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación presenta un diseño no experimental de corte transversal comparativo, debido a que las variables fueron evaluadas en condiciones reales de operación sin manipulación deliberada. Según Hernández Sampieri et al. (2014), el diseño no experimental analiza los fenómenos en su contexto natural, criterio aplicado en la comparación técnica y económica entre brocas de 64 mm y 76 mm.

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.4.1. Población

La población de la presente investigación está conformada por todas las operaciones de perforación de taladros largos desarrolladas en la Unidad Minera Condestable, incluyendo los registros técnicos y operacionales asociados al proceso de perforación.

3.4.2. Muestra

La muestra estuvo conformada por los registros operacionales de perforación correspondientes al tajo 777 del Nv -175 de la Unidad Minera Condestable, considerando la aplicación de brocas de 64 mm y 76 mm para el análisis comparativo del rendimiento de perforación, tiempo operativo y costos unitarios.

3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Comprende la recopilación de información geológica, geo mecánica y operaciones unitarias de la Unidad Minera Condestable, a través de varias técnicas que son:

3.5.1. Técnicas de recolección de datos

Las principales técnicas que se utilizó son:

- Técnicas documentarias (informes y evaluaciones técnicas)
- Observación directa y toma de datos.

3.5.2. Instrumentos de recolección de datos

Los principales instrumentos que se utilizó son:

- Fotografías
- Fichas de mantenimiento de aceros de perforación (aguzado de brocas).
- Reportes diarios/mensuales de desgaste/reemplazo/control de aceros de perforación.

3.6. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

La información recopilada durante la investigación fue organizada, depurada y sistematizada con la finalidad de facilitar su análisis e interpretación. Para ello, se evaluaron los registros operativos, parámetros de perforación, indicadores de productividad y demás datos obtenidos durante el desarrollo del estudio.

Posteriormente, los datos fueron procesados mediante herramientas informáticas que permitieron elaborar tablas, gráficos y cuadros comparativos, contribuyendo a la evaluación de las variables analizadas y a la obtención de resultados confiables para la investigación.

Los programas utilizados para el procesamiento y análisis de la información fueron los siguientes:

- Microsoft Excel.
- Microsoft Word.
- AutoCAD
- Autodesk Civil 3D
- WipFrag

CAPITULO IV:

ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DE BROCAS DE PERFORACIÓN DE 76 MM EN EL TAJO 777 DEL NIVEL-175

4.1. MAPEO GEOMECÁNICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1.1. Datos de la zona de estudio

- Nombre del tajeo: TJ777
- Azimut: 77º
- Nivel: - 175
- Densidad de la roca: 2.7 ton/m3.
- Sección de labor: 4 metros x 4.5 metos

4.1.2. Datos tomados con el martillo de Schmidt

Las condiciones geomecánicas del macizo rocoso del TJ 777 fueron evaluadas mediante ensayos de rebote con martillo de Schmidt, con la finalidad de estimar la resistencia de la roca y determinar la calidad geomecánica de la zona de estudio para las operaciones de perforación de taladros largos. A partir de las lecturas obtenidas se realizó el cálculo de la resistencia UCS y la

clasificación RMR del macizo rocoso, cuyos resultados se presentan en la Figura 20, Figura 21 y Tabla 5.

Figura 20

Rebotes con el martillo Schmidt del Tajeo

SUPERIOR												
Lectura de rebotes con el martillo de Schmidt												
43.5	40	41	45	48	44	45.5	42	39.5	42	41	40.5	47

Fuente: Área de Geomecánica U.M. Condestable.

Calculo mediante las pruebas del martillo de Schmidt. Eliminando los 3 valores más bajos, podemos determinar el UCS.

Figura 21

Rebotes con el martillo Schmidt del Tajeo

SUPERIOR											
Lectura de rebotes con el martillo de Schmidt										PROMEDIO	UCS (Mpa)
43.5	41	45	48	44	45.5	42	42	41	47	43.9	107.12

Fuente: Área de Geomecánica U.M. Condestable.

Tabla 5

Resumen de la calidad RMR de la masa rocosa Tajeo 777 Nivel -175

LITOLOGIA	RMR básico	RMR corregido	RMR' Cond secas	CALIDAD
Granodiorita	68.98	56.98	73.98	REGULAR

Fuente: Área de Geomecánica U.M. Condestable.

4.2. PROGRAMACIÓN DE PRODUCCIÓN DEL TAJO 777 DEL NIVEL-175

La programación de las labores de producción constituye una actividad importante dentro de la gestión de una operación minera, debido a que permite organizar de manera secuencial las actividades necesarias para cumplir los objetivos establecidos en el planeamiento. En este sentido,

la programación representa una etapa posterior al proceso de planificación y sirve como base para la ejecución de las operaciones.

Mediante la programación de producción se establecen las fechas de inicio y culminación de cada tajo, el tipo de actividad a desarrollar, los equipos requeridos para la operación y el personal encargado de ejecutar los trabajos. Una adecuada programación genera diversos beneficios para la operación minera, entre los cuales destacan:

- Cumplimiento de las actividades dentro de los plazos establecidos.
- Determinación de los recursos necesarios, tales como mano de obra, maquinaria y equipos.
- Reducción de costos operativos mediante una adecuada organización y control de las labores.

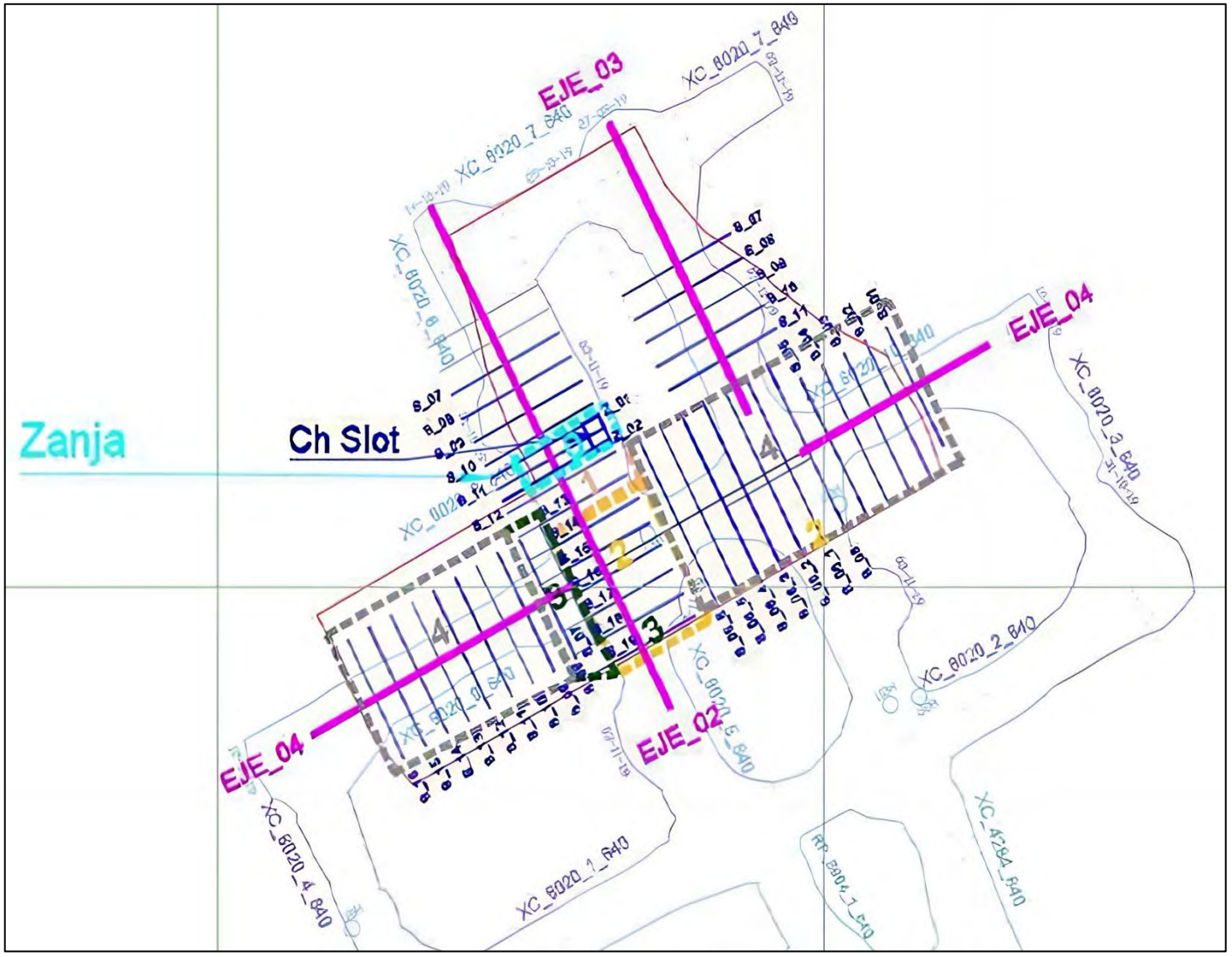
4.3. APLICACIÓN DE TALADROS LARGOS

En la aplicación de taladros largos, el diseño de perforación considera la distribución de ejes, la geometría del tajeo y la disposición de los taladros en abanico desde los subniveles de producción. Para organizar la perforación y la posterior voladura, el Tajo 777 se divide en secciones consecutivas a lo largo del cuerpo mineralizado. Cada sección corresponde a una posición de perforación desde la cual se ejecuta un conjunto de taladros largos en abanico, de acuerdo con la geometría del tajeo y los parámetros establecidos en la malla.

Esta distribución permite programar de manera secuencial las actividades de perforación y voladura, evitando que todo el tajeo sea disparado en un solo evento. En las Figuras 22 y 23 se presentan los planos de diseño donde se observa la ubicación de los ejes, la distribución de las secciones y la geometría de los taladros largos considerados para la explotación mediante Sublevel Stoping.

Figura 22

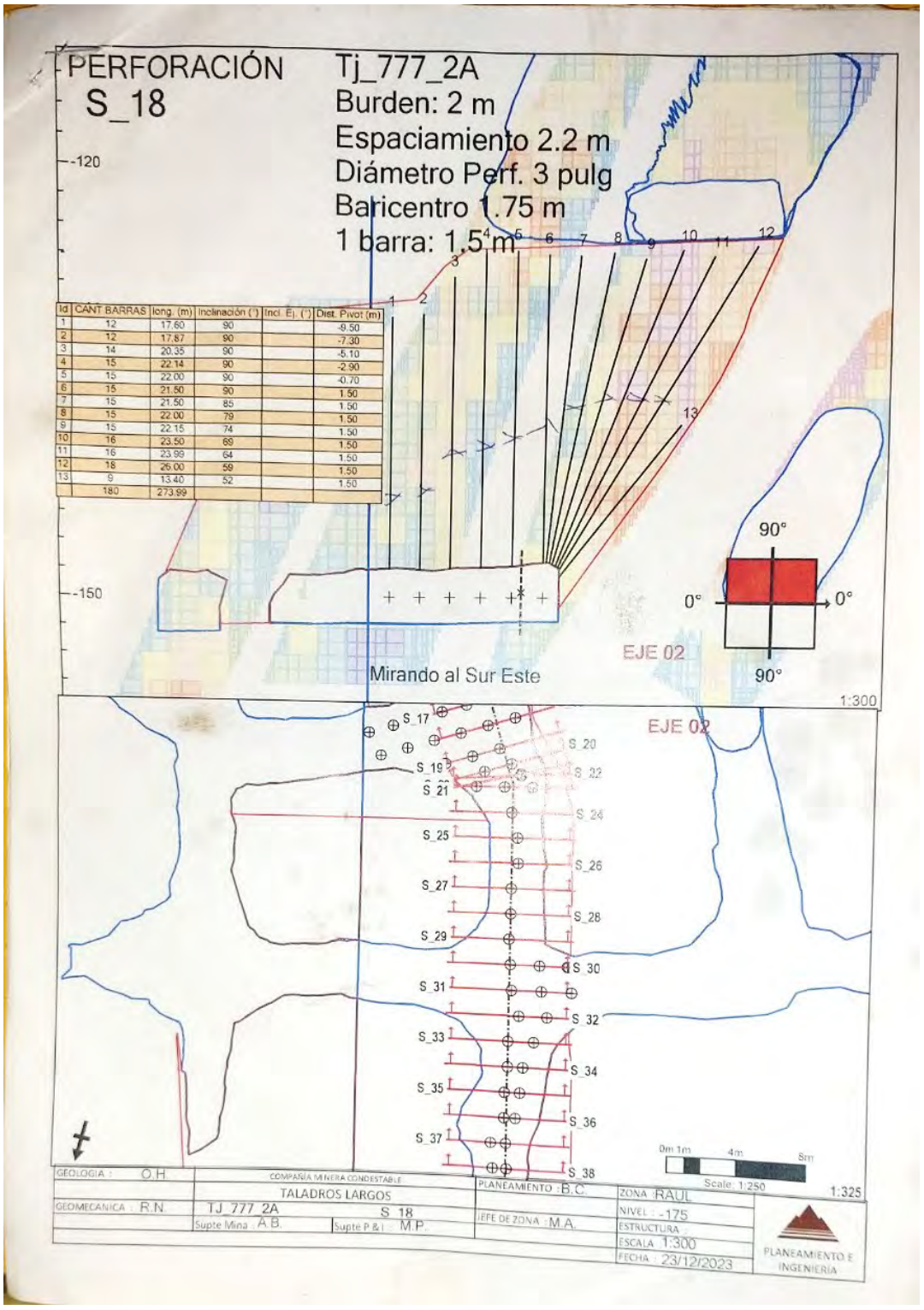
Plano de diseño de malla de perforación y ubicación de ejes en la labor minera



Fuente: Departamento de Planeamiento U.M. Condestable

Figura 23

Plano de diseño de taladros largos y geometría del TJ 777 (Nivel – 175)



Fuente: Departamento de Planeamiento U.M. Condestable

4.4. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES OPERATIVAS INICIALES

Las perforaciones con brocas de 64mm la vienen realizando los equipos de Epiroc S7D, son relativamente eficientes desde el aspecto de perforación, pero desde la ampliación de la capacidad de planta su ratio viene siendo ineficiente para satisfacer dicha demanda.

4.4.1. Condiciones operativas iniciales

El equipo seleccionado para los trabajos de perforación de las labores del TJ 777 en el NV – 175 es el equipo Simba S7D de Epiroc (Véase en la Figura 24).

Figura 24

Simba S7D equipo de perforación de taladros largos

Fuente: Propia

4.4.2. Parámetros operativos de la línea base

Con la finalidad de establecer la condición operacional previa a la implementación de la broca de 76 mm, se recopilaron los principales parámetros de perforación correspondientes a la labor TJ 777 del nivel −175. Estos parámetros representan la configuración utilizada durante la operación de referencia y constituyen la base para la posterior evaluación técnica y económica de la propuesta de mejora.

Tabla 6

Parámetros operativos de la línea base en la labor TJ 777 del nivel −175

Parámetro	Valor	Unidad
Equipo de perforación	Simba S7D	-
Diámetro de perforación	64	mm
Burden	1.80	m
Espaciamiento	2.00	m
Longitud total perforada	338.54	m
Número de taladros	27	taladros
Labor evaluada	TJ 777	-
Nivel de explotación	−175 / −195	m
Fecha de referencia	21/05/2024	-

Fuente: Elaboración propia.

4.4.3. Descripción de la voladura por secciones en el Tajo 777

En el Tajo 777, la longitud de disparo de 8 m no representa un avance lineal como ocurre en la voladura de una galería. Este valor corresponde a la longitud del tajeo que se considera para cada evento de voladura, comprendiendo un conjunto de secciones previamente perforadas mediante taladros largos en abanico.

Las secciones se encuentran distribuidas consecutivamente a lo largo del tajeo. Para determinar cuántas secciones comprende una longitud de voladura de 8 m, se considera

principalmente el burden entre secciones, mientras que el espaciamiento corresponde a la separación entre los taladros que conforman cada sección.

En la línea base con brocas de 64 mm se utilizó un burden de 1.80 m, por lo que una longitud de disparo de 8 m comprende aproximadamente:

8.00 m / 1.80 m = 4.44 ≈ 4 secciones

Para la propuesta con brocas de 76 mm, el burden se incrementa a 2.00 m, obteniéndose:

8.00 m / 2.00 m = 4 secciones

Por lo tanto, para efectos del análisis se consideran cuatro secciones por evento de voladura. Cada sección está constituida por su respectivo abanico de taladros, los cuales son cargados y posteriormente detonados de acuerdo con la secuencia de voladura establecida para el Tajo 777.

4.4.4. Indicadores de rendimiento operacional de la línea base

A partir de la configuración operacional presentada anteriormente, se determinaron los principales indicadores de rendimiento asociados a la ejecución de los taladros largos en la labor TJ 777 del nivel −175. Para ello, se consideró una longitud de disparo de 8 m y un burden de 1.80 m, obteniéndose aproximadamente cuatro secciones de explotación. Estos indicadores permiten cuantificar el volumen de perforación requerido, el tiempo de ejecución del ciclo y la productividad alcanzada bajo las condiciones operativas de referencia.

Tabla 7

Indicadores de rendimiento operacional de la línea base en la labor TJ 777 del nivel −175

Indicador	Valor	Unidad
Longitud de disparo	8.00	m
Burden aplicado	1.80	m
Número de secciones evaluadas	4	secciones
Longitud perforada por sección	338.54	m
Longitud total perforada	1,354.16	m
Número de taladros por sección	27	taladros
Número total de taladros	108	taladros
Metros perforados por guardia	172.95	m/guardia
Número de guardias requeridas	8	guardias
Tiempo total de ejecución	64	h

Fuente: Elaboración propia.

4.4.5. Capacidad de producción de la línea base

Con la finalidad de cuantificar la capacidad productiva de la operación bajo las condiciones iniciales de perforación, se estimó el volumen y tonelaje generado por cada ciclo de explotación. Para ello, se consideraron las dimensiones del tajeo evaluado, la longitud de disparo aplicada y la densidad promedio del macizo rocoso correspondiente a la zona de estudio.

Tabla 8

Indicadores de producción de la línea base en la labor TJ 777 del nivel −175

Indicador	Valor	Unidad
Longitud de disparo	8.00	m
Ancho promedio del tajo	19.56	m
Altura promedio del tajeo	21.45	m
Volumen estimado por disparo	3,357.50	m^3
Densidad de roca	2.70	TM/m^3
Tonelaje estimado por disparo	9,065.25	TM
Longitud total perforada	1,354.16	m
Toneladas por metro perforado	6.69	TM/m

Fuente: Elaboración propia.

4.4.6. Costos operacionales de la línea base

Con la finalidad de evaluar el desempeño económico de la operación bajo las condiciones iniciales de perforación, se determinaron los costos asociados a accesorios, equipo y mano de obra. Asimismo, se consideraron los imprevistos y gastos generales para estimar el costo total de perforación y el costo unitario por tonelada producida.

Tabla 9

Costo consolidado de perforación de la línea base en la labor TJ 777 del nivel −175

Costo asociado a la perforación	Costo (US$)	P.U. (US$/TM)
Accesorios de perforación	2,010.93	0.222
Costos por equipo	4,739.35	0.523
Costos por mano de obra	873.75	0.096
Subtotal	**7,624.03**	**0.841**
Imprevistos (7%)	533.68	0.059
Gastos generales (15%)	1,143.60	0.126
Costo total de perforación	**9,301.31**	**1.026**

Fuente: Elaboración propia

Se observa que el costo asociado al equipo de perforación representa la mayor participación dentro de la estructura de costos, seguido por los accesorios de perforación y la mano de obra. Bajo estas condiciones operativas, el costo unitario alcanzó 1.03 US$/TM, constituyendo la referencia económica para la evaluación de la propuesta de mejora.

4.5. ANÁLISIS DE EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA BROCA DE 76MM

4.5.1. Asignación de equipos de perforación del tajo 777 del nivel-175 con broca de 76mm

Para la investigación se utiliza el monitoreo de 6 subsidencias encontradas en las perforaciones de taladros largos en los tajos del NV -175 de la Compañía Minera Condestable.

Tabla 10

Metros perforados de Análisis

AÑO	SEMANA DEL AÑO	MTS de Perforación
2024	52	727.5
2024	53	2502.5
2025	1	813
2025	2	1539
2025	3	1990.5
2025	9	318.5

Fuente: Elaboración Propia

4.5.2. Programación de operación del equipo de perforación con brocas de 76 mm en la perforación del tajo 777 del nivel-175

La programación de equipos de perforación de taladros largos en minería subterránea, implica planificar y coordinar las operaciones de perforación para lograr la extracción de mineral de manera eficiente y segura.

La planificación debe contemplar diversos factores como el tipo de roca, la geología del yacimiento, la seguridad, objetivos de producción y el equipo a disponer; es en este último aspecto que para los trabajos de perforación de tajos del NV -175 se considerara el uso del equipo RAPTOR N° 9 de Compañía Minera Condestable.

Figura 25

Operación de equipo de perforación RAPTOR 55-2R en labores subterráneas del Nivel –175

Fuente: Propia

Así mismo algunos aspectos a considerar para una buena programación son:

- Análisis de la Malla de Perforación
- Selección del equipo adecuado
- Planificación de la perforación
- Programación de mantenimiento

- Programación de la logística
- Seguridad

4.5.2.1. Diseño de malla de perforación

La malla de perforación corresponde a la distribución de los taladros dentro del área de trabajo, definiendo parámetros como su ubicación, orientación y dimensiones, los cuales influyen directamente en la fragmentación obtenida durante la voladura. Para el diseño de la malla se consideraron los siguientes factores:

- **Método de explotación:** El sistema de minado empleado condiciona la disposición y configuración de la malla de perforación.
- **Equipo de perforación:** Las características y capacidades operativas del equipo influyen en la longitud, orientación y distribución de los taladros.
- **Explosivos:** El tipo y la cantidad de explosivo utilizados determinan la energía aplicada al macizo rocoso y el nivel de fragmentación esperado.
- **Producción requerida:** Los objetivos de producción y las condiciones de operación son considerados para optimizar el diseño de la malla.
- **Calidad de roca:** Evaluada mediante los índices RMR y RQD. Para este estudio se obtuvo un RMR de 57 y un RQD aproximado de 50 %, valores que corresponden a una roca de calidad regular y que sirven como referencia para definir parámetros como el burden y el espaciamiento.

De igual manera se consideran algunos elementos clave de una malla como son:

- **Diámetro de los taladros:** Tamaño del agujero a perforar.
- **Burden:** Distancia entre filas de taladros.
- **Espaciamiento:** Distancia entre taladros de una misma fila.

4.5.2.1.1. Cálculo del burden máximo con el modelo de Langefors

Para el cálculo de burden se tiene:

$$\text{Bmax} = \left(\frac{D}{33}\right) * \sqrt{\frac{\rho_e * PRP}{c * f * \left(\frac{S}{B}\right)}}$$

Donde:

$\text{Bmax} = \text{burden máximo (m)}$

$\text{D} = \text{diámetro de barreno (mm)}$

$\rho\text{e} = \text{densidad del explosivo } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)$

$\text{PRP} = \text{potencia relativa en peso del explosivo}$

$\text{c} = \text{constante de roca}$

$\text{f} = \text{factor de fijación}$

$\text{S/B} = \text{relación espaciamiento/burden}$

Para roca dura se toma como valor base c=0.40; dado que el Burden calculado se encuentra en el intervalo $1.4 \leq B \leq 15$ m, se aplica la corrección:

$$c = 0.40 + 0.40$$

$$c = 0.8$$

Con los datos del caso de estudio:

D = 76 mm

$\rho e = 0.85$ g/cm³

PRP = 1.00

c = 0.8

f = 0.90

S/B = 1.25

Reemplazando en la expresión:

$$Bmax = \left(\frac{76}{33}\right) * \sqrt{\frac{0.85 * 1.00}{0.8 * 0.90 * 1.25}}$$

$$Bmax = 2.303 * \sqrt{\frac{0.85}{0.9}}$$

$$Bmax = 2.303 * \sqrt{0.0.944}$$

$$Bmax = 2.303 * 0.972$$

$$B_{max} = 2.24\, m$$

Calculamos el Burden Práctico:

Bmax = 2.24 m

e' = 0.10 m

db = 0.01 m/m

H = 21.45 m

$$B_{practico} = B_{max} - e' - d_b * H$$

$$B_{practico} = 2.24 - 0.10 - 0.010 * 21.45$$

$$B_{practico} = 2.24 - 0.10 - 0.2145$$

$$\boldsymbol{B_{practico} = 1.93\, m \approx 2.0\, m}$$

4.5.2.1.2. Cálculo del espaciamiento con el modelo matemático de López Jimeno

S = espaciamiento (m)

B = burden práctico (m)

a = ángulo del barreno respecto a la vertical (°)

$$S = 1.15 * B * cos(a)$$

B = 2 m (Burden práctico)

a = 15°

$$S = 1.15 * 2.0 * cos(15°)$$

$$S = 1.15 * 2.0 * 0.966$$

$$\boldsymbol{S = 2.199\, m \approx 2.2\, m}$$

Tabla 11

Parámetros Utilizados en el Diseño de Malla con Broca de 76 mm

Concepto	Símbolo	Valor	Unidad	Descripción
Diámetro de la broca	D	76	mm	Taladro largo de producción
Densidad del explosivo	ρe	0.85	g/cm³	Explosivo de carga de columna
Potencia relativa en peso	PRP	1.00	–	Referido a ANFO
Constante de roca corregida	c	0.80	–	Roca regular competente (RMR ≈ 57)
Factor de fijación	f	0.90	–	Considera inclinación del barreno
Relación espaciamiento/burden	S/B	1.25	–	Geometría inicial de malla
Altura de tajeo (longitud perforada)	H	21.45	m	Longitud real del taladro
Error de emboquille	e'	0.10	m	Variación inicial al collar
Desvío del barreno	db	0.010	m/m	Deriva acumulada en taladros largos
Ángulo de perforación	a	15°	grados	Inclinación respecto a la vertical
Burden máximo	Bmax	2.24	m	Resultado del modelo de Langefors
Burden práctico	Bpráctico	1.93	m	Corregido por desviación y error de emboquille
Espaciamiento	S	2.20	m	Calculado con modelo de López Jimeno

Fuente: Elaboración Propia

4.5.2.1.3. Mallas de perforación broca 76mm

El plano de perforación resultante representa la distribución final de los taladros largos para la aplicación de brocas de 76 mm en el Tajo 777, constituyendo la base para la evaluación del desempeño operativo, el control de la perforación y el análisis de los resultados obtenidos durante la etapa de explotación. (Véase Figura 32).

Figura 26

Plano de diseño de taladros largos del Tajo 777 – Sección SE21 (Nivel –175 / –205), perforación con broca de 76 mm

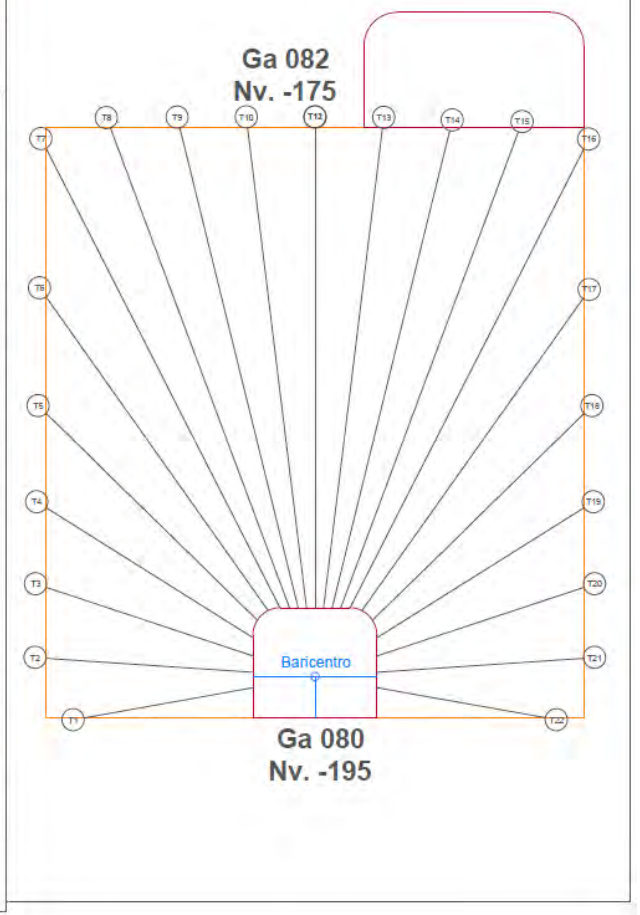
Burden	2.0m : SE22	Baricentro	1.5 m	Long. Perf. (m)	291.09 m
Azimut	324.9°	Espaciamiento	2.2m	N° Taladros	22 taladros
ANFO (Kg)	-	Diam. Perf.	76mm	Ind. Perf. (TM/m-perf)	-

Sección	Labor	Equipo	Fecha	Sist. de Referencia
SE21	TJ 777	RAP 9	11/07/2024	

Elaborado por:
Aprobado por:
Vista:
Mirando hacia el slot
Nivel:
(-175) ; (-195) Tj 777
N° Plano:
SE-21
Esc:. 1:20
CIA. M. CONDESTABLE
SOUTHERN PEAKS MINING

RP: TJ777_SE2_76mm_TL(+)

N° Taladro	Ángulo (°)	Longitud (m)	Observaciones
T1	-10.15° I	6.25	
T2	3.9° I	7.55	
T3	18.38° I	7.93	
T4	32.13° I	8.89	
T5	44.38° I	10.76	
T6	54.69° I	13.99	
T7	63.02° I	18.75	
T8	69.54° I	18.62	
T9	76.15° I	17.97	
T10	83° I	17.58	
T11	90° D	17.45	
T12	90° D	17.45	
T13	82.99° D	17.57	
T14	76.15° D	17.87	
T15	69.54° D	18.47	
T16	63.02° D	18.73	
T17	54.69° D	13.91	
T18	44.38° D	10.76	
T19	32.13° D	8.89	
T20	18.37° D	7.93	
T21	3.91° D	7.53	
T22	-10.15° D	6.23	
TOTAL		291.09	



Fuente: Departamento de Planeamiento U.M. Condestable.

A partir de los registros obtenidos durante la perforación con broca de 76 mm se determinaron los principales parámetros operativos y de rendimiento asociados a los taladros largos. Los resultados reflejan el comportamiento del equipo bajo las condiciones de diseño establecidas para la nueva malla de perforación, permitiendo evaluar la productividad alcanzada, los metros perforados y el tonelaje generado por disparo. La Tabla 12 resume los indicadores operativos obtenidos.

Tabla 12

Parámetros operativos y de rendimiento con broca de 76 mm

Descripción	Valor	Unidad
Burden (76 mm)	2.00	m
Espaciamiento (76 mm)	2.20	m
Long. de Disparo	8.00	m
Secciones por disparo	4	secciones
Metros perforados por sección	291.09	m.p.
Metros perforados por disparo	1164.36	m.p.
N° Taladros por sección	22	taladros
N° Total de taladros por disparo	88	taladros
Rendimiento de perforación	189.2	m.p./Guardia
Tiempo de ejecución	49.2	Hrs
Horas por guardia	8	Hrs/Guardia
N° de guardias	6.2	Guardias
TM producidos	9,520	TM

Fuente: Elaboración propia

4.5.2.2. Velocidad de perforación con broca de 76mm

A partir de los registros obtenidos durante las pruebas de campo, se evaluó el comportamiento de la velocidad de perforación a lo largo del taladro utilizando brocas de 76 mm. La información recopilada permite identificar las variaciones del rendimiento durante la perforación y analizar su relación con las condiciones del macizo rocoso. Los resultados registrados se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13

Registro de tiempos de perforación en taladros largos utilizando broca de 76 mm

Barra	Inicial	Final	Tiempo Perf.	Tiempo Movim.	Pies Perf.	Acumulado
1	00:00:00	00:01:13	00:01:13	00:00:37	5	00:01:13
2	00:01:50	00:03:09	00:01:19	00:00:32	5	00:02:32
3	00:03:41	00:05:00	00:01:18	00:00:33	5	00:03:50
4	00:05:33	00:06:51	00:01:33	00:00:32	5	00:05:23
5	00:07:23	00:08:56	00:01:17	00:00:35	5	00:06:40
6	00:09:31	00:10:48	00:01:16	00:00:39	5	00:07:56
7	00:11:27	00:12:43	00:01:23	00:00:36	5	00:09:19
8	00:13:19	00:14:42	00:01:24	00:00:42	5	00:10:43
9	00:15:24	00:16:48	00:01:30	00:00:33	5	00:12:13
10	00:17:21	00:18:51	00:01:13	00:00:34	5	00:13:26
11	00:19:25	00:20:38	00:01:20	00:00:37	5	00:14:46
12	00:21:15	00:22:35	00:01:22	00:00:35	5	00:16:08
13	00:23:10	00:24:32	00:01:15	00:00:33	5	00:17:23
14	00:25:05	00:26:20	00:01:13	00:00:34	5	00:18:36
15	00:26:54	00:28:07	00:01:15	-	5	00:19:51
		Promedio	**00:01:19**	**00:00:35**		

Fuente: Elaboración Propia

De esta manera podemos hallar la velocidad de Perforación Empleada en la Perforación mediante el siguiente calculo:

$$\text{Pies perforados} = 75 \text{ ft}$$

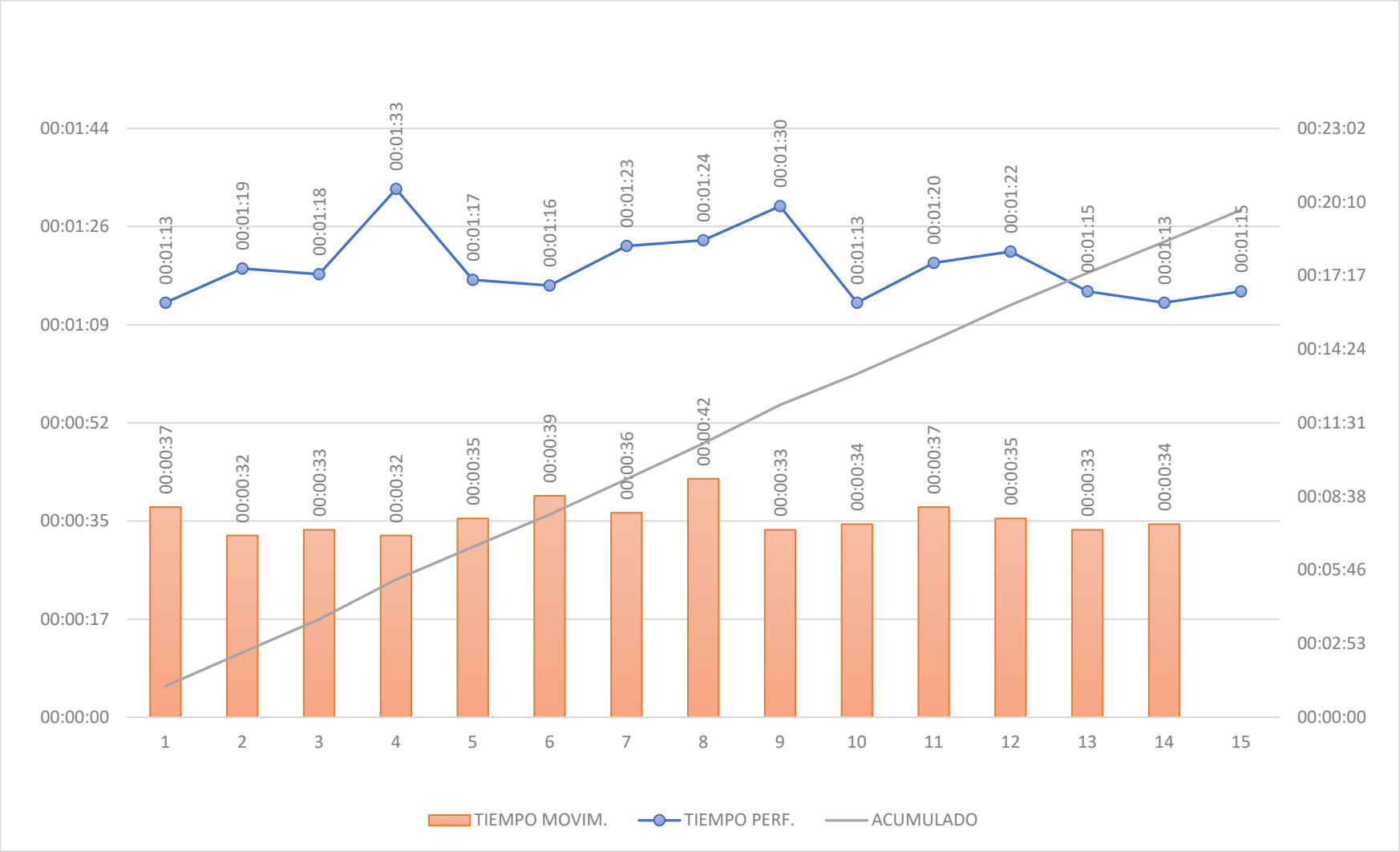
$$\text{Metros perforados} = 22.86 \text{ m (equivalente en metros)}$$

$$\text{Tiempo Total} = 19 \text{ minutos y } 51 \text{ segundos} = 19.85 \text{ min}$$

$$\text{Velocidad de Perforación } \left(\frac{\text{m}}{\text{min}}\right) = \frac{22.86 \text{ m}}{19.85 \text{ m}} = 1.17 \text{ m/min}$$

Figura 27

Comparación del tiempo de movimiento, tiempo de perforación y tiempo acumulado 76mm



Fuente: Elaboración propia

Figura 28

Barras de perforación con broca instalada en interior mina

Fuente: Propia

Figura 29

Brocas de perforación desgastadas utilizadas

Fuente: Propia

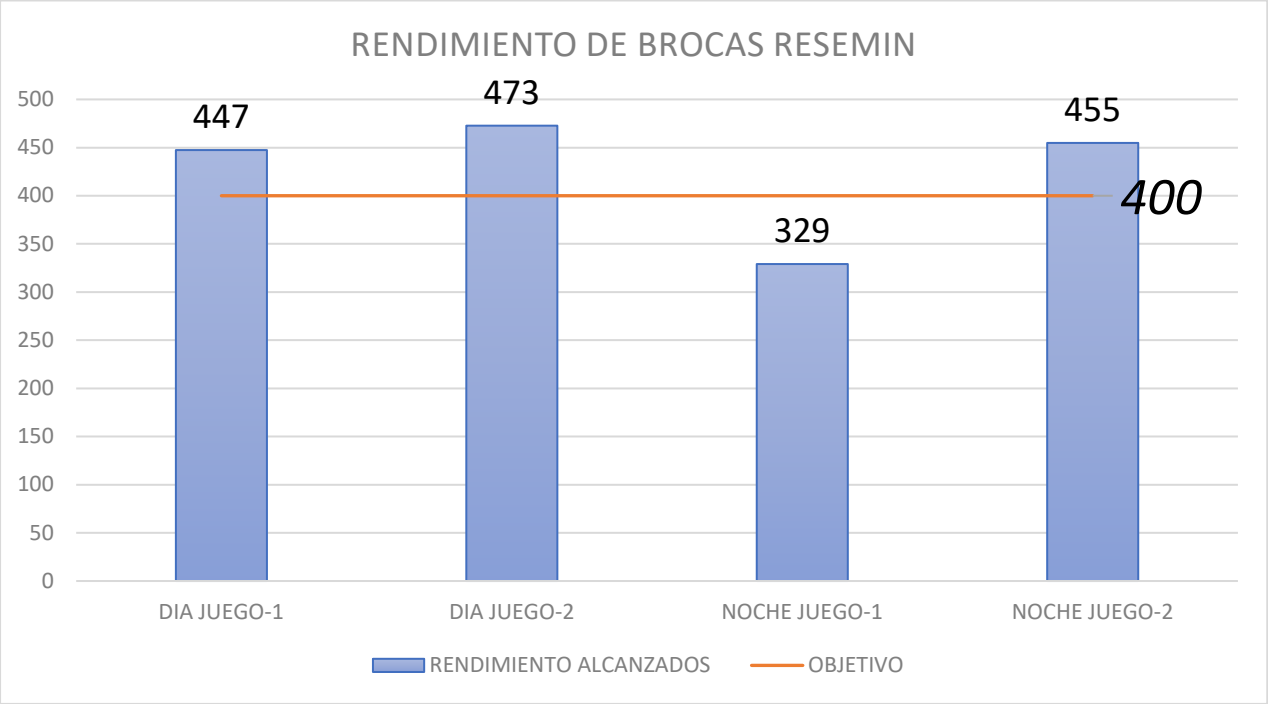
Respecto al afilado de brocas, se debe mencionar que todas son afiladas, más se pudo observar que algunos insertos de las brocas no presentan un correcto afilado, debido probablemente al uso de copas de afilado con desgaste, por lo que se recomienda que para brocas nuevas las copas también deben de ser nuevas o en todo caso estar en muy buenas condiciones, de no ser el caso se genera un desgaste del inserto.

4.5.3. Cálculo de rendimiento de brocas

Para la prueba de rendimientos de las brocas se procedió a proveer de juegos de 6 unidades de brocas por operador, las mismas que al final de la guardia eran devueltas al personal de afilado para su posterior restauración. (Véase en la Figura 30).

Figura 30

Rendimiento de las brocas de 76mm



Fuente: Elaboración propia

4.5.3.1. Vida útil estadística

Para el cálculo de los rendimientos de las brocas de perforación, se realizaron pruebas en las distintas áreas del nivel – 175 de la Compañía Minera Condestable, para ello se usaron varios juegos de brocas de las que se seleccionaron 2 juegos de 6 brocas cada juego, registrándose los metros perforados por broca y su final acumulado luego de todo el proceso de seguimiento.

El objetivo de la prueba es evaluar y obtener los resultados de los rendimientos de las bocas de 76mm en las diversas operaciones de la mina, las mismas que perforan las brocas de 64mm. Esta metodología permitió obtener datos precisos y confiables sobre la vida útil y el rendimiento de las brocas de 76mm, en las labores de perforación del Nv – 175 de la Compañía Minera Condestable (Véase en la Tablas 14 y 15, Figuras 31, 32, 33 y 34).

Tabla 14

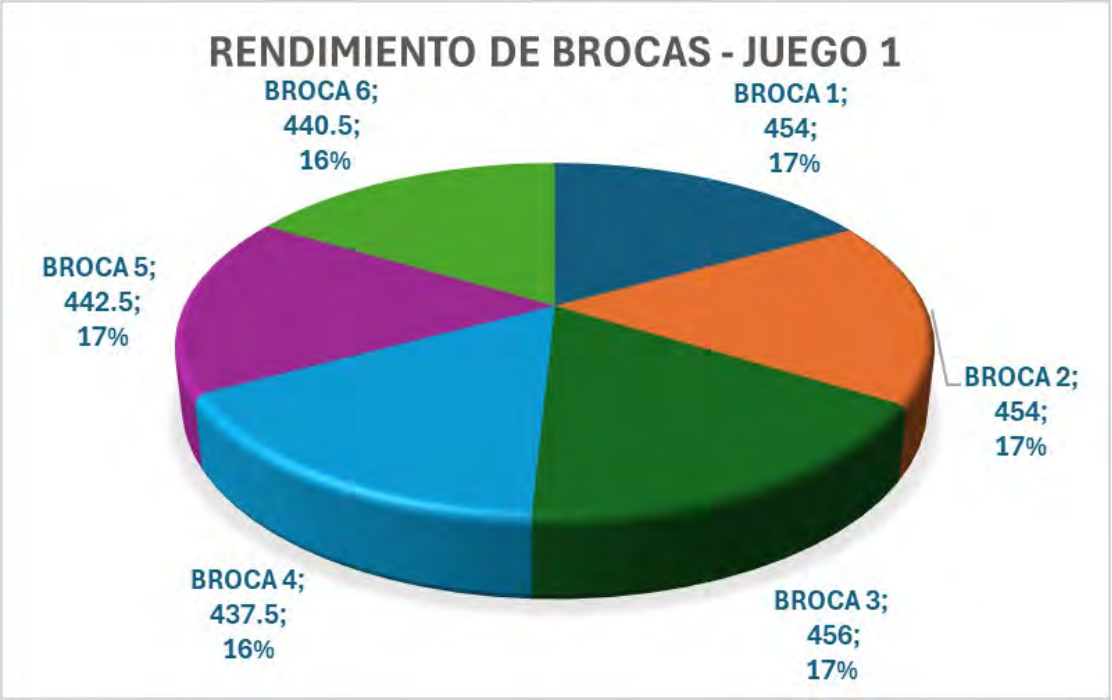
Registro de rendimiento diario de brocas utilizadas en el Juego 1 (76mm)

FECHA	Metros Perforados Totales	BROCA 1	BROCA 2	BROCA 3	BROCA 4	BROCA 5	BROCA 6
22/11/2023	**238.5**	45	40.5	38	33	41	41
23/11/2023	**171**	30	28	24	28	20	41
24/11/2023	**87**	20	15	12	15	25	0
25/11/2023	**121**	25	31	11	24		30
26/11/2023	**92**		30		32	30	
27/11/2023	**114.5**	22	25	41	15.5	11	
28/11/2023	**0**						
29/11/2023	**0**						
30/11/2023	**108**	27		30		20	31
1/12/2023	**237.5**	41	40	42	41	41	32.5
2/12/2023	**159**	27	28	30	31	43	
3/12/2023	**255**	43	42	42	42	43	43
4/12/2023	**147**	24	26	24	25	27	21
5/12/2023	**0**						
6/12/2023	**164**	23	28	25	24	28	36
7/12/2023	**0**						
8/12/2023	**0**						
9/12/2023	**214**	38	19	39	40	41	37
10/12/2023	**90**	24		31		11	24
11/12/2023	**102**		15	16	28	14	29
12/12/2023	**144**	30	31	15	25	12	31
13/12/2023	**21**						21
14/12/2023	**196.5**	35	35	36	34	35.5	23
15/12/2023	**0**						
16/12/2023	**0**						
17/12/2023	**0**						
18/12/2023	**0**						
19/12/2023	**0**						
20/12/2023	**22.5**		22.5				
Metros Perf. por Broca		**454**	**454**	**456**	**437.5**	**442.5**	**440.5**

Fuente: Elaboración Propia

Figura 31

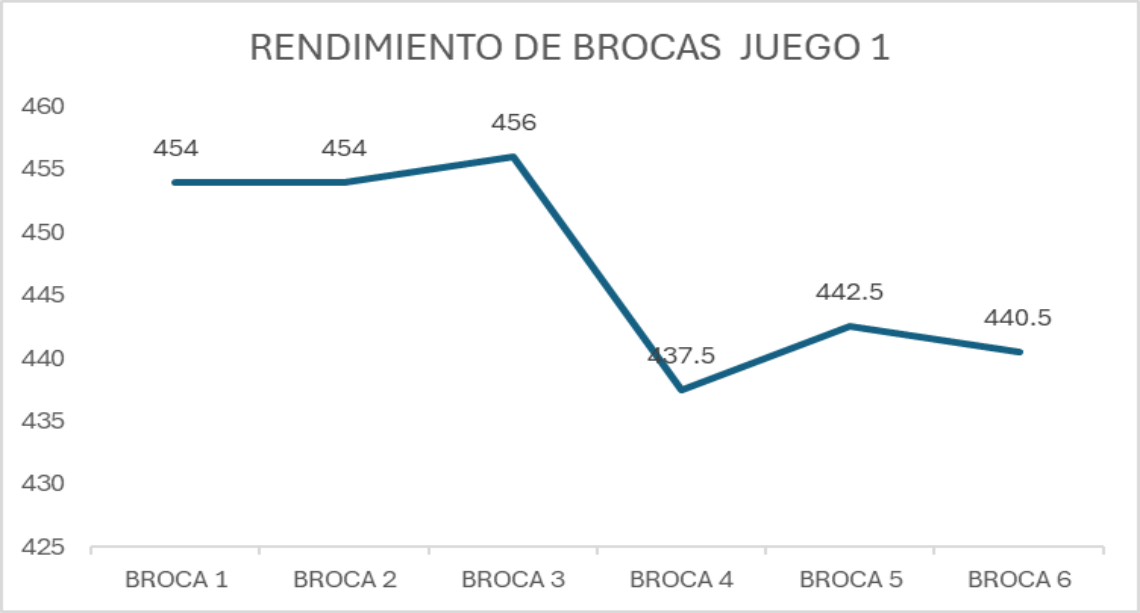
Distribución del rendimiento de brocas en el Juego 1 (76mm)



Fuente: Elaboración Propia

Figura 32

Rendimiento individual de brocas utilizadas en el Juego 1 (76mm)



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 15

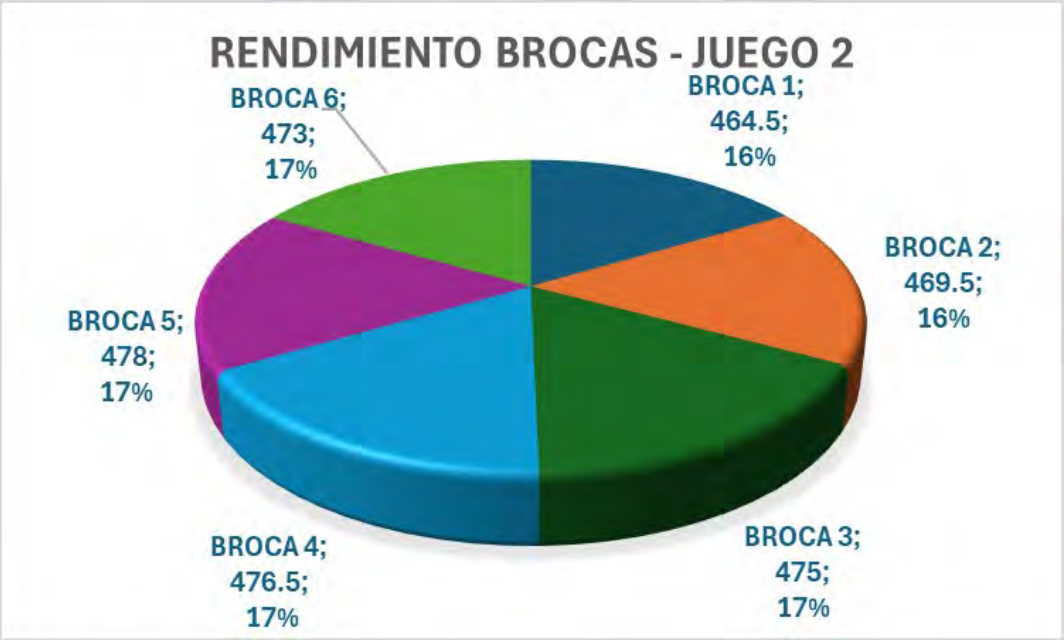
Registro de rendimiento diario de brocas utilizadas en el Juego 2 (76mm)

FECHA	Metros Perforados Totales	BROCA 1	BROCA 2	BROCA 3	BROCA 4	BROCA 5	BROCA 6
21/12/2023	**36**	18	18				
22/12/2023	**234**	51	34	35	37	38	39
23/12/2023	**157**		20	34	33	35	35
24/12/2023	**137**	24	25	26	27	25	10
25/12/2023	**0**						
26/12/2023	**206.5**	41	40	39	39.5	25	22
27/12/2023	**168**	26	27	29	28	29	29
28/12/2023	**250**	42.5	43	41	40.5	41	42
29/12/2023	**235**	39.5	38	41.5	40	41	35
30/12/2023	**115.5**	24	25	27	21	18.5	
31/12/2023	**130.5**	14.5	21	23	22	24	26
1/01/2024	**121**	21	10	25	23	22	20
2/01/2024	**143**		23	33	27	29	31
3/01/2024	**155**	32	34		29	27	33
4/01/2024	**157.5**		32.5	30	31	29.5	34.5
5/01/2024	**70**	23				22.5	24.5
6/01/2024	**60**	22.5		14.5			23
7/01/2024	**180**	30	29	27.5	31	29.5	33
8/01/2024	**180**	34	31	31.5	30.5	27	26
9/01/2024	**100.5**	21.5	19	18	17	15	10
Metros Perf. por Broca		**464.5**	**469.5**	**475**	**476.5**	**478**	**473**

Fuente: Elaboración Propia

Figura 33

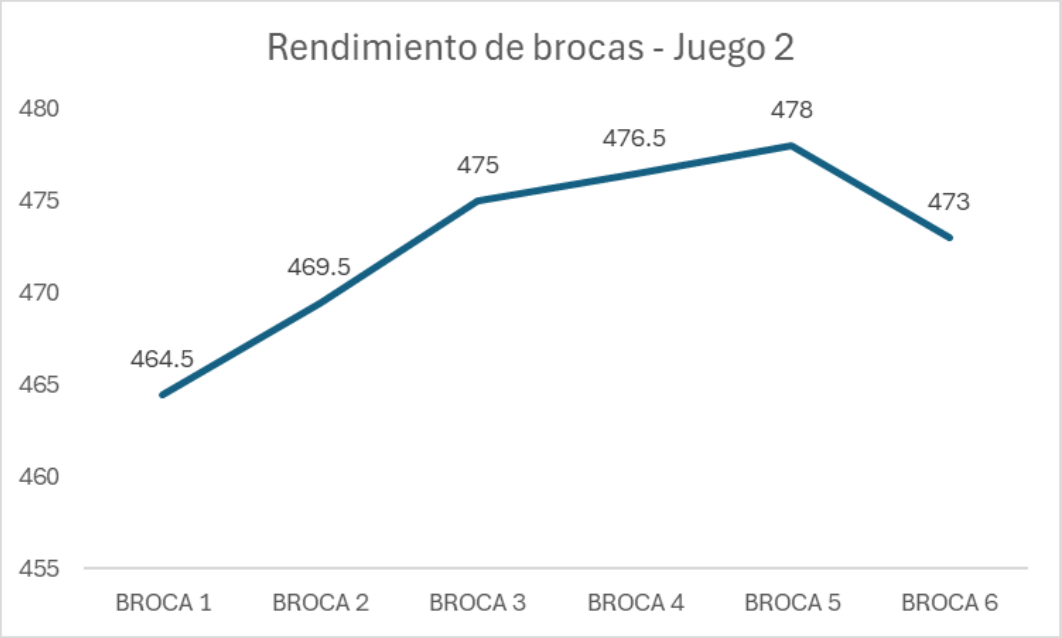
Distribución del rendimiento de brocas en el Juego 2 (76mm)



Fuente: Elaboración Propia

Figura 34

Rendimiento individual de brocas utilizadas en el Juego 2 (76mm)



Fuente: Elaboración Propia

Se puede concluir que en ambas pruebas los rendimientos de las brocas fueron más que aceptables cumpliendo los rendimientos de la Unidad (400 mts/broca).

4.5.3.2. Metros perforados por guardia

Los metros de perforación por guardia eran variables de acuerdo a las diversas condiciones que se presentaban en las operaciones de la unidad. (Véase en la Tabla 16).

Tabla 16

Registro de metros perforados y horas de operación por guardia

FECHA	TURNO	Mts. PERF.	H. HIDRAULICO	H. PERCUSION	H. DIESEL
18/11/2024	DIA	175.5	1275.1	1311.2	2971.6
	NOCHE	251	1278.2	1314.4	2978.5
19/11/2024	DIA	191.5	1275.7	1317.1	2984.6
	NOCHE	274.5	1275.7	1320.7	2991.8
20/11/2024	DIA	214	1275.9	1323.7	2997.9
	NOCHE	270	1276.1	1327.3	3005.1
21/11/2024	DIA	203	1276.9	1330.5	3012.8
	NOCHE	171.5	1278	1332.8	3016.6
22/11/2024	DIA	238.5	1279.3	1336.1	3023.1
	NOCHE	147	1279.7	1338.3	3028.3
23/11/2024	DIA	171	1280.4	1341.1	3035.7
	NOCHE	217.5	1282.1	1343.1	3040.2
24/11/2024	DIA	87	1282.5	1344.7	3043
	NOCHE	210	1282.9	1347.5	3049.5
25/11/2024	DIA	121	1283.3	1349.1	3052.8
	NOCHE	183	1284	1351.4	3058.5
26/11/2024	DIA	92	1284.4	1352.7	3862.8
	NOCHE	187.5	1284.8	1355	3069.1
	PROMEDIO	**189.2 m.p.**			

Fuente: Elaboración Propia

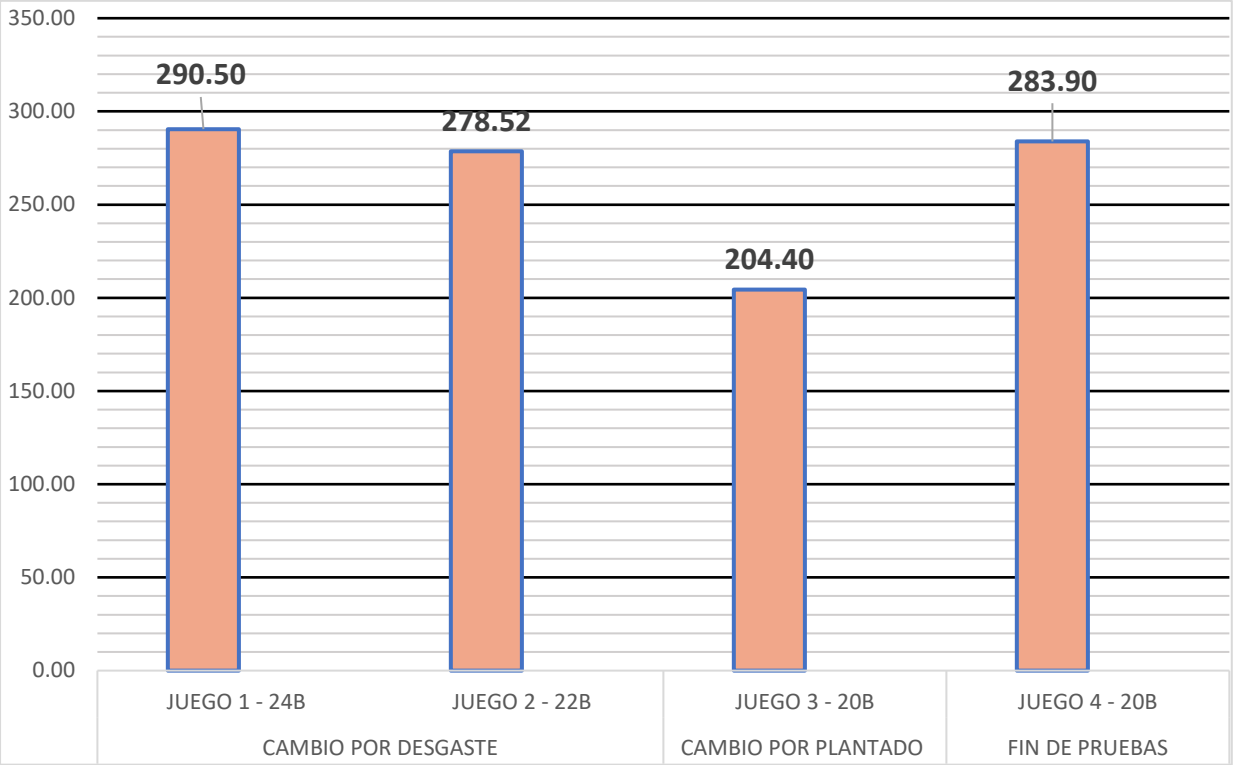
Promedio de metros perforados por guardia son de 189.2 mts por guardia, un promedio considerable tomando en cuenta el diámetro de broca (76mm).

4.5.3.3. Cálculo de rendimientos de los accesorios de perforación (shank, barras)

Se presentan los rendimientos de las barras, llegando a perforar **264.33mts** por barra en todo el proceso de las pruebas, un rendimiento más que aceptable, considerando que el rendimiento garantizado es de 200mts (los cuales en ocasiones no son resultados obtenibles). (Véase en la Figura 35).

Figura 35

Rendimiento promedio por juego y causa de cambio de brocas

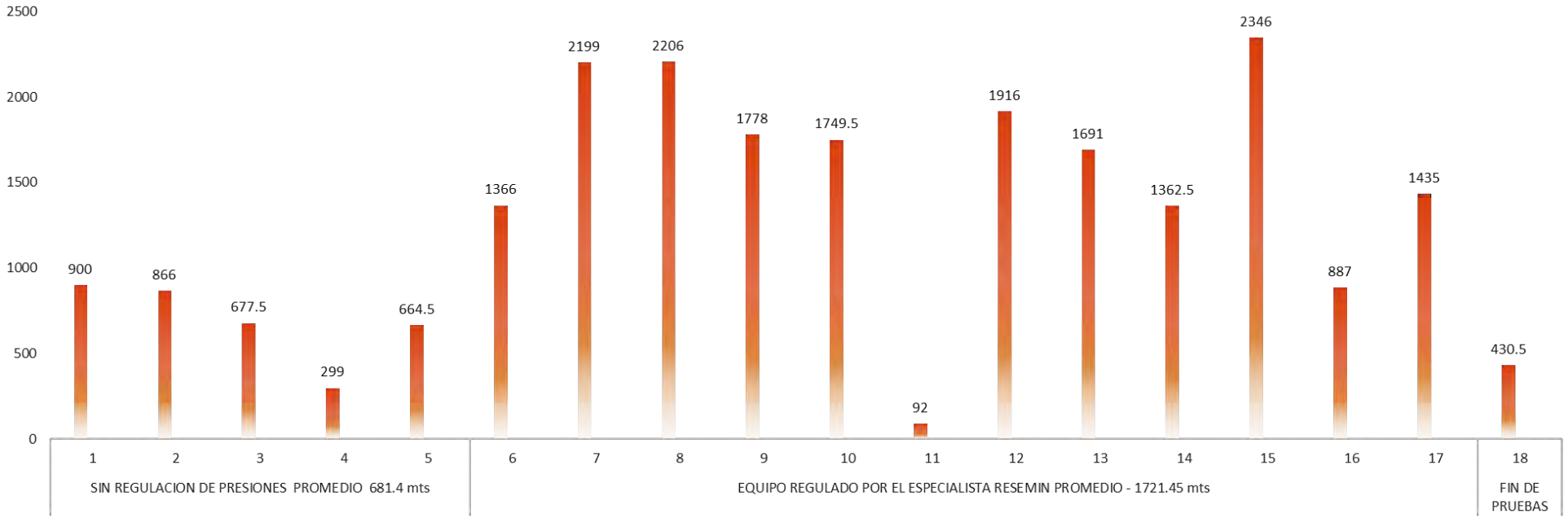


Fuente: Elaboración propia.

Los rendimientos respecto a los shank dan los siguientes resultados, los primeros 5 shanks presentaron un promedio de 681mts por shank, finalmente con el soporte de un mecánico especialista y personal de supervisión se incrementa el rendimiento promedio a 1721mts por shank (regulación de presiones y monitoreo de campo (Véase en la Figura 36).

Figura 36

Comparación del rendimiento de shanks según condición operativa: sin regulación de presiones vs. regulación optimizada



Fuente: Elaboración propia

4.5.3.4. Consumo de accesorios de perforación

Posterior se elaboran un cuadro con los consumos de los accesorios de perforación utilizados durante el trabajo de investigación (Véase en la Tabla 17).

Tabla 17

Consumo mensual de shanks, barras y brocas durante el periodo octubre 2024 – enero 2025

DESCRIPCIÓN	Oct-24	Nov-24	Dic-24	Ene-25
SHANK HC 120-RP D51 T45 x 670mm	7	5	4	2
BARRA MF T45-T45 x 5´	24	22	40	0
BROCA RETRACTIL T45 x 76mm	0	12	12	0

Fuente: Elaboración Propia

4.5.4. Costo operacional con brocas de 76mm

El análisis de costos operacionales asociados a la perforación con brocas de 76 mm permite determinar el gasto real que implica la ejecución de taladros largos bajo las condiciones establecidas en la operación. Este apartado considera los consumos derivados del desgaste de los accesorios de perforación y su relación con los metros avanzados, lo que posibilita estimar el costo unitario por metro perforado y evaluar la eficiencia económica del proceso.

4.5.4.1. Accesorios de perforación

En esta sección se presentan los costos correspondientes a los accesorios empleados en la perforación con broca de 76 mm, considerando la vida útil y el precio de cada componente. Esta información permite calcular el costo unitario por metro perforado y determinar la incidencia económica de los elementos consumibles durante la operación. (Véase en la Tabla 18).

Tabla 18

Costo de Accesorios de Perforación para Operación con Broca de 76 mm

Descripción	Vida Útil (m)	Precio ($)	P.U. ($)
SHANK HC 120-RP D51 T45 x 670mm	1500	420	0.28
BARRA MF T45-T45 x 5´	260	215	0.827
BROCA RETRACTIL T45 x 76mm	400	145	0.363
		Sub Total	1.470
Metros P. 1164.36		**Total**	**1711.61 $**

Fuente: Elaboración Propia

4.5.4.2. Costos por el equipo

En esta parte se consideran los costos asociados al uso del equipo RAPTOR 55-2R empleado en la perforación con broca de 76 mm, incluyendo las horas máquina requeridas y el porcentaje destinado a mantenimiento. Estos valores permiten estimar el costo directo por el funcionamiento del equipo durante la operación. (Véase en la Tabla 19)

Tabla 19

Costos del Equipo para la Perforación RAPTOR 55-2R

Descripción	Unidad	Cantidad	P.U. ($)	Total
Simba RAPTOR 55-2R	Hrs.Maq.	49.20	65	3198.00
Mantenimiento	Hrs.Maq.	30% de Posesión		959.40
			Total	**4157.40**

Fuente: Elaboración Propia

4.5.4.3. Costo por mano de obra

En esta sección se presentan los costos correspondientes al personal en la perforación con broca de 76 mm. Para ello se consideran las horas de trabajo asignadas a cada función y su respectivo costo unitario, permitiendo obtener el costo total de mano de obra requerido para la operación. (Véase en la Tabla 20)

Tabla 20

Costo por Mano de Obra para Perforación con Broca de 76 mm

Descripción	Und.	Cant.	Horas de trabajo	Costo Unitario	Costo total
		(Pers.)	(Hras/tarea)	(US$/Und.)	(US$)
Operario Simba (Taladros Largos)	HH	1	31.73	6.27	**198.92**
Ayudante Simba	HH	1	31.73	4.68	**148.48**
Topógrafo	HH	1	1.5	5.37	**8**
Ayudante topógrafo	HH	1	1.5	4.39	**6.58**
Supervisor T. largos	HH	1	3.78	6.37	**24.03**
Mecánico-Electricista Simba	HH	2	1.5	7.09	**21.28**
Personal servicios	HH	3	5.4	5.05	**81.74**
Conductor camioneta mantenimiento	HH	1	1.5	4.13	**6.2**
Jefe de perforación y voladura	HH	1	1.89	11.65	**22**
Jefe de Guardia	HH	1	3.78	9.6	**36.24**
Inspector de seguridad	HH	1	1.74	7.73	**13.42**
Costo total de personal involucrado					**566.89 US$**

Fuente: Elaboración Propia

4.5.4.4. Costo total por perforación con broca de 76mm

En esta parte se integra el costo total de la perforación realizada con broca de 76 mm, considerando los gastos por accesorios, equipo y mano de obra. La suma de estos componentes permite determinar el costo global del proceso y evaluar su incidencia dentro de las actividades operativas. (Véase en la Tabla 21).

Tabla 21

Costo Total de Perforación con Broca de 76 mm

Costo Asociado Perforación	Costo ($)	P.U. ($/TM)
Accesorios de Perforación	1711.61	0.180
Costos por Equipo	4157.40	0.437
Costo por Mano de Obra	566.89	0.060
Sub Total	**6435.90**	**0.676**
Costos Imprevistos (7%)	**450.51**	**0.047**
Gatos Generales (15%)	**965.39**	**0.101**
Total	**7851.80 $**	**0.824 $/TM**

Fuente: Elaboración Propia

4.6. CUADRO COMPARATIVO DE LOS RENDIMIENTOS DE PERFORACIÓN ENTRE LA LÍNEA BASE Y LA BROCA DE 76 MM

La presente comparación muestra los resultados obtenidos entre las condiciones operativas de la línea base y la propuesta de perforación con broca de 76 mm en el TJ 777 del NV -175. Para ello, se consideran los principales indicadores de perforación y productividad, permitiendo evaluar el efecto de la modificación de la malla sobre los metros perforados, el número de taladros requeridos y la eficiencia operacional del proceso. (Véase la Tabla 22)

Tabla 22

Indicadores de perforación de la línea base y la broca de 76 mm

Indicador	Línea Base	Broca 76 mm
Diámetro de perforación (mm)	64	76
Burden (m)	1.80	2.00
Espaciamiento (m)	2.00	2.20
Longitud perforada por sección (m)	338.54	291.09
Longitud total perforada (m)	1354.16	1164.36
N° de taladros por sección	27	22
N° total de taladros	108	88
Metros perforados por guardia (m/guardia)	172.95	189.20
N° de guardias	8.0	6.2
Tiempo de ejecución (h)	64.0	49.2

Fuente. Elaboración Propia

4.6.1. Contribución de la mejora de perforación a la producción

La planta concentradora requiere una producción de 8,400 TM/día. Considerando una capacidad estimada de 1,500 TM/día por tajeo, se obtiene:

$$Número\ de\ tajeos\ = \frac{8{,}400}{1{,}500}\ =\ 5.6\ tajeos$$

Por lo tanto, se requieren aproximadamente 6 tajeos en producción. La diferencia entre 5.6 y 6 tajeos representa una holgura operacional para cubrir variaciones en carguío, acarreo, disponibilidad de equipos y tiempos improductivos.

Con 6 tajeos:

$$6\ \times\ 1{,}500\ =\ 9{,}000\ TM/día$$

La holgura disponible sería:

$$9{,}000\ -\ 8{,}400\ =\ 600\ TM/día$$

Tabla 23

Estimación del número de tajeos requeridos para el cumplimiento de la producción diaria

Parámetro	Valor
Producción requerida	8,400 TM/día
Producción estimada por tajeo	1,500 TM/día
Tajeos calculados	5.6
Tajeos considerados	**6**
Capacidad conjunta	9,000 TM/día
Holgura operacional	**600 TM/día**

Fuente: Elaboración propia.

En este esquema, el Tajo 777 constituye uno de los tajeos que aportan a la producción total. La mejora en perforación reduce el tiempo de ejecución de 64.0 h a 49.2 h, permitiendo disponer el tajeo para voladura en menor tiempo y mantener la continuidad de las etapas de perforación, voladura, carguío y acarreo.

4.7. IMPACTO TÉCNICO EN VOLADURA

Desde el aspecto técnico, la aplicación de brocas de 76 mm permitió ampliar la geometría de la malla de perforación, reduciendo el número de taladros requeridos para la explotación y disminuyendo los metros totales de perforación. Como consecuencia, se incrementó el tonelaje generado por metro perforado y se redujo el tiempo requerido para completar el ciclo de perforación.

Tabla 24

Comparación de parámetros técnicos de voladura entre la línea base y la broca de 76 mm

Parámetro	Unidad	Línea Base	Broca 76 mm
Taladro promedio	m	21.00	21.00
Tonelaje por disparo	TM	9065.25	9520.00
TM por metro perforado	TM/m	6.69	8.18
Longitud total perforada	m	1354.16	1164.36
Número total de taladros	taladros	108	88

Fuente. Elaboración Propia

4.7.1. Estimación del consumo potencial de explosivo según diámetro de perforación

Debido a que la presente investigación se centra en el proceso de perforación, el análisis de voladura se desarrolla de manera estimativa, considerando la capacidad teórica de carga de los taladros según su diámetro. La carga real de cada taladro depende posteriormente de la longitud de carga, taco y distribución del explosivo establecida en el diseño de voladura.

La concentración lineal de explosivo se determina mediante:

$$q = \rho * \pi * \frac{D^2}{4}$$

Donde:

q = concentración lineal de carga, kg/m

ρ = densidad del explosivo, kg/m³

D = diámetro del taladro, m

Para efectos comparativos se considera una densidad de explosivo de 0.85 g/cm³, equivalente a 850 kg/m³.

a) Taladros de 64 mm

$q_{64} = 850 \times \pi \times (0.064)^2 / 4$

$q_{64} = 2.73$ kg/m

Por lo tanto, por cada metro efectivamente cargado, un taladro de 64 mm presenta una capacidad aproximada de 2.73 kg de explosivo.

b) Taladros de 76 mm

$q_{76} = 850 \times \pi \times (0.076)^2 / 4$

$q_{76} = 3.86$ kg/m

Por cada metro efectivamente cargado, un taladro de 76 mm presenta una capacidad aproximada de 3.86 kg de explosivo.

El incremento relativo de capacidad de carga por metro es:

$$\left[\frac{3.86 - 2.73}{2.73}\right] \times 100 = 41.0\ \%$$

Por lo tanto, el incremento del diámetro de 64 mm a 76 mm genera aproximadamente 41 % más capacidad de carga explosiva por metro cargado.

Sin embargo, con el diámetro de 76 mm también se reduce el número total de taladros de 108 a 88, equivalente a una disminución de aproximadamente 18.5 %, mientras que la longitud total perforada disminuye de 1,354.16 m a 1,164.36 m, equivalente a una reducción de aproximadamente 14.0 %.

Para observar el efecto conjunto de ambas variaciones, se puede estimar la capacidad potencial de carga suponiendo, únicamente para fines comparativos, que toda la longitud perforada corresponde a longitud cargable.

Para 64 mm:

Q_{64} = 2.73 kg/m × 1,354.16 m

Q_{64} ≈ 3,702.87 kg

Para 76 mm:

Q_{76} = 3.86 kg/m × 1,164.36 m

Q_{76} ≈ 4,489.76 kg

La variación estimada es:

$$\left[\frac{4{,}489.76 - 3{,}702.87}{3{,}702.87}\right] \times 100 = 21.25\ \%$$

Tabla 25

Estimación comparativa de la capacidad potencial de carga explosiva

Parámetro	64 mm	76 mm	Variación
Concentración lineal	2.73 kg/m	3.86 kg/m	+41.0 %
Número total de taladros	108	88	−18.5 %
Longitud total perforada	1,354.16 m	1,164.36 m	−14.0 %
Capacidad potencial de carga	3,702.87 kg	4,489.76 kg	**+21.25 %**

Fuente: Elaboración Propia

El análisis muestra que, aunque la aplicación de brocas de 76 mm reduce el número de taladros y los metros totales perforados, el aumento del diámetro genera una mayor capacidad de alojamiento de explosivo por metro. Bajo esta estimación, la capacidad potencial total de carga podría incrementarse aproximadamente en 21.25 %.

No obstante, este porcentaje no representa el consumo real de explosivo, debido a que los taladros no se cargan completamente. La cantidad efectiva depende de la longitud de carga de cada taladro, el taco de collar, posibles tacos de fondo y la distribución de la columna explosiva. Por ello, el resultado se utiliza únicamente para identificar el posible efecto del cambio de diámetro sobre el requerimiento de explosivos y su eventual incidencia en el costo de voladura.

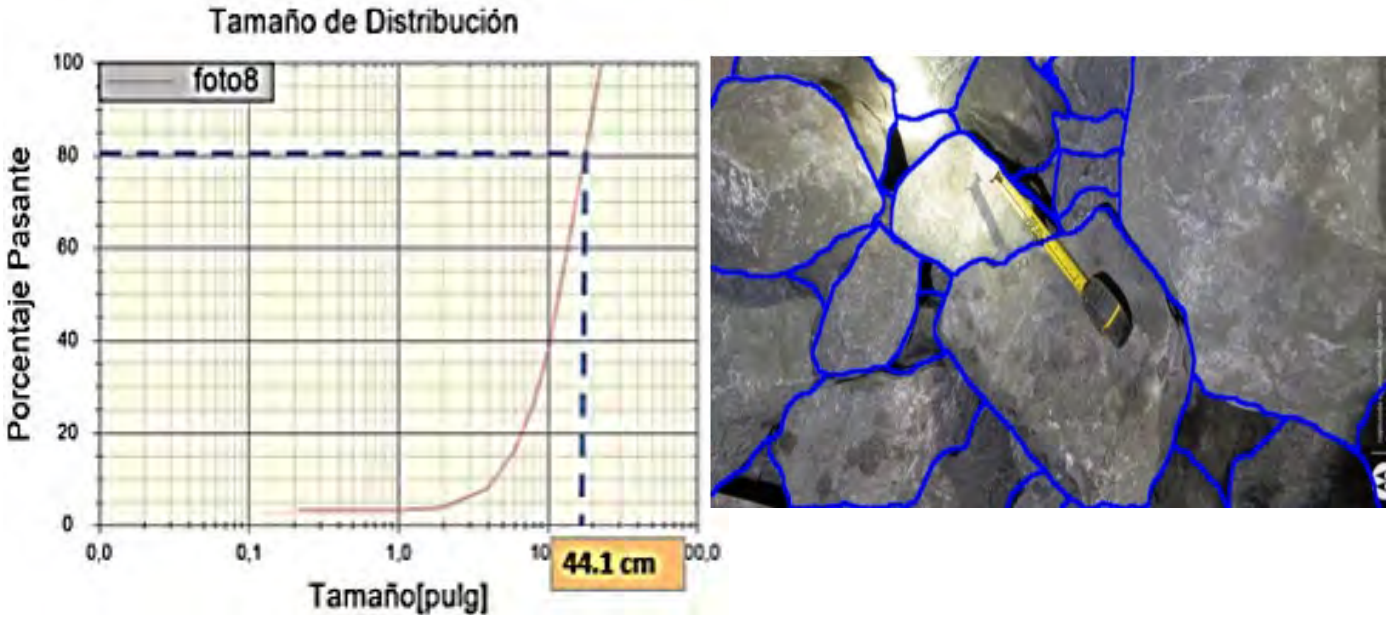
4.7.2. Análisis del P80

Un indicador importante para determinar la calidad de fragmentación post voladura es el P80, para este análisis se procesa la información fotográfica de las voladuras tomadas insitu, las fotografías tomadas del material disparado en el NV -175 del TJ 777 con brocas de 76 mm desde el EJE 2 desde la sección 18 al 31, la información estadística se detalla a continuación.

4.7.2.1. Análisis del p80 de voladura con broca de 76mm (3”)

Figura 37

Análisis del P80 de voladura – Foto 1 (Broca de 76 mm)



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 26

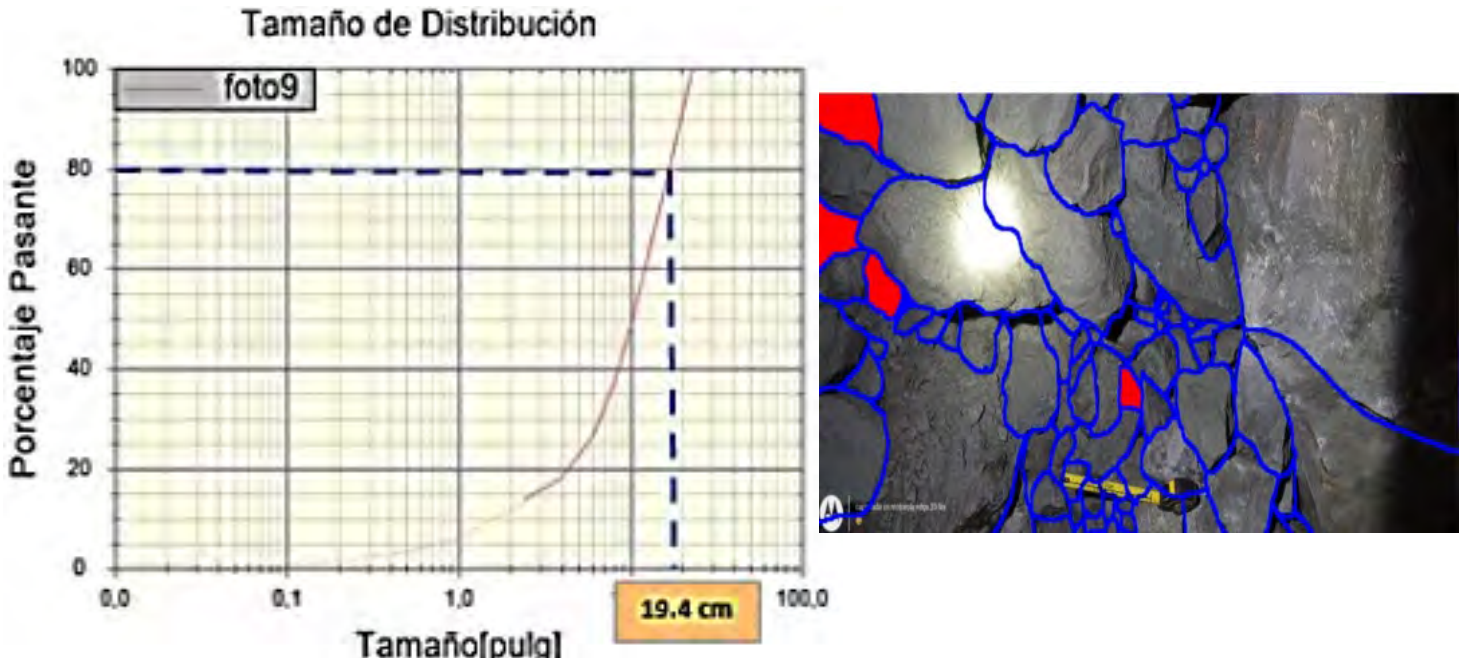
Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 1 (Broca de 76 mm)

% Pasante	Tamaño (cm)
P10	11.7
P20	17.3
P30	22.3
P40	26.6
P50	30.8
P60	35.1
P70	39.3
P80	**44.1**
P90	50.6
P100	58.3

Fuente: Elaboración Propia

Figura 38

Análisis del P80 de voladura – Foto 2 (Broca de 76 mm)



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 27

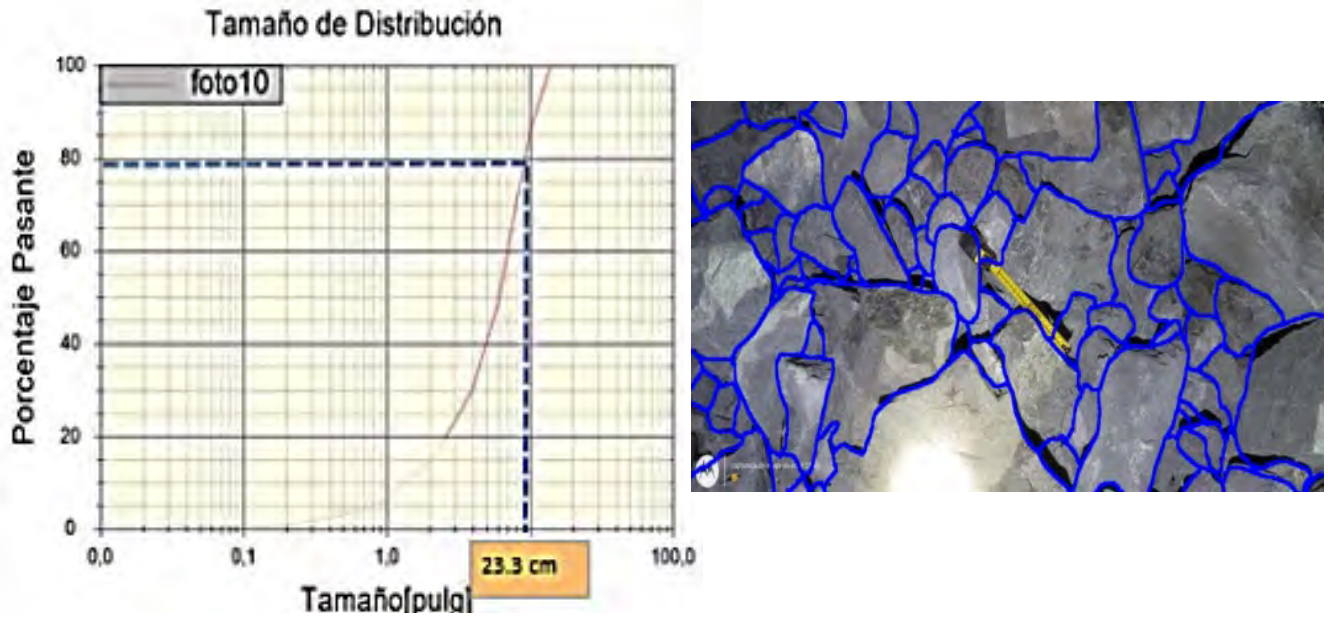
Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 2 (Broca de 76 mm)

% Pasante	Tamaño (cm)
P10	4.19
P20	7.07
P30	9.23
P40	11.09
P50	12.9
P60	14.77
P70	16.81
P80	**19.39**
P90	22.12
P100	25.38

Fuente: Elaboración Propia

Figura 39

Análisis del P80 de voladura – Foto 3 (Broca de 76 mm)



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 28

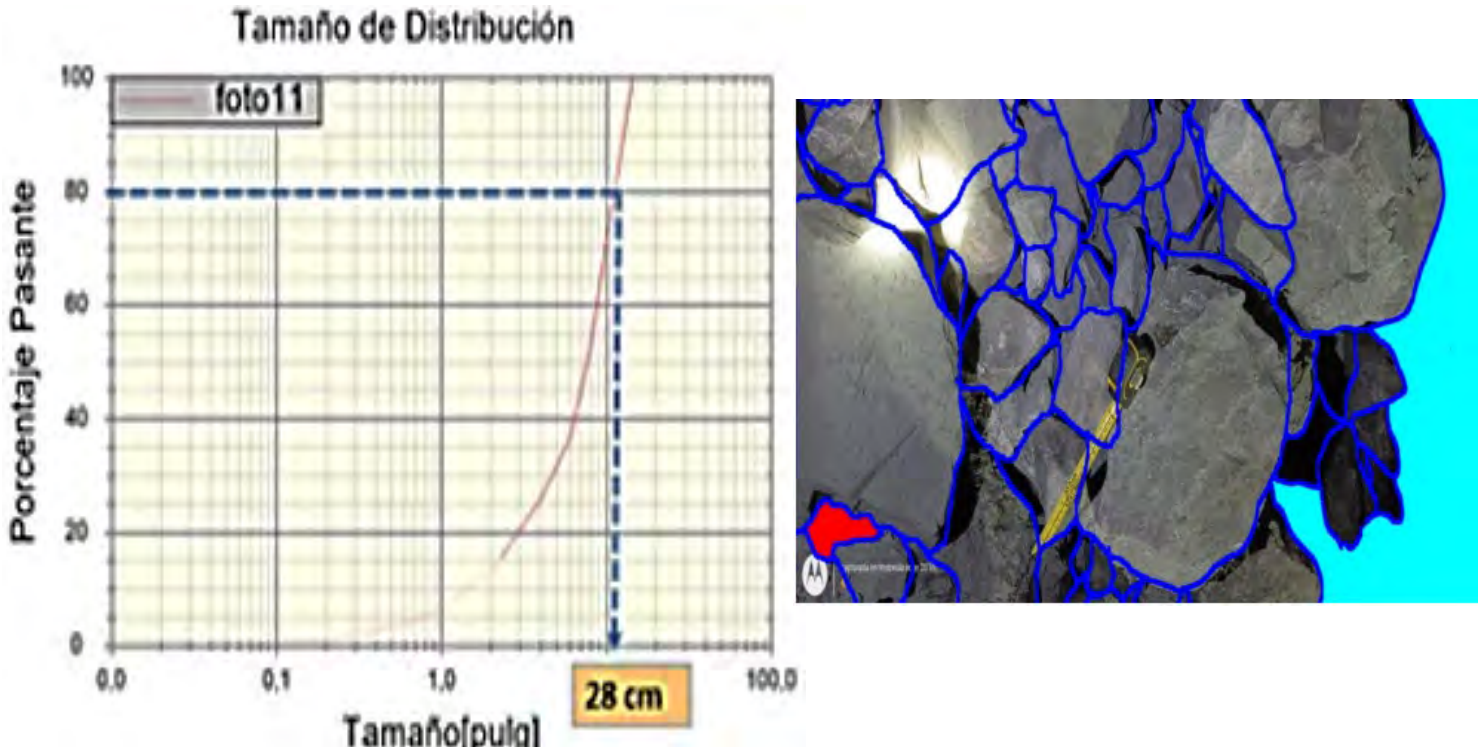
Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 3 (Broca de 76 mm)

% Pasante	Tamaño (cm)
P10	3.6
P20	6.7
P30	10.1
P40	12.9
P50	15.5
P60	17.4
P70	20.4
P80	**23.3**
P90	27.5
P100	35.6

Fuente: Elaboración Propia

Figura 40

Análisis del P80 de voladura – Foto 4 (Broca de 76 mm)



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 29

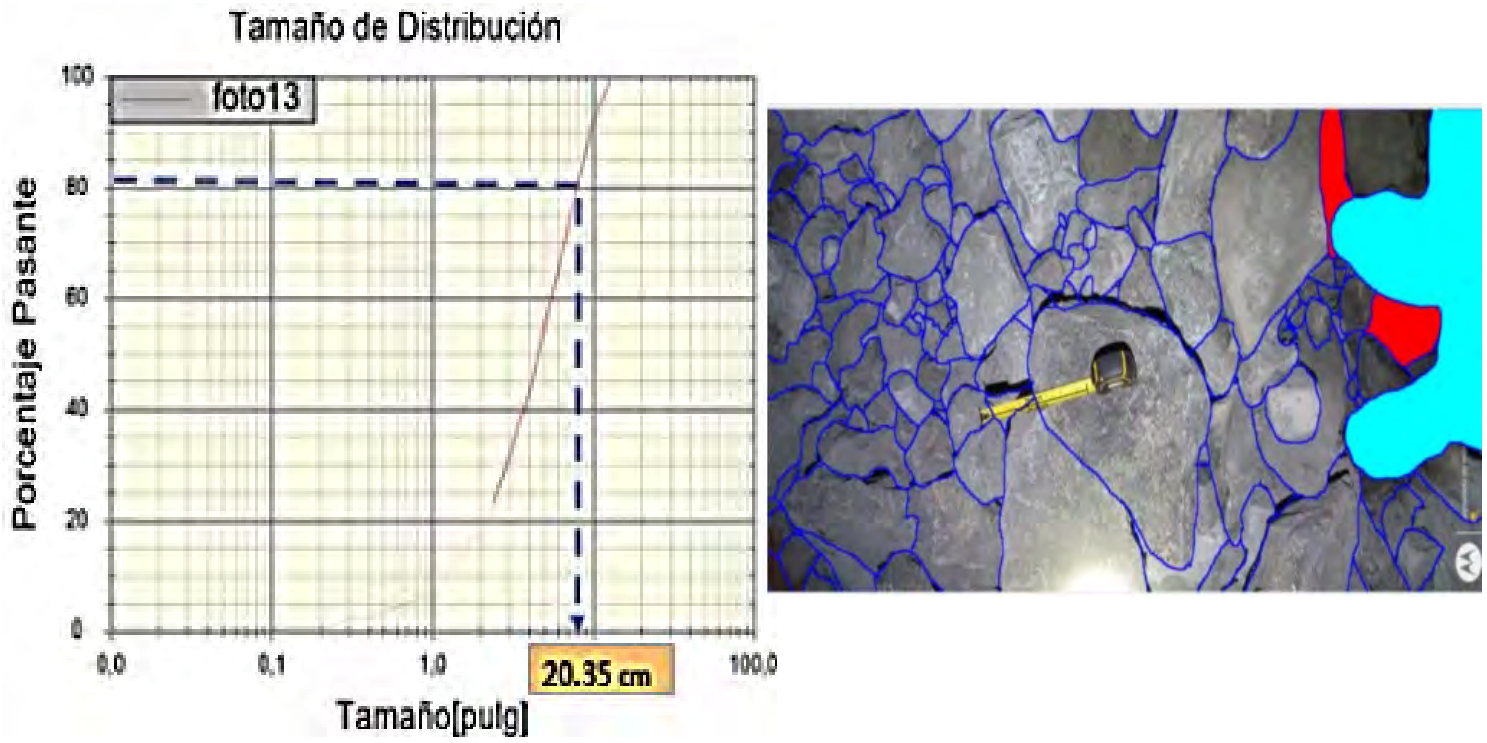
Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 4 (Broca de 76 mm)

% Pasante	Tamaño (cm)
P10	3.76
P20	7.8
P30	12.22
P40	16.64
P50	20.43
P60	22.48
P70	24.62
P80	28.09
P90	31.39
P100	36.58

Fuente: Elaboración Propia

Figura 41

Análisis del P80 de voladura – Foto 5 (Broca de 76 mm)



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 30

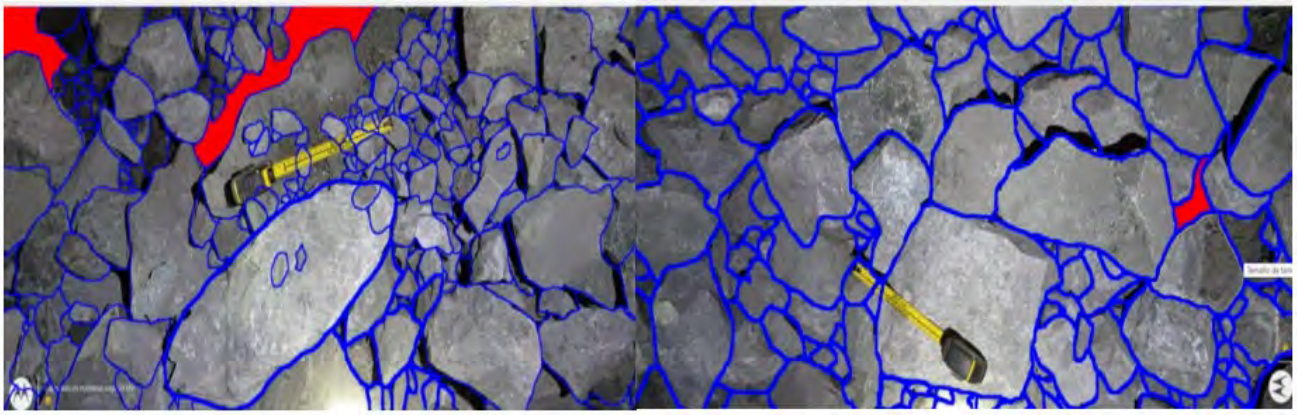
Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 5 (Broca de 76 mm)

% Pasante	Tamaño (cm)
P10	3.1
P20	5.46
P30	7.65
P40	9.63
P50	11.71
P60	14.05
P70	16.66
P80	20.35
P90	24.51
P100	33.1

Fuente: Elaboración Propia

Figura 42

Análisis del P80 de voladura – Foto 6 y 7 (Broca de 76 mm)



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 31

Resultados del análisis granulométrico combinado (P80 promedio = 28.55 cm) - broca de 76 mm

% Pasante	Combinado Tamaño (cm)
P10	3.07
P20	6.45
P30	9.75
P40	12.88
P50	16.08
P60	19.69
P70	23.7
P80	**28.55**
P90	36.37
P100	58.09

Fuente: Elaboración Propia

Del análisis de la fragmentación combinada se determina que el valor promedio del P80 obtenido en la voladura ejecutada con broca de 76 mm es de 28.55 cm.

CAPITULO V:

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en la perforación con brocas de 64 mm y 76 mm en el Tajo 777 del Nivel –175 de la Unidad Minera Condestable. La evaluación considera parámetros operacionales, rendimiento de perforación y costos asociados al proceso.

Los resultados permiten comparar el comportamiento técnico y económico de ambos diámetros de broca, determinando su influencia en el avance operativo y la eficiencia de perforación.

5.1.1. Resultados técnicos comparando la línea base y la broca de 76 mm

La evaluación técnica considera los principales indicadores operativos obtenidos durante la perforación de taladros largos en el TJ 777 del Nivel −175. Para ello, se comparan las condiciones de la línea base con la propuesta de perforación mediante broca de 76 mm, analizando parámetros relacionados con el diseño de malla, productividad, rendimiento de perforación y

calidad de fragmentación. Estos indicadores permiten evaluar la influencia de la modificación del diámetro de perforación sobre la eficiencia operativa del proceso.

Tabla 32

Comparación técnica entre la línea base y la aplicación de brocas de 76 mm

Indicador técnico	Unidad	Línea Base	Broca 76 mm	Análisis técnico
Burden	m	1.80	2.00	Permitió ampliar la malla de perforación manteniendo condiciones adecuadas de fragmentación.
Espaciamiento	m	2.00	2.20	Incrementó la cobertura entre taladros, reduciendo la cantidad requerida por disparo.
Número total de taladros	taladros	108	88	La reducción de taladros disminuyó tiempos operativos y consumo de accesorios.
Longitud total perforada	m	1354.16	1164.36	Se requirió menor longitud de perforación para explotar el mismo volumen de mineral.
Metros perforados por guardia	m/guardia	172.95	189.20	Se obtuvo una mayor productividad por guardia de trabajo.
Tiempo total de perforación	h	64.0	49.2	La disminución del tiempo permitió mejorar la disponibilidad operativa del equipo.
Productividad	TM/m.p.	6.69	8.18	Cada metro perforado generó una mayor cantidad de mineral explotado.
P80	cm	20.30	28.55	La fragmentación fue más gruesa, manteniéndose dentro de rangos operacionales aceptables.

Fuente: Elaboración Propia

- El incremento del burden y espaciamiento permitió ampliar la malla de perforación, reduciendo el número total de taladros requeridos de 108 a 88 por disparo.

- La longitud total perforada disminuyó de 1354.16 m a 1164.36 m, reduciendo la cantidad de perforación necesaria para explotar un volumen similar de mineral.
- Los metros perforados por guardia se incrementaron de 172.95 m.p./guardia a 189.20 m/guardia, evidenciando una mejora en la productividad operativa.
- El tiempo total de ejecución se redujo de 64.0 h a 49.2 h, permitiendo completar el ciclo de perforación en menor tiempo.
- La productividad expresada en toneladas por metro perforado aumentó de 6.69 TM/m.p. a 8.18 TM/m.p., reflejando un mejor aprovechamiento de cada metro perforado.
- El rendimiento de los accesorios de perforación fue superior con la configuración de 76 mm, alcanzándose rendimientos entre 450 y 480 m por broca y hasta 1721 m por shank bajo condiciones de operación controladas.
- La fragmentación presentó un incremento del P80 de 20.30 cm a 28.55 cm; sin embargo, estos valores permanecieron dentro de los rangos operacionales aceptables para las operaciones de carguío y chancado primario.

5.1.2. Resultados económicos de la broca 76 mm

El análisis económico se realizó considerando los costos asociados a accesorios de perforación, equipo y mano de obra, así como su incidencia en el costo unitario por tonelada producida. Los valores provienen del control operacional durante el periodo de evaluación, permitiendo comparar la eficiencia económica entre ambas alternativas de perforación.

Tabla 33

Comparación económica entre la línea base y la aplicación de brocas de 76 mm

Concepto	Línea Base (USD)	Broca 76 mm (USD)	Variación (%)	P.U. Línea Base (US$/TM)	P.U. 76 mm (US$/TM)
Costo de accesorios	2,010.93	1,711.61	↓ 14.9 %	0.222	0.180
Costo de equipo	4,739.35	4,157.40	↓ 12.3 %	0.523	0.437
Costo de mano de obra	873.75	566.89	↓ 35.1 %	0.096	0.060
Costo total directo	**7,624.03**	**6,435.90**	**↓ 15.6 %**	**0.841**	**0.676**
Costo total final	**9,301.31**	**7,851.80**	**↓ 15.6 %**	**1.026**	**0.824**
Costo por metro perforado (US$/m)	**6.87**	**6.74**	**↓ 1.9 %**	**—**	**—**

Fuente: Elaboración Propia

- La aplicación de brocas de 76 mm permitió reducir el costo total final de perforación en 15.6 %, debido principalmente a la disminución del número de taladros y de la longitud total perforada.
- El costo de accesorios disminuyó en 14.9 %, como consecuencia del menor consumo de brocas, barras y demás elementos de perforación.
- El costo de equipo se redujo en 12.3 %, debido a la disminución del tiempo total de perforación de 64.0 h a 49.2 h.
- El costo de mano de obra presentó una reducción de 35.1 %, asociada a la menor duración del ciclo operativo.
- El costo unitario disminuyó de 1.026 US$/TM a 0.824 US$/TM, evidenciando una mejora en la eficiencia económica del proceso de perforación.

5.1.3. Interpretación de resultados para la elección del diámetro de broca

La evaluación técnica demuestra que la aplicación de brocas de 76 mm permitió optimizar el diseño de perforación mediante el incremento del burden de 1.80 m a 2.00 m y del espaciamiento de 2.00 m a 2.20 m. Esta modificación permitió reducir el número total de taladros de 108 a 88 y disminuir la longitud total perforada de 1354.16 m a 1164.36 m, manteniendo condiciones adecuadas de fragmentación y estabilidad operacional.

Asimismo, los metros perforados por guardia se incrementaron de 172.95 m/guardia a 189.20 m/guardia, mientras que la productividad aumentó de 6.69 TM/m a 8.18 TM/m. Del mismo modo, el rendimiento de los accesorios de perforación mejoró, alcanzándose valores de hasta 1721 m por shank y entre 450 y 480 m por broca, evidenciando un mejor aprovechamiento de los consumibles de perforación.

Desde el punto de vista económico, el costo total de perforación disminuyó de US$ 9,301.31 a US$ 7,851.80, representando una reducción de 15.6 %. Asimismo, el costo unitario se redujo de 1.026 US$/TM a 0.824 US$/TM, lo que demuestra una mejora en la eficiencia económica del proceso.

Respecto a la fragmentación, el P80 se incrementó de 20.30 cm a 28.55 cm debido a la ampliación de la malla de perforación; sin embargo, dichos valores se mantuvieron dentro de los rangos aceptables para las operaciones de carguío y chancado primario.

En función de los resultados obtenidos, la broca de 76 mm constituye la alternativa más eficiente para las condiciones operativas del TJ 777 del Nivel −175, debido a que permite incrementar la productividad, reducir los tiempos de perforación y disminuir los costos unitarios de operación.

5.1.4. Beneficios del diámetro seleccionado (76 mm)

a implementación de brocas de 76 mm generó beneficios operativos, económicos y productivos que contribuyen a mejorar la eficiencia del proceso de perforación de taladros largos.

5.1.4.1. Beneficios operativos

- Incremento del burden de 1.80 m a 2.00 m y del espaciamiento de 2.00 m a 2.20 m, permitiendo optimizar la malla de perforación.
- Reducción del número total de taladros de 108 a 88 por disparo.
- Disminución de la longitud total perforada de 1354.16 m a 1164.36 m.
- Incremento de los metros perforados por guardia de 172.95 m/guardia a 189.20 m/guardia.
- Mayor rendimiento de brocas y shanks mediante el empleo de la columna T45.

5.1.4.2. Beneficios económicos

- Reducción del costo total de perforación de US$ 9,301.31 a US$ 7,851.80.
- Disminución del costo unitario de 1.026 US$/TM a 0.824 US$/TM.
- Reducción del consumo de accesorios de perforación debido a la disminución de metros perforados.
- Disminución de horas de utilización del equipo y tiempo operativo por ciclo de perforación.

5.1.4.3. Beneficios productivos

- Incremento de la productividad de 6.69 TM/m.p. a 8.18 TM/m.p.
- Mayor volumen de mineral explotado por cada metro perforado.
- Reducción del tiempo requerido para completar el ciclo de perforación.
- Mejor aprovechamiento de la capacidad operativa del equipo Simba S7D y de la columna de perforación T45.

5.1.5. Alternativas de optimización del rendimiento de broca

Con la finalidad de mejorar el rendimiento operativo del sistema de perforación, se plantean las siguientes medidas técnicas:

5.1.5.1. Control de parámetros de perforación

- Control de presión de aire y empuje para reducir desgaste prematuro de brocas y shanks.
- Verificación diaria de parámetros operativos del equipo.

5.1.5.2. Programa de mantenimiento y afilado

- Control periódico del desgaste de copas y botones.
- Estandarización de parámetros de afilado según condiciones geomecánicas.

5.1.5.3. Control de desviación de taladros

- Verificación de alineamiento durante la perforación.
- Ajustes de burden y espaciamiento en zonas fracturadas.

5.1.5.4. Capacitación operativa

- Capacitación en control de parámetros y secuencia de perforación.
- Reducción de errores operativos durante el ciclo de perforación.

5.1.5.5. Optimización del ciclo de perforación

- Reducción de tiempos muertos por cambio de barras.
- Distribución secuencial de perforación según accesibilidad.

5.1.5.6. Gestión de desgaste de componentes

- Reemplazo oportuno de componentes críticos.
- Control de vibraciones y pérdidas de energía de impacto.

5.1.6. Cuadro resumen comparativo de resultados

La Tabla 34 presenta de manera consolidada los principales resultados obtenidos entre la línea base con brocas de 64 mm y la aplicación de brocas de 76 mm en el Tajo 777 del Nivel −175. La comparación permite identificar las variaciones generadas en los parámetros de perforación, productividad, tiempo de ejecución, producción, fragmentación y costos.

Tabla 34

Resumen comparativo de resultados entre brocas de 64 mm y 76 mm

Indicador	Unidad	Broca 64 mm	Broca 76 mm	Variación
Diámetro de perforación	mm	64	76	+18.8 %
Burden	m	1.80	2.00	+11.1 %
Espaciamiento	m	2.00	2.20	+10.0 %
Longitud perforada por sección	m	338.54	291.09	−14.0 %
Longitud total perforada	m	1,354.16	1,164.36	−14.0 %
Taladros por sección	N.°	27	22	−18.5 %
Número total de taladros	N.°	108	88	−18.5 %
Metros perforados por guardia	m/guardia	172.95	189.20	+9.4 %
Número de guardias	guardias	8.0	6.2	−22.5 %
Tiempo total de perforación	h	64.0	49.2	**−23.1 %**
Tonelaje estimado por disparo	TM	9,065.25	9,520.00	+5.0 %
Rendimiento productivo	TM/m	6.69	8.18	**+22.3 %**
P80 promedio	cm	20.30	28.55	+40.6 %
Costo unitario de perforación	USD/TM	1.026	0.824	**−19.7 %**

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que el incremento del diámetro de perforación permitió ampliar el burden y el espaciamiento, reduciendo en 18.5 % el número total de taladros y en 14.0 % los metros totales perforados. Como consecuencia, el tiempo total de perforación disminuyó en 23.1 %, mientras que los metros perforados por guardia se incrementaron en 9.4 %.

Asimismo, el rendimiento productivo aumentó en 22.3 %, pasando de 6.69 TM/m a 8.18 TM/m, y el tonelaje estimado por disparo se incrementó aproximadamente en 5.0 %. En el aspecto económico, el costo unitario de perforación se redujo en 19.7 %, de 1.026 USD/TM a 0.824 USD/TM.

Respecto a la fragmentación, el P80 aumentó de 20.30 cm a 28.55 cm, equivalente a una variación de 40.6 %; sin embargo, de acuerdo con los resultados del estudio, este tamaño se mantuvo dentro de las condiciones operacionales consideradas para el carguío y chancado primario.

5.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.2.1. Estudio técnico económico de la broca de 76 mm

En la presente investigación se determinó que la implementación de brocas de 76 mm permitió incrementar la productividad de 6.69 TM/m.p. a 8.18 TM/m.p., debido al incremento del burden de 1.80 m a 2.00 m y del espaciamiento de 2.00 m a 2.20 m, reduciendo el número total de taladros de 108 a 88 por disparo. Asimismo, los metros perforados por guardia se incrementaron de 172.95 m/guardia a 189.20 m/guardia, evidenciando una mejora en la eficiencia operativa del proceso.

El P80 se incrementó de 20.30 cm a 28.55 cm, obteniéndose una fragmentación más gruesa; sin embargo, dichos valores permanecieron dentro de rangos operacionales aceptables para las operaciones de carguío y chancado primario. Estos resultados guardan relación con Aparco Huillcas y García de la Cruz (2019), quienes reportan mejoras en el rendimiento de perforación mediante optimización operacional y control de parámetros de perforación.

5.2.2. Sustitución del equipo Simba Epiroc S7D por la Raptor 55-2R

Los resultados obtenidos demostraron que la implementación del equipo para la aplicación de brocas de 76 mm permitió incrementar la productividad del proceso mediante la optimización de la malla de perforación y la reducción de los tiempos operativos. Asimismo, la longitud total perforada disminuyó de 1354.16 m a 1164.36 m, mientras que el tiempo total de perforación se redujo de 64.0 h a 49.2 h.

Del mismo modo, el rendimiento del shank se incrementó de 1371 m/shank a 1721 m/shank mediante la regulación de presiones y el control operacional durante la perforación. Asimismo, el rendimiento de broca aumentó de 402 m/broca a valores entre 450 y 480 m/broca. Estos resultados coinciden con Aparco Huillcas y García de la Cruz (2019), quienes concluyen que el monitoreo técnico y el control operacional incrementan el rendimiento de los aceros de perforación.

5.2.3. Aplicación de brocas de 76 mm en la perforación del tajo 777

La aplicación de brocas de 76 mm en el Tajo 777 permitió incrementar los metros perforados por guardia de 172.95 m/guardia a 189.20 m/guardia, mejorando el rendimiento operativo del proceso de perforación. Asimismo, el incremento del burden y espaciamiento permitió reducir el número total de taladros de 108 a 88 y disminuir la longitud total perforada requerida para la explotación del mineral.

El rendimiento operativo de la columna T45 permitió alcanzar valores de hasta 1721 m/shank y entre 450 y 480 m/broca bajo condiciones normales de operación. Estos resultados guardan relación con Ruelas Alpaca (2020), quien concluye que la optimización de mallas y el control operacional permiten mejorar la productividad y reducir los tiempos de perforación.

5.2.4. Reducción de costos unitarios de perforación mediante brocas de 76 mm

La implementación de brocas de 76 mm permitió reducir el costo total final de perforación de US$ 9,301.31 a US$ 7,851.80, representando una disminución de 15.6 %. Asimismo, el costo unitario disminuyó de 1.026 US$/TM a 0.824 US$/TM.

Los costos de accesorios, equipo y mano de obra se redujeron en 14.9 %, 12.3 % y 35.1 %, respectivamente, debido principalmente a la reducción del número de taladros, la disminución de la longitud total perforada y la reducción del tiempo operativo de perforación.

Estos resultados coinciden con Ruelas Alpaca (2020), quien reporta reducciones de costos operativos mediante la optimización de las mallas de perforación y la disminución del número de taladros requeridos por disparo.

CONCLUSIONES

- Se demostró que la aplicación de brocas de 76 mm en las operaciones de perforación del Tajo 777 del Nivel –175 permitió mejorar su aporte productivo, incrementando la productividad de 6.69 TM/m a 8.18 TM/m y reduciendo el tiempo total de perforación de 64.0 h a 49.2 h. Estos resultados permiten reducir los tiempos operacionales de perforación y contribuir al cumplimiento de la programación productiva de la unidad minera.
- Se demostró que la sustitución del equipo Simba Epiroc S7D por el equipo Raptor 55-2R permitió mantener condiciones operativas adecuadas para la aplicación de brocas de 76 mm. Asimismo, permitió trabajar con un burden de 2.00 m y un espaciamiento de 2.20 m, superiores a los valores de 1.80 m y 2.00 m utilizados en la línea base.
- Se demostró que la aplicación de brocas de 76 mm en la perforación del Tajo 777 del Nivel –175 permitió reducir el número total de taladros de 108 a 88 y disminuir el tiempo global de perforación de 64.0 h a 49.2 h, equivalente a una reducción aproximada de 23.1 %, mejorando la eficiencia operacional del proceso.
- Se determinó que la implementación de brocas de 76 mm permitió reducir el costo unitario de perforación de 1.026 USD/TM a 0.824 USD/TM, equivalente a una reducción aproximada de 19.7 %, evidenciando una mayor eficiencia económica respecto a la línea base, conforme a los resultados comparativos presentados en la Tabla 33.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda al área de operaciones mantener la aplicación de brocas de 76 mm en el Tajo 777 del Nivel –175, considerando los parámetros de burden y espaciamiento evaluados, debido a que permiten reducir el número de taladros y disminuir el tiempo total de perforación en aproximadamente 23.1 %.
- Se recomienda al área de planeamiento y perforación evaluar la productividad en función de las toneladas obtenidas por metro perforado, considerando que con el diámetro de 76 mm el rendimiento se incrementó de 6.69 TM/m a 8.18 TM/m, mejorando el aporte productivo del tajeo.
- Se recomienda al área de costos y abastecimiento realizar el seguimiento del costo unitario de perforación, debido a que con la aplicación de brocas de 76 mm este indicador se redujo de 1.026 USD/TM a 0.824 USD/TM.
- Se recomienda a la gerencia de operaciones evaluar la aplicación de brocas de 76 mm en otros tajeos que presenten condiciones geomecánicas, geométricas y operativas similares a las del Tajo 777, previa evaluación técnica y económica.

BIBLIOGRAFÍA

Aparco Huillcas, A., & García de la Cruz, J. A. (2019). Optimización de la vida útil de los aceros de perforación para la reducción de costos en mina San Vicente – Cía. Minera San Ignacio de Morococha S.A.A. año 2018 [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú]. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNCP_f67c6e21327f0f0760287a45a41af487/Details?utm_source

Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons.

Compañía Minera Condestable S.A.A. (s. f.). Cartografía geológica y redes de galerías de la Unidad Minera Condestable [Base de datos interna]. Área de Geología, Unidad Minera Condestable.

Díaz Huamani, W. R. (2020). Trade off entre el método de tajeo por subniveles y el corte y relleno ascendente para minar la veta Thalia de una mina subterránea [Trabajo de investigación de bachiller en Ingeniería de Minas, Pontificia Universidad Católica del Perú]. https://tesis.pucp.edu.pe/bitstreams/e390d10e-c947-4fa3-b01e-a3f0beac80d3/download?utm_source

Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw-Hill Education. https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/4446562?utm_source

Hidalgo Polanco, E. S. (2016). Evaluación de automatización de operaciones unitarias en minería subterránea [Memoria de título, Universidad de Chile]. https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/33320?utm_source

Maldonado Álvarez, L. M. (2022). Evaluación geomecánica para determinar las condiciones de estabilidad de minado en la Unidad Minera Condestable S.A.A. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú]. https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/9102?utm_source

Ñaupas Paitán, H., Mejía Mejía, E., Novoa Ramírez, E., & Villagómez Páucar, A. (2014). Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis (4.ª ed.). Ediciones de la U. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/4278/1/DO_UC_EG_MAI_UC0584_2018.pdf?utm_source

Pirca Palomino, J. J. (2020). Análisis de las variables de rendimiento operacional en los equipos de carguío y transporte de mineral para la mejora de la productividad y reducción de costos en la Unidad Minera Condestable [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/9442/4/IV_FIN_110_TE_Pirca_Palomino_2020.pdf?utm_source

Ruelas Alpaca, A. M. (2020). Optimización de vida útil de los aceros de perforación para disminuir costos en Unidad Minera Santa Filomena – Sotrami S.A. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/9102?utm_source

Salvador Cobo, C. F. (2020). Automatización de operaciones unitarias de producción y desarrollo para la mejora de indicadores operacionales Mina El Teniente [Memoria de título, Universidad de Chile]. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/140580?utm_source

Southern Peaks Mining. (2020). Reporte de sostenibilidad Southern Peaks Mining 2020. Southern Peaks Mining. https://southernpeaksmining.com/wp-content/uploads/2024/01/REPORTE-DE-SOSTENIBILIDAD-SOUTHERN-PEAKS-MINING-2020-ESPANOL.pdf?utm_source

Valdés Soto, S. T. (2016). Metodología de cálculo de productividad de perforación y mejoras de la gestión de perforación en minas a cielo abierto: Aplicado a RDT [Memoria de título, Universidad de Chile]. https://chatgpt.com/c/6933673b-155c-8326-bf6a-54efc1596543#:~:text=Vald%C3%A9s%20Soto%2C%20S,Dialnet

ANEXOS

ANEXO 1:

ASPECTOS GENERALES DE LA UNIDAD MINERA CONDESTABLE

Compañía Minera Condestable S.A. comprende un área aproximada de 310 ha.; asimismo una parte del área superficial (40 ha) donde CMC viene desarrollando las actividades de la U.M. Raúl es de propiedad de la Comunidad Campesina de Mala por lo que la compañía, en cumplimiento a las normas vigentes, ha firmado un convenio de uso de los terrenos superficiales por una extensión total de 500 ha.

Figura 43

Ubicación geográfica de la Unidad Minera Condestable

Fuente: Google Maps (2025)

BREVE DESCRIPCIÓN DE MINERA CONDESTABLE

Minera Condestable es una mina subterránea que explota un yacimiento de cobre tipo IOCG (óxidos de hierro, cobre y oro). La mina consta de dos yacimientos adyacentes, Condestable y Raúl, que alimentan una planta de procesamiento de sulfuros. La compañía ha implementado un sistema de gestión de calidad y medio ambiente, y busca constantemente la mejora continua en sus procesos. Además, destaca por ser la primera mina peruana en operar al 100% con energía renovable y por emplear electromovilidad, lo que le permite reducir su huella de carbono.

ACTIVIDADES DE LA EMPRESA

Compañía Minera Condestable S.A. es una empresa dedicada al procesamiento y comercialización de concentrados de cobre, el cual es obtenido mediante la explotación de sus yacimientos.

La compañía pertenece al grupo económico Southern Peaks Mining (SPM), quien, en la actualidad, por medio de Southern Peaks Mining LP, el cual tiene más del 99.99 % de sus acciones comunes. El grupo económico SPM cuenta con una sede en Perú y tiene inversiones en corporaciones del sector minero peruano.

De la misma manera, el Grupo SPM está conformado por las siguientes empresas:

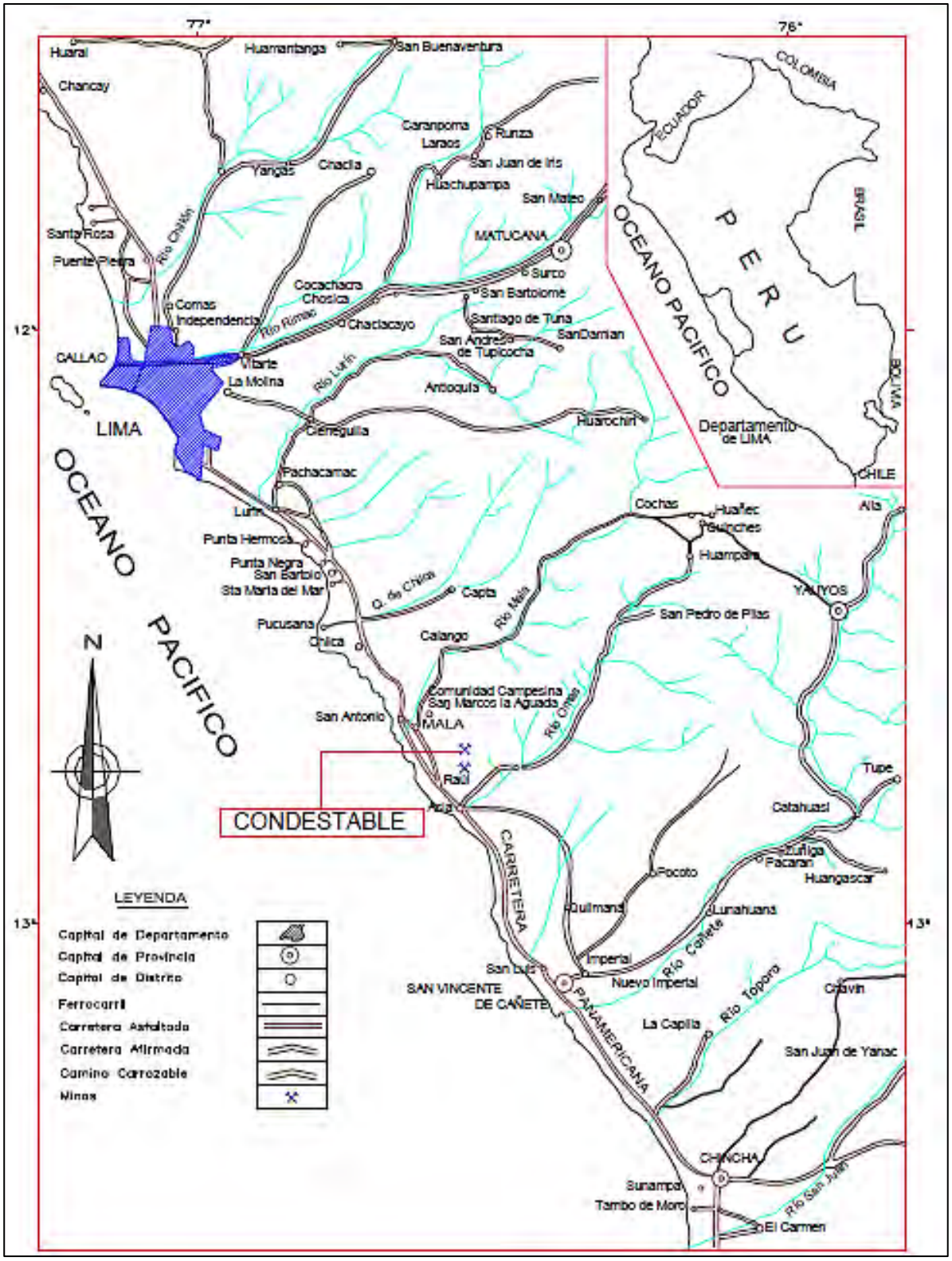
- a) Southern Peaks Mining S.A.C. El objetivo es dedicarse a la gestión y evaluación de los proyectos del Grupo.
- b) Ariana Operaciones Mineras S.A.C. Su objeto social es la exploración desarrollo y explotación de recursos mineros.
- c) Minera Tantara S.A.C. Tiene como actividad la exploración de yacimientos mineros

UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La Mina Condestable, se ubica en el distrito de Mala, provincia de Cañete, departamento de Lima a una altitud promedio de 249msnm. Sus coordenadas geográficas son las siguientes: 76º 35’ 30” de longitud W y 12º 42’ 02” de latitud Sur.

Figura 44

Plano de Ubicación U.M. Condestable



Fuente: Compañía de Minas Condestable

ACCESOS A LA MINA

Su acceso desde la ciudad de Lima, se efectúa utilizando la siguiente ruta:

- Autopista Lima – Mala = 90 Km. Mala – Mina = 4km.
- Autopista Abancay - Bujama= 845km. Bujama – Mina = 5km.

La mina Condestable se encuentra ubicada en el paraje denominado Loma de Vincho, adyacente a la localidad Bujama Altos en el distrito de Mala, provincia de Cañete, departamento de Lima. Se encuentra ubicada a una altitud promedio de 200 msnm, en una pequeña subcuenca, delimitada por una extensa llanura que ingresa como una entrante hasta las primeras estribaciones rocosas. El acceso a la mina es a través de la carretera Panamericana Sur hasta el Km. 90, desde donde se ingresa hacia el Este, aproximadamente 5 Km.

GEOMORFOLOGÍA Y RELIEVE

Todo el yacimiento está limitado por dos valles: uno al norte, el valle del rio Mala, y otro al sur, un valle actualmente seco. Las pendientes de las faldas de los cerros en el área son ligeras a moderadas. Se presentan dos unidades morfológicas descritas a continuación.

La unidad morfológica “cerros altos de modelado suave” involucra promontorios de altitudes entre 300 y 420 m s. n. m., que corresponden principalmente al área de propagación de las rocas volcánicas, las cuales presentan generalmente relieves o modelados suaves.

Figura 45

Vista del relieve y morfología del área de la Unidad Minera Condestable

Fuente: Elaboración Propia

En las intersecciones con las quebradas laterales muestran cortes abruptos, como se observan en las partes altas de las instalaciones de la chancadora y en la parte alta del antiguo Open Pit Raúl. Sobre esta unidad actúan los agentes químicos y físicos que provocan la alteración y fracturación de las rocas a profundidades considerables, prevaleciendo el proceso erosivo.

La unidad morfológica “depresiones con acumulaciones de depósitos cuaternarios” está asociada a los valles relativamente jóvenes como los observados desde el ingreso a las instalaciones de la mina, los cuales presentan relieves ondulados en su base, donde se acumula considerable cantidad de detritos de diverso origen; estos valles fueron labrados siguiendo probablemente lineamientos geológicos estructurales.

Figura 46

Imagen del Relieve Característico de la Zona

Fuente: Compañía de Minas Condestable

CLIMA Y METEOROLOGÍA

El clima del área es típico de la Costa Peruana, cálido y húmedo en verano con temperaturas que oscilan durante el día entre 20º y 30º C con medias de 75 %de humedad relativa, mientras que en el invierno la temperatura oscila entre11º y 18º, con humedad relativa de hasta 100 % que sumada a la precipitación de llovizna estacional, favorecen el desarrollo de vegetación de pastizales en las lomas, situación que es aprovechada por pastores nómades que bajan de la cordillera con ganado caprino y vacuno.

Figura 47

Imagen de clima característico de la zona

Fuente: Elaboración Propia

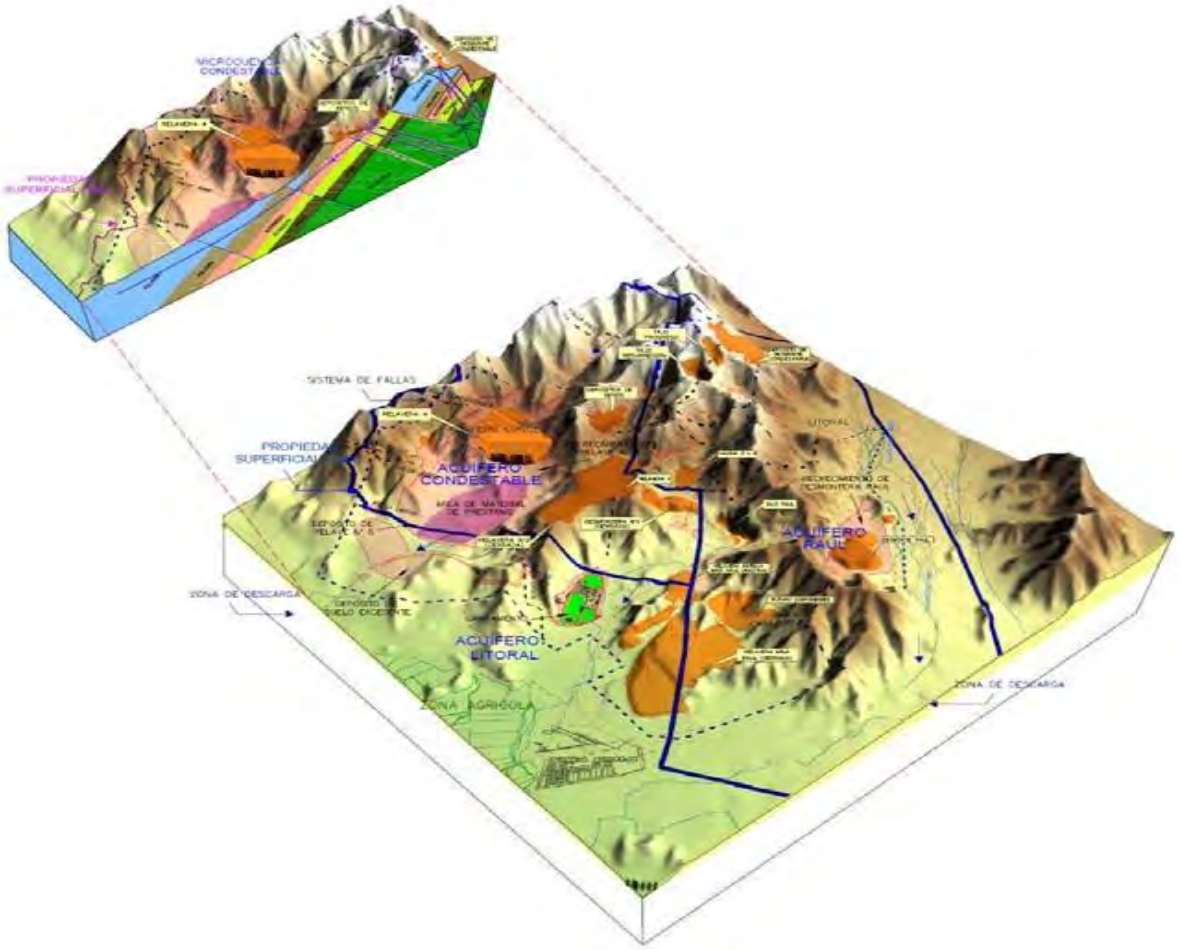
RECURSOS

Recurso de Agua.

La disposición estructural de los estratos afectados por fallamiento e intrusión de roca porfirítica andesítica e intrusiones granodioríticas como resultado del tectonismo regional ocurrido en el área de estudio, así como la calidad de agua subterránea nos ha permitido establecer que estaríamos frente a tres acuíferos en medio fracturado: acuífero litoral, acuífero Condestable y acuífero Raúl. Así mismo estos dos últimos se encuentran actualmente en régimen no influenciado ya que no reciben recarga por precipitación ni curso de agua superficial.

Figura 48

Cuencas de Minera Condestable



Fuente: Modelo hidrogeológico de la unidad Minera Condestable

Flora y Fauna

Las lomas de Mala: Durante el invierno costero, una densa capa de neblina con alto contenido de humedad envuelve las colinas costeras, acompañada de lloviznas que bloquean el paso de los rayos solares. Este evento da lugar a la formación de ecosistemas únicos, como las lomas, propias de la costa del Perú. La principal característica de estas lomas es su estacionalidad, lo que significa que muestran variaciones significativas según la época del año. En invierno, la presencia de la niebla favorece una vegetación diversa en las lomas costeras, mientras que, en

verano, esta vegetación disminuye notablemente, llegando incluso a ser escasa a simple vista. Las Lomas de Mala son hábitat de especies de flora y fauna, estos son algunos de los servicios ecosistémicos de las Lomas de Mala, hogar de una riqueza extraordinaria de flora y fauna, que se han adaptado a las condiciones cambiantes de este entorno costero. Su diversidad biológica es impresionante y ofrecen refugio y alimento a una amplia variedad de especies. A continuación, las cinco especies de flora más abundantes en las Lomas de Mala:

Figura 49

Imagen de Flora de las Lomas de Mala

Fuente: Área de Gestión Ambiental de Minera Condestable

En cuanto a la fauna, las Lomas de Mala son un hábitat crucial para una variedad de especies animales, que incluyen aves, mamíferos, reptiles e insectos. Entre las cinco especies más comunes, se encuentran:

Figura 50

Imagen de Fauna de las Lomas de Mala

Fuente: Área de Gestión Ambiental de Minera Condestable

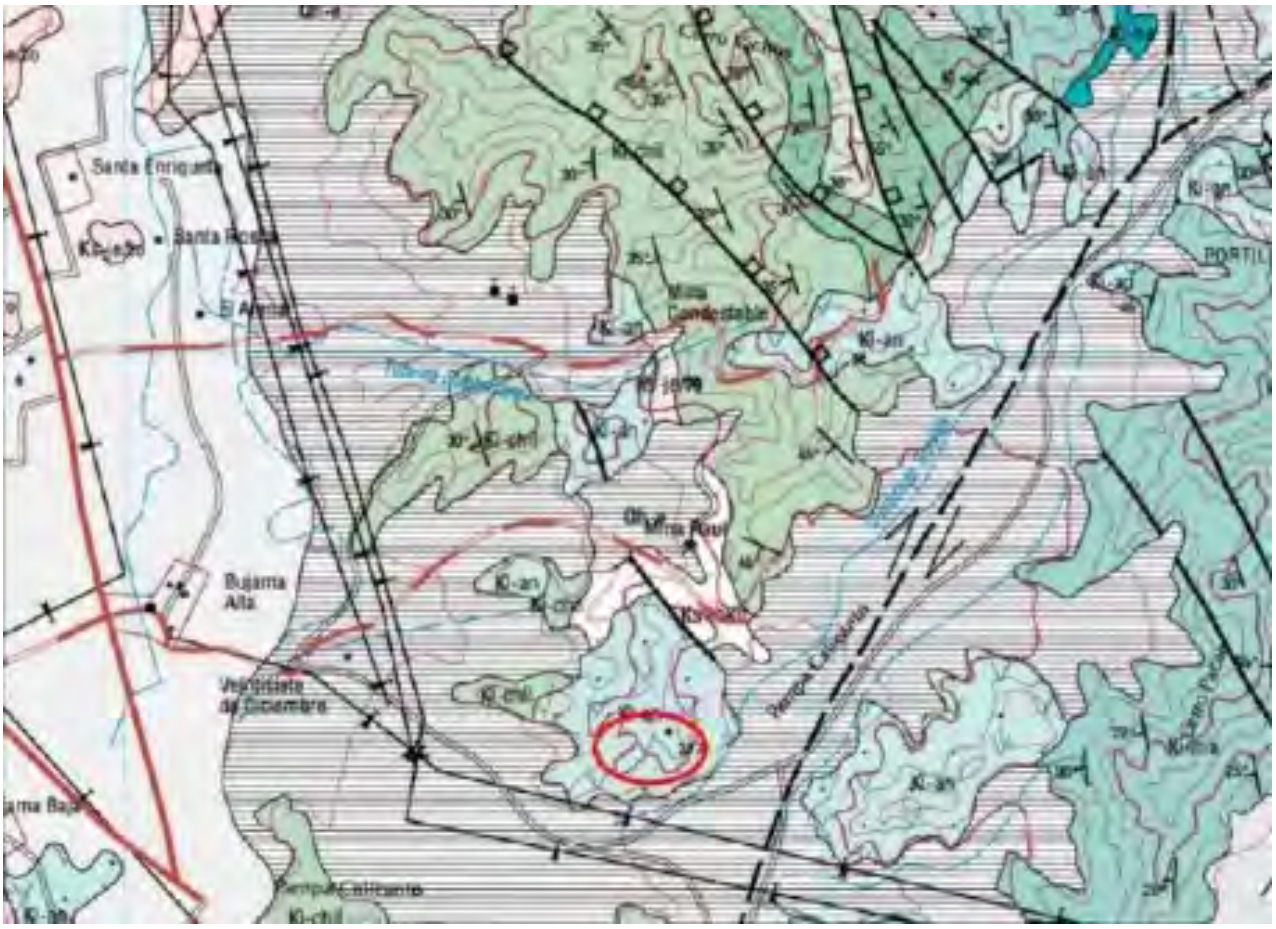
GEOLOGÍA

Geología Regional

Respecto a la Geología Regional, el proyecto está ubicado en la unidad lito-estratigráfica identificada como formación Chilca, rocas Intrusivas tales como Tonalita de las subunidades Jecuan y Tiabaya, el volcánico Andesita y depósitos cuaternarios eólicos. Se observa la presencia de rocas volcánico-sedimentarias, identificándose en la columna estratigráfica de piso a techo a la formación Asia, al Grupo Morro Solar, a las formaciones Pucusana, Pamplona, Atocongo y Chilca, y más hacia el sur a los volcánicos Quilmaná. La edad que se le asigna a esta secuencia va del jurásico superior al cretácico inferior. Cortando a la secuencia de rocas volcánico-sedimentarias, se presentan rocas intrusivas del cretácico medio, pertenecientes al batolito de la costa. Estructuralmente, la secuencia se presenta muy disturbada.

Figura 51

Formaciones Sedimentarias Regionales



Fuente: Área de Geología de Minera Condestable

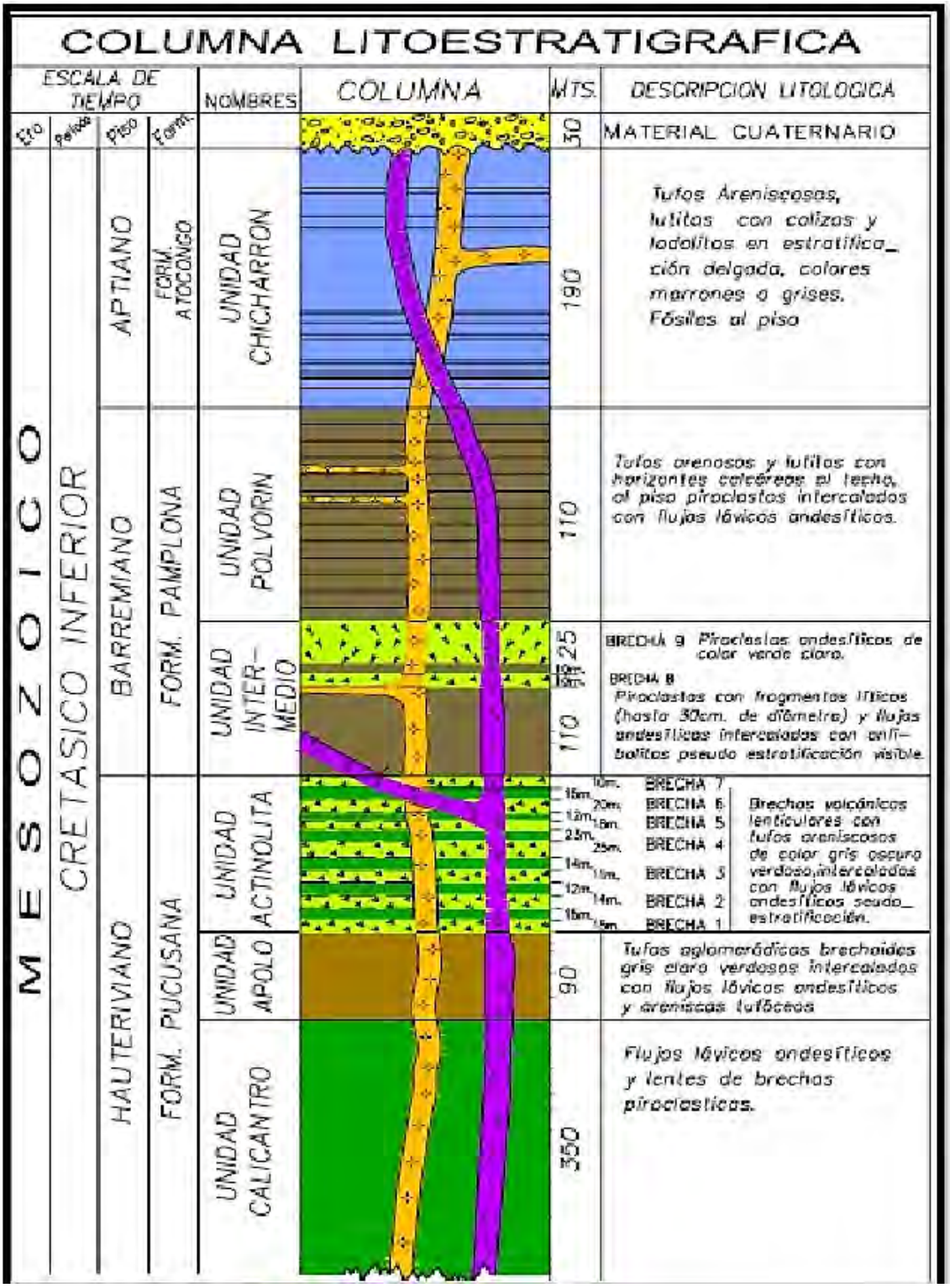
Geología Local

Las tres cuartas partes de las concesiones están formadas por una secuencia de rocas volcánico-sedimentarias depositadas en un ambiente marino de aguas poco profundas, el resto lo conforman rocas ígneas intrusivas asociadas al Batolito de la Costa Peruana. La geología en el área de la mina se caracteriza por un panel de roca sedimentaria volcán-homoclinal golpear al sur-sureste y inclinado hacia el oeste a unos 40º. Toda la mineralización de sulfuro conocido se produce a 1,3 km unidad de espesor, subdividida en seis principales subunidades conformables (Calicantro, Apolo, actinolita, Intermedio, Polvorín y chicharrón). Las rocas sedimentarias volcán hay

intrusiones una amplia gama de rocas intrusivas que comprenden noreste, norte-noreste y noroeste de tendencias diques. La mineralización de sulfuro de cobre en el yacimiento de Raúl-Condestable se produce como cuerpos de recambio estrato ligados (mantos o arrecifes) y sulfuro de vetas de cuarzo que soportan transversales. Los arrecifes consisten en diseminada, semi-masivo de sulfuro de hierro-óxido masiva. Los principales sulfuros son calcopirita, bornita, pirita y pirrotita. Los óxidos de hierro incluyen magnetita y hematita. Scapolite, calcita, cuarzo, y los anfíboles son los minerales de la ganga dominantes. A nivel local, molibdenita, blenda y galena se encuentran. oro Minor y plata están asociados con la mineralización de cobre.

Figura 52

Columna Litoestratigráfica



Fuente: Área de Geología de Minera Condestable

Geología Estructural

Las líneas de falla y las intrusiones rocosas causaron que las rocas porfídicas andesíticas y granodioríticas redujeran la integridad estructural de los estratos circundantes. Esto llevó a los geólogos a predecir que tres depósitos subterráneos residen dentro de un entorno fracturado. Los dos primeros se denominan acuíferos Constable y Raúl. Reciben afluencia de precipitaciones o canales que se conectan con el océano o la superficie terrestre. El acuífero costero, por otro lado, no se ve afectado por la precipitación porque no hay rutas de infiltración que lo conecten con la superficie.

El acuífero Inter cuenca drena sus aguas en el océano Pacífico y posee una altura piezométrica máxima entorno a los 30 m.s.n.m. Los acuíferos Condestable y Raúl no presentan zonas de drenaje natural ni tampoco de recarga y por tanto estos últimos se encuentran en régimen no influenciado. El acuífero Raúl se encuentra fuertemente compartimentado por las fallas y presenta zonas con el nivel piezométrico por debajo de los -175 msnm. En el acuífero Condestable el nivel piezométrico se encuentra entre los 280 msnm y los 32 msnm.

Origen y tipo de Yacimiento

Genesis del Yacimiento

El metal en forma de vetas, mantos y rellenos de porosidad se encuentra en brechas volcánicas y tobas estratificadas. El cobre y el hierro se mineralizan principalmente en estas estructuras; Otros metales incluyen anfíboles, calcopirita, hematita, magnetita, pirrotita, pirita y esfalerita.

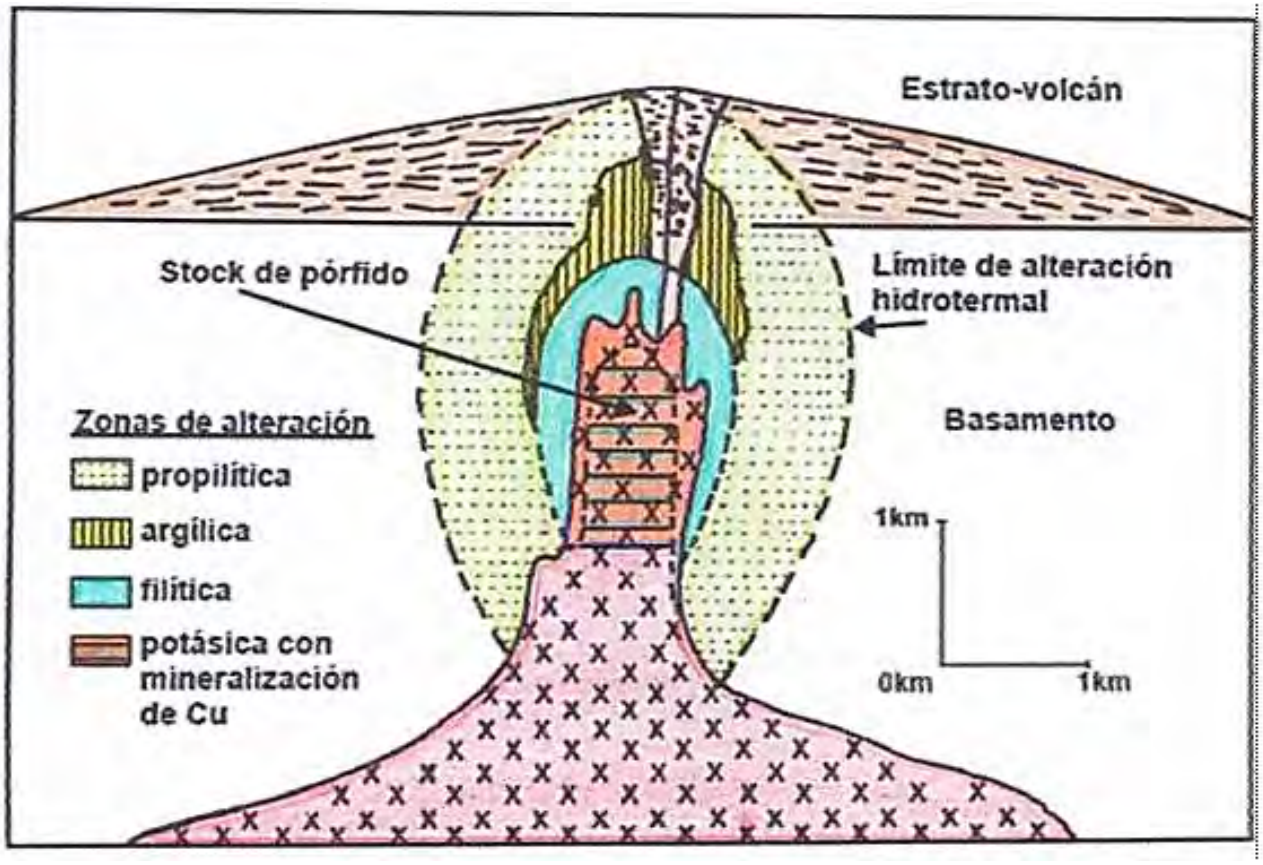
También se encuentran presentes concentraciones locales de molibdeno, plata y plomo. Los minerales económicos son la bornita y la calcopirita, ambos subproductos de los concentrados de metales, así como el oro y la plata que se encuentran en los subproductos de los concentrados.

Aparte del hecho de que a veces divergen, las ocurrencias en manto tienden a ser más extensas en las Unidades Apolo, Intermedio y Polvorín. También se pueden encontrar en pórfido dacítico y diabasa.

En cuanto a la apariencia, algunas formaciones del manto suelen presentarse en formas irregulares con una potencia máxima de 6 metros. Las brechas vienen en una variedad de tamaños y formas contenidas dentro de las Unidades de Actinolita y la parte superior Intermedia. Las vetas que cruzan las capas separan transversalmente estrechas hendiduras subverticales. Y se tienen inclusiones en forma de rosario.

Figura 53

Esquema de alteración hidrotermal y zonificación litológica del yacimiento



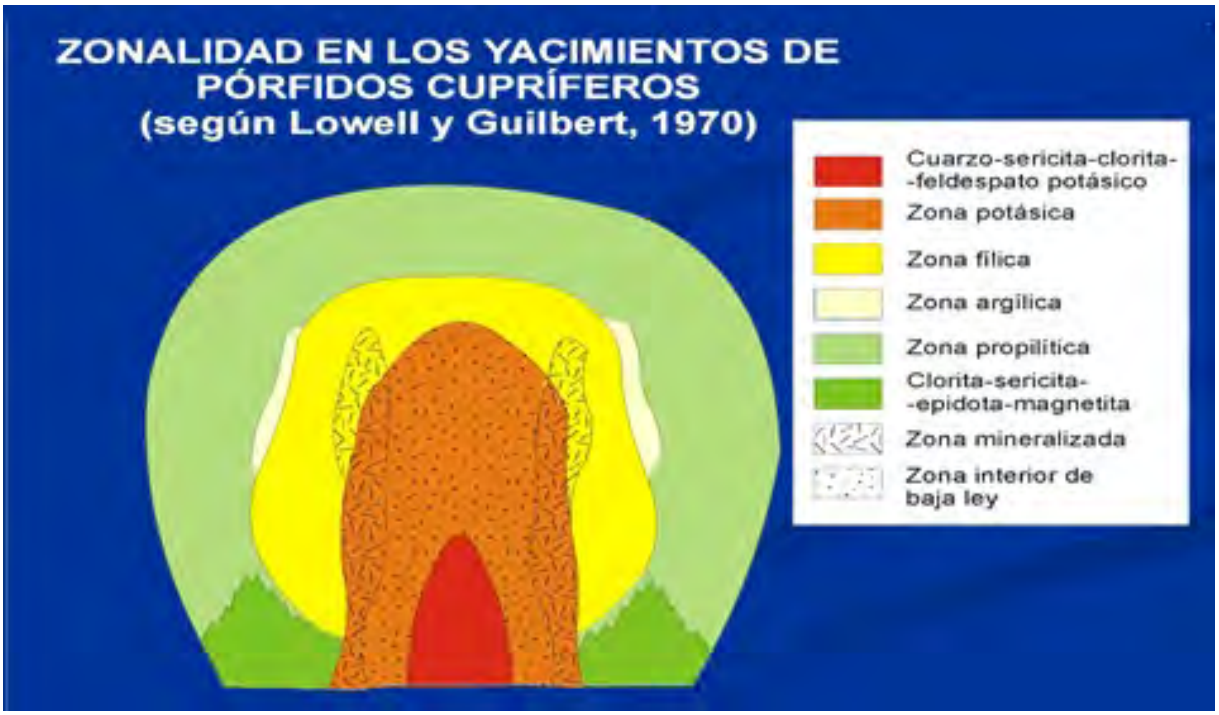
Fuente: Área de Geología de Minera Condestable

El proceso de alteración se lleva a cabo de la siguiente forma:

La distribución de las alteraciones hidrotermales es concéntrica, con la alteración potásica en el centro (compuesta por cuarzo, feldespato potásico, biotita y pirita), seguida de la alteración fílica (compuesta por cuarzo y sericita) y finalmente una zona de alteración propilítica (compuesta por epídota, clorita, calcita y pirita). Además, se forman cuerpos de skarn (compuestos por anfíboles, cloritas y granate, y hornfels de diópsido, granate y brucita) que se asemejan a techos colgantes.

Figura 54

Zonalidad de alteración en yacimientos de pórfidos cupríferos



Fuente: Área de Geología de Minera Condestable

El conjunto de rocas intrusivas (diorita, granodiorita, monzonita cuarcífera y pórfido cuarcífero) del Terciario, así como las calizas del Grupo Pucará (Triásico-Jurásico), forman la roca huésped del pórfido de cobre.

- El skarn de cobre se encuentra asociado a magmas calcoalcalinos, en particular a stocks y pórfidos de granodiorita/dacita y cuarzos monzoníticos.

- Los skarns de cobre se encuentran cerca o en contacto con el cuerpo intrusivo. También se observa una alta concentración de magnetita-hematita, lo que sugiere un entorno oxidante.
- Los minerales sulfurosos comunes incluyen la pirita, la calcopirita y en menor medida la bornita y la esfalerita, lo que sugiere un nivel moderado de contenido de azufre.

El depósito de este yacimiento está relacionado con el pórfido cuprífero de CIA Condestable, lo que resulta en grandes volúmenes de mineral. Estos depósitos se formaron a temperaturas que oscilaron entre 500° y 300° C. En el caso del skarn de cobre asociado a un sistema de pórfido cuprífero, existe una relación entre los eventos de alteración metasomática del skarn y la evolución de la alteración del pórfido. La alteración progresiva del skarn está relacionada con la alteración potásica y presenta una zonificación con respecto al núcleo potásico. A medida que el sistema de pórfido cuprífero evoluciona, se produce el colapso del sistema hidrotermal, lo que resulta en la alteración fílica en el pórfido y la alteración retrograda en el skarn. Esta alteración retrograda se superpone a la alteración progresiva y es altamente destructiva. Se caracteriza por la presencia de tremolita-actinolita, smectita, siderita, calcita, talco, epidota, clorita, junto con óxidos y/o sulfuros de hierro.

Mineralización

Las mineralizaciones metálicas ocurrieron como dos asociaciones. La primera de estas, es la asociación Fe-Cu y consiste básicamente de calcopirita, pirita, magnetita y contenidos menores de pirrotita, galena, esfalerita, illmenita, molibdenita, bornita, mackinawita, valerita, marcasita, electrum y cobalto, siendo la mena de calcopirita con subproductos de Ag y Au. La asociación Pb-Zn es tardía e insignificante y ocurre como vetas y venillas menores de galena y esfalerita con trazas de pirita, calcopirita, tetrahedrita, melnicovita, Au y calcita. No se ha observado formaciones exhalativas de las asociaciones Cu-Feo Pb-Zn. (J. Injoque 2002) La temperatura máxima de

formación es alrededor de 320ºC A 414ºC y los estudios de isótopos (S, H, O) e inclusiones fluidas indican que el azufre y fluidos mineralizantes fueron de origen marino y que no hubo ebullición. Las menas en mantos constituyen alrededor del 55% de la mineralización en Raúl, mientras que la mineralización en vetillas y diseminados constituyen alrededor del 35%, y las vetas un 10%. En los depósitos IOCG (pero además en pórfidos de cobre y skarn) es común observar la siguiente secuencia paragenética "de oxidación":

Hematita –> magnetita –> pirita –> calcopirita

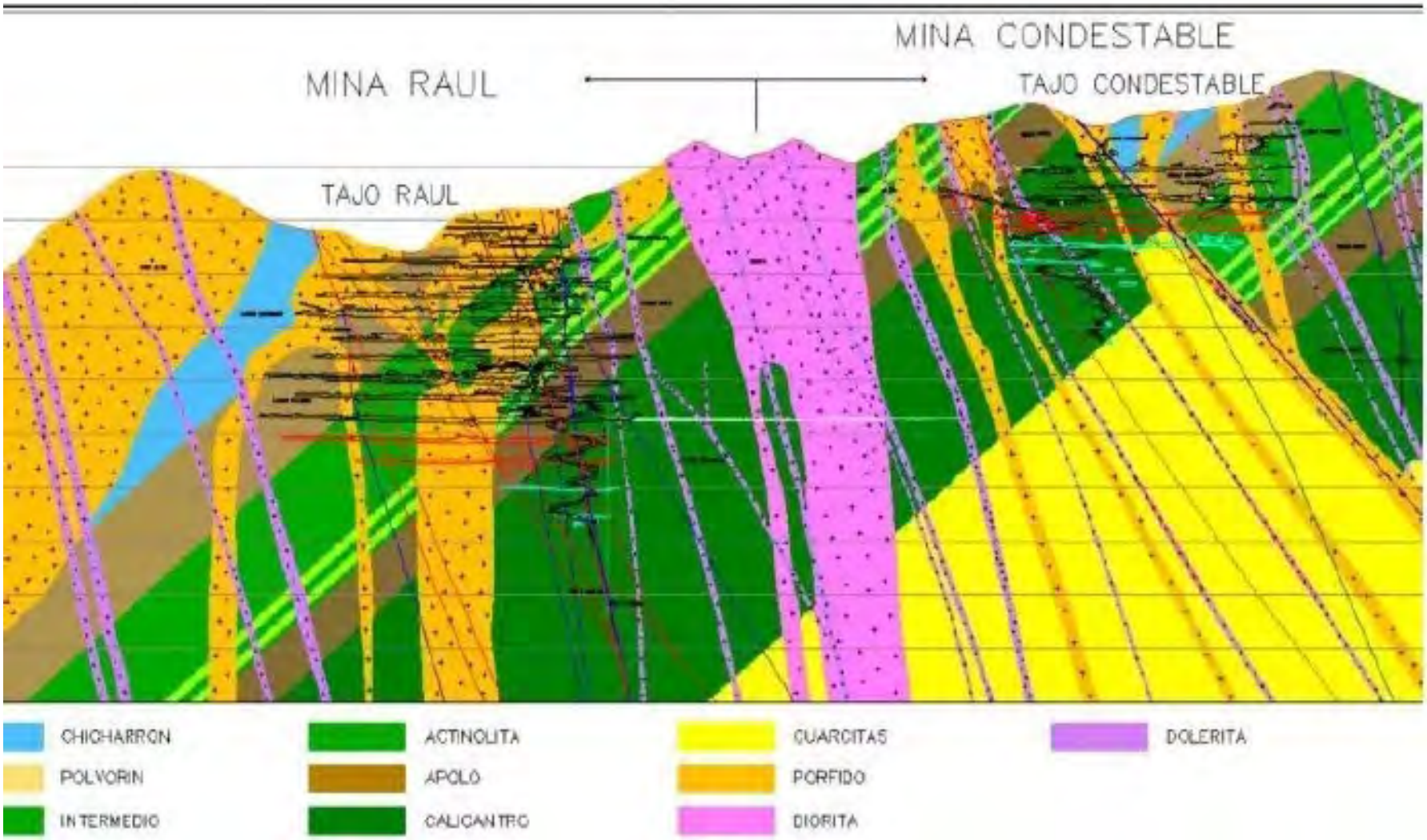
En otros lugares (dentro del mismo depósito) esta secuencia de oxidación puede ser reemplazada (no en todos los depósitos) por una secuencia "reductora":

pirrotita –> pirita –> calcopirita

La terminología "oxidación" y "reducción" (de Haller, 2006) de estas dos secuencias se refiere a su formación mineral (hematita o pirrotita). En la zona de Raúl se destacan las siguientes características para la mineralización:

Figura 55

Mapeo de zonas de concentración de Metal cuprífero



.Fuente: Área de Geología de Minera Condestable

ANEXO 2: Resumen de Parámetros Utilizados en el Diseño de Malla con Broca de 64 mm

Concepto	Símbolo	Valor	Unidad	Descripción
Diámetro de broca	D	64	mm	Taladro largo de producción
Densidad del explosivo	ρ_e	0.85	g/cm³	Explosivo de columna (ANFO o carga equivalente)
Potencia relativa en peso	PRP	1	–	Referido a ANFO
Constante de roca corregida	c	0.8	–	Para roca dura (c = 0.40 + 0.40)
Factor de fijación	f	0.95	–	Considera inclinación del barreno
Relación espaciamiento/burden	S/B	1.25	–	Relación geométrica inicial
Altura de tajeo (longitud perforada)	H	21.45	m	Longitud real perforada
Error de emboquille	e’	0.15	m	Desalineación inicial indicada por Epiroc para 64 mm
Desvío del barreno	db	0.02	m/m	Deriva acumulada en taladros largos
Ángulo de perforación	a	15°	grados	Respecto a la vertical
Burden máximo	Bmax	2.0	m	Resultado con Langefors
Burden práctico	Bpráctico	1.80	m	Ajustado por desviación y sobreperforación
Espaciamiento	S	2.00	m	Calculado con modelo López Jimeno

Fuente: Elaboración Propia

ANEXO 3: Malla de Perforación Broca 64mm

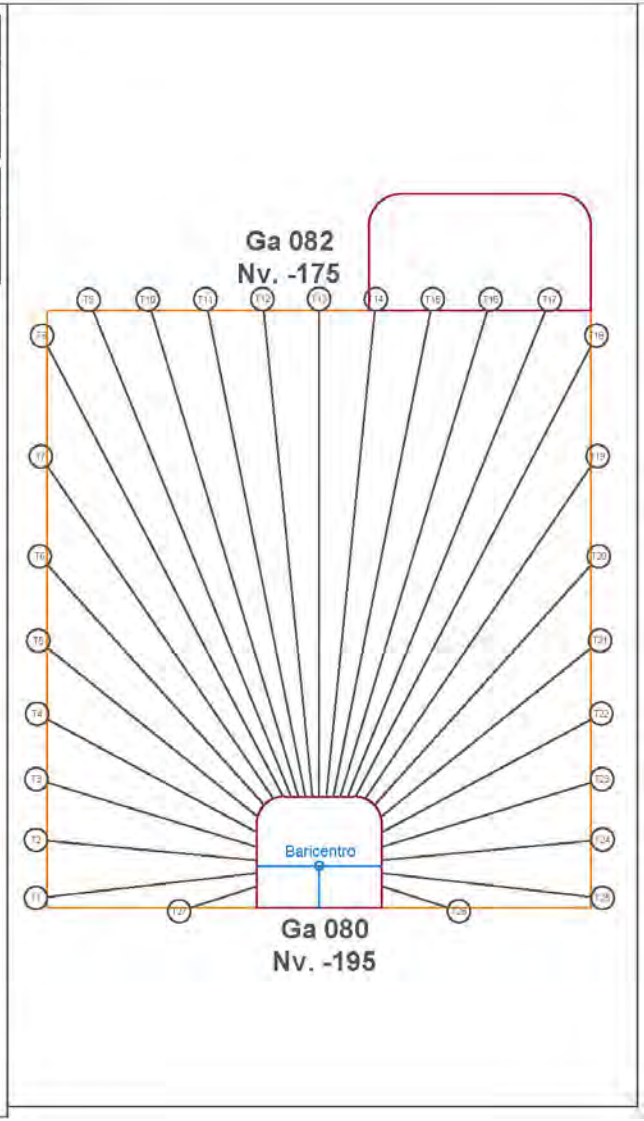
Burden	1.8m : SE2	Baricentro	1.5 m	Long. Perf. (m)	338.54m
Azimut	324.9°	Espaciamiento	2.0m	N° Taladros	27 Taladros
ANFO (Kg)	-	Diam. Perf.	64mm	Ind. Perf. (TM/m-perf)	-

Sección	Labor	Equipo	Fecha	Sist. de Referencia
SE1	TJ 777	S10	21/05/2024	

Elaborado por:
Aprobado por:
Vista:
Mirando hacia el slot
Nivel:
(-175) ; (-195) Tj 777
N° Plano:
SE-1
Esc:. 1:20
CIA. M. CONDESTABLE
SOUTHERN PEAKS MINING

RP: TJ777_SE1_64mm_TL(+)

N° Taladro	Ángulo (°)	Longitud (m)	Observaciones
T1	-6.44° I	7.58	
T2	5.28° I	7.56	
T3	17.03° I	7.88	
T4	28.31° I	8.55	
T5	38.68° I	9.69	
T6	47.87° I	11.63	
T7	55.75° I	14.45	
T8	62.36° I	18.26	
T9	67.8° I	18.85	
T10	73.13° I	18.23	
T11	78.63° I	17.8	
T12	84.28° D	17.54	
T13	90° D	17.45	
T14	84.29° D	17.54	
T15	78.65° D	17.8	
T16	73.15° D	18.23	
T17	67.82° D	18.84	
T18	62.38° D	18.28	
T19	55.77° D	14.46	
T20	47.88° D	11.63	
T21	38.7° D	9.7	
T22	28.32° D	8.55	
T23	17.05° D	7.87	
T24	5.3° D	7.56	
T25	-6.44° D	7.58	
T26	-17.93° D	2.51	
T27	-17.93° I	2.51	
TOTAL		338.54	

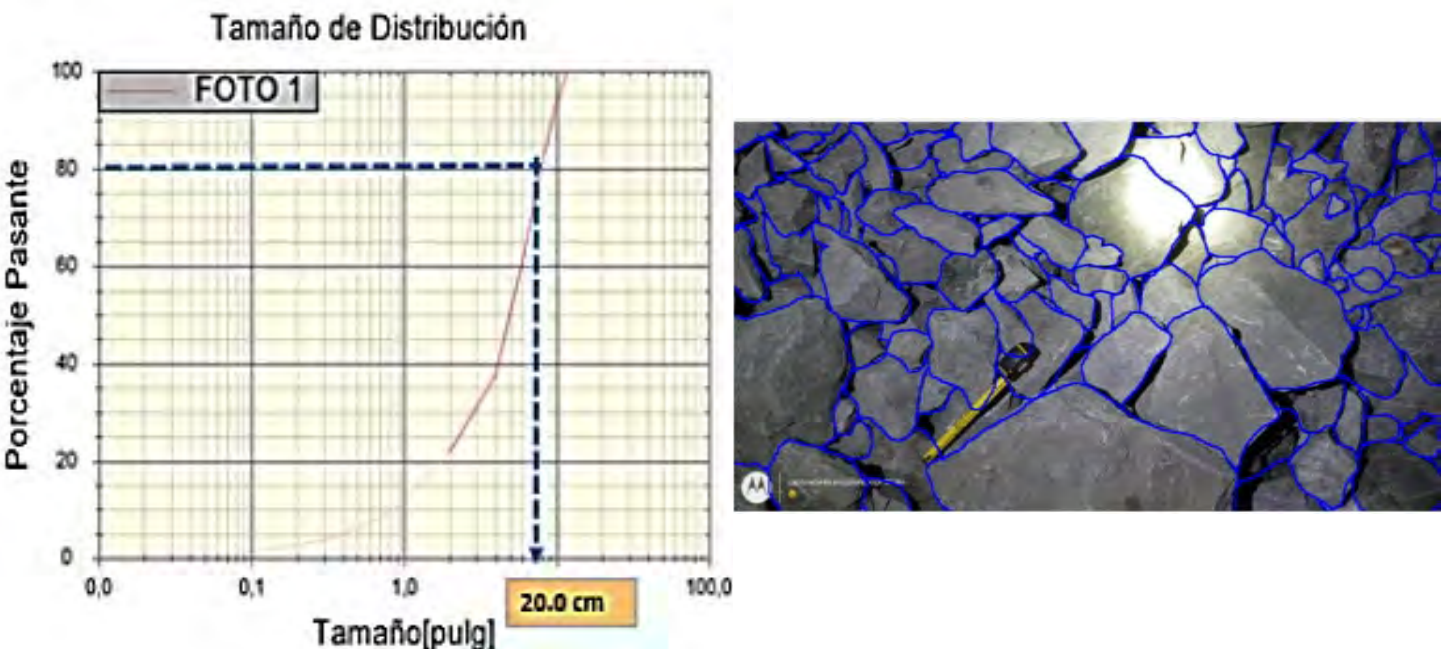


Fuente: Departamento de Planeamiento U.M. Condestable.

ANEXO 4: Análisis del P80 de voladura con Broca de 64 mm (2.5”)

Figura 56

Análisis del P80 de voladura – Foto 1 (Broca de 64 mm)



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 35

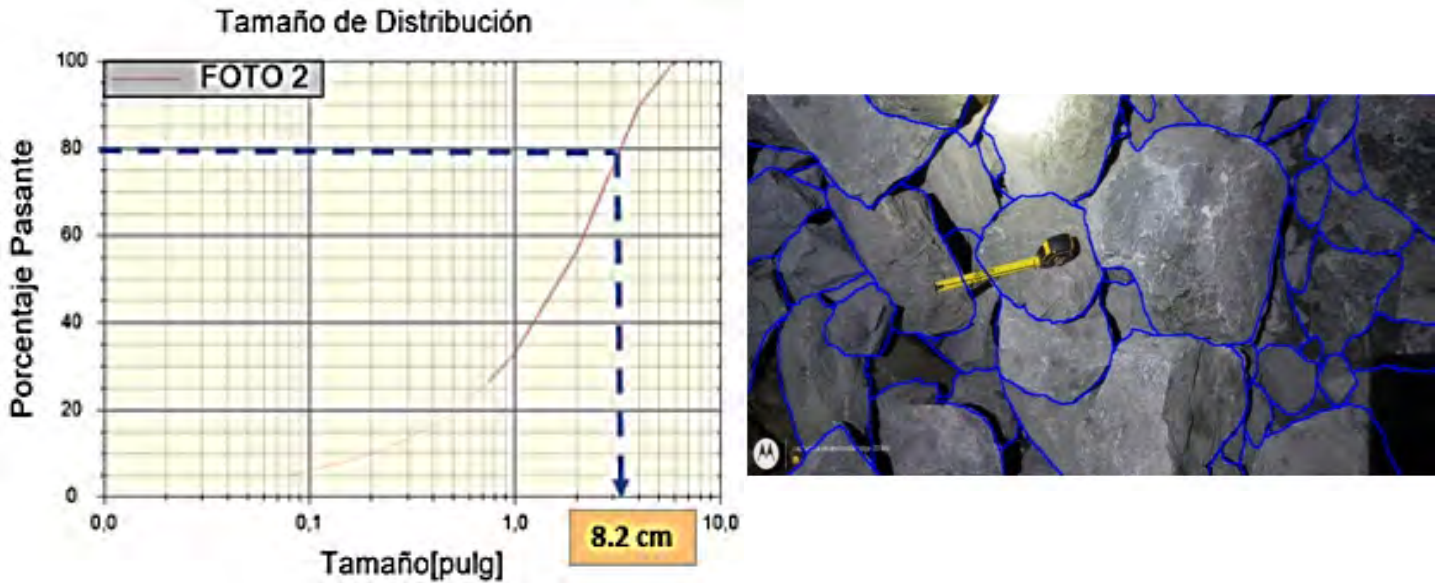
Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 1 (Broca de 64 mm)

% Pasante	Tamaño (cm)
P10	2.11
P20	4.5
P30	8.13
P40	10.72
P50	12.95
P60	14.96
P70	17.27
P80	**20.02**
P90	23.72
P100	29.92

Fuente: Elaboración Propia

Figura 57

Análisis del P80 de voladura – Foto 2 (Broca de 64 mm)



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 36

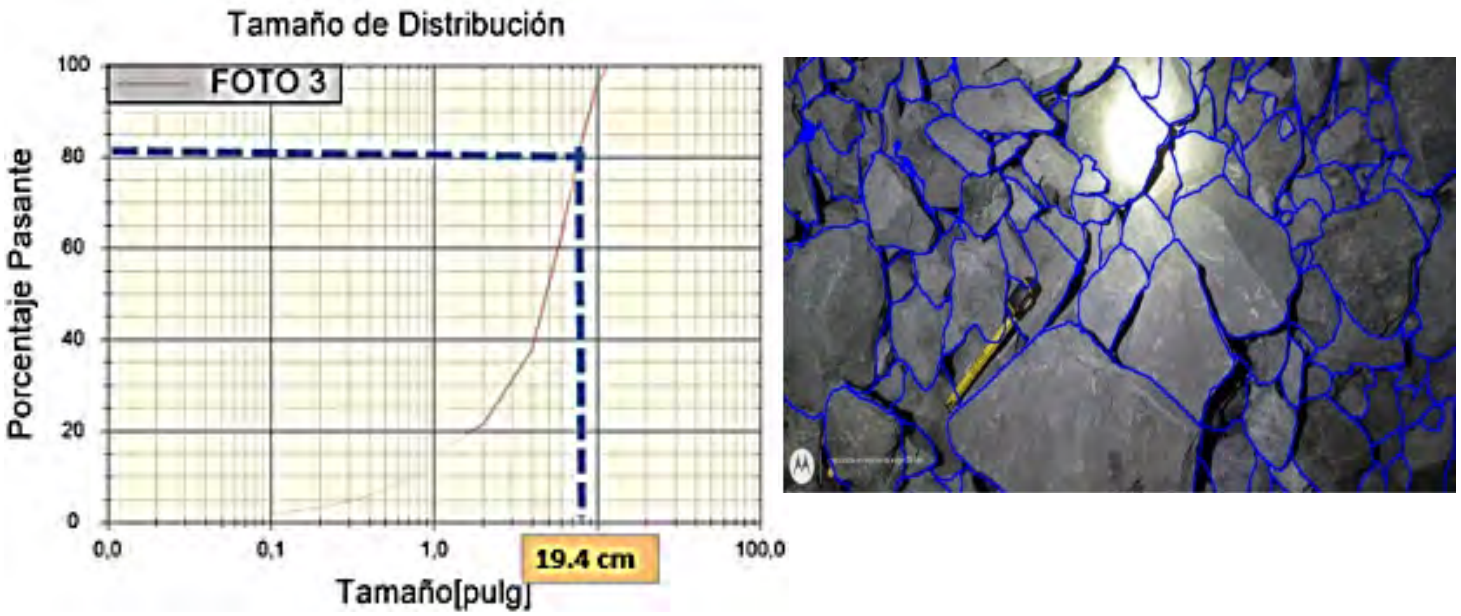
Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 2 (Broca de 64 mm)

% Pasante	Tamaño (cm)
P10	0.51
P20	1.3
P30	2.26
P40	3.25
P50	4.34
P60	5.49
P70	6.76
P80	**8.2**
P90	10.34

Fuente: Elaboración Propia

Figura 58

Análisis del P80 de voladura – Foto 3 (Broca de 64 mm)



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 37

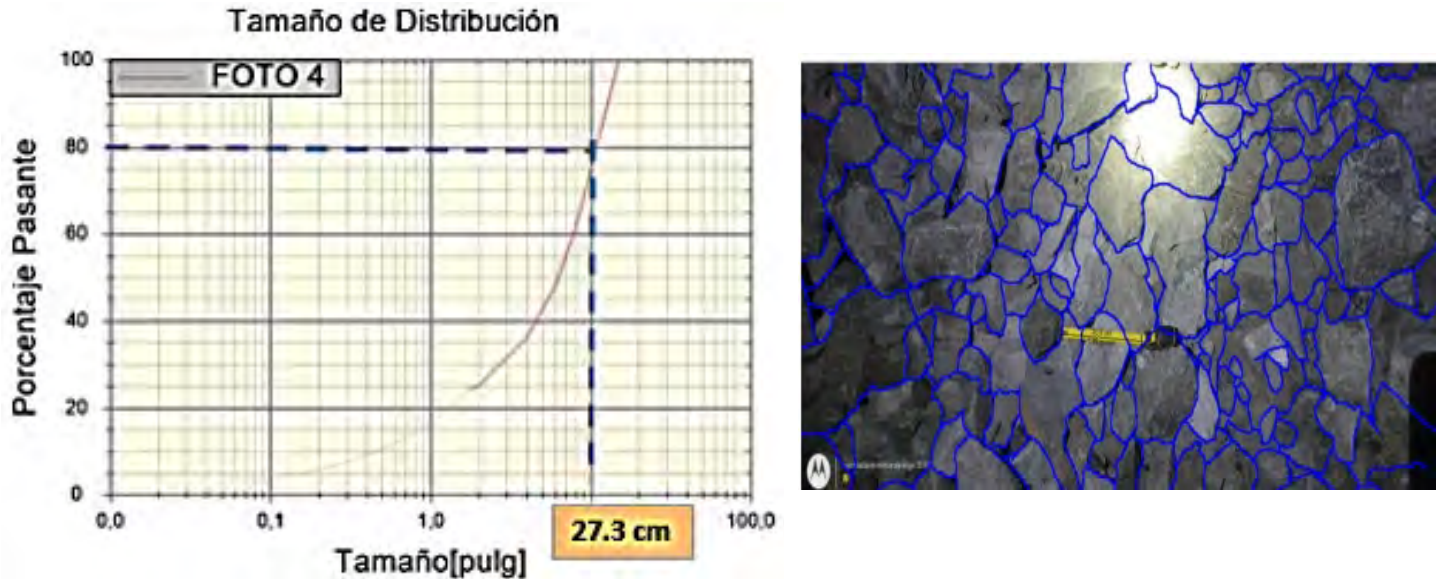
Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 3 (Broca de 64 mm)

% Pasante	Tamaño (cm)
P10	1.85
P20	4.32
P30	8.23
P40	10.67
P50	12.75
P60	14.66
P70	16.97
P80	**19.46**
P90	22.61
P100	29.72

Fuente: Elaboración Propia

Figura 59

Análisis del P80 de voladura – Foto 4 (Broca de 64 mm)



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 38

Resultados del análisis granulométrico (P80) – Foto 4 (Broca de 64 mm)

% Pasante	Tamaño (cm)
P10	1.14
P20	3.38
P30	7.54
P40	11.81
P50	16.03
P60	20.07
P70	23.65
P80	**27.36**
P90	31.34
P100	38.33

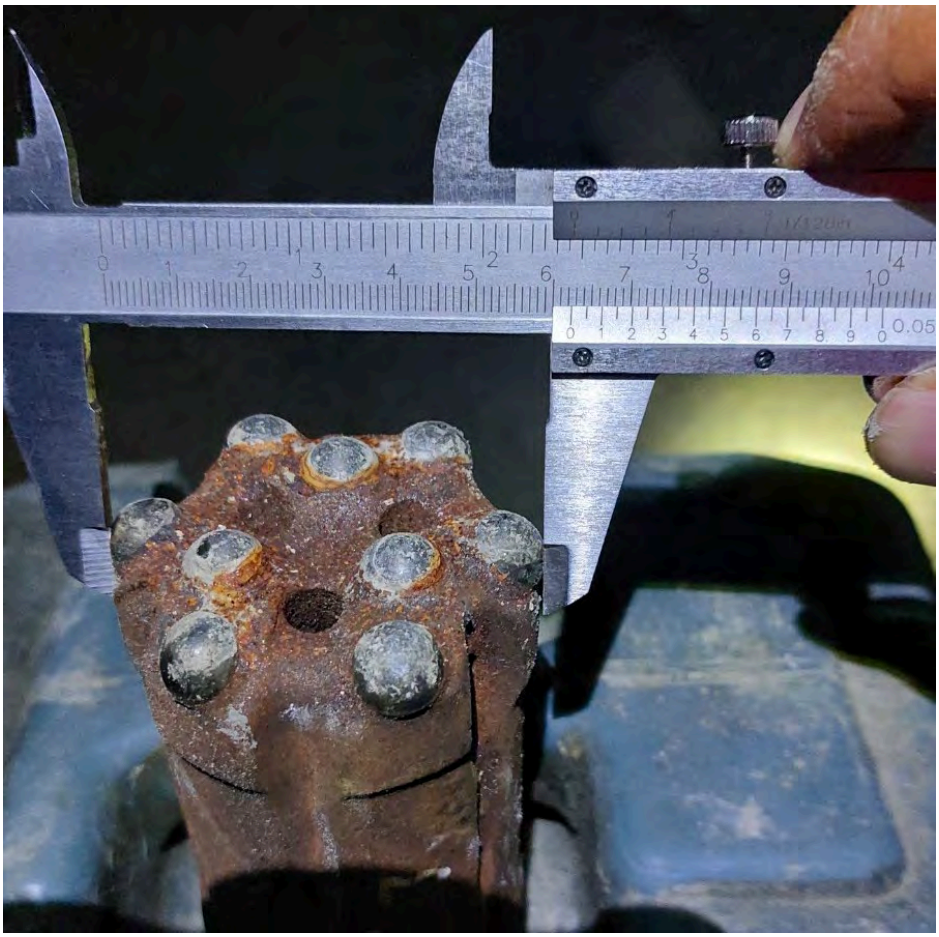
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 39

Resultados del análisis granulométrico combinado (P80 promedio = 20.3 cm) - Broca de 64 mm

% Pasante	Tamaño (cm)
P10	3.8
P20	6.5
P30	8.7
P40	10.7
P50	12.7
P60	14.8
P70	17.3
P80	**20.3**
P90	24.6
P100	40.3

Fuente: Elaboración Propia

A partir del análisis combinado se verifica que, utilizando la broca de 64 mm de diámetro, la fragmentación característica del P80 alcanza un valor promedio de 20,3 cm.

ANEXO 5: REGISTRO FOTOGRÁFICO