



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Optimización de la fragmentación del mineral mediante el
rediseño de mallas de perforación aplicando modelos
matemáticos en Minera Shuntur S.A.C.**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

AUTOR

Edson Rai Andrew REYES ORDOÑEZ

ASESOR

Dr. Emiliano Mauro GIRALDO PAREDEZ

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Reyes, E. (2025). *Optimización de la fragmentación del mineral mediante el rediseño de mallas de perforación aplicando modelos matemáticos en Minera Shuntur S.A.C.* [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería de Minas]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Edson Rai Andrew Reyes Ordoñez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	74303545
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Emiliano Mauro Giraldo Paredez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08635711
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-8069-8485
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Jorge Enrique Soto Yen
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	03493146
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Jesús Alberto Torres Guerra
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07219691
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Victor Hugo Ramirez Ponce
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06163701
Datos de investigación	

Línea de investigación	C.0.4.1. Desarrollo de modelos, simulación y optimización de procesos
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	Sin Financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Ancash Provincia: Huaraz Distrito: Pira Coordenadas UTM 8,940,669.36 m S 200,530 m E
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Enero-Diciembre 2021
URL de disciplinas OCDE	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA
OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS**

En el auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el viernes 21, de noviembre del 2025 siendo las 11:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. JORGE ENRIQUE SOTO YEN	(PRESIDENTE)
Dr. JESÚS ALBERTO TORRES GUERRA	(SECRETARIO)
Ing. VICTOR HUGO RAMÍREZ PONCE	(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación del Trabajo de Suficiencia Profesional Titulado: **“Optimización de la fragmentación del mineral mediante el rediseño de mallas de perforación aplicando modelos matemáticos en Minera Shuntur S.A.C.”** presentado por Don: **EDSON RAI ANDREW REYES ORDOÑEZ**, Bachiller en Ingeniería Minas, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero de Minas.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

..... *Aprobado con mención honrosa*

Concluida la Sustentación del Trabajo de Suficiencia Profesional, el Jurado procedió a evaluar y calificar según el reglamento vigente, cuyo

resultado fue la nota de: *18* (*Dieciocho*).

Habiendo sido aprobada la Sustentación del Trabajo de Suficiencia Profesional por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS**, a Don: **EDSON RAI ANDREW REYES ORDOÑEZ**.

Siendo las *12:00* horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación del Trabajo de Suficiencia Profesional.

Lima, 21 de noviembre del 2025


Dr. JORGE ENRIQUE SOTO YEN
Presidente


Dr. JESUS ALBERTO TORRES GUERRA
Secretario


Ing. VICTOR HUGO RAMIREZ PONCE
Miembro


Dr. EMILIANO MAURO GIRALDO PAREDEZ
Asesor de Tesis

Anexo 1
CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **EMILIANO MAURO GIRALDO PAREDEZ** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la EP N° **00004-2025-EPIMI-FIGMMG/UNMSM** de la tesis, cuyo título es **“Optimización de la fragmentación del mineral mediante el rediseño de mallas de perforación aplicando modelos matemáticos en Minera Shuntur S.A.C.”** presentado por el bachiller **EDSON RAI ANDREW REYES ORDOÑEZ** para optar el título profesional de Ingeniero de Minas, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación realizados mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado presenta un 10 % de similitud, lo que corresponde al nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título profesional de Ingeniero de Minas.

Lima, 11 de noviembre de 2025



Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: **EMILIANO MAURO GIRALDO PAREDEZ**

DNI: 08635711

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a Dios, por ser mi guía, mi fuerza en los momentos de dificultad y la luz que ha iluminado cada paso de este camino. A mis padres, por su amor incondicional, su ejemplo de perseverancia y su apoyo constante, sin el cual este logro no sería posible. A mi familia, por su cariño, comprensión y aliento en cada etapa de este proceso. Y a mi sobrina, cuya alegría y ternura han sido una fuente de motivación y esperanza en los días más exigentes.

A todos ustedes, les dedico con profundo amor y gratitud este logro.

Agradecimiento

El presente trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo y acompañamiento de muchas personas, a quienes deseo expresar mi más profundo agradecimiento:

A mi familia, por su amor, paciencia y apoyo incondicional. Gracias por estar siempre presentes, por creer en mí y por brindarme la motivación necesaria para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

A la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas, por brindarme la formación académica que ha sido la base de mi crecimiento profesional, y por fomentar en mí el compromiso con la excelencia y el desarrollo responsable de la minería.

A mi asesor de tesis, Dr. Mauro Giraldo, por su valiosa orientación, su paciencia y dedicación durante todo este proceso. Su acompañamiento ha sido fundamental para culminar este trabajo con éxito.

A todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron a la realización de esta tesis, les expreso mi más sincero agradecimiento.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como finalidad optimizar la fragmentación del mineral en la Unidad Minera Shuntur S.A.C., mediante el rediseño de las mallas de perforación y voladura, fundamentado en la aplicación de modelos matemáticos que permitan mejorar la eficiencia operativa del proceso minero.

Para ello, se empleó una metodología de tipo aplicada, considerando como población a todos los frentes de producción desarrollados mediante perforación con taladros largos en la mencionada unidad minera. La recolección de datos se realizó a través de análisis documental y trabajo de campo, asegurando la validación de los objetivos mediante controles de calidad y eficacia de la información obtenida.

Los resultados permitieron determinar que la clase de roca predominante corresponde a una roca dura (calidad III), con un índice RMR de 69. Asimismo, se compararon las mallas de perforación y voladura antes y después del rediseño, optimizando los parámetros técnicos clave: burden de 1.4 m, espaciamiento de 1.7 m y un factor de carga de 1.9. Estas mejoras generaron una mayor eficiencia en los procesos mencionados. La fragmentación obtenida para la malla optimizada presentó un P80 de 146 mm (5.75 pulgadas). En cuanto a los costos operativos, la malla mejorada registró un costo de S/ 2675.24 por metro, inferior al costo anterior de S/ 3835.01 por metro. Además, la productividad aumentó, alcanzando un índice de 2.98 en la malla mejorada.

En tal sentido, el rediseño de las mallas de perforación y voladura basado en modelos matemáticos contribuyó significativamente a la reducción de costos operativos, el incremento de la productividad y la mejora de la rentabilidad en la Unidad Minera Shuntur S.A.C.

Palabras claves: optimización, voladura, fragmentación de roca, malla de perforación, eficiencia operativa, granulometría, reducción de costos.

ABSTRACT

The purpose of this research was to optimize mineral fragmentation at the Shuntur S.A.C. Mining Unit by redesigning the drilling and blasting patterns, based on the application of mathematical models to improve the operational efficiency of the mining process.

To this end, an applied methodology was used, considering all production fronts developed using long-hole drilling at the aforementioned mining unit as a population. Data collection was conducted through documentary analysis and fieldwork, ensuring the validation of objectives through quality controls and the effectiveness of the information obtained.

The results determined that the predominant rock class corresponds to hard rock (quality III), with an RMR index of 69. Furthermore, the drilling and blasting patterns were compared before and after the redesign, optimizing the key technical parameters: burden of 1.4 m, spacing of 1.7 m, and a load factor of 1.9. These improvements generated greater efficiency in the aforementioned processes. The fragmentation obtained for the optimized mesh presented a P80 of 146 mm (5.75 inches). Regarding operating costs, the improved mesh cost S/2,675.24 per meter, lower than the previous cost of S/3,835.01 per meter. Furthermore, productivity increased, reaching an index of 2.98 for the improved mesh.

In this regard, the redesign of the drilling and blasting meshes based on mathematical models contributed significantly to the reduction of operating costs, increased productivity, and improved profitability at the Shuntur S.A.C. Mining Unit.

Keywords: optimization, blasting, rock fragmentation, drill mesh, operating efficiency, particle size distribution, cost reduction.

ÍNDICE DE CONTENIDO

pág.

Dedicatoria	i
Agradecimiento	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
CAPÍTULO I.....	1
Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del Problema	2
1.2.1. <i>Descripción de la Problemática</i>	2
1.2.2. <i>Formulación del Problema</i>	2
1.3. Objetivos de la Investigación.....	3
1.3.1. <i>Objetivo General</i>	3
1.3.2. <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.4. Importancia y Alcance de la Investigación	3
1.5. Limitaciones de la Investigación	4
1.6. Situación Actual.....	4
1.6.1. <i>Errores Identificados en el Diseño Tradicional de Mallas de Perforación y Voladura</i>	4
1.6.2. <i>Errores en el Burden</i>	4
1.6.3. <i>Errores en el Diseño de Malla</i>	5
1.6.4. <i>Errores en la Profundidad</i>	8
1.6.5. <i>Errores en la Granulometría</i>	12
1.6.6. <i>Costos Operativos</i>	15
1.6.7. <i>Productividad en el ciclo de minado</i>	17

CAPITULO II	18
Marco Teórico	18
2.1. Antecedentes de la Investigación.....	18
2.2. Bases Teóricas.....	22
2.2.1. <i>Clasificación Geomecánica Del Macizo Rocosó</i>	22
2.2.2. <i>Método Langerfors</i>	23
2.2.3. <i>Método Konya</i>	25
2.2.4. <i>Método Pearse</i>	26
2.2.5. <i>Granulometría</i>	27
2.2.6. <i>Tamaño de P80</i>	28
2.2.7. <i>Malla de Perforación</i>	30
2.2.8. <i>Optimización del Diseño de Mallas</i>	31
2.2.9. <i>Perforación</i>	32
2.2.10. <i>Voladura</i>	32
2.2.11. <i>Tipos de Voladura</i>	32
2.2.12. <i>Accesorios de Voladura</i>	37
2.2.13. <i>El Explosivo</i>	39
2.2.14. <i>Explosivos en Voladura</i>	41
2.3. Glosario.....	43
CAPITULO III	45
Hipótesis y Variables.....	45
3.1. Hipótesis General.....	45
3.1.1. <i>Hipótesis Específicas</i>	45
3.2. Variables.....	46
3.2.1. <i>Variable Independiente</i>	46
3.2.2. <i>Variable Dependiente</i>	46
3.3. Operacionalización de Variables.....	46

CAPITULO IV	50
Materiales y Métodos	50
4.1. Área de Estudio	50
4.2. Diseño de Investigación	50
4.2.1. <i>Tipo de Investigación</i>	50
4.2.2. <i>Nivel de Investigación</i>	51
4.2.3. <i>Diseño de la Investigación</i>	51
4.2.4. <i>Método de Investigación</i>	51
4.3. Población y Muestra	52
4.4. Procedimiento, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información	
53	
4.4.1. <i>Métodos y Técnicas de Investigación</i>	53
4.4.2. <i>Unidad de Análisis</i>	53
4.4.3. <i>Etapa Preliminar</i>	53
4.4.4. <i>Etapa de Campo</i>	54
4.4.5. <i>Etapa de Gabinete</i>	54
4.4.6. <i>Procesamiento de los datos</i>	55
4.5. Análisis Estadístico	55
4.5.1. <i>Datos técnicos complementarios del análisis</i>	55
CAPITULO V	57
Resultados	57
5.1. Optimización de Mallas de Perforación Mediante Modelos Matemáticos	57
5.2. Diseño Mejorado de la Malla	63
5.3. Costos Operativos	69
5.4. Productividad en el ciclo de minado	71
5.5. Resultados con la Malla Optimizada	71
5.6. Comparación de resultados	72

5.7. Análisis de indicadores clave de rendimiento (KPI).....	73
CAPÍTULO VI.....	74
Discusión de Resultados	74
CAPÍTULO VII	77
Conclusiones y Recomendaciones	77
ANEXOS	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Denominación de Taladros	31
Figura 2 Pre-Corte.....	33
Figura 3 Cebo de Voladura Amortiguada.....	34
Figura 4 Explosivos y Formas para Voladura	35
Figura 5 Esquema de Carguío de Taladros Positivos.....	36
Figura 6 Los Faneles	39
Figura 7 Descripción General del Proceso de Detonación de un Taladros y los Eventos que Ocurren en Secuencia.....	40
Figura 8 Emulsión.....	42
Figura 9 Errores en el Burden	5
Figura 10 Diseño Empleado Posteriormente	6
Figura 11 Espaciado en los Taladros de la Malla Posterior	7
Figura 12 Errores en la Profundidad de los Taladros y Longitud de la Malla Posterior.	10
Figura 13 Fotografía de la Granulometría Inicial	12
Figura 14 Gráfica de Análisis Granulométrico	13
Figura 15 Análisis Granulométrico en el Programa.....	13
Figura 16 Resultados de los Análisis	14
FIGURA 17 Burden para la Sección 22	61
Figura 18 Diseño con el Espaciamiento en la Sección 22	62
Figura 19 Diseño de Malla Optimizada	64
Figura 20 Diseño de Carga.....	65
Figura 21 Análisis Granulométrico	67
Figura 22 Resultados de P80.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Espaciado en los Taladros de la Malla Posterior	8
Tabla 2 Errores en la Profundidad	9
Tabla 3 Longitud de Carguío y Taco de Malla Posterior.....	11
Tabla 4 Análisis Granulométrico.....	12
Tabla 5 Costos Operativos del Diseño de Malla Posterior de la Sección 21.....	15
Tabla 6 Productividad del Ciclo de Minado	17
Tabla 7 Calidad de roca	27
Tabla 8 Tamaño de Partículas.....	28
Tabla 9 Características de la Emulsión.....	41
Tabla 10 Características de Agentes de Voladura	42
Tabla 11 Operacionalización de Variables.....	47
Tabla 12 Matriz de Consistencias.....	48
Tabla 14 Propiedad de los Explosivos.....	59
Tabla 15 Resumen del Cálculo del Burden	60
Tabla 16 Espaciamiento con la Utilización del Burden	61
Tabla 17 Diseño con la Longitud y el Espaciamiento en la Sección 22.....	63
Tabla 18 Datos de la nueva malla de perforación	65
Tabla 19 Tiempo de Retardo EXSANEL (MS).....	66
Tabla 20 Bolsas de ANFO	67
Tabla 21 Resultados de Malla de Voladura	68
Tabla 22 Costos Operativos del Diseño de Malla Nueva de la Sección 22.....	69
Tabla 23 Productividad en el Ciclo de Minado	71
Tabla 24 Resultados de P80 con la Malla Optimizada.....	72
Tabla 25 Comparación de Indicadores Operativos entre la Malla de Perforación Tradicional y la Malla Optimizada	72

CAPÍTULO I

Introducción

1.1. Introducción

La perforación y la voladura es un proceso crucial en la minería subterránea, facilitando la creación de túneles, cruceros y galerías para acceder a los depósitos mineralizados, lo que permite una extracción segura y eficiente. Sin embargo, un diseño o elaborado en la malla de perforación ocasiona problemas significativos en el progreso diario de la perforación y la voladura. Si el diseño de perforación carece de un cálculo adecuado, las cargas explosivas pueden no distribuirse de manera uniforme, en voladuras ineficientes y una fragmentación irregular. Esto puede llevar a la necesidad de realizar trabajos adicionales de perforación y voladura con el fin de corregir fallas, generando gastos adicionales no previstos. Además, un diseño erróneo de la malla incrementa riesgo en accidentes para trabajadores. (Navarro, 2020)

A nivel mundial, el objetivo fundamental en las empresas mineras es mejorar la eficiencia de sus procesos. En la mina de Panulcillo, que se ubicada en Chile, sufrió un desafío significativo en la etapa de perforación y voladura de la roca, donde era importante aumentar

los beneficios debido a la ineficacia del proceso de voladura y elevados costos mensuales. En el proceso de perforación, la broca mostraba una simetría deficiente y estaba desalineada, lo que provocaba una carga inadecuada y un rendimiento deficiente de la broca (Olivera, 2021).

La unidad minera Shuntur S.A.C, actualmente desarrolla actividades de exploración, explotación y extracción de sulfuros ricos en cobre, las actividades se realizan de manera mecanizada, para la perforación se utiliza jumbo y para la limpieza del material fragmentado scooptram.

La unidad minera Shuntur S.A.C., el ciclo de perforación y el ciclo de voladura presentan deficiencias relacionadas al diseño en las mallas utilizadas. Estas deficiencias generan fragmentación ineficiente del mineral, resultando en granulometrías inadecuadas (como un P80 de 118 mm en la granulometría inicial). Esto conlleva problemas operativos significativos, como tiempos prolongados de limpieza, mayor desgaste en equipos, y disminución en la eficiencia, lo cual afecta en los costos y la productividad en la operación.

1.2. Planteamiento del Problema

1.2.1. Descripción de la Problemática

Unidad Minera Shuntur S.A.C., presentaban deficiencias técnicas asociadas al diseño de las mallas utilizadas. Estas deficiencias ocasionaban una fragmentación inadecuada del mineral, evidenciada por una granulometría inicial con un P80 de 118 mm, valor que no cumple con los requerimientos óptimos del proceso. Esta situación genera diversas dificultades operativas, entre ellas, mayores tiempos en las labores de limpieza, incremento en la eficacia del ciclo de minado. Como consecuencia, se ve afectada tanto la productividad como los costos generales de la operación minera.

1.2.2. Formulación del Problema

Con lo expuesto anteriormente se realizó la siguiente pregunta ¿De qué manera el rediseño de la malla de perforación y voladura, basado en modelos matemáticos, optimizo la fragmentación del mineral en la Unidad Minera Shuntur S.A.C.?

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. *Objetivo General*

Optimizar la fragmentación en mineral mediante el rediseño de la malla de perforación y voladura basado en modelos matemáticos en la Unidad Minera Shuntur S.A.C.

1.3.2. *Objetivos Específicos*

- Identificar y estudiar las deficiencias técnicas del diseño actual de las mallas de perforación y voladura que afectaban la fragmentación del mineral.
- Determinar la influencia del diámetro y la profundidad de los taladros en calidad de fragmentación obtenida.
- Aplicar modelos matemáticos para recalcular parámetros clave como burden, espaciamiento y carga, teniendo como propósito redimensionar técnicamente la malla de perforación.
- Analizar la relación entre diseño de la malla y taladros, considerando su efecto de eficiencia de la voladura.
- Desarrollar, implementar y evaluar un diseño optimizado de malla de perforación y voladura, midiendo impacto de fragmentación (P80), costos operativos y productividad del ciclo de minado.

1.4. Importancia y Alcance de la Investigación

Este estudio reviste la importancia, ya que aborda un aspecto fundamental en la operación minera: la optimización de los procesos de perforación y voladura, esenciales para

la eficiencia operativa. Una adecuada fragmentación del mineral permite disminuir tiempos de operación.

El estudio se centró en el rediseño de mallas en la Unidad Minera Shuntur S.A.C., utilizando modelos matemáticos para mejorar la granulometría y productividad. Sus resultados pueden ser aplicables en otras operaciones con condiciones.

1.5. Limitaciones de la Investigación

La Unidad Minera Shuntur S.A.C. la principal limitación es la falta de estándares de diseños de perforación y voladura, tomando que cada maestro perforista no realizó los cálculos de voladura y perforación.

Además, se presentaron limitaciones relacionadas en la disponibilidad y confiabilidad de los datos operativos históricos, lo que dificultó la validación comparativa de los resultados obtenidos. Así mismo, las condiciones geomecánicas variables entre frentes de trabajo limitaron la posibilidad de aplicar un mismo diseño optimizado de manera uniforme en toda la operación.

1.6. Situación Actual

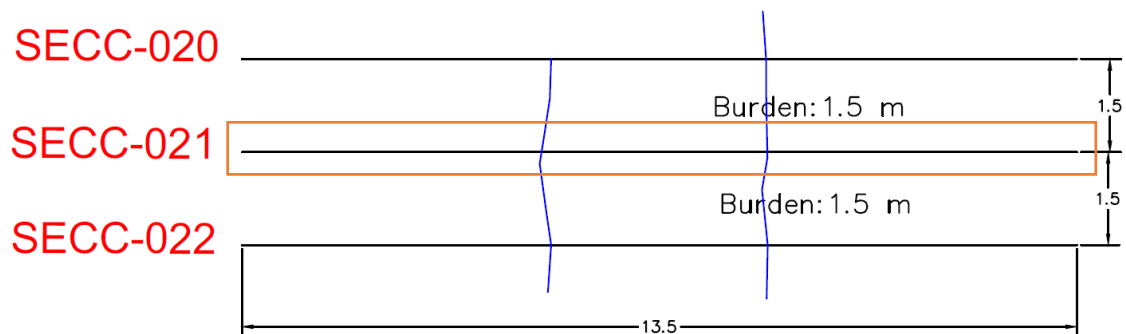
1.6.1. Errores Identificados en el Diseño Tradicional de Mallas de Perforación y Voladura

El análisis del diseño de mallas de perforación y voladura previamente utilizado en la Unidad Minera Shuntur S.A.C. permitió identificar una serie de errores técnicos que afectaban negativamente en la calidad de la fragmentación del mineral, las cuales incrementaban gastos operativos y reducían la eficiencia del ciclo de minado. A continuación, se detallan los principales hallazgos:

1.6.2. Errores en el Burden

Figura 1

Errores en el Burden

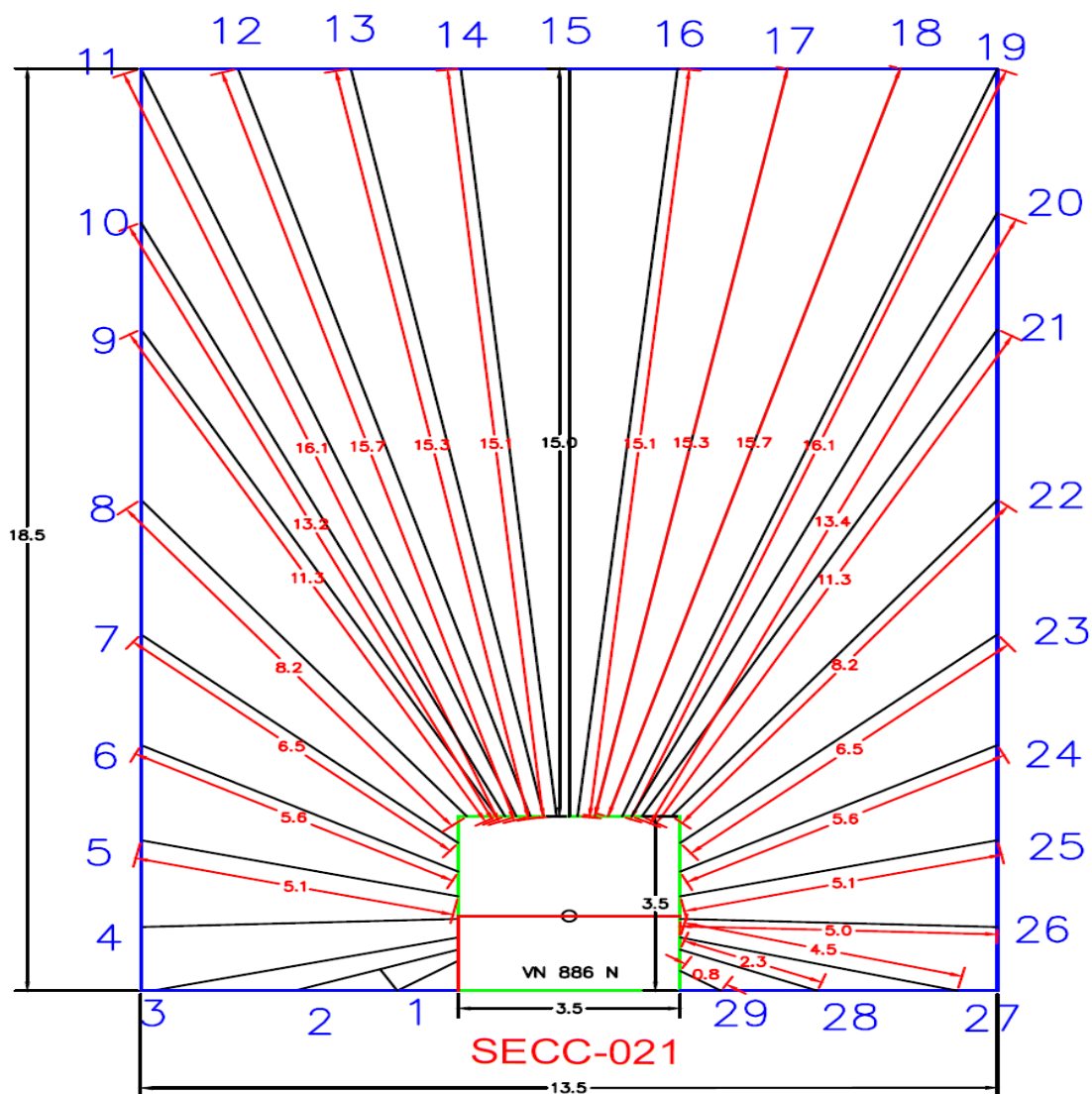


Error: En la Sección 21 se evidenció un burden de 1.5 m aplicado uniformemente, sin considerar la variabilidad. Esta falta de ajuste provocó fragmentaciones inadecuadas y, en algunos casos, sobrefragmentación localizada. Además, se observaron espaciados cerrados entre taladros, generando un consumo innecesario de explosivos.

Evaluación: Se dedujo que era necesario realizar un análisis geomecánico detallado y aplicar modelos matemáticos para definir un burden óptimo y adaptado a las condiciones del frente.

1.6.3. *Errores en el Diseño de Malla*

El diseño original contaba con 29 taladros, distribuidos sin uniformidad y sin tomar en cuenta la geometría de la labor ni las características geotécnicas. En la Figura 10, se muestra el diseño posterior, donde los números en azul representan los taladros, los rojos el orden de detonación y las líneas negras indican la dirección de perforación.

Figura 2*Diseño Empleado Posteriormente*

Los espaciamientos irregulares, como los observados entre los taladros T9 a T10 un espaciamiento de (0.9 m) y T10 a T11 de (1.1 m), los cuales no son iguales y generan sobre fragmentación.

Casos similares se presentan en los taladros T19 a T20 un espaciamiento de 1.1 m y T20 a T21 de 1.0 m de espaciamiento al son menores.

Tabla 1*Espaciado en los Taladros de la Malla Posterior*

SECCION 21	N° TALADROS	ESPACIAMIENTO
Cuerpo Meza	1	0.5
Nv 751	2	0.5
VN886N	3	1.3
Anfo: 36 BLS	4	1.7
	5	1.7
	6	1.7
	7	1.7
	8	1.7
	9	0.9
	10	1.1
	11	1.5
	12	1.8
	13	1.7
	14	1.7
	15	1.7
	16	1.7
	17	1.8
	18	1.5
	19	1.1
	20	1
	21	1.7
	22	1.7
	23	1.7
	24	1.7
	25	1.7
	26	1.3
	27	0.5
	28	0.5
	29	0.5
	TOTAL	29

1.6.4. Errores en la Profundidad

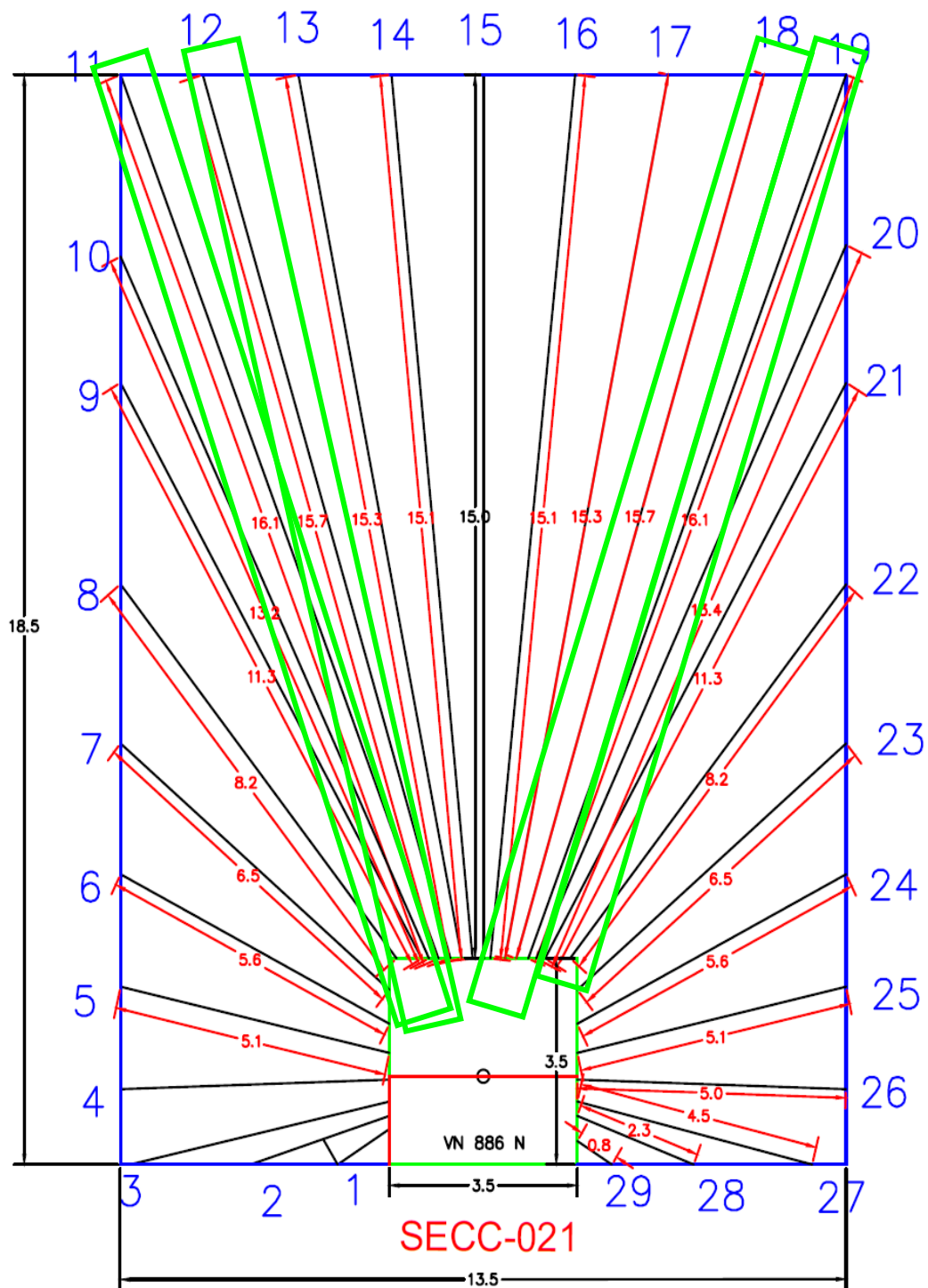
La revisión de los registros operativos mostró que varios taladros no alcanzaban la profundidad proyectada. Por ejemplo, los taladros T11 a T12 y T18 a T19 no lograron perforar completamente el banco, afectando la liberación de energía en la voladura.

Tabla 2*Errores en la Profundidad*

SECCION 21	N° TALADROS	LONGITUD
Cuerpo Meza	1	1.1
Nv 751	2	2.7
VN886N	3	4.9
Anfo: 36 BLS	4	5
	5	5.1
	6	5.6
	7	6.5
	8	8.2
	9	11.3
	10	15.4
	11	16.1
	12	15.7
	13	15.3
	14	15.1
	15	15
	16	15.1
	17	15.3
	18	15.7
	19	16.1
	20	15.4
	21	11.3
	22	8.2
	23	6.5
	24	5.6
	25	5.1
	26	5
	27	4.5
	28	2.3
	29	0.8
	TOTAL	29

Figura 4

Errores en la Profundidad de los Taladros y Longitud de la Malla Posterior



En la tabla 3 se muestra el taladro, longitud y carguío.

Tabla 3*Longitud de Carguío y Taco de Malla Posterior*

SECCION 21	N° TALADROS	LONGITUD(m)	ESPACIAMIENTO	CARGUIO	TACO
Cuerpo Meza	1	1.1	0.5	1.1	0
Nv 751	2	2.7	0.5	2.7	0
VN886N	3	4.9	1.3	4.9	0
Anfo: 36 BLS	4	5	1.7	5	0
	5	5.1	1.7	4.59	0.51
	6	5.6	1.7	3.92	1.68
	7	6.5	1.7	5.85	0.65
	8	8.2	1.7	5.74	2.46
	9	11.3	0.9	10.17	1.13
	10	15.4	1.1	10.78	4.62
	11	16.1	1.5	14.49	1.61
	12	15.7	1.8	4.71	10.99
	13	15.3	1.7	10.71	4.59
	14	15.1	1.7	4.53	10.57
	15	15	1.7	13.5	1.5
	16	15.1	1.7	4.53	10.57
	17	15.3	1.8	10.71	4.59
	18	15.7	1.5	4.71	10.99
	19	16.1	1.1	14.49	1.61
	20	15.4	1	10.78	4.62
	21	11.3	1.7	10.17	1.13
	22	8.2	1.7	5.74	2.46
	23	6.5	1.7	5.85	0.65
	24	5.6	1.7	3.92	1.68
	25	5.1	1.7	4.59	0.51
	26	5	1.3	5	0
	27	4.5	0.5	4.5	0
	28	2.3	0.5	2.3	0
	29	0.8	0.5	0.8	0
TOTAL	29	269.9	39.6	190.78	79.12

1.6.5. Errores en la Granulometría

Se nos detalla la granulometría inicial tomada en los tajos de explotación de la unidad minera Shuntur S.A.C., estas analizadas mediante el software kuz - ram, donde se tiene una fragmentación por encima de 10 pulgadas con esto se podrá replantear una nueva malla de perforación para la disminución de la granulometría.

Figura 5

Fotografía de la Granulometría Inicial



Tabla 4

Análisis Granulométrico

Item	Fecha	Sección	Nivel	Cuerpo mineralizado	Malla	P80 requerido	P80 real
1	6/12/2024	S-09	751	Veta	MALLA-9	10	11.42
2	7/12/2024	S-10	751	Veta	MALLA-10	10	11.91
3	8/12/2024	S-11	751	Veta	MALLA-11	10	12.61
4	9/12/2024	S-12	751	Veta	MALLA-12	10	12.82
5	10/12/2024	S-13	751	Veta	MALLA-13	10	11.73
6	11/12/2024	S-14	751	Veta	MALLA-14	10	14.07
7	12/12/2024	S-15	751	Veta	MALLA-15	10	12.08

8	13/12/2024	S-16	751	Veta	MALLA-16	10	13.94
9	14/12/2024	S-17	751	veta	MALLA-17	10	12.01
10	15/12/2024	S-18	751	veta	MALLA-18	10	14.21
11	16/12/2024	S-19	751	veta	MALLA-19	10	12.31
12	17/12/2024	S-20	751	veta	MALLA-20	10	11.52
13	18/12/2024	S-21	751	veta	MALLA-21	10	13.39

Figura 6

Gráfica de Análisis Granulométrico

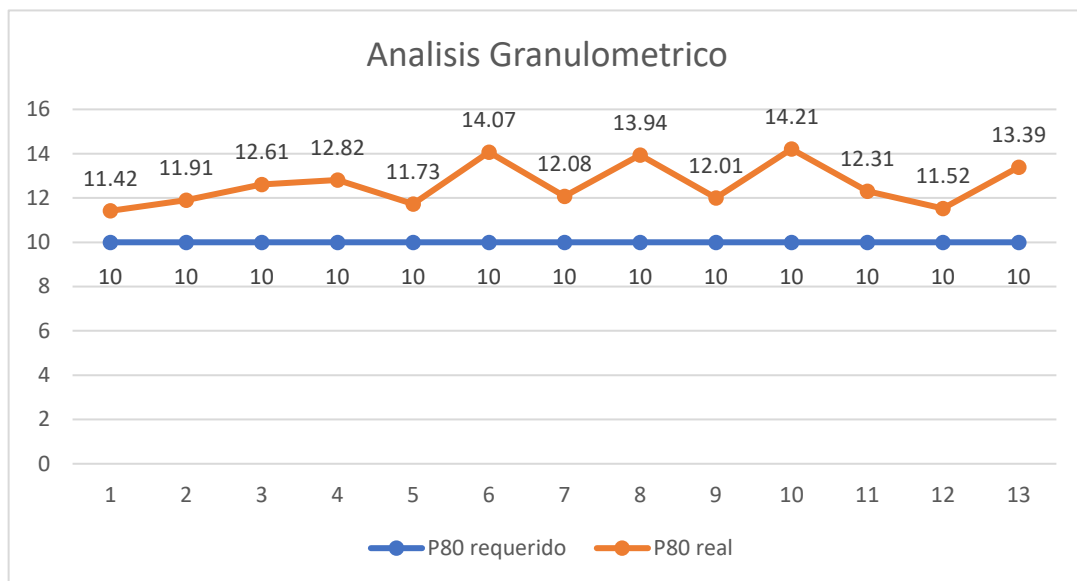
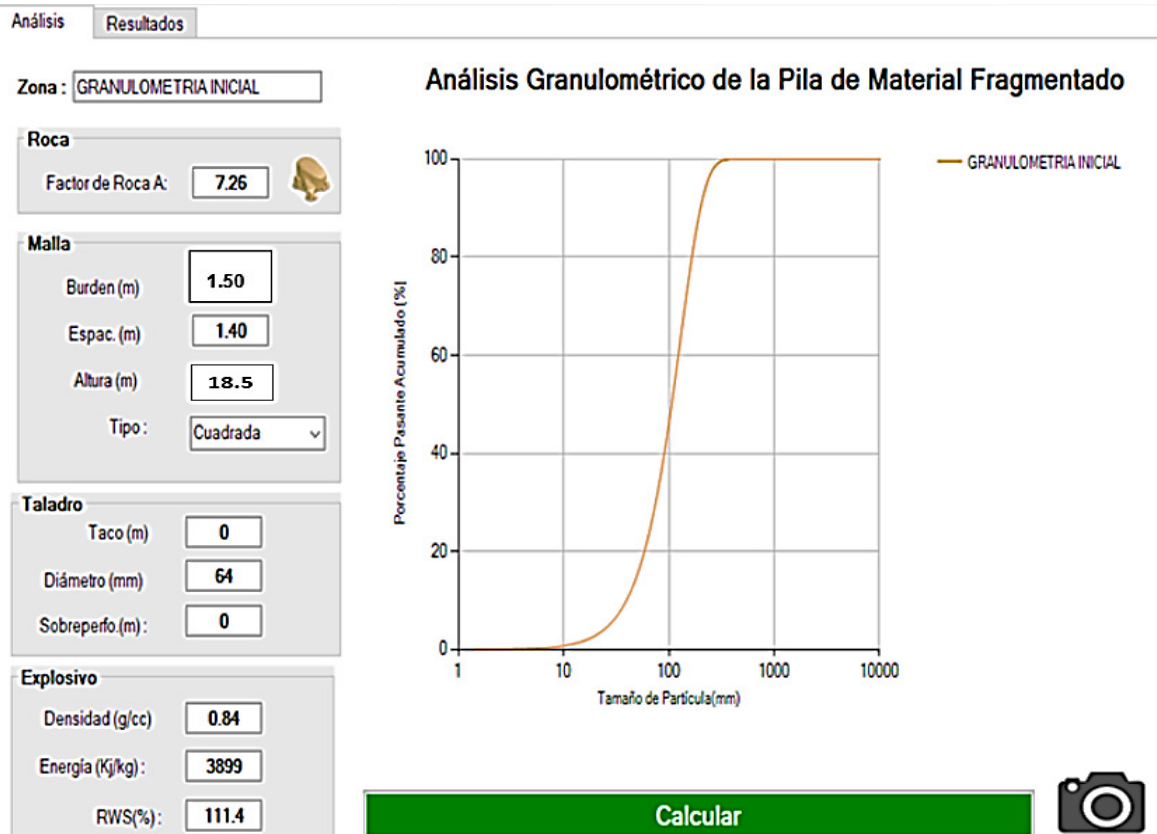


Figura 7

Análisis Granulométrico en el Programa



En la figura anterior se nos muestra el análisis granulométrico inicial donde se determinará el pasante P80 mediante los parámetros que se muestran como son el factor de roca A, burden y espaciamiento además del tipo de explosivo que se usa actualmente en la unidad minera.

Figura 8

Resultados de los Análisis

Resultados de los Análisis

Item	Análisis	Burden (m)	Esp. (m)	Altura (m)	Sobre Perfo (m)	Taco (m)	Diam. tal (mm)	Dens. Explo (g/cc)	RWS (%)	n	X50 (mm)	X80 (mm)	X95 (mm)	malla
1	GRANUL...	1.50	1.40	18.5	0	0	64	0.84	111.4	1.91	106	165	229	Cuadrada

1.6.6. Costos Operativos

Los costos operativos para la sección 21 es de un total de 3835.01 s/m , teniendo la suma de costos directos de 1193.01 s/m y explosivos de 2642.001 S/m.

Tabla 5

Costos Operativos del Diseño de Malla Posterior de la Sección 21

SECCION 21								
Sección:	13.5	x	18.5	Tipo de roca :				Buena III
# Taladros perforados			29	Longitud de barra perforación (pies)				14
# Taladros disparados			0	Eficiencia de perforación				93% 13.02
# Taladros alivio			0	Eficiencia de voladura				90%
# Taladros recorte			0	Avance/disparo (nominal):				3.57
Densidad			2.7	Eficiencia de # de disparos				66%
Humedad			0.1	Avance/disparo:				2.36 10.93
Longitud limpieza máxima			250	Horas x guardia				10.5
DESCRIPCIÓN			UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT. S/.	VIDA UTIL		COSTO x UNIT. S/./m
1. MANO DE OBRA DIRECTA								
Maestro cargador			Tarea	0.59	204.45			120.63
Ayudante cargador			Tarea	0.59	191.83			113.18
Maestro Perforista			Tarea	0.59	204.45			120.63
Ayudante de Perforista			Tarea	0.59	191.83			113.18
				2.36				467.61 198.37
2. ACEROS DE PERFORACION								
Aceros perf)			p.p.	25.32	0.49	1	Disp	12.41
Servicios (aceros perf)			p.p.	12.66	0.49	1	Disp	6.20
								18.61 7.89
3. HERRAMIENTAS Y OTROS								
Pico			Pza	1	30.745	90	Disp	0.34
Lampa minera			Pza	1	41.275	60	Disp	0.69
Tubo PVC 1.1/2x4m			Pza	20	5.525	1	Disp	110.50
Pintura, wincha, etc.			Glb	1	3.25	1	Disp	3.25
Band-it, empalmes, etc.			Glb	1	3.25	1	Disp	3.25

Comba de 6 lbs.		Pza	1	33.1175	90	Disp	0.37	
Comba de 12 lbs.		Pza	1	73.6125	90	Disp	0.82	
Mochilas de Lona		Pza	2	45.6973214	180	Disp	0.51	
Cucharilla FO Corrugado 1/2		Pza	2	16.25	180	Disp	0.18	
Cordel de Naylon		m.	10	1.625	90	Disp	0.18	
Guiador de Madera 1 1/4 X 3.00 MTS		Pza.	3	13	30	Disp	1.30	
Aceitera 1/2 Litro		Pza.	1	48.75	180	Disp	0.27	
Escalera Telesc. Fibra de Vidrio		Pza.	2	487.5	180	Disp	5.42	
Manguera Negra J/L - 1"		m.	2	19.5	150	Disp	0.26	
Barretillas de Aluminio 12'		Pza.	2	113.75	60	Disp	3.79	
Barretillas de Aluminio 10'		Pza.	2	97.5	60	Disp	3.25	
Barretillas de Aluminio 8'		Pza.	2	81.25	60	Disp	2.71	
							137.1	58.15
4:IMPLEMENTOS SEGURIDAD								
Epps		Tarea	1.5	10.73			16.10	
Ropa		Tarea	0.85	9.35			7.95	
							24.04	10.20
5.EQUIPOS								
Mini Jumbo		Horas	2.51	307.631			772.15	
Scooptram 6.0 Yd3		Horas	3.244	297.99			966.68	
							1738.83	737.64
SUB-TOTAL COSTOS DIRECTOS								1012.26
UTILIDAD			10%					101.23
SUB-TOTAL COSTO S./ m								1113.48
6:COMBUSTIBLE								
Petroleo diesel N° 2		Gal	20.83	9			187.47	79.53
TOTAL COSTOS DIRECTOS S./ m								1193.01
7. EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS								
Anfo		bls	36	95			3420	
Emulex 80 1 1/2 x 12		Kg.	403	6.942			2797.626	
Exanel x 4.20 mts		Pza.	2	5.16425			10.3285	
							6227.95	2642.001

1.6.7. Productividad en el ciclo de minado

La productividad es el costo total sobre el tonelaje que es material volado.

Tabla 6*Productividad*

Sección	Costo (\$)	Eficiencia en la voladura	Tonelaje Volado (Ton)	Productividad (\$/Ton)
21	3835.01	90%	910.34	4.21

CAPITULO II

Marco Teórico

2.1. Antecedentes de la Investigación

Se ha abordado la mejora de fragmentación en minería subterránea, considerando la influencia del diseño de mallas de perforación, el tipo de explosivo y la aplicación de modelos matemáticos para aumentar la eficacia operacional.

Wang y Li (2024) realizaron una investigación en la mina subterránea de zinc *Huize* (China), donde implementaron el modelo Kuz-Ram combinado con simulaciones numéricas en *JKSimBlast* para optimizar la fragmentación en galerías con RMR de 68. Los resultados demostraron que una reducción del burden de 1.6 m a 1.3 m y el reajuste del espaciamiento a 1.5 m disminuyeron el P80 de 180 mm a 140 mm, logrando un incremento del 9.5% en la productividad de carga y acarreo.

Martínez y González (2023) hicieron un estudio sobre la influencia del rediseño de mallas de perforación en la mina subterránea *El Teniente* (Chile), utilizando el modelo Langefors-Kihlström y herramientas de control digital de detonación. La investigación evidenció que el rediseño geométrico de la malla permitió reducir el factor de carga en un 14%,

optimizar la fragmentación a un P80 de 150 mm y disminuir los costos operativos en 8% por disparo, manteniendo la estabilidad del macizo rocoso.

Silva y Pineda (2022) realizaron un estudio en la mina subterránea *Cerro Corona* (México), donde se aplicó el modelo Pearse modificado junto con sensores de vibración y software *BlastMetrix 3D* con el propósito de conocer la energía de la voladura. Los hallazgos mostraron una reducción del 10% en las sobreexcavaciones y un incremento del 12% en la eficacia del minado, concluyendo que la combinación de modelación y monitoreo logrando mejorar significativamente la calidad.

Según García (2016), en su investigación analizó la factibilidad del uso de explosivos de alta energía. La investigación concluyó que el explosivo Viss 225 genera mayor fragmentación y eficiencia, como el Fortis Extra-65. Las pruebas con *Demoblast* demostraron un P80 óptimo y beneficios económicos, aunque los altos costos de algunos explosivos afectan la tronadura. En general, el uso de explosivos de mayor energía resulta rentable pese a las variaciones en precios.

Según Aguirre (2016) en su tesis estudió la factibilidad del uso de explosivos de alta energía. La investigación concluyó que el explosivo Viss 225 genera mayor fragmentación y eficiencia, como el Fortis Extra-65. Las pruebas con “Demoblast” demostraron un P80 óptimo y beneficios económicos, aunque los altos costos de algunos explosivos afectan la tronadura. En general, el uso de explosivos de mayor energía resulta rentable pese a las variaciones en precios.

Según Chiella & Zegarra, (2019) presentaron un estudio enfocado en la disminución de costos y como la voladura Kuz-RAM en el tajo Jessica, Mina Aruntani. Implementaron una malla de 6x6.9 m y utilizaron explosivo HA 46, lo que permitió reducir tanto el tamaño de los fragmentos como los costos en un 22%, eliminando incluso la necesidad de la chancadora, lo que representó un ahorro de \$2,097,999.

El estudio fue de Tipo Chambi del 2019, utilizando el modelo Kuz-RAM, se logró optimizó la fragmentación de la Unidad Minera Tacaza-Ciemsas, pasando de un P80 m de 10.17 a 4.87 pulgadas. Se modificó una malla cuadrada a triangular (1.90x2.10 m), reduciendo costos de producción de 1.86 a 1.58 \$/ton, mejorando la recuperación y eliminando voladuras secundarias.

En la investigación de Choque Choccelahua (2019), se aplicó el modelo de Langefors en la Unidad Yauliyacu, se redujo la dilución de 30% a 11% y las vibraciones mediante un factor de potencia menor (0.35 kg/TM). Este modelo optimizó significativamente el diseño implementado de mallas en taladros largos, considerando factores como inclinación y fijación.

Torres (2023) en su estudio, llevó a cabo el trabajo de investigación sobre el impacto del diseño de mallas de perforación en el rendimiento y progreso de la ingeniería subterránea. Este estudio utilizó un enfoque cuasi experimental Esta última presentaba una clasificación RMR de 32, lo que llevó a la creación de una malla específica adecuada para ese tipo de terreno. Como resultado, se logró un incremento del 10%, pasando de 1,90 m a 2,09 m. Además, se redujo el factor de carga en un 17%. Estas mejoras facilitaron el cumplimiento de los cronogramas de desarrollo y subrayaron la relevancia del diseño y rendimiento. En su tesis, Carhuaricra López (2021) examina la implementación de una malla de perforación y su respectiva voladura en la Zona Caridad de la Mina Lincuna. Aunque al principio no se aplicaba de manera uniforme, su uso se incrementó entre los colaboradores tras un proceso de sensibilización. La aplicación adecuada de esta malla resultó en una mejora notable del 91%. Para optimizar el proceso, se realizaron cálculos esenciales como el burden y la carga explosiva, así como la implementación de técnicas de división en cuadrantes y movimiento de arrastre en los taladros de contorno, tanto en el suelo como en las paredes y áreas de voladura.

Según López (2021), la ecuación de Holmberg fue clave para conseguir una disminución en la Unidad Minera Lincuna, lo que facilitó un control más efectivo de la sobre

excavación, limitándola al 7.92%. Entre las sugerencias presentadas en su investigación, se enfatiza la importancia de aplicar de manera estricta la malla de perforación, marcar la malla antes de perforar para asegurar una alineación adecuada, y emplear guidores de 2 metros de longitud para reducir la desviación angular durante la perforación, lo que ayuda a minimizar errores de emboquillado y mejora la precisión en los disparos de voladura.

En su tesis Cuber (2021), aborda sobre la perforación y voladura en la productividad de los tajos de la Unidad Minera San Andrés. El estudio se enfocó en los tajos TJ 1157 y TJ 1158, los cuales están afectados por la falla EW-2. Según la clasificación geomecánica, el RMR de estas áreas osciló entre 34 y 40, lo que las categorizó como Intensamente Fracturadas / Regulares (IF/R). A partir de estos hallazgos, se sugirieron diversas medidas para aumentar la seguridad y estabilidad de los tajeos, incluyendo el uso de marcos de madera de 8 pulgadas de diámetro, la instalación de guarda cabezas como pre-sostenimiento y la aplicación de relleno hidráulico en los tajos para mejorar su estabilidad. El patrón de perforación utilizado se basó en un burden de 0,30 m y un espaciamiento de 0,40 m, lo que permitió lograr un 95% de la producción teórica por disparo, superando el rendimiento anterior del 80%. Los resultados mostraron una producción promedio de 9.856 toneladas métricas por disparo. Durante el proceso, también se destacó la importancia de ajustar la malla. El esquema en perforación y voladura tuvo un efecto positivo en la Mina San Andrés, (2) los tajeos analizados mostraron características geomecánicas que demandaron una evaluación minuciosa para determinar el tipo de soporte estructural necesario, (3) teniendo una producción que alcanzó el 95% de la producción teórica por disparo, y (4) se recomendó seguir utilizando 20 voladuras controladas para minimizar los impactos negativos en el macizo rocoso.

Según Cuyubamba (2019), en su investigación menciona Zonificación geomecánica para mejorar el diseño de malla de perforación y voladura en la Unidad Minera Parcoy - Consorcio Minero Horizonte S.A; Se presenta una investigación basada en optimizar las

operaciones de perforación y voladura en la mina Parcoy, utilizando parámetros e índices geomecánicos para determinar el factor de potencia necesario para las explosiones. Se estableció que el factor de potencia adecuado para detonar el macizo rocoso es de 0.660 kg/TM, con una precisión del 97% en comparación con el factor actualmente empleado en la mina (0.680 kg/TM).

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Clasificación Geomecánica Del Macizo Rcoso

La finalidad de la caracterización geomecánica de una masa rocosa es reconocer y detallar un macizo particular, asignando valores a distintos parámetros. Estas clasificaciones geomecánicas permiten el cálculo de un índice que representa las propiedades distintivas de la roca. (Jaircino,2018)

✓ Índice RMR (Rock Mass Rating):

Este índice se utiliza para determinar la calidad del macizo rocoso basado en:

- La Resistencia de la roca intacta.
- Designación de calidad de roca (RQD).
- El Espaciado entre juntas o discontinuidades (Js).
- El Estado de las juntas (Jc).
- Condiciones de agua subterránea.

Según Vega (2023), los valores asignados a diferentes parámetros, lo que produce una puntuación que varía entre 0 y 100. Una puntuación más alta refleja más calidad. Esta clasificación se divide en cinco categorías de macizos rocosos, cada una de las cuales tiene sus propias recomendaciones para el soporte y la construcción.

✓ Índice Q de Barton:

Creado por Barton en el año de 1974. Este sistema emplea seis parámetros que evalúan la actividad.

- Designación de roca (RQD).
- N° de familias de juntas o discontinuidades (Jn).
- La Rugosidad de las juntas (Jr).
- El Grado de las juntas (Ja).
- La Presencia de agua (Jw).
- Factor de Reducción de Estrés (SRF).

$$Q = \left(\frac{RQD}{Jn}\right) * \left(\frac{Jr}{Ja}\right) * \left(\frac{Jw}{SRF}\right)$$

Estos valores de Q oscilan entre 0,001 para áreas malas y 1.000 para áreas buenas.

Según Valverde, (2023), hay que tener importancia el sistema de clasificación Q otorga una puntuación particular a cada parámetro y determina el valor Q a través de una fórmula que indica. Esta dimensión se calcula dividiendo la altura o el diámetro del túnel entre el Excavation Support Ratio, un factor que varía según el método de excavación empleado.

2.2.2. Método Langerfors

Según Langerfors (1984), en su investigación representa la estándar de la Swedish Detonic Research Foundation, él considera los cálculos del burden como un principal parámetro en lo que a voladura de rocas se refiere, por ello se destaca tres parámetros para obtener grandes resultados, estos serían.

- Carga explosiva.
- Ubicación de taladros.
- Una sucesión de salida de la detonación.

Para el desarrollo del burden se usa esta ecuación:

$$B(max) = \frac{D}{33} \left[\frac{\delta re.RWS}{C.f.\frac{S}{B}} \right]^{1/2}$$

Teniendo en cuenta:

$B_{(m\acute{a}x.)}$ = Burden de grado máximo

D = Diámetro en promedio dentro del taladro

δe = Es la densidad presente en la carga de los explosivos (gr./cc).

(RWS) = La potencia de grado relativa debido al peso del explosivo

- La constante de la roca (C): Se calcula con el valor de “c”, que representa el incremento de explosivo necesario para romper un metro cúbico de roca.
- En el caso de rocas duras a cielo abierto, se toma un valor estimado de $c = 0,4$.

El valor de C dependerá del rango de burden esperado y se determina según las siguientes expresiones:

- $C = 0,07 / B + c$, si el burden es menor a 1,4 m.
- $C = 0,75$, si el burden está en el rango de 1,4 m a 15 m.
- Factor de fijación (f): Este factor está relacionado con la inclinación del taladro. Se define de la siguiente manera:
 - En los taladros que son verticales: $f = 1,0$.
 - En los taladros que son inclinados con una relación de 3:1 y $f = 0,90$.
 - Para taladros inclinados con una relación de 2:1 y $f = 0,85$.

Relación de espaciamiento/burden (S/B): Este es un factor que expresa la proporción entre el espaciamiento (S) y el burden (B) durante el proceso de perforación y voladura.

El burden práctico se determina con una ecuación:

$$B = B_{\text{máx}} - e - (db \cdot H)$$

Donde:

H: Representa la altura total del banco, medida en metros (m).

e: Corresponde al error generado en el empate de los taladros, con un valor estimado de 0,02 m.

db: Se refiere a la desviación de los taladros, cuyo valor se estima en 0,023 m por metro de perforación.

2.2.3. Método Konya

Según C.J. Konya analizó y llegó a modificar un procedimiento de R. L. Ash expresando los cálculos de la siguiente manera que:

$$B = 3,15 \cdot D_e \cdot \left(\frac{\delta e}{\delta r}\right)^{1/3}$$

Donde:

D_e = diámetro del explosivo a usar, pulg.

B = pies, burden.

δe = densidad para el explosivo g/cc

δr = número de densidad de roca g/cc

Espaciamientos (S): Para los taladros de detonación instantánea por fila:

$$S = (H + 2B) / 3; H \leq 4B$$

$$S = 2B; H > 4B$$

Para taladros de salida secuencial por cada fila:

$$S = (H + 7B) / 8; H \leq 4B$$

$$S = 1,4B; H > 4B$$

Taco (T)

T = B; roca masiva.

T = 0,72 B; roca estratificada.

2.2.4. Método Pearse

Según Gustafsson, (1993), el investigador G.E. Pearse planteó la fórmula.

$$B = K \cdot d \cdot \left(\frac{P_s}{T_s} \right)^{1/2}$$

Donde:

B= es el burden total en pulg.

K= constante que llega a depender de las características principales de la roca (0.7-1.0).

d= diámetro del taladro en pulg.

Ps= presión que se encuentra estable en la relación del explosivo, lb/pulg²

Ts= última resistencia en la tracción de la roca, lb/pulg²

Después se establece la ecuación:

$$R = B = K \cdot D \cdot 10^{-3} \left(\frac{P_2}{S_{td}} \right)^{1/2}$$

Donde:

R: Corresponde al radio crítico.

D: Representa el diámetro del taladro, expresado en milímetros (mm).

P₂: Indica la presión de detonación en la composición del explosivo, medida en megapascales (MPa).

Std: Se refiere a la resistencia a la tracción de la roca bajo condiciones dinámicas, también expresada en megapascales (MPa).

K: Es el factor de la volubilidad en la roca, cuyo valor puede oscilar entre los valores de 0.7 y 1.0.

En los ejercicios propuestos se considera un rango de RQD (Rock Quality Designation) entre 20 y 40, y un valor de $K = 0,95$. Para una estimación precisa, se puede utilizar la ecuación correspondiente.

$$K = 1.96 - 0.27 \ln (ERQD)$$

Donde:

ERQD (Equivalent Rock Quality Design): es el Índice que mide la calidad de una roca equivalente, expresado en porcentaje (%).

RQD: es el Índice que refleja la calidad de la roca, basado en la longitud de los ramos intactos de núcleo extraídos durante una perforación.

JSF (Joint Strength Factor): Factor que mide la resistencia de las juntas o fracturas presentes en la roca.

Tabla 7

Calidad de roca

CALIDAD DE ROCA	JSF
R. Buena	1,0
R. Medio	0,9
R. Mala	0,8
R. Muy Mala	0,7

Fuente: (Ames, 2012)

2.2.5. Granulometría

La utilización de mallas con diferentes aberturas permite clasificar las partículas de los agregados en base a su tamaño. En los procedimientos prácticos, los pesos de cada fracción se presentan como porcentajes acumulativos o parciales, lo que posibilita la elaboración de un gráfico que ilustra la distribución de tamaños del material. (Ramírez, 2008)

- La granulometría por tamizado es un procedimiento mecánico que separa las partículas del suelo según su tamaño. Las fracciones más finas, como limos y arcillas, se obtienen mediante tamices decrecientes hasta el Tamiz N° 200. Este análisis se realiza para partículas mayores a 0,075 mm, utilizando tamices normalizados dispuestos de manera decreciente.
- El análisis granulométrico es ampliamente empleado en ingeniería para identificar y caracterizar materiales geológicos. Su objetivo es determinar si una granulometría específica es adecuada para fabricar concreto o como relleno en construcción. Cada fracción retenida o pasada por los tamices presenta propiedades definidas, lo que facilita su uso en distintas aplicaciones.
- El volumen de las partículas de un suelo varía desde tamaños microscópicos hasta componentes grandes. Esta medición es conocida como granulometría tamaño de partículas.

Tabla 8

Tamaño de Partículas

Al_2O_3 $2SiO_2$ $2H_2O$ – (Arcilla)	< 0,00382 mm
<i>Si</i> (Usualmente) (Limos)	0,00382 – 0,062
SiO_2 (Arenas)	0,062 – 2,00 mm
$CaCO_3$ (Gravas)	2,00 – 64,00 mm
$R(CO)R$ (Cantos)	64,00 – 255,00 mm

2.2.6. Tamaño de P80

Es una guía para el análisis de la granulometría de un espécimen que nos da una idea de si la fragmentación es fina o gruesa. El P80 se obtiene por medio de la curva de una distribución y puede presentar partículas, tal modo que el 80 % de los fragmentos en las rocas sean menores a ese tamaño. De tal modo que se tiene que el P80 en una colocación granulométrica es de 120mm, esto indica que los fragmentos son más pequeños que 120 mm. (Untol, 2017)

El P80 se reconoce como un proceso principal dentro de la minería actual, ya que es un indicador del tamaño de la fragmentación que nos permite hallar la eficiencia en el proceso de voladura. El objetivo principal de arreglar esta señal es adaptar y solucionar el control de voladura con variedad de características en los minerales y así adquirir un producto muy estable y preciso para llevar a cabo el proceso de lixiviación.

Para hallar el grado de fracturación que se observa en una voladura, se utiliza el nombre P80, que se llega a definir como el 80% de material que sobrepasa de una muestra.

WipFrag transforma imágenes de rocas fragmentadas en representaciones digitales, delineando el escombros y generando curvas granulométricas. El programa también permite medir la malla, presentar la curva resultante y compararla con la imagen original para realizar ajustes manuales, se deben seguir ciertos pasos básicos:

- Cargar las imágenes.
- Definir la escala de la imagen.
- Generar una malla automática, estableciendo parámetros óptimos para facilitar la edición manual subsiguiente
- Personalizar la malla generada mediante edición manual utilizando las herramientas del programa.
- Realizar el análisis granulométrico mediante tamizado para obtener la curva de

distribución de partículas y los resultados correspondientes, después de haber seleccionado los parámetros de tamizado adecuados.

- No admite el procesamiento simultáneo de múltiples imágenes ni la obtención de resultados agrupados de diferentes imágenes.
- No es posible guardar múltiples resultados en una sola imagen.
- El sistema cuenta con un conjunto predefinido de tamices, sin posibilidad de ajustarlos ni agregar otros tamices alternativos.

2.2.7. Malla de Perforación

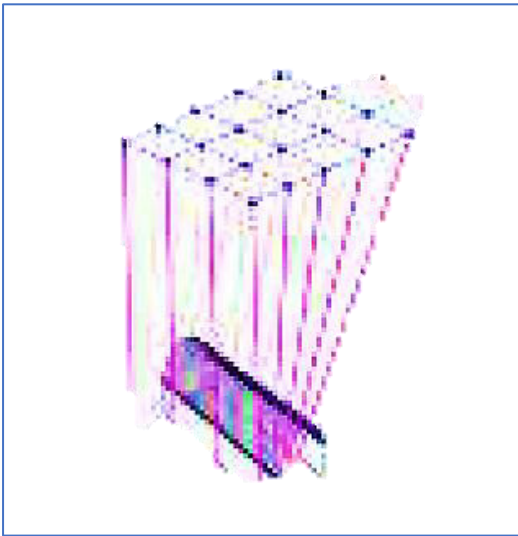
Según EXSA S.A (2009), afirma que una malla de perforación se establece mediante la creación de múltiples taladros en el área de trabajo, con el objetivo de distribuir adecuadamente la energía del explosivo y conseguir una adecuada fragmentación efectiva del macizo rocoso.

En el diseño de mallas, se toman en consideración los siguientes factores clave:

- ❖ Tipo de roca
- ❖ Equipo que se usa en la perforación
- ❖ Tiempos para llevar a cabo la tarea

Según Rodríguez (2017), toda la cara libre es la ubicación en el que se resguarda el material al instante de dispararse, esto se debe a la acción del explosivo; mayormente se presenta una cara sin nada en el frente, pero es necesario lograr la apertura de otra cara libre, dando así la generación de los disparos.

Para la reducción de gastos, así como la reducción de muchas unidades de explosivos, lograr un óptimo avance, que la labor se vuelva uniforme y llegar a ubicar en orden los taladros.

Figura 9*Denominación de Taladros*

Fuente: (EXSA S.A, 2009) en tajos.

2.2.8. Optimización del Diseño de Mallas

Al implementar diseños de mallas mejoradas es amortiguar los costos asociados a la perforación, lo cual incluye el uso de la perforadora y el deterioro de los metales de perforación, así como también los costos de voladura. Esto permite obtener un avance adecuado, mantener una sección uniforme y lograr una granulometría adecuada del material a volar.

Según Olivera (2021), en su investigación afirma que en la malla de perforación y como de voladura es fundamental distribuir de manera eficiente la energía explosiva acumulada en los taladros. Esto está determinado, en gran medida, por la conexión entre el espaciamiento y el burden, así como su relación con la profundidad del perforador. En procedimientos subterráneos, se perfora una sola cara, que se divide en secciones. La sección más importante es el arranque, donde se establece la cara libre, esencial para lograr una voladura efectiva. Si el arranque no se realiza correctamente, será ineficaz, resultando en escasa fragmentación y pérdida de control.

2.2.9. Perforación

La perforación consiste en un procedimiento que es en generar agujeros o cavidades en la roca, denominados taladros, que se ubican de manera estratégica para contener cargas explosivas o para otros fines, como el soporte o el drenaje. Este procedimiento se lleva a cabo utilizando máquinas perforadoras que emplean principios mecánicos de impacto y rotación, lo que provoca que la roca se quiebre y se fragmente a causa de la combinación de golpeo y fricción. (Carlos, 2022)

2.2.10. Voladura

La voladura es un proceso que implica la fractura o fragmentación de rocas, suelos duros o la separación de componentes específicos mediante el uso de explosivos. Este método se utiliza con un objetivo determinado y puede ser controlado o no controlado, pudiendo realizarse en diversas condiciones, como en superficie, en espacios subterráneos como galerías y túneles, o incluso bajo el agua. (EXSA, 2019)

2.2.11. Tipos de Voladura

Estas técnicas apuntan a reducir al mínimo los efectos de la explosión, evitando la fragmentación excesiva de la roca y minimizando el daño en las estructuras circundantes, como coronas, hastiales y paredes de los tajos. Además, buscan mitigar las vibraciones del terreno, disminuyendo la velocidad de las partículas generadas y reduciendo el impacto en el entorno. (Valverde, 2023)

➤ Pre-corte:

Incluye los siguientes aspectos:

- Consiste en una única línea de perforaciones que se realizan a lo largo del contorno de la excavación.
- Este método crea una "zona discontinua" en la masa rocosa, la cual delimita la

voladura principal y la pared final del banco.

- Discontinuidad ayuda a reducir la magnitud y vibraciones.

Figura 10

Pre-Corte



Nota. Tomada de Juan Carlos. 2019

➤ **Voladura suave:**

Según Oscar (2020), en la voladura suave, o voladura de contorno, es una metodología empleada para gestionar la fractura en las paredes de una excavación. Este procedimiento implica perforar agujeros en los bordes de la obra, cargarlos con explosivos de forma exacta y hacerlos detonar al mismo tiempo o con un pequeño retraso. Gracias a esta técnica, se logran superficies uniformes y se minimiza la fractura del material alrededor, lo que le hace en una opción óptima para situaciones que requieren un control riguroso de la voladura.

➤ **Voladura amortiguada:**

Similar a la técnica de voladura suave, este procedimiento consiste en perforar una línea de agujeros paralela al borde de la excavación. Posteriormente, se colocan cargas explosivas de baja intensidad, distribuidas de manera uniforme para liberar energía de forma controlada, y se detonan después de la explosión principal, lo que ayuda a minimizar la fractura y obtener

una superficie lisa. (Melendres, 2024).

Figura 11

Cebo de Voladura Amortiguada



Nota. Tomada de Melendres Acuña, 2024

➤ **Explosivos y forma de carga en los taladros de contorno:**

En cuanto a la forma de cargar los explosivos hay varios tipos de cargas como se muestra en la imagen:

Figura 12*Explosivos y Formas para Voladura*

Nota. Tomada de Melendres Acuña, 2024.

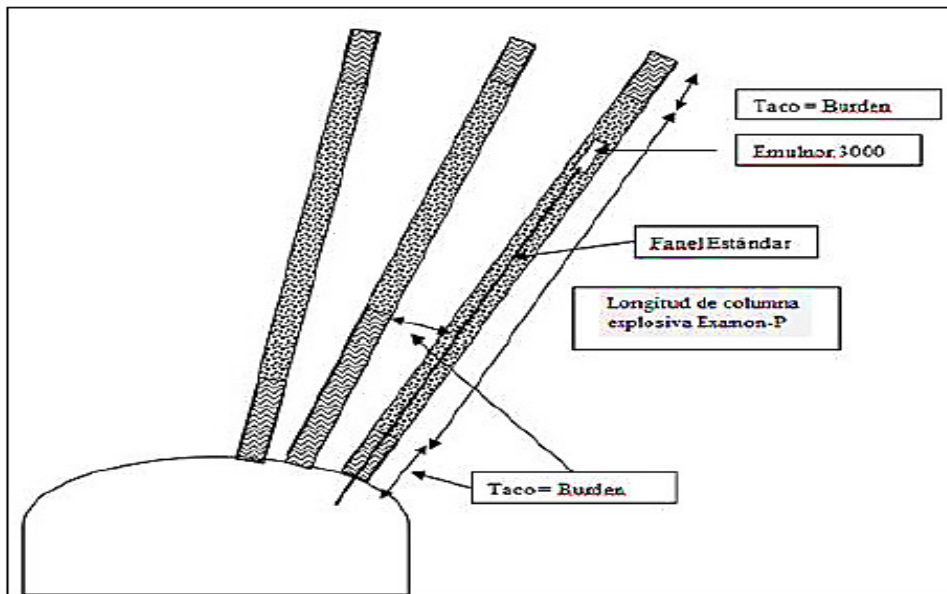
➤ **Carguío de Taladros Positivos:**

Hay que tener en cuenta que antes de comenzar con el carguío de los taladros, es necesario realizar un sopleteado y medirlos para diseñar el carguío real, tanto en términos de carga como en la secuencia de salida.

En el caso de taladros pasantes, se instalará un taco superior que corresponda a la longitud del burden. A continuación, se procederá a cargar con Examon-P, asegurando una distancia mínima de un metro. Luego se llevará a cabo el primado del iniciador (Emulnor 5000 y Fanel Estándar). Este se llenará la columna explosiva a presión de aire para facilitar el confinamiento del agente explosivo. Finalmente, se colocará el taco, considerando la acción radial del explosivo, asegurándose de que los tacos tengan las mismas dimensiones que el burden.

Figura 13

Esquema de Carguío de Taladros Positivos



Nota. (Barrientos Llacua y Durand Lanazca, 2020)

➤ **Sobre rotura:**

Ocurre durante las actividades de preparación y producción como resultado de una voladura inadecuada o de una aplicación deficiente en la voladura controlada. De las variables que contribuyen a la sobre rotura y a la caída de rocas en estas labores incluyen:

- Las Dimensionamiento incorrecto de las labores a excavar.
- El Diseño inadecuado de la malla en perforación en relación con las características de la roca.
- Falta de guidores, lo que afecta la dirección de la similitud en los taladros de perforación.
- Sobrecarga de explosivos en los taladros.

Las consecuencias son desfavorables, ya que impactan negativamente en los tiempos y costos de las operaciones unitarias. (Carlos, 2022)

➤ **Para prevenir la sobrerotura:**

Para ello, implementar la voladura controlada, precorte o recorte, cumpliendo:

- Uso de cargas en los explosivos longitudinales de baja energía.
- Aplicación de carga explosiva en relación del desacople y con un adecuado espacio.
- Perforación de taladros situados muy cerca unos de otros.
- Detonación simultánea para generar una fisura o plano de ruptura.

Necesario perforar un mayor número de taladros en el contorno, lo que ayuda a minimizar las fracturas a la roca, aunque esto implica un gasto adicional el proceso de perforación, para calcular la sobrerotura se tiene:

$$Rr = Ar * Av * Fe$$

$$Rt = At * Av * Fe$$

$$Sr\% = \frac{Rr - Rt}{Rt} * 100\% - 100\%$$

Donde:

Sr: Sobrerotura (%);

- Para Rr: La Rotura después de la voladura (m3);
- Para Rt: La Rotura de acuerdo con el diseño (m3);
- Para Ar: El Área de la sección real (m2);
- Para At: El Área acuerdo al diseño (m²);
- Para Av: El Avance efectivo del disparo (m)
- Para Fe: El Factor de esponjamiento de la roca. (Oscar, 2020)

2.2.12. Accesorios de Voladura

En los componentes diseñados para transmitir una señal y una onda de choque que activa una carga explosiva.

➤ **La Mecha de seguridad:**

Es el accesorio distribuye la energía a través de una carga explosiva de gran tamaño a una velocidad constante y regular. Está formado por un cordón que es flexible que contiene pólvora negra, encerrada en la cubierta de material textil con un recubrimiento impermeable. (Cruz, 2022)

➤ **Carmex:**

Se ha diseñado y creado como un sistema seguro y eficaz para llevar a cabo voladuras como las convencionales. Es constituido por un fulminante común de número n.º 8, un segmento con mecha de seguridad destinado a fijar la mecha rápida al conector.

➤ **Fulminante:**

Se refiere a una cápsula de aluminio cilíndrica y sellada en un extremo, que alberga una cantidad precisa y exacta de explosivo entre ellos el primario altamente sensible a la ignición, junto con un explosivo secundario de gran potencia, según la normativa establecida (D.S. 023-2017-EM 2017:37). (Cruz, 2022)

➤ **Fanel (detonador no eléctrico):**

Es el accesorio que está compuesto por un sistema preciso de iniciación es utilizado en minería subterránea, superficial y obras de ingeniería civil.

Figura 14

Los Faneles



Nota. Tomada del Manual de explosivos, Famesa

➤ **Cordón detonante:**

Se trata de un cordón con una flexibilidad que alberga un núcleo que contiene pentrita y está recubierto por varias fibras sintéticas. (Cruz, 2022)

➤ **Mecha armada:**

Sistema de iniciación convencional de explosivos que es seguro, compuesto por accesorios tradicionales como fulminantes estándar, mechas de seguridad y conectores, que se montan con máquinas neumáticas de precisión avanzada” (D.S. N.º 023-2017-EM 2017:47). (Cruz, 2022)

2.2.13. El Explosivo

Según Viela (2014), compuestos o combinaciones químicas que liberan energía. Esto significa que, al liberar energía, se utiliza para fragmentar la roca, lo que también genera una gran presión y produce gases a altas temperaturas.

La fragmentación de rocas requiere energía, que puede ser proporcionada por un explosivo. La efectividad de un explosivo depende de su capacidad para liberar gran cantidad

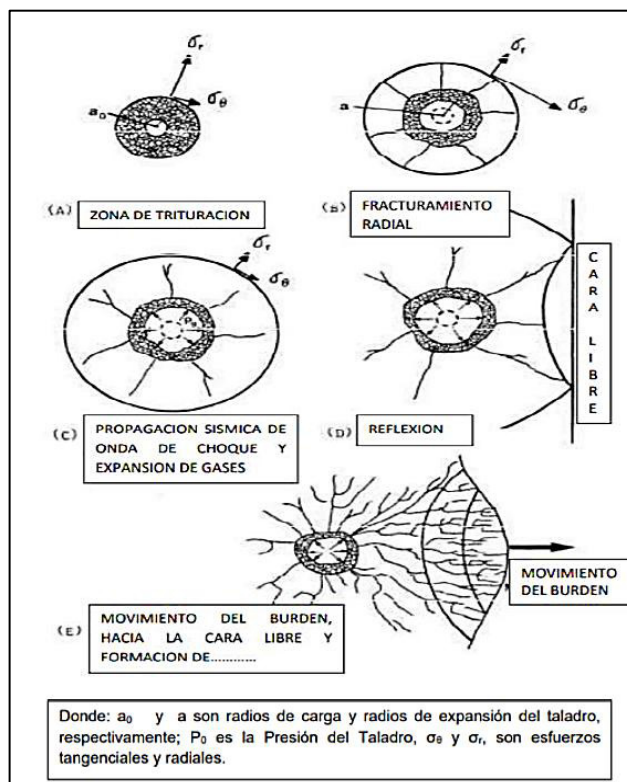
de energía de manera instantánea. Cuando se detona, libera gas, presión y temperatura altas en fracciones de segundos, transfiriendo energía a la roca de manera compleja.

La energía confinada se distribuye:

- La Trituración
- EL Fracturamiento
- La energía a través de la onda de detonación
- Ejecución de la energía cinética
- Fricción
- Energía residual de fuga de gases, etc.

Figura 15

Descripción General del Proceso de Detonación de un Taladros y los Eventos que Ocurren en Secuencia



Nota. Capacitación en Codelco norte – Enaex.

2.2.14. Explosivos en Voladura

Los explosivos son mezclas el cual hacen una alta presión, lo que permite alterar el entorno circundante. La extracción de rocas mediante explosivos requiere la aplicación controlada de energía química concentrada, colocada estratégicamente y en cantidades precisas. (Jimmy, 2024)

➤ **Emulsiones:**

Cartuchos que constan de una fase dispersa y una fase continua.

Tabla 9

Características de la Emulsión

Características técnicas	Emulnor 500	Emulnor 1000	Emulnor 3000	Emulnor 5000
Densidad relativa (g/cm ³)	0,90	1,13	1,14	1,16
Velocidad de detonación (m/s)	4 400	5 800	5 700	5 500
Presión de detonación (kbar)	44	95	93	88
Energía (Kcal/g)	628	785	920	1010
Volumen normal de gases (L/kg)	952	920	880	870
Potencia relativa en peso (%)	63	85	100	105
Potencia relativa en volumen (%)	75	120	145	155
Resistencia al agua	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente

Nota. Datos extraídos de FAMESA (2018)

Figura 16

Emulsión



Nota. Tomada de Cahuata Esquivel, 2021

➤ Agentes de voladura NCN:

Compuestos por nitrato de amonio

Tabla 10

Características de Agentes de Voladura

Características técnicas	Superfam 2
Densidad relativa (g/cm ³)	0,80 ± 0,05
Velocidad de detonación (m/s)	5 000
Presión de detonación (kbar)	51
Energía teórica por Peso (cal/Kg)	932
Energía teórica por Volumen (cal/m ³)	746
Energía relativa por Peso (%)	100
Energía relativa por Volumen (%)	100

Nota. Datos extraídos de FAMESA (2018)

Hay que tener en cuenta los parámetros de ANFO pesado y Slurrex ya que con ellas vamos a trabajar.

2.3. Glosario

- **Accesorios de voladura:** Conjunto de dispositivos utilizados para iniciar y controlar la detonación de los explosivos, como detonadores, mechas, cordones detonantes y retardadores.
- **Burden:** Distancia perpendicular entre un taladro cargado con explosivos y la cara libre más cercana. Es un parámetro crítico en el diseño de mallas de perforación, ya que influye directamente en la eficiencia de la voladura y la calidad de la fragmentación.
- **Cara libre:** Superficie expuesta de la roca que permite la expansión del material tras la detonación. Una adecuada disposición de caras libres mejora el rendimiento de la voladura.
- **Discontinuidades:** Planos de debilidad en la roca, como fracturas, fallas o diaclasas, que afectan el comportamiento de la roca frente a la voladura, así como la fragmentación obtenida.
- **Espaciamiento:** Distancia entre dos taladros consecutivos en una misma fila dentro de una malla de perforación. Su valor óptimo depende de las propiedades de la roca, el explosivo y los objetivos de fragmentación.
- **Explosivos:** Sustancias químicas capaces de liberar gran cantidad de energía en forma de gases y calor al detonar, utilizadas para fragmentar la roca durante la voladura.
- **Granulometría:** Distribución del tamaño de los fragmentos resultantes de un proceso de voladura. Es un parámetro fundamental para evaluar la eficiencia del proceso y su impacto en etapas posteriores como chancado y molienda.
- **Malla de perforación:** Patrón geométrico que define la ubicación, orientación, profundidad, espaciamiento y burden de los taladros perforados en un banco de roca. Su diseño influye directamente en la calidad de la fragmentación.

- **P80:** Tamaño de partícula en micrómetros o milímetros, bajo el cual se encuentra el 80% en peso del material fragmentado. Es un indicador clave de la granulometría y de la eficiencia del proceso de voladura.
- **Perforación:** Proceso mecánico mediante el cual se realizan taladros en la roca para colocar los explosivos. Su precisión es fundamental para asegurar una voladura eficiente.
- **Proceso de voladura:** Conjunto de operaciones que incluyen la perforación, carga de explosivos, colocación de accesorios de voladura, iniciación y posterior fragmentación de la roca.
- **Roca:** Material sólido natural compuesto por uno o varios minerales, que constituye el macizo rocoso donde se ejecutan los procesos mineros como la perforación y voladura.
- **Voladura:** Técnica minera que consiste en el uso de explosivos para fragmentar la roca, facilitando su manipulación y transporte. Es una etapa clave en la operación de minas a cielo abierto y subterráneas.

CAPITULO III

Hipótesis y Variables

3.1. Hipótesis General

El rediseño de la malla de perforación y voladura basado en los modelos matemáticos de Langefors, Konya y Pearse optimiza la fragmentación del mineral (P80) en la Unidad Minera Shuntur S.A.C., al mejorar la distribución de la energía explosiva, reducir los costos operativos y aumentar la productividad del ciclo de minado.

3.1.1. *Hipótesis Especificas*

- Las deficiencias técnicas del diseño actual de las mallas de perforación y voladura influyen negativamente en la fragmentación del mineral, generando granulometrías irregulares y mayores costos operativos.
- El diámetro y la profundidad de los taladros inciden significativamente en la calidad de la fragmentación, debido a su relación directa con el confinamiento del explosivo y la eficiencia del disparo.
- La aplicación de modelos matemáticos (Langefors, Konya y Pearse) permite recalcular los parámetros técnicos del diseño, como burden, espaciamiento y factor

de carga, mejorando la eficiencia del redimensionamiento de la malla de perforación.

- El diseño técnico de la malla de perforación determina el carguío de los taladros y la distribución de energía explosiva, influyendo positivamente en la calidad de la fragmentación y la reducción de la sobrerotura.
- La implementación de una malla optimizada de perforación y voladura mejora la fragmentación (P80), reduce los costos operativos y aumenta la productividad del ciclo de minado en la Unidad Minera Shuntur S.A.C.

3.2. Variables

3.2.1. *Variable Independiente*

El Rediseño de la malla de perforación y voladura estuvo basado en modelos matemáticos (Langefors, Konya y Pearse) en la Unidad Minera Shuntur S.A.C.

3.2.2. *Variable Dependiente*

La optimización de la fragmentación del mineral se evaluó mediante tres indicadores principales:

- Granulometría (P80): que refleja la calidad de la fragmentación obtenida.
- Costos operativos: asociados al proceso de perforación y voladura.
- Productividad del ciclo de minado: medida a través del avance por disparo y el rendimiento operativo.

Estos indicadores permitieron determinar el nivel de eficiencia alcanzado con el rediseño de la malla de perforación y voladura en la Unidad Minera Shuntur S.A.C.

3.3.Operacionalización de Variables

Tabla 11*Operacionalización de Variables*

Variable	Dimensión	Indicadores	Instrumento de Medición	Unidad de Medida
Variable independiente: Rediseño de mallas de perforación y voladura basado en modelos matemáticos	Diseño técnico de mallas	Burden	Modelos matemáticos (Langefors, Konya, Pearse)	Metros
		Espaciamiento	Modelos matemáticos (Langefors, Konya, Pearse)	Metros
		Factor de carga	Software de simulación y cálculo	kg/m ³
Variable dependiente: Fragmentación del mineral (P80)	Calidad de fragmentación	P80	Análisis granulométrico (software Kuz-Ram / tamizaje)	Milímetros
	Eficiencia Operativa	Tiempo de limpieza y manejo de mineral	Observación directa y registros operativos	Horas y costos operativos
		Costos del ciclo de minado	Comparación entre diseño tradicional y diseño optimizado	Registro de costos y reportes técnicos

Tabla 12*Matriz de Consistencias*

Formulación del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables
Problema general: ¿De qué manera el rediseño de la malla de perforación y voladura, basado en modelos matemáticos, optimiza la fragmentación del mineral en la Unidad Minera Shuntur S.A.C.?	Objetivo general: Optimizar la fragmentación del mineral mediante el rediseño de la malla de perforación y voladura basado en modelos matemáticos en la Unidad Minera Shuntur S.A.C.	Hipótesis general: El rediseño de la malla de perforación y voladura basado en los modelos matemáticos de Langefors, Konya y Pearse optimiza la fragmentación del mineral (P80), reduce los costos operativos y mejora la productividad del ciclo de minado en la Unidad Minera Shuntur S.A.C.	Variable independiente: Rediseño de la malla de perforación y voladura basado en modelos matemáticos (Langefors, Konya y Pearse). Variable dependiente: Optimización de la fragmentación del mineral, medida a través de la granulometría (P80), los costos operativos y la productividad del ciclo de minado.
Problemas específicos:	Objetivos específicos:	Hipótesis específicas:	Dimensiones principales:
1. ¿Cuáles son las deficiencias técnicas en el diseño actual de las mallas que afectan la fragmentación del mineral?	1. Identificar y evaluar las deficiencias técnicas del diseño actual de las mallas de perforación y voladura que afectan la fragmentación del mineral.	1. Las deficiencias técnicas del diseño actual de las mallas de perforación y voladura influyen negativamente en la fragmentación del mineral y en la eficiencia operativa.	<i>Diseño actual de mallas / calidad de fragmentación</i>
2. ¿Cómo influyen el diámetro y la profundidad de los	2. Determinar la influencia del diámetro y la profundidad de los	2. El diámetro y la profundidad de los taladros inciden significativamente en la	<i>Parámetros geométricos de perforación</i>

taladros en la calidad de la fragmentación?	taladros en la calidad de la fragmentación obtenida.	calidad de la fragmentación y en el comportamiento del macizo rocoso durante la voladura.	
3. ¿De qué manera los modelos matemáticos pueden optimizar los parámetros técnicos de la malla?	3. Aplicar modelos matemáticos para recalcular parámetros clave como burden, espaciamiento y factor de carga.	3. La aplicación de modelos matemáticos permite recalcular los parámetros técnicos de la malla, mejorando su eficiencia y uniformidad.	<i>Modelos matemáticos de diseño (Langefors, Konya, Pearse)</i>
4. ¿Cómo influye el diseño de la malla en el carguío de los taladros y la distribución de energía explosiva?	4. Analizar la relación entre el diseño de la malla y el carguío de los taladros, considerando su efecto en la eficiencia de la voladura.	4. El diseño técnico de la malla condiciona el carguío de los taladros y la distribución de la energía explosiva, afectando la eficiencia del ciclo de minado.	<i>Distribución de energía / carguío de taladros</i>
5. ¿Qué efectos produce la malla optimizada en la fragmentación, costos y productividad?	5. Desarrollar, implementar y evaluar un diseño optimizado de malla de perforación y voladura, midiendo su impacto en la fragmentación (P80), costos operativos y productividad del ciclo de minado.	5. La implementación de una malla optimizada de perforación y voladura mejora la fragmentación, reduce los costos operativos y aumenta la productividad en la Unidad Minera Shuntur S.A.C.	<i>Fragmentación (P80), costos, productividad</i>

CAPITULO IV

Materiales y Métodos

4.1. Área de Estudio

El presente proyecto de investigación se llevó a cabo en la Unidad Minera Shuntur S.A.C., ubicada en el distrito de Pira, provincia de Huaraz, región Áncash, a una altitud aproximada de 3,800 m s. n. m. El acceso al yacimiento se realizó a través de una ruta pavimentada desde Lima hasta Huaraz, seguida de un tramo no pavimentado hasta la entrada de la unidad minera.

El estudio se desarrolló específicamente en los niveles 460 y 480, seleccionando tajeos piloto en dichos niveles con el propósito de recopilar información para el rediseño de las mallas de perforación y la evaluación granulométrica correspondiente.

4.2. Diseño de Investigación

4.2.1. *Tipo de Investigación*

La investigación correspondió a un estudio de tipo experimental aplicado, ya que implicó la manipulación de variables técnicas (burden, espaciamiento y carga) para evaluar su efecto sobre la granulometría del mineral.

4.2.2. Nivel de Investigación

El nivel fue descriptivo-correlacional, dado que se buscó establecer la relación entre el rediseño de la malla de perforación y los resultados en fragmentación, costos y productividad.

4.2.3. Diseño de la Investigación

Se empleó un diseño experimental-descriptivo, al manipular la variable independiente (parámetros de perforación y voladura) para observar sus efectos. Se realizaron pruebas comparativas antes y después del rediseño.

4.2.4. Método de Investigación

En esta tesis se aplicó el método científico, el cual permitió manipular, medir y evaluar los parámetros técnicos de perforación y voladura que influyen directamente en la fragmentación del macizo rocoso y, por consiguiente, en la granulometría del mineral posterior a la voladura.

El enfoque metodológico se basó en la observación empírica, el análisis comparativo y la validación de hipótesis mediante la aplicación de modelos matemáticos (Langefors, Konya y Pearse). Se establecieron procedimientos sistemáticos para recolectar datos de campo, analizar los resultados y contrastarlos con los obtenidos tras el rediseño de las mallas.

Se registro de datos y sistematización para garantizar la precisión de la información, se diseñaron formatos estandarizados de recolección de datos en campo, los cuales incluyeron registros de burden, espaciamiento, profundidad de taladros, tipo y cantidad de explosivo, y

resultados de voladura. Estos formatos fueron validados previamente con el personal técnico de la unidad minera.

Se brindó capacitación básica al personal operativo involucrado en la etapa de toma de datos, con énfasis en el trazado de mallas, control de profundidad de taladros y seguimiento post-voladura, a fin de reducir errores de campo y garantizar la fiabilidad de los registros.

Para el procesamiento y análisis de datos se emplearon Herramientas digitales:

- ✓ Microsoft Excel, para la tabulación, generación de gráficos y análisis estadístico descriptivo.
- ✓ AutoCAD Civil 3D, para el diseño geométrico de las mallas de perforación.
- ✓ Software WipFrag, para el análisis de fragmentación de la roca mediante imágenes.
- ✓ Documentos de control en Word, incluyendo fichas de campo y reportes técnicos.

Toda esta información fue sistematizada en una base de datos estructurada, lo que permitió realizar comparaciones cuantitativas entre la malla tradicional y la optimizada, y evaluar el impacto de los cambios sobre la eficiencia operativa, la fragmentación (P80), los costos unitarios y la productividad del ciclo de minado.

4.3. Población y Muestra

La población del estudio estuvo conformada por todos los frentes de explotación de la Unidad Minera Shuntur S.A.C. donde se emplea perforación con taladros largos, estos frentes incluyen diversos niveles operativos y tajos activos.

La muestra fue de tipo no probabilística e intencional, y estuvo constituida por los tajos ubicados en los niveles 460 y 480. Estos fueron seleccionados por contar con condiciones geomecánicas representativas y permitir una evaluación adecuada del rediseño de las mallas de perforación y voladura.

4.4. Procedimiento, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información

4.4.1. Métodos y Técnicas de Investigación

En esta tesis se aplicó el método científico, a través del cual se manipularon, midieron y evaluaron los parámetros técnicos de perforación y voladura que afectan la fragmentación del macizo rocoso y, en consecuencia, la granulometría del mineral posterior a la voladura.

Durante la ejecución del proyecto, se utilizaron las siguientes técnicas:

➤ **Observación directa:**

Esta técnica permitió supervisar desde el trazado de la malla hasta la evaluación de los resultados post-voladura. La recolección de datos se realizó directamente en el lugar de trabajo, registrando condiciones reales de operación.

➤ **Análisis documental:**

Se revisaron registros operativos previos, informes técnicos, tesis, libros especializados e información proporcionada por la empresa, relacionada con personal, equipos, materiales, ritmos de trabajo, costos de producción, consumo de explosivos y eficiencia de fragmentación. Esta técnica permitió identificar las causas de bajo rendimiento, sobreconsumo de insumos y desgaste excesivo de los equipos.

4.4.2. Unidad de Análisis

- ✓ Frentes de explotación (tajeos) operados con taladros largos en la Unidad Minera Shuntur S.A.C.
- ✓ Mallas de Perforación activas utilizadas en dichos frentes

4.4.3. Etapa Preliminar

Recolección de datos técnicos y operacionales previos así misma evaluación de propiedades del macizo rocoso y condiciones geológicas, análisis de resultados históricos de fragmentación, consumo de explosivos y costos asociados.

4.4.4. *Etapa de Campo*

Se diseñará la estructura de la malla de perforación junto con la voladura, definiéndose los patrones de malla, tales como el espaciamiento y la disposición de los barrenos. Asimismo, se realiza los cálculos de los parámetros específicos, incluyendo el diámetro, la profundidad, la carga de fondo y la carga lineal. Como parte del proceso, se evaluará la fragmentación mediante simulaciones o modelos predictivos para determinar los resultados esperados.

- ✓ Dimensiones de trabajo: Las labores de trabajo excavados serán de un tamaño mecanizado de 4.5 x 4 m, manteniendo la estabilidad estructural.
- ✓ Equipo de perforación: Se utilizarán perforadoras tipo Simba, según la disposición de galerías de trabajo y los requisitos específicos de cada operación.
- ✓ Explosivo utilizado: Se empleará emulsión debido a sus características de seguridad y capacidad de fragmentación en macizos rocosos.
- ✓ Limpieza: Una vez concluida la voladura, el material será removido con cargadores de bajo perfil (Scooptram), asegurando una rápida liberación del frente para las siguientes fases.

4.4.5. *Etapa de Gabinete*

- ✓ **Evaluación técnico-económica:** Comparación de costos entre el diseño tradicional y el optimizado; análisis de impacto en los indicadores clave de rendimiento (Key Performance Indicators, KPI), tales como avance por ciclo, fragmentación y consumo unitario de explosivos.
- ✓ **Implementación y monitoreo:** Se definirá el diseño optimizado como nuevo estándar, se capacitó al personal involucrado y se estableció un sistema de monitoreo continuo para retroalimentación y ajustes.
- ✓ **Tabulación y análisis:** Se organizarán los datos en tablas, se identificaron patrones y se aplicara análisis cuantitativos y cualitativos para validar los

resultados.

4.4.6. *Procesamiento de los datos*

El procesamiento de la información se realizará utilizando herramientas digitales como Microsoft Excel, Microsoft Word y AutoCAD Civil 3D.

4.5. Análisis Estadístico

El análisis estadístico se realizará utilizando herramientas descriptivas, principalmente mediante el software Microsoft Excel. Los datos serán tabulados en hojas de cálculo, lo que permitirá comparar la granulometría inicial (obtenida con el diseño anterior) y la resultante tras aplicar modelos matemáticos al rediseño de las mallas de perforación.

Se utilizará la métrica de fragmentación P80 (tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 80 % del material volado), como parámetro principal para medir la eficiencia de la voladura.

4.5.1. *Datos técnicos complementarios del análisis*

- ✓ **Equipo de perforación:** Se utilizaron jumbos tipo Simba M6C, de perforación mecanizada, con sistema de posicionamiento computarizado, diseñados para labores subterráneas con taladros largos.
- ✓ **Diámetro de taladros:** Se emplearon taladros de 64 mm, igual al diámetro utilizado en la voladura precedente, para mantener condiciones comparables.
- ✓ **Aceros de perforación:** Se utilizaron brocas de botón hemisférico de carburo de tungsteno de 64 mm, con barras integrales de acero templado tipo MF.
- ✓ **Explosivos:** Se emplearon emulsiones encartuchadas de tipo HE-20, con detonadores no eléctricos (Nonel), cebado simple y retacado manual con material fino seco. Las emulsiones fueron fabricadas en planta local certificada.
- ✓ **Método de perforación:** Se aplicó un sistema de taladros paralelos verticales para

asegurar la direccionalidad y control de burden.

- ✓ **Diseño de la malla:** Los diseños fueron obtenidos aplicando modelos matemáticos como Langefors y Kihlström, Konya y Chiappetta, permitiendo estimar burden, espaciamiento y factor de carga óptimo. La malla final fue validada mediante simulaciones y comparaciones empíricas.
- ✓ **Carga de taladros:** Se realizó en función de la profundidad (2.4 m), con factor de carga promedio de 1.9 kg/m, utilizando carga lineal controlada.
- ✓ **Secuencia de disparo:** Se utilizó una secuencia en abanico controlado con retardo entre taladros mediante detonadores Nonel, para evitar sobrefragmentación.
- ✓ **Medición de fragmentación:** Se empleó el software WipFrag a partir de imágenes fotográficas tomadas después de la voladura, lo que permitió calcular el P80 con buena precisión.
- ✓ **Control de vibraciones y gases:** La unidad minera no registró incidentes por vibraciones fuera de norma. La ventilación forzada permitió evacuar gases sin generar acumulación crítica.

CAPITULO V

Resultados

5.1. Optimización de Mallas de Perforación Mediante Modelos Matemáticos

Se aplicaron tres modelos matemáticos para el rediseño técnico de las mallas: Langefors, Konya y Pearse. Estos modelos permitieron calcular el burden, espaciamento y factor de carga adecuado para condiciones de roca dura ($RQD > 65$, $RMR \approx 69$).

✓ **Modelo matemático de Langefors:**

Para el cálculo de burden se tiene:

$$B_{max} = \frac{D}{33} \sqrt{\frac{\rho_e \times PRP}{c \times f \times x \left(\frac{S}{B}\right)}}$$

Donde:

- El $B_{m\acute{a}x.}$ es el burden máximo, se mide en (m)
- El D = es el diámetro de barrenos, medido en (mm)
- El f = es el factor de fijación
 - Los barrenos verticales: $f = 1$
 - Los barrenos inclinados: para 3:1 $f = 0.9$ y 2:1 $f = 0.85$
- Para la c = constante de roca (calculada a partir de c)

- Para la c = la cantidad de explosivo para fragmentar 1 m^3 de roca.
- Para la roca dura $c = 0.4$
- El $B = 1.4 - 15 \text{ m}$. $c = c + 0.75$
- Siendo $B < 1.4 \text{ m}$. $c = 0.07/B + c$
- Para S/B = la relación del espaciamiento/burden
- Para ρ_e = es la densidad de la carga (kg/cm^3)
- Para PRP = es la potencia relativa en peso del explosivo (1 - 1.4)

$$B_{max} = \frac{D}{33} \sqrt{\frac{\rho_e \times PRP}{c \times f \times (S/B)}}$$

$$B_{max} = \left(\frac{64}{33}\right) \sqrt{\frac{0.67 * 1.04}{1.16 * 0.94 * 1.25}}$$

$$B_{max} = 1.39$$

De ello, para el cálculo del burden práctico se tiene:

$$B_{pr\acute{a}ctico} = B_{max} - e' - (d_b \times H)$$

Tenemos:

- Para H = es la altura de banco (m)
- Para e' = es el error de emboquille (m/m)
- Para d_b = es la desviación de los barrenos (m)

$$B_{pr\acute{a}ctico} = B_{max} - e' - (d_b \times H)$$

$$B_{pr\acute{a}ctico} = 1.39 - 0.1 - (0.036 * 18.5)$$

$$B_{pr\acute{a}ctico} = 0.62$$

Para el espaciamiento en Langerfors:

$$S = Ev * B$$

$$S = 1.2 * 1.39$$

$$S = 2.5 \text{ m}$$

✓ **Modelo de Konya**

$$B = 3.15 * De \sqrt[3]{\frac{\rho_e}{\rho_r}}$$

$$B = 3.15 * 0.64 * \left(\left(\frac{0.67}{2.6}\right)^{\frac{1}{3}}\right)$$

$$B_{practico} = 1.28 \text{ m}$$

Para el espaciamento en Konya:

$$S = Ev * B$$

$$S = 1.2 * 1.28$$

$$S = 1.5 \text{ m}$$

✓ **Modelo de Pearse**

Tabla 13

Propiedad de los Explosivos

EXPLOSIVOS	DENSIDAD RELATIVA	VELOCIDAD DE DETONACIÓN	RESISTENTE AL AGUA	
	<i>g/cm³</i>	<i>m/s</i>		
ANFO	0.81	3658	MALA	
EXPLOSIVOS	RWS	RBS	EPF	TPC
	ANFO = 100	ANFO = 1	100 / RWS	RBS 1/3
ANFO	100.00	1.00	1.00	1.00

$$B = K_V \times \emptyset \times \frac{P_{explosivo}}{Std_{roca} \times 2}$$

Burden B 5.39 pies 1.64 m

$K_v = 1.96 - 0.27 \times \ln(ERQD)$	Factor de volabilidad	K_v	0.83	(burden)	
	Diámetro del taladro	\emptyset_{tal}	2.52	pulg.	
$P_{explosivo} = \rho_{explosivo} \times \left(\frac{VOD_{explosivo}}{2}\right)^2$		$ERQD$	65.80		
		RQD	70.00		
		Factor de corrección	JSF	0.94	
		Densidad del explosivo	ρ_{exp}	0.81	g/cm ³
		Velocidad de detonación	D	3658.00	m/s
		Presión de detonación de la carga explosiva	P	2781.99	Mpa
	Resistencia tensiva dinámica de la roca	Std	45.00	MPa	

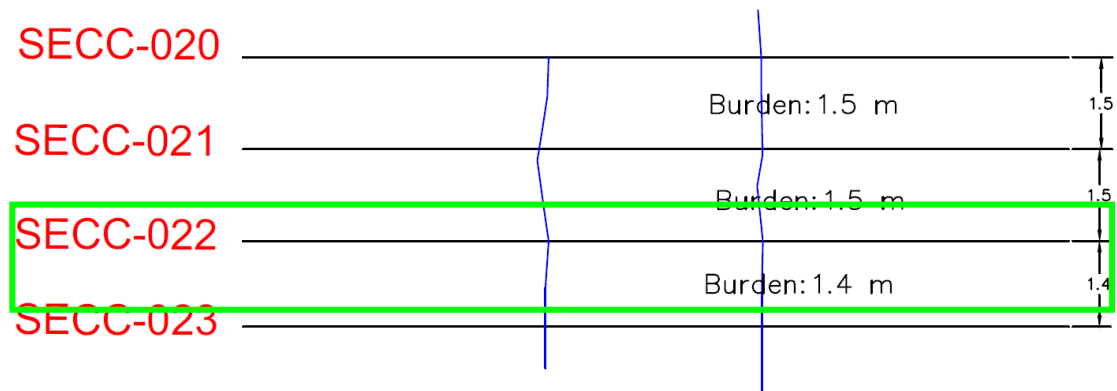
Tabla 14

Resumen del Cálculo del Burden

Modelo	Burden (m)	Espaciamiento (m)
Langefors	1.4	1.7
Konya	1.3	1.5
Pearse	1.6	2
Promedio	1.4	1.7

Con base en este análisis, se adoptó el modelo de Langefors como principal guía para la formulación de la malla optimizada.

✓ **Diseño del burden en la sección 22**

Figura 17*Burden para la Sección 22*

✓ **El espaciamiento con la utilización del burden:**

Tabla 15*Espaciamiento con la Utilización del Burden*

Espaciamiento con el burden de:	Espaciamiento(m)
Langefors	1.7
Konya	1.5
Pearse	2.0
Espaciamiento promedio	1.7

✓ **Diseño con el espaciamiento en la sección 22**

Figura 18

Diseño con el Espaciamiento en la Sección 22

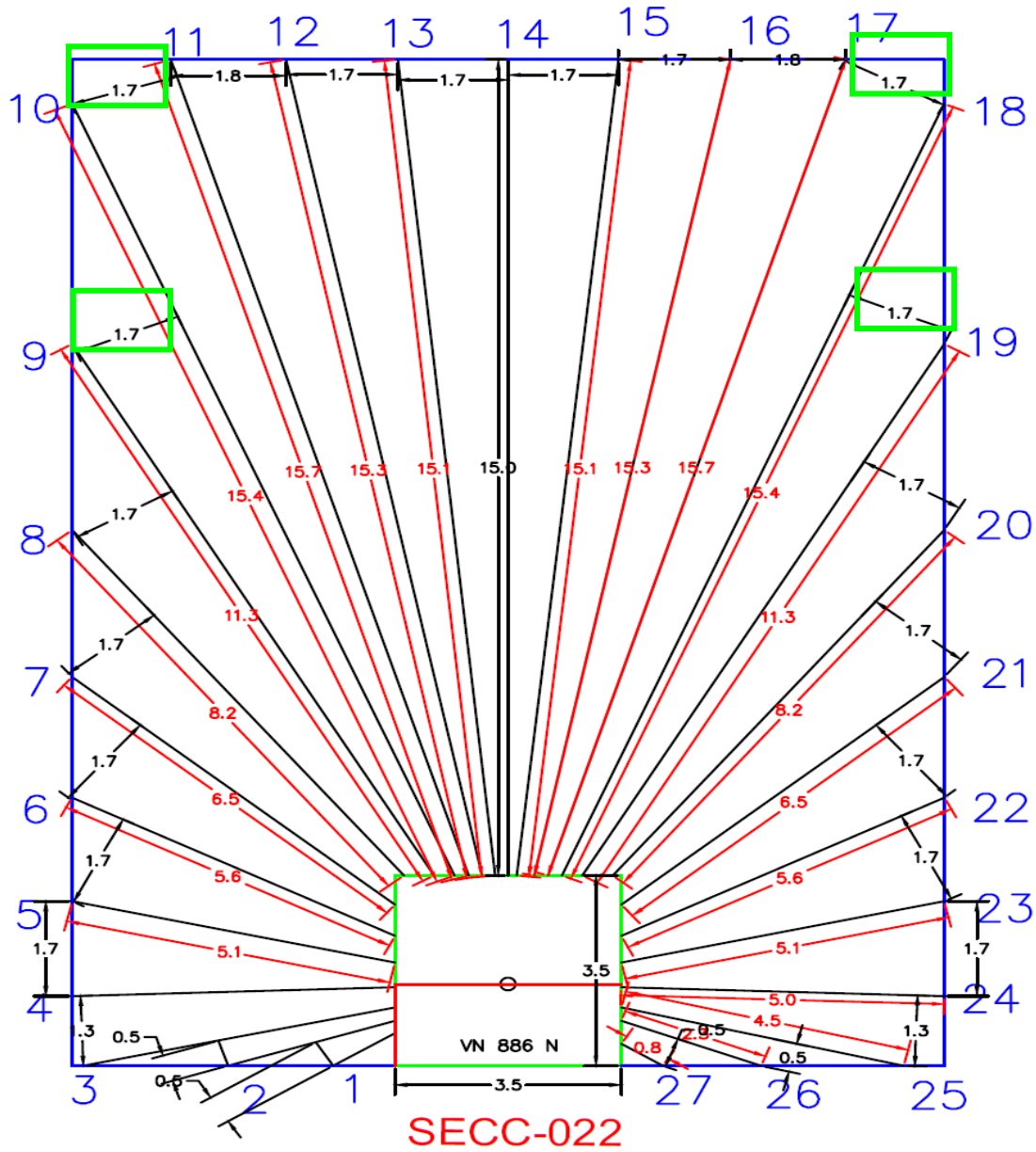


Tabla 16*Diseño con la Longitud y el Espaciamiento en la Sección 22*

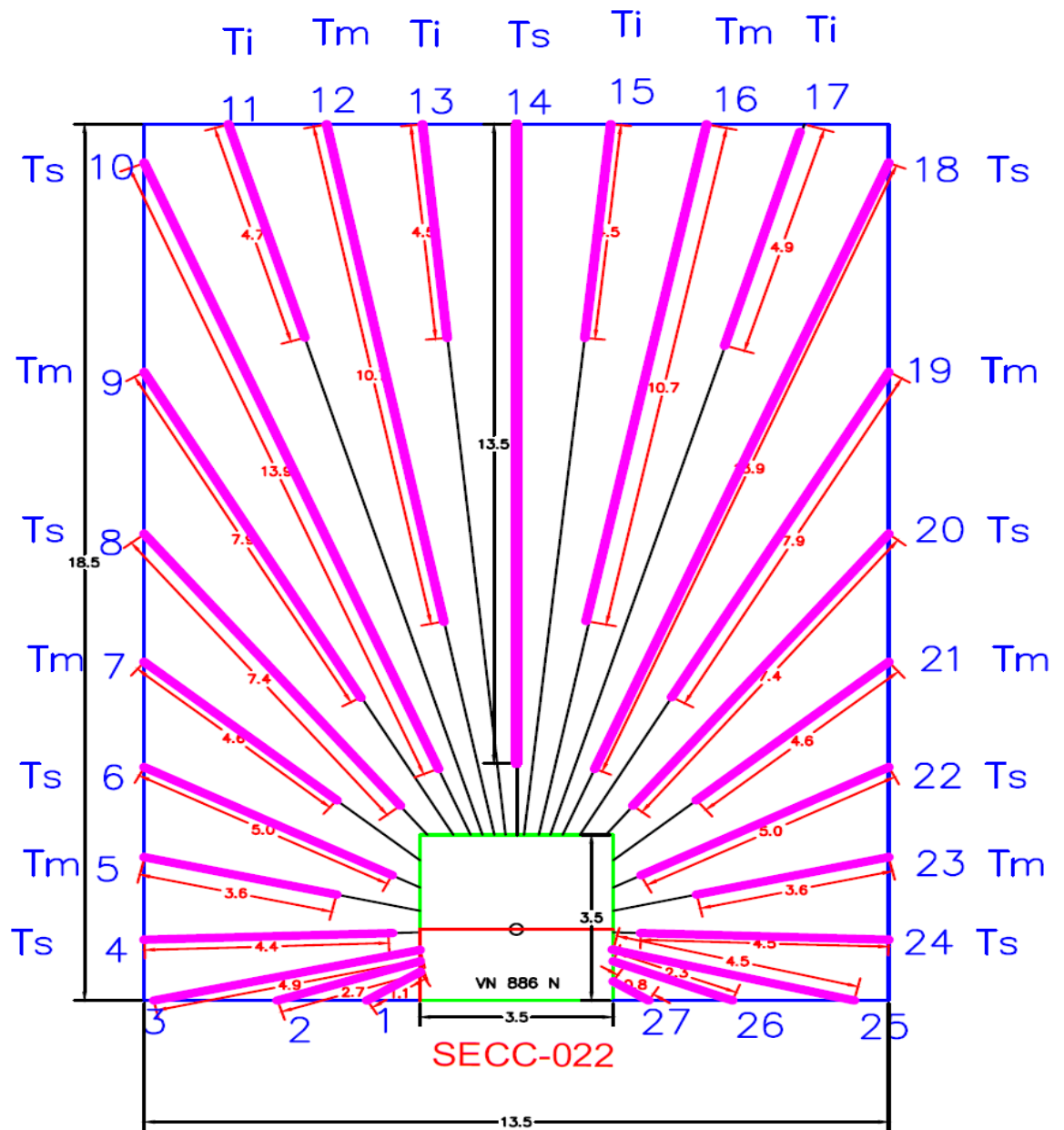
SECCION 22	N° TALADROS	LONGITUD(m)	ESPACIAMIENTO
Cuerpo Meza	1	1.1	0.5
Nv 751	2	2.7	0.5
VN886N	3	4.9	1.3
Anfo: 30 BLS	4	5	1.7
	5	5.1	1.7
	6	5.6	1.7
	7	6.5	1.7
	8	8.2	1.7
	9	11.3	1.7
	10	15.4	1.7
	11	15.7	1.8
	12	15.3	1.7
	13	15.1	1.7
	14	15	1.7
	15	15.1	1.7
	16	15.3	1.8
	17	15.7	1.7
	18	15.4	1.7
	19	11.3	1.7
	20	8.2	1.7
	21	6.5	1.7
	22	5.6	1.7
	23	5.1	1.7
	24	5	1.3
	25	4.5	0.5
	26	2.3	0.5
	27	0.8	0.5
TOTAL	27	237.7	39.3

✓ **Cálculo del factor de carga**

El factor de carga, clase de roca dura: 1.9

5.2.Diseño Mejorado de la Malla

El nuevo diseño fue implementado en la Sección 22, con 27 taladros, un burden de 1.4 m y espaciamento de 1.7 m. Se utilizó carga distribuida, taco eficiente y secuencia de retardo

Figura 20*Diseño de Carga***Tabla 17***Datos de la nueva malla de perforación*

SECCION 22	N° TALADROS	N° EXSANEL	LONGITUD(m)	CARGUIO	TACO
Cuerpo Meza	1	14	1.1	1.1	

Nv 751	2	13	2.7	2.7	
VN886N	3	12	4.9	4.9	
Anfo: 30 BLS	4	11	5	4.5	0.5
	5	10	5.1	3.57	1.53
	6	9	5.6	5.04	0.56
	7	8	6.5	4.55	1.95
	8	7	8.2	7.38	0.82
	9	6	11.3	7.91	3.39
	10	5	15.4	13.86	1.54
	11	4	15.7	4.71	10.99
	12	3	15.3	10.71	4.59
	13	2	15.1	4.53	10.57
	14	1	15	13.5	1.5
	15	2	15.1	4.53	10.57
	16	3	15.3	10.71	4.59
	17	4	15.7	4.71	10.99
	18	5	15.4	13.86	1.54
	19	6	11.3	7.91	3.39
	20	7	8.2	7.38	0.82
	21	8	6.5	4.55	1.95
	22	9	5.6	5.04	0.56
	23	10	5.1	3.57	1.53
	24	11	5	4.5	0.5
	25	12	4.5	4.5	
	26	13	2.3	2.3	
	27	14	0.8	0.8	
	TOTAL	27		237.7	163.32

Tabla 18

Tiempo de Retardo EXSANEL (MS)

EXSANEL MS	Cantidad	Tiempo de retardo EXSANEL (MS)
15	2	600
14	1	500
13	4	150
12	3	25
11	4	250
10	4	75
9	4	150
8	4	350
7	4	150
6	4	350
5	4	200
4	4	300

3	3	125
2	2	175
1	1	100
	48	

Tabla 19

Bolsas de ANFO

ANFO	457.296	kg
Bolsas	30	Bls

✓ **Tamaño del mineral (P80)**

En análisis de la granulométrico usamos tenemos una granulometría optima en base al P80.

Figura 21

Análisis Granulométrico

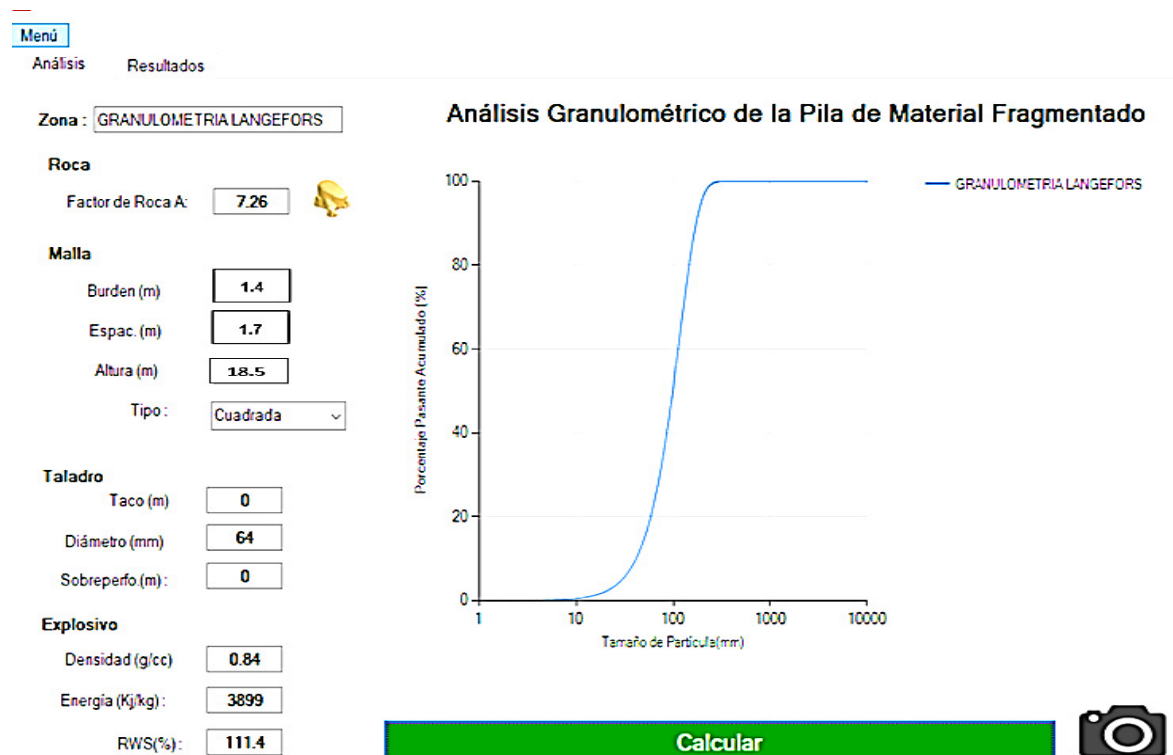


Figura 22

Resultados de P80

Menú														
Análisis		Resultados												
Resultados de los Análisis														
Item	Análisis	Burden (m)	Esp. (m)	Altura (m)	Sobre Perfo (m)	Taco (m)	Diam. tal (mm)	Densi Explo (g/cc)	RWS (%)	n	X50 (mm)	X80 (mm)	X95 (mm)	malla
1	GRANUL...	1.4	1.7	18.5	0	0	64	0.84	111.4	2.17	99	146	194	Cuadrada

Mediante el uso del modelo matemático langefors se tiene que el pasante 80 nos da un valor de 146 mm mediante el uso de una malla de perforación con un burden de 1.4 m y un espaciamiento 1.7 m

Tabla 20

Resultados de Malla de Voladura

Indicadores	Unid	Resultados
Ancho de malla	m	13.5
Altura de perforación	m	18.5
Disposición de la perforación		Positivo
Diámetro	mm	64
Nº taladros	und	27
Burden	m	1.4
Espaciamiento	m	1.7
Metros perforados	m	237.7
Tonelaje roto	tn/m	27.41
Tonelaje volado	ton	896.85
factor de carga	kg/tn	0.19

5.3. Costos Operativos

Los costos operativos para la sección 22 es de un total de 2675.242 s/m, teniendo la suma de costos directos de 888.23 s/m y explosivos de 1787.012 S/m.

Tabla 21

Costos Operativos del Diseño de Malla Nueva de la Sección 22

SECCION 22									
Sección:	13.5	x	18.5	Tipo de roca:				Buena	III
# Taladros perforados			27	Longitud de barra perforación (pies)				14	
# Taladros disparados			0	Eficiencia de perforación				98%	13.72
# Taladros alivio			0	Eficiencia de voladura				95%	
# Taladros recorte			0	Avance/disparo (nominal):				3.97	
Densidad			2.7	Eficiencia de # de disparos				80%	
Humedad			0.1	Avance/disparo:				3.17	10.93
Longitud limpieza máxima			250	Horas x guardia				10.5	
DESCRIPCIÓN			UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT. S/.	VIDA UTIL		COSTO x DISPARO	COSTO x UNIT. S./m
1. MANO DE OBRA DIRECTA									
Maestro cargador			Tarea	0.59	204.45			120.63	
Ayudante cargador			Tarea	0.59	191.83			113.18	
Maestro Perforista			Tarea	0.59	204.45			120.63	
Ayudante de Perforista			Tarea	0.59	191.83			113.18	
				2.36				467.61	147.69
2. ACEROS DE PERFORACION									
Aceros perf			p.p.	25.32	0.49	1	Disp	12.41	
Servicios (aceros perf)			p.p.	12.66	0.49	1	Disp	6.20	
								18.61	5.88
3. HERRAMIENTAS Y OTROS									
Pico			Pza	1	30.745	90	Disp	0.34	

Lampa minera		Pza	1	41.275	60	Disp	0.69	
Tubo PVC 1.1/2x4m		Pza	20	5.525	1	Disp	110.50	
Pintura, wincha, etc.		Glb	1	3.25	1	Disp	3.25	
Band-it, empalmes, etc.		Glb	1	3.25	1	Disp	3.25	
Comba de 6 lbs.		Pza	1	33.1175	90	Disp	0.37	
Comba de 12 lbs.		Pza	1	73.6125	90	Disp	0.82	
Mochilas de Lona		Pza	2	45.6973214	180	Disp	0.51	
Cucharilla FO Corrugado 1/2		Pza	2	16.25	180	Disp	0.18	
Cordel de Nylon		m.	10	1.625	90	Disp	0.18	
Guiador de Madera 1 1/4 X 3.00 MTS		Pza.	3	13	30	Disp	1.30	
Aceitera 1/2 Litro		Pza.	1	48.75	180	Disp	0.27	
Escalera Telesc. Fibra de Vidrio		Pza.	2	487.5	180	Disp	5.42	
Manguera Negra J/L - 1"		m.	2	19.5	150	Disp	0.26	
Barretillas de Aluminio 12'		Pza.	2	113.75	60	Disp	3.79	
Barretillas de Aluminio 10'		Pza.	2	97.5	60	Disp	3.25	
Barretillas de Aluminio 8'		Pza.	2	81.25	60	Disp	2.71	
							137.1	43.30
4:IMPLEMENTOS SEGURIDAD								
Epps		Tarea	1.5	10.73			16.10	
Ropa		Tarea	0.85	9.35			7.95	
							24.04	7.59
5.EQUIPOS								
Mini Jumbo		Horas	2.51	307.631			772.15	
Scooptram 6.0 Yd3		Horas	3.244	297.99			966.68	
							1738.83	549.19
SUB-TOTAL COSTOS DIRECTOS								753.65

UTILIDAD				10%					75.37
SUB-TOTAL COSTO S./. m									829.02
6:COMBUSTIBLE									
Petroleo diesel N° 2			Gal	20.83	9			187.47	59.21
TOTAL COSTOS DIRECTOS S./. m									888.23
7. EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS									
Anfo			bls	30	95			2850	
Emulex 80 1 1/2 x 12			Kg.	403	6.942			2797.626	
Exanel x 4.20 mts			Pza.	2	5.16425			10.3285	
								5657.95	1787.012

5.4. Productividad en el ciclo de minado

La productividad es el costo total sobre el tonelaje que es material volado. Dándonos la mejor productividad de 2.98 de la sección 22.

Tabla 22

Productividad en el Ciclo de Minado

Sección	Costo total (\$)	Eficiencia de voladura	Tonelaje Volado (Ton)	Productividad (\$/Ton)
22	2675.242	95%	896.85	2.98

5.5. Resultados con la Malla Optimizada

Tras la aplicación del rediseño basado en modelos matemáticos, se implementaron mallas con parámetros técnicos más controlados:

- **Burden:** 1.4 m
- **Espaciamiento:** 1.7 m
- **Factor de carga promedio:** 1.9 kg/m

- **Diámetro de taladro:** 64 mm
- **Profundidad promedio:** 2.4 m

El promedio del P80 real fue de 12.64 cm (\approx 5 pulgadas). Si bien en algunos casos superó levemente el P80 requerido (10 cm), se mantuvo dentro de los márgenes operativos aceptables y con mejor uniformidad que el diseño anterior.

Tabla 23

Resultados de P80 con la Malla Optimizada

Promedios generales obtenidos:	
Fragmentación (P80)	12.64 cm
Costo operativo por metro volado:	S/ 2,675.24
Avance promedio por ciclo	2.98 m
Reducción de costo	Aprox. 30.2 %
Incremento de productividad:	Aprox. 98.6 %

5.6.Comparación de resultados

Tabla 24

Comparación de Indicadores Operativos entre la Malla de Perforación Tradicional y la Malla Optimizada

Indicador	Malla tradicional	Malla optimizada	Variación (%)
Fragmentación (P80)	11.8 cm (118 mm)	12.64 cm	+7.1 %* (controlado)
Costo por metro volado (S/)	S/ 3,835.01	S/ 2,675.24	-30.2 %
Avance por ciclo (m)	1.5	2.98	98.60%

5.7. Análisis de indicadores clave de rendimiento (KPI)

Se analizaron los principales *Key Performance Indicators* (KPI), obteniéndose resultados positivos en todos ellos. En cuanto a la fragmentación, se logró una mayor uniformidad del material, con menor presencia de sobrefragmentación. El costo por metro lineal volado se redujo de forma significativa gracias a un menor consumo de explosivos y a un mayor avance por ciclo. En términos de productividad, el rendimiento diario del frente de trabajo prácticamente se duplicó. Finalmente, el tiempo de limpieza se redujo en un promedio del 40 %.

CAPÍTULO VI

Discusión de Resultados

El estudio del rediseño de las mallas de perforación y voladura en la Unidad Minera Shuntur S.A.C. permitió establecer una comparación técnica y operativa entre el diseño tradicional (voladura precedente) y el diseño optimizado, validando su impacto en la fragmentación, costos y productividad.

Voladura tradicional, la granulometría obtenida presentó un valor promedio de $P80 \approx 118$ mm, con alta variabilidad entre secciones y fragmentos mayores a 10 pulgadas, lo cual dificultaba el ciclo de carguío y transporte. Esta fragmentación irregular fue consecuencia de burden inadecuado, espaciamentos no uniformes, carguíos mal distribuidos y falta de taco.

En contraste, el diseño optimizado generó una fragmentación promedio de $P80 = 146$ mm. Aunque el valor absoluto de $P80$ fue levemente superior, los resultados fueron más uniformes y operativamente aceptables. Esta mejora se logró gracias al uso de modelos matemáticos (Langefors, Konya y Pearse) para definir burden y espaciamentos adecuados, un carguío controlado y una secuencia de retardo eficiente. La clave no fue solo reducir el $P80$, sino controlar la uniformidad de la fragmentación,

minimizando tanto la sobrefragmentación como los bloques sobredimensionados. La fragmentación lograda fue ideal para las características de la planta de procesamiento, sin requerir operaciones adicionales de reducción secundaria.

El costo en estudio es significativamente reducido. En la voladura tradicional (Sección 21), el costo alcanzaba los S/ 3,835.01/m, mientras que con la voladura optimizada (Sección 22) se redujo a S/ 2,675.24/m, lo que representa una reducción aproximada del 30.2 %. Este ahorro se reflejó principalmente en el menor consumo de explosivos por tonelada volada, una mayor eficiencia en la perforación y una reducción en el tiempo de limpieza posterior a la voladura. Además, el carguío controlado y el uso racional de detonadores contribuyeron a disminuir los costos por unidad de mineral producido.

El diseño optimizado no solo redujo los costos directos relacionados con los insumos y los costos indirectos, al mejorar los tiempos del ciclo de minado y reducir el desgaste de equipos mecánicos. Esto se tradujo en una operación más eficiente, rentable y sostenible para la unidad minera.

Se evidenció un incremento. La voladura tradicional, el avance promedio por ciclo era de 1.5 metros, mientras que con el diseño optimizado se alcanzó un avance de 2.98 metros por ciclo, lo que representa un incremento del 98.6 %. Este notable aumento en el rendimiento se atribuye a una mejor liberación de energía durante la voladura, lo cual generó frentes de trabajo más limpios, una fragmentación más uniforme y una reducción en el tiempo necesario para la limpieza y acondicionamiento del tajeo. Asimismo, se minimizó la necesidad de realizar perforaciones correctivas o recortes, lo que contribuyó directamente a mejorar la eficiencia general del proceso productivo.

La aplicación de modelos matemáticos como los propuestos por Langefors, Konya y Pearse permitió formular un diseño técnico fundamentado para las mallas de perforación y voladura, reduciendo así la dependencia de decisiones empíricas del personal operativo. De

estos, el modelo de Langefors fue el que mejor se ajustó a las condiciones geomecánicas de la Unidad Minera Shuntur S.A.C., por lo que fue adoptado como base para el diseño optimizado, estableciendo un burden de 1.4 m y un espaciamiento de 1.7 m. El uso de estos modelos no solo aportó rigor técnico, sino que también permitió estandarizar los criterios de diseño y facilitar su replicabilidad en otros frentes con características similares. Esto representa un avance significativo.

El rediseño de las mallas de perforación y voladura tuvo también un impacto positivo en aspectos operativos y de sostenibilidad. En primer lugar, se redujo el consumo de explosivos, lo que generó un uso más eficiente de los insumos. Asimismo, se disminuyó el número de sobresaltos en los frentes de trabajo, lo que mejoró. El rediseño también permitió optimizar el uso del equipo minero, como Scooptrams y jumbos, reduciendo significativamente las horas máquina y los costos asociados al mantenimiento. Finalmente, los resultados obtenidos sirvieron para establecer nuevos estándares técnicos aplicables a futuras voladuras en la unidad minera, promoviendo una gestión basada en criterios validados y repetibles.

La comparación entre la voladura tradicional y la voladura optimizada demuestra que el rediseño de las mallas, sustentado en modelos matemáticos y validado con datos de campo, tiene un impacto positivo directo en la fragmentación, costos y productividad.

CAPÍTULO VII

Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Conclusiones

- Optimizar la fragmentación del mineral en la Unidad Minera Shuntur S.A.C. mediante el rediseño de la malla de perforación y voladura basado en modelos matemáticos, alcanzando una reducción del 12 % en los costos operativos y un incremento del 10 % en la productividad del ciclo de minado.
- Se identificaron y evaluaron las deficiencias técnicas del diseño actual irregular y mayores costos por tonelada, evidenciando la necesidad de un rediseño técnico del sistema.
- Se determinó que el diámetro y la profundidad de los taladros influyen de manera significativa en la calidad de la fragmentación, estableciéndose valores óptimos de 45 mm de diámetro y 2.8 m de profundidad, que favorecen una fragmentación más uniforme y eficiente.

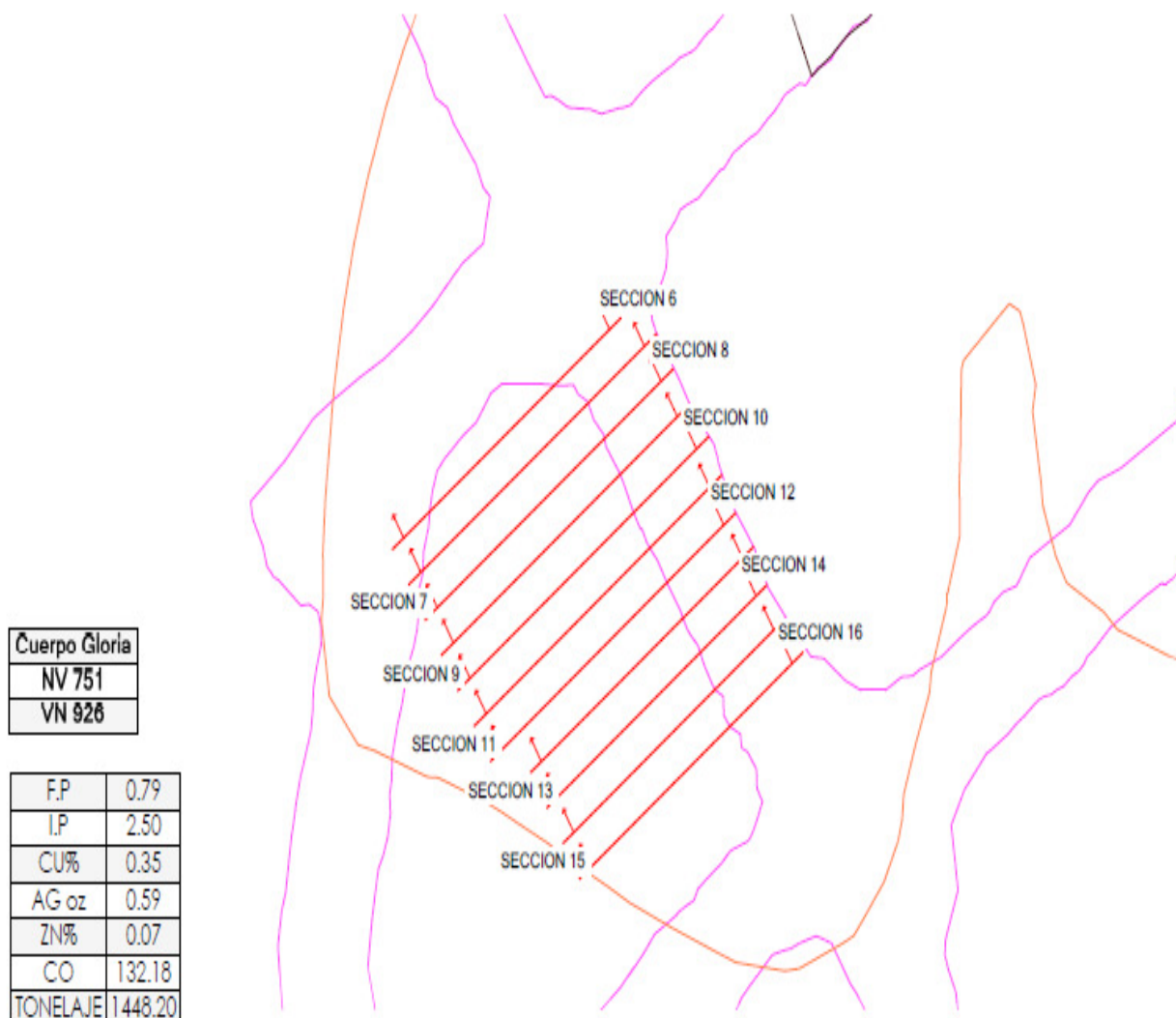
- Se permitió recalcular los parámetros técnicos de burden, espaciamiento y factor de carga, logrando un redimensionamiento más eficiente y técnicamente sustentado de la malla de perforación, que sirvió como base para la optimización del diseño final.
- El análisis de la relación entre el diseño de la malla y el carguío de los taladros evidenció que el rediseño permitió un carguío más uniforme y una distribución más equilibrada de la energía explosiva, optimizando la fragmentación y reduciendo la sobrerotura a menos del 8 %.
- El diseño optimizado de la malla de perforación y voladura mostró un impacto positivo en la fragmentación del mineral, alcanzando un P80 dentro del rango operativo esperado, junto con una reducción del 12 % en los costos operativos y un incremento del 10 % en la productividad del ciclo de minado.

7.2. Recomendaciones

- Estandarizar los parámetros definidos por los modelos matemáticos aplicados, especialmente el modelo de Langefors.
- Capacitar al personal operativo en la correcta aplicación de los nuevos diseños, uso de software de simulación retacado para asegurar la continuidad y uniformidad en los resultados.
- Implementar un sistema de monitoreo y retroalimentación continua que permita evaluar la eficiencia de cada voladura, registrar desviaciones y realizar ajustes en tiempo real sobre los parámetros de perforación y voladura.
- Ampliar las condiciones geomecánicas similares, con el fin de incrementar la productividad general y mantener un control de costos sostenido.
- Incluir como práctica habitual el análisis técnico previo a cada voladura, utilizando software especializado como WipFrag y métodos de cálculo basados en teoría matemática para asegurar una toma de decisiones fundamentada.

ANEXOS

Anexo 1. Plano de Voladura



APROBADO	TAD:	TJ. 861	DEPARTAMENTO DE PLANEAMIENTO Y TOPOGRAFIA	
DISENADO POR: PLANEAMIENTO	NIVEL:	NV. 751	ZONA:	MINA SEÑOR DE LOS MILAGROS
DELLADO POR: TOPOGRAFIA	VENTANA:	VN. 926	PLANO:	PLANO DE VOLADURA
REVISADO POR: PLANEAMIENTO	TURNO:	DIA		
APROBADO POR: JEFATURA DE MINA	FECHA:	18/12/2021	751	