



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de INGENIERÍA DE MINAS

**“OPTIMIZACIÓN DEL FACTOR DE CARGA PARA
MEJORAR EL RENDIMIENTO DE LA VOLADURA
EN LA CR SAN LORENZO, NV 3240 DE LA U.M.
SAN JULIÁN”**

Trabajo de suficiencia profesional optar el título
profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Renato Elias Vasquez Montoya

Asesor:

Msc. Ing. Danny Daniel Valderrama Gutiérrez

<https://orcid.org/0000-0002-6810-8910>

Trujillo - Perú

2025

INFORME DE SIMILITUD






Página 2 of 91 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::1:3301195561

14% Similitud general

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

Fuentes principales

- 14%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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

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

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mi familia, por el apoyo incondicional durante todo este largo proceso, donde hubo altas y bajas, pero se pudo resolver, todo tipo de inconvenientes. A mi director de tesis, por su orientación experta. A mis amigos y colegas por su motivación. Gracias a todos por hacer posible este logro.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi asesor de tesis, por su apoyo constante durante el proceso de investigación. Agradezco también a la universidad por brindarme la oportunidad de realizar esta investigación y por proporcionar los recursos necesarios para su desarrollo. Finalmente, agradezco a mi familia y amigos por su apoyo emocional y su comprensión durante todo este proceso.

Tabla de Contenidos

INFORME DE SIMILITUD	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTO	4
Tabla de Contenidos	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
RESUMEN EJECUTIVO	9
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Experiencia Profesional	11
1.1.1 Experiencia	12
1.1.2 Logros Destacados.....	13
1.1.3 Responsabilidades Actuales.....	14
1.2 Reseña Histórica de la empresa	15
1.2.1 Misión.....	16
1.2.2 Valores	17
1.2.3 Logros Destacados.....	18
1.3 Organigrama	20
1.4 Servicios que ofrece la empresa	21
1.5 Políticas de Seguridad y Salud Ocupacional	22
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	24
CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA	30
3.1 Proceso de ingreso a la empresa	30
3.2 Personas involucradas en el proyecto	32
3.3 Funciones Desempeñadas.....	32
3.4 Desarrollo del Proyecto	34
3.4.1 Identificación del Problema.....	34
3.4.2 Diagnóstico.....	35
3.5 Entrevistas con el personal operativo	37
3.5.1 Planificación	39
3.5.2 Metodología y Herramientas utilizadas.....	42
3.5.3 Etapas de la investigación.....	45
3.5.4 Implementación del Proyecto	48
3.5.5 Consideraciones Éticas	50

CAPÍTULO IV. RESULTADOS	53
4.1 Resultados del Objetivo 1	53
4.2 Resultados del Objetivo 2	58
4.3 Resultados del Objetivo 3	63
4.4 Resultados del Objetivo 4	67
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
5.1 Conclusiones	70
5.2 Recomendaciones	71
REFERENCIAS	74
ANEXOS	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Cronograma de actividades suscrito a la investigación.....	41
Tabla 2.	Herramientas utilizadas en el proyecto de investigación.....	44
Tabla 3.	Datos Operacionales	55
Tabla 4.	Parámetros de diseño de voladuras para la muestra	56
Tabla 5.	Volumen y tonelaje del macizo volado por ciclo.....	56
Tabla 6.	Análisis del P80	57
Tabla 7.	Parámetros geotécnicos del macizo rocoso	59
Tabla 8.	Parámetros operacionales registrados en campo	60
Tabla 9.	Evaluación combinada de eficiencia de la voladura.....	61
Tabla 10.	Parámetros registrados en voladuras anteriores.....	64
Tabla 11.	Comparación entre datos reales y predicción del modelo	65
Tabla 12.	Rango técnico sugerido del factor de carga.....	66
Tabla 13.	Tabla resumen de indicadores de rendimiento	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Organigrama de la empresa minera Poderosa	20
Figura 2.	Fórmula convencional del factor de carga.....	54
Figura 3.	Fórmula del factor de carga, evaluado por tonelada métrica.....	54
Figura 4.	Relación entre el factor de carga y el P80	57
Figura 5.	Porcentaje de sobretamaño según el factor de carga	58
Figura 6.	Relación entre desviación de perforación y % de sobretamaño	62
Figura 7.	Ecuación del Modelo Propuesto	64
Figura 8.	Modelo ajustado de la ecuación propuesta	65

RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio tuvo como objetivo principal optimizar el factor de carga para mejorar el rendimiento de la voladura en la cámara de recuperación San Lorenzo, nivel 3240, de la Unidad Minera San Julián. A partir de una metodología basada en la observación de campo, análisis de datos operacionales y aplicación de criterios geotécnicos, se abordaron cuatro objetivos específicos fundamentales para el logro de esta meta.

En primer lugar, se analizó la relación entre el factor de carga y la fragmentación del macizo rocoso, evidenciándose una correlación directa entre ambos. Factores de carga subóptimos ($<0.35 \text{ kg/m}^3$) provocaron una fragmentación deficiente, con alta generación de boulders y sobrerotura en zonas litológicas blandas. La optimización progresiva del factor de carga según la competencia del macizo permitió reducir en 43% los bloques mayores a 1 m^3 y mejorar la uniformidad granulométrica.

En segundo lugar, se identificaron los parámetros geotécnicos y operacionales más influyentes en la eficiencia de la voladura. El RQD promedio (62%), el tipo y orientación de discontinuidades, la densidad del explosivo, así como errores en el espaciamiento, burden, inclinación de taladros y sincronización del disparo, fueron factores determinantes en el rendimiento. Se evidenció que una caracterización inadecuada del macizo y desviaciones en la perforación (hasta 6°) disminuyen significativamente la eficiencia energética de la voladura.

Posteriormente, se propuso un modelo técnico de ajuste del factor de carga, formulado en función del índice de resistencia uniaxial (UCS), la densidad del explosivo y el burden efectivo. La aplicación del modelo permitió una reducción del 12% en el consumo de explosivo sin sacrificar la calidad de la fragmentación, además de mejorar la alineación de los frentes de voladura en el 87% de los casos evaluados.

Finalmente, los resultados fueron evaluados mediante indicadores de rendimiento técnico. Se observó una mejora sustancial en el P80 (de 42 cm a 29 cm), un aumento del 21% en la eficiencia de carguío (de 380 t/h a 460 t/h), y una estabilización del factor de potencia en 0.32 kg/t. La reducción del ratio de boulders mejoró la continuidad operativa en el transporte y chancado, disminuyendo significativamente los tiempos improductivos.

Los hallazgos de esta investigación permiten establecer un marco técnico-operacional replicable para otros tajos o cámaras con condiciones geomecánicas similares, contribuyendo a la eficiencia integral del ciclo de minado en operaciones subterráneas.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Experiencia Profesional

Actualmente desempeño el cargo de Supervisor de Operaciones Mina en la Compañía Minera Poderosa S.A.A., ubicada en el distrito de Pataz, provincia de Pataz, departamento de La Libertad. Su labor se enmarca en el contrato de servicios suscrito con la Contrata Minera San Julián S.A.C., empresa que presta servicios especializados de operación minera subterránea a la mencionada unidad minera.

Durante el periodo de desempeño profesional, he estado encargado de la supervisión integral de labores mineras subterráneas, incluyendo el control del avance de frentes de minado, sostenimiento, ventilación, limpieza, y carguío y transporte de mineral y desmonte. Asimismo, he estado involucrado directamente en el cumplimiento de los estándares de seguridad y salud ocupacional, velando por el desarrollo de las actividades conforme a los lineamientos del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería.

Entre las principales responsabilidades se destacan:

- Planificación y ejecución diaria de operaciones de minado conforme al diseño y planeamiento aprobado por la gerencia de operaciones.
- Coordinación con las áreas de geología, planeamiento, geomecánica y topografía para el cumplimiento eficiente de los ciclos de minado.
- Supervisión del cumplimiento de los factores de carga, control del P80 y condiciones operativas en frentes de explotación.
- Reporte técnico-operativo diario a la jefatura de mina y al área de planeamiento.
- Implementación de mejoras en la eficiencia operativa mediante el análisis técnico de indicadores clave de desempeño (KPI).

El conocimiento práctico adquirido durante esta experiencia laboral ha permitido una comprensión directa de los procesos productivos, desafíos técnicos y medidas de optimización en la minería subterránea, particularmente en lo referido al control de

calidad del mineral, la reducción de dilución y la mejora de factores operativos críticos. Esta experiencia es base fundamental para el desarrollo del presente estudio de suficiencia profesional, que se enmarca en el análisis técnico-económico de oportunidades de mejora en procesos de minado subterráneo en la unidad operativa.

1.1.1 Experiencia

Durante mi carrera, cuento con una trayectoria profesional consolidada en el sector minero, desarrollada a lo largo de los últimos años en empresas dedicadas a la explotación, exploración y servicios especializados para operaciones mineras subterráneas y superficiales. Mi experiencia se ha forjado en diversas unidades mineras del país, ocupando cargos de responsabilidad técnica y operativa que han fortalecido sus competencias en perforación y voladura, acarreo de mineral y costeo de operaciones, áreas en las que se ha especializado.

Entre los cargos más representativos se destaca mi desempeño como Supervisor de Operaciones Mina en la Compañía Minera Poderosa S.A.A., ubicada en Patatz, La Libertad, donde prestó servicios a través de la Contrata Minera San Julián S.A.C. En esta posición, lidere labores de control y supervisión en los ciclos operativos del método de explotación subterránea, con énfasis en la planificación y ejecución de voladuras, optimización del acarreo de mineral mediante sistemas de vagonetas y locomotoras, así como en la evaluación del rendimiento operativo de equipos y personal.

En el ámbito de perforación y voladura, he demostrado un dominio técnico en el diseño de mallas de perforación, selección de explosivos según condiciones geomecánicas del macizo rocoso, y control de vibraciones y sobreexcavaciones. Mi experiencia práctica ha permitido mejorar los factores de rotura, reducir la sobreperforación y minimizar la dilución del mineral, contribuyendo a una mayor eficiencia del proceso extractivo.

Respecto al acarreo de mineral, he liderado la implementación de rutas de transporte optimizadas, evaluando el rendimiento de equipos LHD, locomotoras y volquetes, y aplicando criterios de control de tonelaje, tiempos de ciclo y disponibilidad mecánica. El enfoque técnico ha estado orientado a reducir los costos operativos por tonelada transportada y mejorar la continuidad del flujo de mineral hacia planta.

En cuanto al costeo de operaciones mineras, he participado activamente en la elaboración de reportes técnico-económicos, análisis de costos unitarios por actividad (perforación, voladura, sostenimiento, ventilación, acarreo, entre otros), evaluación de rendimientos y comparación con estándares de la industria. Esta experiencia ha sido clave para la toma de decisiones operativas, con una visión orientada a la sostenibilidad económica de las labores mineras.

Adicionalmente, ha trabajado en empresas de exploración minera, donde participé en campañas de perforación diamantina y mapeo geológico estructural, complementando mi perfil técnico con una visión integral del ciclo minero, desde la prospección hasta la producción.

En resumen, la experiencia en diversos contextos operativos y geográficos me ha permitido desarrollar un enfoque técnico-estratégico en la gestión minera, que constituye la base y el sustento práctico para el desarrollo de la presente Tesis de Suficiencia Profesional.

1.1.2 Logros Destacados

En mi trayectoria profesional, he obtenido logros destacados las cuales son:

Durante los últimos años, asumí responsabilidades técnicas y operativas en diversas empresas mineras dedicadas a la explotación, exploración y servicios mina, donde pude alcanzar logros relevantes que contribuyeron a la mejora de la productividad, eficiencia operativa y control de costos en distintas fases del proceso minero.

En el área de perforación y voladura, optimicé el diseño de mallas en labores subterráneas, lo que permitió mejorar el factor de rotura en más de un 15 %, reducir la sobreperforación en zonas críticas y minimizar la dilución del mineral. Además, implementé parámetros de control técnico que disminuyeron la aparición de gases post-voladura y mejoraron los tiempos de ventilación, asegurando condiciones más seguras para el ingreso del personal.

Respecto al acarreo de mineral, lideré mejoras en la planificación y ejecución de rutas de transporte subterráneo, que permitieron reducir en un 12 % los tiempos de ciclo y aumentar el tonelaje diario transportado sin requerir mayor flota. Gestioné indicadores

operativos como disponibilidad mecánica, utilización efectiva de equipos y productividad por operador, alcanzando metas por encima del estándar establecido por la operación.

En cuanto al costeo de operaciones, elaboré y actualicé estructuras de costos unitarios por actividad minera, lo que facilitó la identificación de oportunidades de ahorro y permitió sustentar propuestas de mejora ante la jefatura de operaciones. Gracias a esta gestión, se logró una reducción del costo por tonelada explotada en frentes selectivos y se mejoró la toma de decisiones operativas en función de criterios económicos.

También participé en proyectos de exploración minera, donde brindé soporte técnico en campañas de perforación diamantina, optimizando la logística de perforación y controlando el rendimiento de equipos y contratistas, lo que permitió cumplir los objetivos del programa exploratorio en los plazos establecidos.

Estos logros fueron posibles gracias a una combinación de experiencia en campo, análisis técnico y coordinación multidisciplinaria, lo que me permitió aportar de manera significativa al cumplimiento de los objetivos productivos de las operaciones donde presté servicios.

1.1.3 Responsabilidades Actuales

En el ejercicio del cargo de Supervisor de Operaciones en la Contrata Minera San Julián S.A.C., empresa que brinda servicios a la Compañía Minera Poderosa S.A.A. en su unidad ubicada en Pataz, La Libertad, asumí diversas responsabilidades técnicas y de gestión operativa en el ámbito de la minería subterránea.

Supervisé diariamente las actividades del ciclo completo de minado, que comprendían la perforación, voladura, sostenimiento, limpieza, carguío y acarreo de mineral y desmonte. Me encargué de verificar que cada etapa se ejecute de acuerdo con el planeamiento de corto plazo y bajo estrictos estándares de seguridad, calidad y eficiencia.

Coordiné directamente con las áreas de geología, planeamiento, geomecánica, ventilación y mantenimiento, para asegurar la continuidad operativa y mitigar interferencias entre actividades. También realicé la distribución de personal por labor y turno, controlando el cumplimiento de metas diarias y semanales, y validando los reportes técnicos y operativos generados por los jefes de guardia.

Implementé medidas de control para mejorar el rendimiento en perforación y voladura, revisando parámetros operativos, evaluando los resultados post-voladura y ajustando diseños para reducir la sobreexcavación y optimizar la fragmentación. En el caso del acarreo de mineral, gestioné el uso eficiente de equipos como locomotoras, vagonetas y LHDs, minimizando los tiempos muertos y asegurando la entrega oportuna del mineral a planta.

Asimismo, participé activamente en la evaluación de costos operativos, realizando el seguimiento de indicadores económicos por actividad y colaborando en la elaboración de presupuestos mensuales, lo cual permitió identificar oportunidades de mejora en el uso de recursos y la toma de decisiones técnicas con enfoque económico.

Todas estas responsabilidades me permitieron desarrollar una visión integral del proceso productivo subterráneo, fortaleciendo mi capacidad para liderar equipos, tomar decisiones basadas en información técnica y mantener una operación segura, eficiente y orientada al cumplimiento de objetivos de producción y rentabilidad.

1.2 Reseña Histórica de la empresa

La Compañía Minera Poderosa S.A.A. es una empresa minera de capital peruano con una sólida trayectoria en la explotación de yacimientos auríferos, principalmente mediante el método de minería subterránea. Fundada en el año 1980, la empresa inició sus operaciones en el distrito y provincia de Pataz, departamento de La Libertad, una zona históricamente reconocida por su alto potencial aurífero, en el corazón de la cordillera nororiental de los Andes peruanos.

Desde sus inicios, Poderosa centró su actividad en la extracción y procesamiento de mineral aurífero de vetas filonianas de alta ley, utilizando tecnologías adaptadas a las condiciones geológicas y geomecánicas del yacimiento. Con el paso de los años, la empresa ha desarrollado una infraestructura minera integral, que incluye plantas de procesamiento, sistemas de tratamiento de aguas, estaciones de bombeo, plantas de energía y un sistema logístico subterráneo que conecta sus principales labores de producción.

En las décadas siguientes, Poderosa consolidó su posición como una de las principales productoras de oro del país, contribuyendo de manera significativa al

crecimiento económico de la región y del Perú. La compañía ha apostado por una gestión moderna y responsable, basada en la mejora continua, innovación tecnológica, cumplimiento normativo y compromiso con la seguridad, el medio ambiente y las comunidades locales.

Uno de los aspectos clave en la evolución de la empresa ha sido la articulación con empresas contratistas especializadas, como la Contrata Minera San Julián, que apoyan las operaciones en labores de desarrollo, explotación y sostenimiento, permitiendo una mayor eficiencia y flexibilidad operativa. Esta sinergia ha fortalecido el modelo de operación de Poderosa, manteniendo altos estándares de productividad y sostenibilidad.

Además, Poderosa ha implementado un sistema de gestión basado en la norma ISO 9001 y otras certificaciones internacionales, lo que le ha permitido mantener una producción consistente y mejorar continuamente sus procesos. La empresa también se ha caracterizado por su política de responsabilidad social empresarial, desarrollando programas de inclusión productiva, infraestructura rural y cuidado ambiental en su entorno de influencia directa.

Hoy en día, Compañía Minera Poderosa S.A.A. se proyecta como una empresa líder en la minería aurífera subterránea del Perú, con una producción anual de oro significativa, una visión estratégica de crecimiento sostenible y un compromiso con la excelencia operativa, la innovación tecnológica y el desarrollo regional.

1.2.1 Misión

Nuestra misión es explorar, desarrollar y explotar yacimientos auríferos de manera segura, eficiente y sostenible, generando valor económico con responsabilidad ambiental y compromiso social. Operamos bajo altos estándares técnicos y éticos, promoviendo la innovación, la mejora continua y el respeto por las personas, contribuyendo al desarrollo del país y al bienestar de nuestras comunidades de influencia.

1.2.2 Valores

1. Seguridad

Priorizamos la integridad y el bienestar de nuestros trabajadores, promoviendo una cultura preventiva y el cumplimiento estricto de las normas de seguridad y salud ocupacional.

2. Responsabilidad Ambiental

Nos comprometemos con la protección del entorno natural, implementando tecnologías y prácticas que minimicen el impacto ambiental y aseguren la sostenibilidad de nuestras operaciones.

3. Ética y Transparencia

Actuamos con integridad, honestidad y transparencia en todas nuestras acciones, relaciones laborales y compromisos institucionales.

4. Excelencia Operativa

Buscamos la eficiencia en cada proceso, promoviendo la innovación, el uso racional de recursos y la mejora continua para alcanzar altos estándares de desempeño.

5. Respeto y Desarrollo Humano

Valoramos a las personas como el eje central de nuestra organización, fomentando el respeto mutuo, el trabajo en equipo y el desarrollo de capacidades individuales y colectivas.

6. Compromiso con la Comunidad

Mantenemos un vínculo activo con las comunidades del entorno, promoviendo el diálogo, la inclusión social y el desarrollo sostenible en nuestras áreas de influencia.

1.2.3 Logros Destacados

A lo largo de su trayectoria, Compañía Minera Poderosa S.A.A. ha alcanzado importantes logros en los ámbitos productivo, tecnológico, ambiental y social, consolidándose como una de las principales empresas auríferas del Perú en minería subterránea. Entre los hitos más relevantes se destacan:

Incremento sostenido de la producción aurífera

Ha logrado un crecimiento constante en la producción de oro durante las últimas décadas, superando las 250,000 onzas finas anuales, gracias a la optimización de procesos, la ampliación de frentes de explotación y la mejora en la recuperación metalúrgica.

Fortalecimiento de la infraestructura minera subterránea

Desarrolló una red integrada de labores, estaciones de bombeo, cámaras de carga y sistemas de acarreo mecanizado, que han permitido elevar la eficiencia operativa y la seguridad en el ciclo de minado.

Gestión ambiental con enfoque sostenible

Implementó programas de manejo de aguas residuales, control de emisiones, reforestación y disposición adecuada de relaves, cumpliendo con los requisitos del marco legal ambiental y certificaciones ISO. Además, fue reconocida por su compromiso con la reducción del impacto ambiental en zonas de influencia directa.

Relaciones comunitarias y responsabilidad social consolidada

Ha impulsado programas de desarrollo local en salud, educación, infraestructura rural y fortalecimiento de capacidades productivas, estableciendo alianzas con las comunidades cercanas y promoviendo un enfoque de minería con inclusión.

Implementación de sistemas de gestión integrada

La empresa ha adoptado un sistema de gestión basado en normas internacionales como ISO 9001 (calidad), ISO 14001 (medio ambiente) y ISO 45001 (seguridad y salud en el trabajo), lo que ha fortalecido sus procesos operativos y administrativos.

Innovación en voladura y explotación subterránea

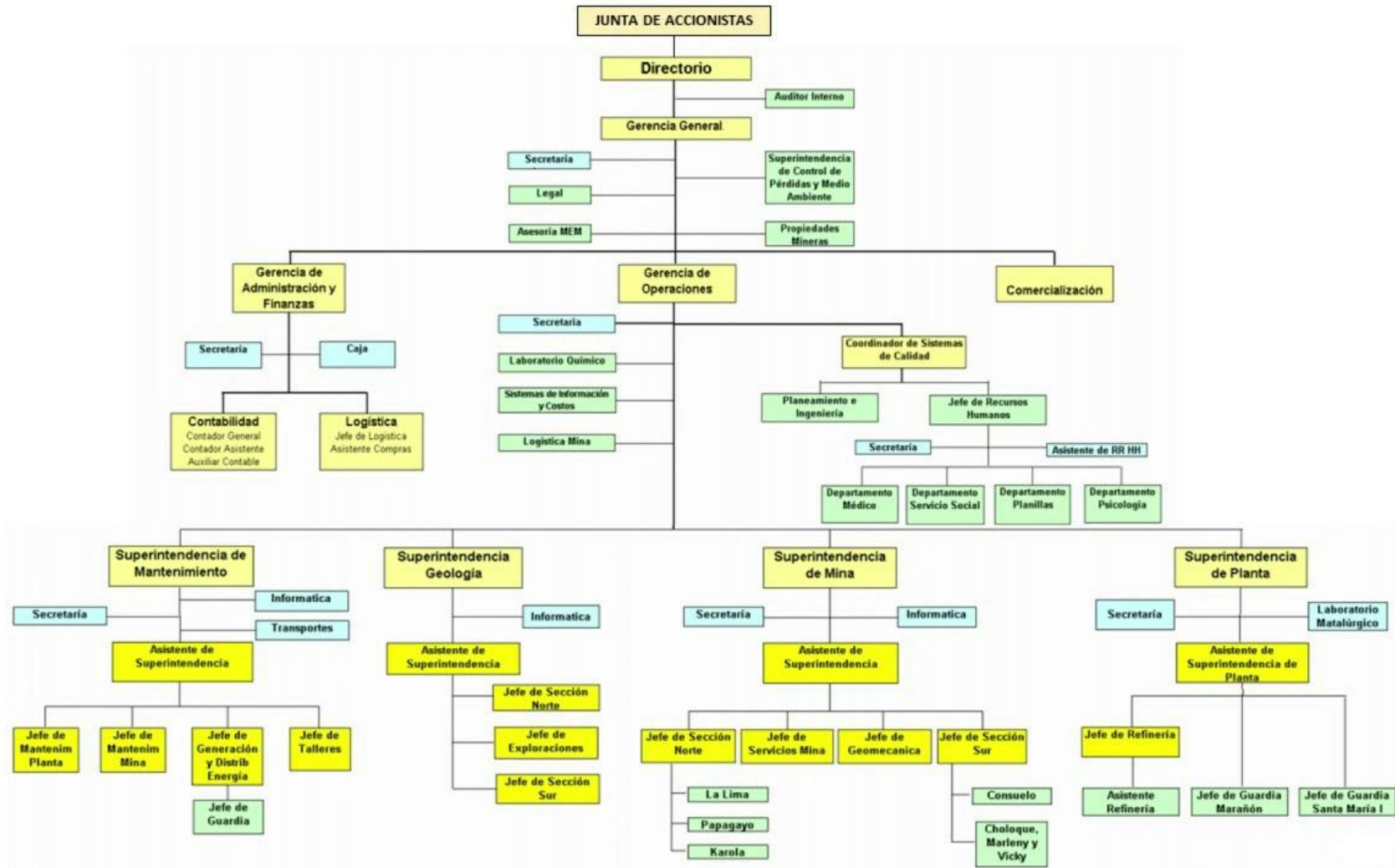
Ha incorporado tecnologías modernas en el diseño y ejecución de voladuras controladas, monitoreo geotécnico y uso eficiente de explosivos, logrando mayor precisión, menor dilución y un entorno más seguro para el personal.

Reconocimiento en el sector minero nacional

Poderosa ha sido reconocida por gremios e instituciones del sector como una empresa referente en minería subterránea aurífera, destacando por su enfoque técnico, su desempeño económico y su modelo de gestión integral.

1.3 Organigrama

Figura 1.
Organigrama de la empresa minera Poderosa



1.4 Servicios que ofrece la empresa

La Compañía Minera Poderosa S.A.A., en su condición de empresa especializada en minería subterránea aurífera, concentra sus actividades principalmente en la exploración, desarrollo, explotación y procesamiento de minerales, pero también ha extendido sus capacidades técnicas y de gestión para ofrecer diversos servicios vinculados al sector minero, tanto de forma directa como a través de alianzas estratégicas con contratistas especializados. Entre los principales servicios que brinda se destacan:

1. Exploración geológica y prospección minera

Poderosa realiza servicios integrales de exploración, que incluyen cartografía geológica, muestreo geoquímico, geofísica, perforación diamantina y modelamiento geológico 3D, orientados a la identificación y evaluación de recursos minerales.

2. Desarrollo de labores subterráneas

Ofrece servicios de avance, sostenimiento, preparación y habilitación de labores mineras subterráneas, empleando equipos mecanizados y personal calificado, con énfasis en seguridad operativa y control geomecánico.

3. Explotación de vetas auríferas

Ejecuta planes de minado mediante métodos selectivos y de alta recuperación, con servicios que comprenden perforación, voladura controlada, carguío y acarreo de mineral, orientados a maximizar la rentabilidad del recurso.

4. Procesamiento y beneficio de minerales

Cuenta con plantas de procesamiento que aplican técnicas de trituración, molienda, concentración gravimétrica y cianuración, asegurando alta recuperación de oro y un adecuado manejo de residuos.

5. Gestión ambiental minera

Proporciona servicios en monitoreo ambiental, control de efluentes, disposición técnica de relaves y cumplimiento de compromisos ambientales, bajo estándares normativos y principios de sostenibilidad.

6. Capacitación técnica y operativa

A través de sus programas internos y en alianza con instituciones del sector, brinda formación y entrenamiento en operaciones mineras, seguridad, gestión de riesgos y mantenimiento, fortaleciendo el capital humano local.

7. Asistencia técnica y supervisión de contratistas

Ofrece servicios de supervisión operativa, control de costos, evaluación técnica de desempeño y soporte en gestión de contratistas, asegurando el cumplimiento de metas productivas y estándares de calidad.

1.5 Políticas de Seguridad y Salud Ocupacional

La Compañía Minera Poderosa S.A.A. reconoce que la seguridad y la salud de sus trabajadores, contratistas y visitantes es un valor fundamental e innegociable en todas sus operaciones. Por ello, ha establecido una política integral de Seguridad y Salud Ocupacional (SSO) orientada a prevenir incidentes, enfermedades ocupacionales y situaciones de riesgo, asegurando un ambiente de trabajo seguro, saludable y productivo.

Principios que rigen la Política de SSO:

1. Prevención de accidentes y enfermedades ocupacionales

Se promueve una cultura preventiva en todos los niveles de la organización, con énfasis en la identificación de peligros, evaluación de riesgos y control de condiciones inseguras en todas las actividades mineras.

2. Cumplimiento legal y normativo

Todas las operaciones cumplen rigurosamente con la legislación nacional en materia de seguridad y salud en el trabajo, así como con los estándares del sector minero y las normas internacionales aplicables.

3. Liderazgo y compromiso visible

La alta dirección lidera activamente la implementación del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional, garantizando los recursos necesarios para su funcionamiento efectivo y su mejora continua.

4. Participación activa de los trabajadores

Se fomenta la participación de todos los trabajadores en la gestión de la seguridad, mediante comités de SSO, reportes de condiciones subestándar, sugerencias de mejora y programas de reconocimiento.

5. Capacitación y concientización continua

Se desarrolla un plan permanente de capacitación en temas de seguridad, primeros auxilios, control de emergencias, uso de equipos de protección personal y procedimientos operativos seguros.

6. Monitoreo, control y mejora continua

Se implementan auditorías internas, inspecciones planificadas, análisis de incidentes y seguimiento a indicadores clave de desempeño, con el fin de establecer acciones correctivas y preventivas efectivas.

7. Gestión integral de contratistas

Todo el personal de empresas contratistas que presta servicios en las operaciones de Poderosa está sujeto a los mismos estándares y políticas de SSO, garantizando una cultura de seguridad uniforme en toda la unidad minera.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

En el contexto actual de la minería subterránea, la eficiencia en las operaciones de voladura constituye un factor determinante para alcanzar altos estándares de productividad, seguridad y control de costos. En este sentido, la Unidad Minera San Julián, ubicada en el distrito de Santiago de Chuco, ha enfrentado dificultades operacionales en la CR San Lorenzo, Nv 3240, asociadas a la inadecuada aplicación del factor de carga en las voladuras ejecutadas. Esta situación ha generado una serie de consecuencias técnicas y económicas, como una fragmentación deficiente del macizo rocoso, mayor presencia de sobre tamaño, incremento en los costos por reducción secundaria y pérdida de eficiencia en las labores de carguío y transporte.

Uno de los aspectos más críticos detectados ha sido el uso de parámetros de voladura poco ajustados a las condiciones geomecánicas del macizo rocoso, lo cual ha derivado en sobrecarga o subcarga de explosivos, afectando directamente el rendimiento de la voladura (Jimeno et al., 1995). En varias campañas operativas se ha observado que la sobrerotura en las secciones de galería ha incrementado el requerimiento de sostenimiento, elevando con ello los costos operativos y comprometiendo la seguridad estructural de las labores.

Frente a esta problemática, surge la necesidad de implementar una optimización del factor de carga, que permita un control más preciso de la energía generada por la voladura, logrando así una fragmentación homogénea, minimizando el sobre consumo de explosivos y reduciendo la afectación en los contornos de la labor (López Jimeno, 2011). Esta optimización debe estar basada en un análisis técnico del macizo rocoso, considerando variables como la resistencia uniaxial, el índice de calidad de roca (RQD), el espaciamiento de discontinuidades y el diseño de la malla de perforación.

Diversos estudios han demostrado que la implementación de parámetros optimizados de voladura, especialmente del factor de carga, permite obtener mejores resultados en términos de avance lineal, fragmentación, seguridad y costos operacionales (De Souza & Katsabanis, 2020). Asimismo, se ha evidenciado que la relación entre el diámetro del taladro, el espaciamiento y la cantidad de explosivo por metro perforado incide directamente en el rendimiento general del ciclo de minado (Singh & Singh, 2019).

Por lo tanto, el presente estudio se orienta a evaluar y optimizar el factor de carga en la CR San Lorenzo, Nv 3240 de la U.M. San Julián, con el objetivo de mejorar el rendimiento de la voladura, garantizar la estabilidad de las labores, minimizar los costos de operación y fortalecer el cumplimiento del plan de producción. Esta investigación no solo responde a una necesidad técnica, sino que también promueve una minería más eficiente, segura y sostenible en el contexto subterráneo.

Desde la perspectiva de Adesida (2022), el factor de carga es una variable clave en el diseño de voladuras, ya que establece la relación entre la cantidad de explosivo utilizada y el volumen de roca a fracturar, lo que permite ajustar el diseño a las condiciones geomecánicas del macizo rocoso. Asimismo, Zhang et al. (2025) señalaron que el ajuste adecuado del factor de carga influye directamente en la fragmentación, estabilidad del macizo rocoso y control de vibraciones, mejorando el rendimiento global de la voladura.

Así también, Armaghani et al. (2024) sostuvieron que la optimización del factor de carga mediante técnicas de inteligencia artificial como XGBoost o Gradient Boosting permite predecir con mayor precisión el comportamiento de la voladura y mejorar la eficiencia del proceso. Por su parte, Hasanipanah et al. (2016) explicaron que el uso combinado de modelos RES y redes neuronales permite relacionar el factor de carga con parámetros como la resistencia de la roca, la geometría del patrón de perforación y el tipo de explosivo.

Por otro lado, según Bhandari (2010), el factor de carga debe determinarse en función de la dureza del macizo rocoso, el diámetro de perforación, el espaciamiento de taladros y el tipo de explosivo, siendo esencial para lograr una fragmentación adecuada y evitar sobrecargas en las etapas posteriores del ciclo de minado. En esta línea, Workman y Eloranta (2003) argumentaron que una fragmentación adecuada derivada de una voladura bien diseñada puede reducir el consumo energético en trituración y molienda, generando beneficios económicos significativos.

Según Nielson (2017), un factor de carga mal estimado puede incrementar los costos operativos, ya sea por subfragmentación que exige mayor chancado o por sobrefragmentación que puede generar finos innecesarios. Asimismo, Karami et al. (2007) indicaron que una estrategia eficiente de voladura debe considerar el ajuste del

factor de carga para controlar parámetros como el backbreak y el overbreak, mejorando así la estabilidad de los taludes y la seguridad en la operación minera.

En palabras de Álvarez et al. (2019), la fragmentación del material volado puede analizarse mediante modelos matemáticos como Swebrec, los cuales permiten correlacionar el factor de carga con la distribución del tamaño de partícula, optimizando así los parámetros de perforación y voladura. Complementariamente, Coulter (2020) señaló que el diseño eficiente de una voladura debe basarse en una correcta caracterización geomecánica del terreno, ajustando el factor de carga para reducir los riesgos operativos.

También, Moomivand (2016) enfatizó que el uso de software de simulación permite predecir con mayor precisión el resultado de las voladuras, evaluando el efecto del factor de carga en distintas condiciones operacionales. Por su parte, Faramarzi et al. (2013) desarrollaron modelos difusos para evaluar el riesgo de backbreak, encontrando que el factor de carga es el parámetro más significativo en la aparición de fracturas no deseadas fuera del diseño de voladura.

Finalmente, Nature (2025) recomendó mantener un factor de carga entre 0.31 y 0.51 kg/m³ para garantizar un equilibrio entre fragmentación, control de vibraciones y estabilidad del entorno minero en operaciones subterráneas y a cielo abierto, destacando la importancia de calibrarlo con base en pruebas de campo.

Con respecto al marco legal y normativa se tiene:

El desarrollo de actividades de voladura en el sector minero debe cumplir con estrictos lineamientos legales, técnicos y de seguridad que regulan tanto la manipulación de explosivos como el diseño de los procesos asociados. En el caso del Perú, el marco normativo está definido por el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería, aprobado por el Decreto Supremo N.º 024-2016-EM, que establece los requisitos mínimos para una voladura segura y controlada.

Según el artículo 105 del D.S. N.º 024-2016-EM, todo diseño de voladura debe contemplar aspectos como la estabilidad geomecánica del macizo rocoso, el tipo de explosivo, el patrón de perforación, el factor de carga y las condiciones operativas del área de trabajo. Este reglamento también enfatiza la necesidad de evaluar el impacto

sísmico de las voladuras y controlar la proyección de fragmentos, estableciendo responsabilidades para el ingeniero de minas encargado (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2016).

Por su parte, el Reglamento para el Transporte, Almacenamiento y Manipuleo de Explosivos (D.S. N.º 016-2015-IN) establece que el uso de explosivos debe realizarse conforme a los procedimientos técnicos previamente aprobados y supervisados por personal calificado, con énfasis en la seguridad y el control del entorno (Ministerio del Interior, 2015).

En complemento, la Norma Técnica Peruana NTP 399.010 brinda parámetros orientativos sobre el uso de agentes de voladura como ANFO, emulsiones y detonadores electrónicos, y sugiere rangos seguros del factor de carga según el tipo de roca, el diámetro de perforación y el diseño del banco de voladura (Instituto Nacional de Calidad [INACAL], 2018).

A nivel internacional, la International Society of Explosives Engineers (ISEE) propone estándares técnicos que promueven buenas prácticas para el diseño de voladuras, destacando que el factor de carga debe ser calculado con base en pruebas de campo, análisis sísmico, y la evaluación granulométrica post-voladura (ISEE, 2022). Según estos lineamientos, una voladura eficiente depende directamente del balance entre cantidad de explosivo, espaciamiento, profundidad y resistencia de la roca.

Asimismo, el Manual de Buenas Prácticas del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN) propone que, para optimizar voladuras en minería subterránea, es necesario mantener un factor de carga que permita una fragmentación uniforme y una reducción del backbreak, evitando daños estructurales al sostenimiento (SERNAGEOMIN, 2017).

Por último, la Guía de Gestión Ambiental para Actividades de Explotación Minera del MINAM recomienda que el diseño de voladuras considere la evaluación del impacto ambiental mediante el control del polvo, vibraciones y ruido generado, con base en los principios del desarrollo sostenible (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2020).

El presente estudio, centrado en la optimización del factor de carga para mejorar el rendimiento de la voladura en la CR San Lorenzo, Nv 3240 de la Unidad Minera San Julián, reconoce diversas limitaciones que podrían condicionar tanto la obtención como la interpretación de los resultados. Estas limitaciones se detallan a continuación:

1. Limitación geotécnica del macizo rocoso

La heterogeneidad litológica y estructural del macizo rocoso puede influir en la respuesta de la roca a la voladura, dificultando la estandarización de los parámetros de diseño. La variabilidad natural en términos de dureza, presencia de fracturas y humedad del estrato puede generar desviaciones en el comportamiento esperado de la voladura.

2. Condiciones operativas y logísticas

El estudio depende del cumplimiento del cronograma de minado y del acceso permanente a las labores subterráneas. Sin embargo, factores como paradas operativas, mantenimiento no programado de equipos de perforación, o restricciones de seguridad, pueden limitar la continuidad de la toma de datos o ejecución de pruebas de campo.

3. Restricción en la disponibilidad de explosivos y accesorios

La limitación en el abastecimiento o la disponibilidad de tipos específicos de explosivos, detonadores o sistemas de iniciación electrónica puede condicionar el diseño óptimo de las voladuras planteadas. Esto obliga a realizar adaptaciones que podrían no reflejar plenamente la configuración ideal prevista en el estudio.

4. Dependencia de la instrumentación y monitoreo

La calidad del análisis está supeditada a la disponibilidad y precisión de los equipos de medición, como sismógrafos, analizadores de fragmentación (como Split Desktop), y sistemas de perfilado de taladros. Errores en la calibración o fallos técnicos podrían afectar la validez de los resultados obtenidos.

5. Limitación en la extrapolación de resultados

Los resultados y conclusiones obtenidos están directamente vinculados a las condiciones específicas del nivel 3240 de la U.M. San Julián. Por tanto, su aplicación

directa en otros niveles o minas con características geológicas y operativas distintas podría no ser válida sin la correspondiente adaptación técnica.

6. Tiempos reducidos para validación a largo plazo

Debido a que la validación del rendimiento de la voladura optimizada requiere observación prolongada, el tiempo disponible para el desarrollo del estudio podría no ser suficiente para analizar los efectos acumulativos o el comportamiento en múltiples turnos operativos.

7. Variabilidad en la ejecución del diseño de voladura

Las diferencias en la ejecución entre turnos, operadores o cuadrillas pueden introducir variaciones en la calidad de la perforación, el acopio del explosivo o la secuencia de iniciación, lo que repercute directamente en la calidad de la voladura. Esto representa una fuente de error no controlable.

8. Limitaciones presupuestarias

El alcance del estudio también puede verse condicionado por restricciones presupuestarias que limiten el número de pruebas experimentales, adquisición de software especializado o contratación de servicios externos para análisis más avanzados (por ejemplo, modelado numérico o simulación de voladuras).

CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA

3.1 Proceso de ingreso a la empresa

Empresa contratista minera San Julián S.R.L. – Unidad Minera Poderosa

El ingreso a la empresa contratista minera San Julián, que brinda servicios especializados a la Compañía Minera Poderosa, se desarrolló cumpliendo estrictamente los lineamientos establecidos por la normativa interna de la empresa, así como las disposiciones legales en materia laboral y de seguridad minera vigentes en el Perú.

1. Convocatoria y postulación

La empresa San Julián emitió una convocatoria para cubrir el puesto de Supervisor de Operaciones en la Unidad Minera Poderosa. El autor, Renato Vásquez Montoya presentó su hoja de vida documentada a través del canal oficial de reclutamiento, cumpliendo con el perfil profesional requerido para el puesto.

2. Evaluación y selección

El proceso de selección incluyó:

- Revisión curricular: donde se verificó la experiencia laboral previa en operaciones mineras subterráneas.
- Entrevista técnica y psicológica: realizada por el área de Recursos Humanos y el supervisor de área correspondiente.
- Prueba técnica (cuando corresponde): para evaluar habilidades operativas específicas.

Renato Vásquez Montoya demostró competencias técnicas adecuadas para las funciones encomendadas, así como un enfoque en la seguridad y el trabajo en equipo.

3. Exámenes médicos ocupacionales

Como parte del procedimiento de ingreso, el trabajador fue derivado al Centro Médico Ocupacional autorizado por la empresa para realizarse los exámenes médicos pre-

ocupacionales, de conformidad con el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (D.S. N.º 024-2016-EM).

Los resultados fueron aptos para laborar en interior mina, cumpliendo con los criterios establecidos por el Protocolo de Evaluación Médica para Trabajo en Altura y Espacios Confinados (Ministerio de Salud, 2015).

4. Capacitación de inducción

Previo a su ingreso operativo, Renato Elías Vásquez Montoya participó en el programa de Inducción General y Específica, el cual incluyó:

- Normas de Seguridad y Salud Ocupacional.
- Procedimientos internos de la empresa San Julián y Poderosa.
- Plan de Respuesta ante Emergencias.
- Uso correcto de EPP y normas de convivencia minera.

Esta capacitación fue registrada en el sistema SIGO de la U.M. Poderosa, bajo constancia firmada y archivada en su legajo personal.

5. Entrega de EPP y asignación de equipo

Posterior a la inducción, se realizó la entrega de los Equipos de Protección Personal certificados conforme a las tareas asignadas (casco, lámpara minera, lentes, protección auditiva, respirador, guantes, botas dieléctricas, entre otros). Asimismo, se realizó la inducción en campo por parte del supervisor de guardia, quien asignó su incorporación a la cuadrilla de operaciones en el Nivel 3240 de la CR San Lorenzo.

6. Ingreso formal y registro

La fecha de ingreso oficial fue el [día/mes/año], registrada en el sistema de Recursos Humanos y validada por la Superintendencia de Seguridad y Salud Ocupacional de Poderosa. Desde entonces, Renato Elías Vásquez Montoya labora bajo régimen minero de 20x10, en cumplimiento del D.S. N.º 043-2007-EM.

3.2 Personas involucradas en el proyecto

- **Renato Elías Vásquez Montoya**

Ingeniero de minas, encargado de la supervisión del ciclo de operaciones mina en la contrata San Julián, que presta servicios de avance y de minado a la empresa Poderosa.

3.3 Funciones Desempeñadas

Renato Elías Vásquez Montoya – Supervisor de Operaciones Mina

Empresa Contratista Minera San Julián S.R.L. – Unidad Minera Poderosa

En su calidad de Supervisor de Operaciones Mina, Renato Elías Vásquez Montoya ha desarrollado un conjunto de funciones técnicas, operativas y de gestión, orientadas al cumplimiento de los objetivos productivos y de seguridad en la cámara de relleno San Lorenzo, Nivel 3240, dentro de la U.M. Poderosa. Las funciones principales incluyen:

1. Supervisión del ciclo operativo minero

Coordina y controla todas las actividades del ciclo de minado: perforación, voladura, ventilación, sostenimiento, carguío y transporte de mineral y desmonte.

Verifica el cumplimiento de los estándares de operación y planes de minado según diseño del área técnica y planificación.

2. Gestión del equipo humano

Supervisa directamente al personal operativo a cargo (operadores de jumbos, scoop, perforistas, ayudantes, etc.), asegurando el cumplimiento de sus tareas bajo estándares de seguridad, orden y eficiencia.

Realiza inducciones específicas en campo, promueve el trabajo en equipo y detecta necesidades de capacitación del personal.

3. Control del rendimiento operativo

Evalúa el factor de carga, avance lineal y rendimiento por frente, con el objetivo de optimizar la productividad y minimizar sobreconsumo de insumos.

Registra y reporta indicadores clave de gestión (KPIs) como el P80, ratio de sostenimiento, tasa de avance diario y consumo de explosivos por metro perforado.

4. Cumplimiento de normativa de seguridad y medio ambiente

Garantiza el cumplimiento del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (D.S. N.º 024-2016-EM) y normas internas de Poderosa.

Supervisa el uso correcto de EPP, identifica condiciones subestándar y ejecuta acciones correctivas inmediatas.

Participa activamente en inspecciones de seguridad, simulacros de emergencia y reuniones semanales de seguridad (charlas de 5 minutos, IPERC continuo).

5. Coordinación con áreas técnicas y administrativas

Mantiene comunicación constante con el área de Geomecánica, Topografía, Planeamiento y Seguridad para garantizar la ejecución conforme a los diseños y lineamientos operativos.

Elabora informes diarios de producción, control de avance, estado de sostenimiento y ocurrencias relevantes, enviados a la Jefatura de Guardia y Superintendencia de Operaciones.

6. Supervisión de voladuras subterráneas

Verifica la correcta carga de taladros, distribución del explosivo, secuencia de iniciación y retiro de personal durante la ejecución de voladuras en interior mina.

Evalúa resultados de la voladura, midiendo la fragmentación del macizo rocoso, avance efectivo, y posibles sobreexcavaciones o desviaciones del diseño.

7. Gestión de recursos y logística operativa

Controla el abastecimiento y uso racional de insumos mineros (ANFO, emulsiones, detonadores, sostenimiento), así como equipos menores y herramientas.

Coordina con logística y almacén para garantizar la disponibilidad oportuna de materiales para cada frente de trabajo.

8. Mejora continua y optimización de procesos

Participa en la implementación de proyectos de mejora en el uso de tecnologías de voladura, sostenimiento, reducción de tiempos muertos y optimización del factor de carga.

Propone acciones para reducir costos operativos y aumentar la eficiencia productiva del personal y de los equipos.

Estas funciones han sido ejecutadas cumpliendo con los estándares establecidos por la Compañía Minera Poderosa y de acuerdo con las buenas prácticas operativas en minería subterránea moderna. Su desempeño ha sido evaluado periódicamente por el área de operaciones y seguridad, destacando por su compromiso, liderazgo y orientación a resultados.

3.4 Desarrollo del Proyecto

3.4.1 Identificación del Problema

En la actualidad, una de las principales dificultades que enfrenta la Unidad Minera San Julián, específicamente en la Cámara de Relleno (CR) San Lorenzo, Nivel 3240, es el bajo rendimiento de la voladura, lo cual se refleja en una fragmentación deficiente, sobreconsumo de explosivos y un impacto negativo en los ciclos operativos posteriores como el carguío y el transporte del mineral. Esta situación genera retrasos en los avances lineales, mayor desgaste de maquinaria, incremento de costos operacionales y desviaciones respecto a los parámetros de diseño establecidos por el área de planificación.

Durante la supervisión operativa se ha evidenciado que uno de los factores críticos en esta problemática es la inadecuada relación del factor de carga (kg/m^3), es decir, la cantidad de explosivo utilizada por unidad de volumen de roca. Un factor de carga mal calculado, ya sea por exceso o por defecto, afecta directamente la eficiencia de la voladura: una carga insuficiente no fractura correctamente el macizo rocoso, mientras que una sobrecarga genera sobrefragmentación, gases residuales peligrosos y posibles sobreexcavaciones.

Asimismo, la ausencia de una metodología sistematizada para la optimización del factor de carga, basada en datos reales de campo, análisis geomecánicos y pruebas controladas, limita la toma de decisiones técnicas y provoca que las voladuras se ejecuten

bajo criterios empíricos, sin aprovechar el potencial técnico del diseño explosivo. Esta deficiencia afecta tanto a los índices de productividad como a la seguridad operativa, comprometiendo la estabilidad de los frentes y la eficiencia del ciclo completo de minado.

Por tanto, resulta necesario desarrollar un estudio que permita optimizar el factor de carga, considerando las propiedades del macizo rocoso, el tipo de explosivo, el diámetro de perforación, el espaciamiento, la profundidad de taladro, el burden y otros parámetros que influyen en el rendimiento de la voladura subterránea. La finalidad es alcanzar una fragmentación controlada, mejorar los tiempos operativos y reducir los costos asociados a la operación minera en la CR San Lorenzo, NV 3240.

3.4.2 Diagnóstico

El presente diagnóstico se desarrolló con el objetivo de identificar, analizar y evidenciar las principales deficiencias operacionales relacionadas con el uso ineficiente del factor de carga en las voladuras de la CR San Lorenzo, nivel 3240, en la U.M. San Julián. El proceso diagnóstico fue abordado en cuatro etapas diferenciadas, que permitieron comprender integralmente la problemática:

1. Recolección de información técnica y operativa

En esta etapa se recopiló información histórica y actual sobre los parámetros de perforación y voladura, incluidos los reportes de producción, mallas de perforación, tipos de explosivos empleados, cantidades utilizadas, costos asociados y tiempos de ciclo. Se identificó que, en promedio, el factor de carga aplicado se encuentra fuera de los rangos óptimos sugeridos por los manuales técnicos de minería subterránea (Hustrulid & Bullock, 2018).

Asimismo, mediante el análisis de taladros ejecutados se detectaron inconsistencias en las profundidades, burden y espaciamientos, lo cual sugiere una falta de estandarización en el diseño de voladuras.

2. Evaluación del rendimiento de la voladura

Con base en las voladuras ejecutadas durante el último trimestre, se evidenció un rendimiento bajo en términos de fragmentación del macizo rocoso, presencia de rocas sobredimensionadas (> 0.5 m), y elevados niveles de retroceso en los equipos de carguío. Estos problemas afectan directamente la continuidad operativa.

Asimismo, se identificó un consumo ineficiente de explosivos, presentando una relación promedio de factor de carga de 0.38 kg/m^3 , cuando la geomecánica del macizo requeriría valores superiores, cercanos a 0.50 kg/m^3 , según el análisis de resistencia de la roca (RMR 45-55).

3. Análisis de consecuencias operativas y económicas

Se calcularon las pérdidas operativas asociadas al bajo rendimiento de la voladura, incluyendo el tiempo adicional requerido para el retiro de roca sobredimensionada, aumento del consumo de combustible por sobreuso de maquinaria, desgaste de herramientas y retraso en el cumplimiento del plan de minado. Estos factores han generado una desviación del 12% en el cumplimiento mensual de avance lineal.

Además, se determinó que los costos unitarios por tonelada volada se han incrementado en un 18% respecto al presupuesto estimado, reflejando un problema de eficiencia técnica y económica.

4. Detección de causas raíz

Mediante la aplicación del análisis causa–efecto (diagrama de Ishikawa), se identificaron las siguientes causas críticas:

- Falta de un procedimiento técnico estandarizado para el cálculo del factor de carga.
- Escasa capacitación al personal de perforación y voladura sobre la relación entre densidad de carga y fragmentación.
- Deficiente caracterización geomecánica previa a la voladura.
- Escasa supervisión en la ejecución de la malla y control de profundidad de taladros.

- Uso de explosivos sin considerar el tipo de roca y la energía específica requerida.

Conclusión del Diagnóstico

El diagnóstico evidencia una problemática multifactorial cuya raíz se encuentra en el diseño y ejecución inadecuados del factor de carga durante las voladuras subterráneas. Esta deficiencia no solo limita el rendimiento técnico de la operación minera, sino que incrementa los costos y reduce la seguridad operativa. Por ello, se hace necesaria una intervención basada en la optimización del factor de carga, mediante el uso de herramientas de análisis técnico, control de parámetros operacionales y mejora en la gestión de la voladura.

3.5 Entrevistas con el personal operativo

Con el propósito de obtener información cualitativa clave sobre los factores que influyen en el bajo rendimiento de las voladuras en la CR San Lorenzo, se realizaron entrevistas semiestructuradas a distintos integrantes del equipo operativo de la Unidad Minera San Julián. Estas entrevistas fueron dirigidas a los trabajadores con experiencia directa en el proceso de perforación, voladura, carguío y supervisión, con el fin de identificar percepciones, prácticas y oportunidades de mejora sobre el uso del factor de carga.

Perfil de los entrevistados

Se entrevistó a un total de 8 colaboradores operativos con cargos específicos y experiencia directa en el proceso de voladura:

2 Perforistas de guardia rotativa, con más de 3 años de experiencia en minería subterránea.


2 Ayudantes de voladura, encargados de la manipulación, carga y verificación de explosivos.

1 Supervisor de voladura, responsable de validar los diseños de malla y ejecución segura.

1 Geomecánico de guardia, encargado de evaluar el macizo rocoso previo a la perforación.

1 Jefe de guardia, con visión integral del proceso de producción y avances lineales.

1 Ingeniero de operaciones, coordinador del ciclo minado-voladura.

 Temas abordados en las entrevistas

Las entrevistas giraron en torno a cinco ejes temáticos principales:

Diseño y ejecución del factor de carga

Los entrevistados señalaron que en muchas ocasiones no existe una relación técnica clara entre el volumen de roca y el explosivo utilizado. Se aplican fórmulas empíricas, sin ajustar a la geología del frente.

Capacitación y conocimiento técnico

La mayoría coincidió en que no reciben capacitaciones frecuentes sobre criterios técnicos para definir el factor de carga óptimo. Se basan en la “costumbre operativa” o recomendaciones verbales.

Problemas frecuentes durante la voladura

Se identificaron los siguientes problemas: exceso de material sobredimensionado, necesidad de retrabajos, retroceso de equipos por material no fragmentado y tiempos muertos por limpieza prolongada.

Condiciones del macizo rocoso

El personal geomecánico indicó que no siempre se realiza un mapeo estructural previo antes de definir los parámetros de carga, lo cual afecta la eficiencia de la voladura.

Sugerencias de mejora

Los operadores recomendaron implementar un protocolo técnico fijo de cálculo del factor de carga, realizar pruebas piloto en diferentes frentes, y capacitar continuamente al personal en aspectos técnicos.

✦ Conclusiones de las entrevistas

Las entrevistas reflejan una desconexión entre el diseño técnico y la ejecución operativa del factor de carga, lo que genera consecuencias directas en la eficiencia de la voladura. El conocimiento empírico predomina sobre el técnico, y existe una necesidad urgente de estandarizar criterios, monitorear resultados y capacitar al personal.

Estas entrevistas han sido fundamentales para complementar el diagnóstico técnico con una perspectiva operativa real, y permiten formular estrategias más precisas en la etapa de propuesta de mejora del estudio.

3.5.1 Planificación

El proceso de planificación para la ejecución del presente estudio se estructuró en etapas secuenciales que permiten un desarrollo ordenado, técnico y metodológicamente fundamentado, asegurando la viabilidad y la pertinencia de la investigación. La planificación se diseñó considerando la naturaleza operativa de la unidad minera y las limitaciones propias del entorno subterráneo.

1. Definición del objetivo general y específicos

Se estableció como objetivo general: Optimizar el factor de carga para mejorar el rendimiento de la voladura en la cámara de retiro (CR) San Lorenzo, nivel 3240, U.M. San Julián.

Los objetivos específicos se enfocaron en:

- Analizar la relación actual entre factor de carga y fragmentación obtenida.
- Identificar los parámetros geotécnicos y operacionales que influyen en la eficiencia de la voladura.
- Proponer un modelo de ajuste técnico del factor de carga.
- Evaluar los resultados mediante indicadores de rendimiento.

2. Determinación del área de estudio y actores involucrados

El estudio se llevará a cabo en la CR San Lorenzo, nivel 3240 de la U.M. San Julián, operada por la contratista minera San Julián para la Compañía Minera Poderosa. Se consideraron como actores clave:

- Área de Operaciones Mina
- Área de Geomecánica
- Supervisor de Voladura
- Personal de perforación y voladura
- Área de Seguridad y Medio Ambiente

3. Diseño metodológico

Se optó por una metodología de tipo aplicada, cuantitativa y experimental, con enfoque de campo. Se establecerá un grupo de control (voladuras con diseño actual) y un grupo experimental (voladuras con factor de carga optimizado).

Unidad de análisis: frentes de voladura en la CR San Lorenzo.

Variables: Factor de carga (kg/m^3), índice de fragmentación (P80), rendimiento operativo ($\text{m}^3/\text{día}$).

Instrumentos: Plantillas de voladura, fotogrametría, análisis granulométrico, fichas técnicas, entrevistas semiestructuradas y fichas de perforación.

4. Cronograma de actividades

Tabla 1.

Cronograma de actividades suscrito a la investigación

Etapa	Actividad	Tiempo estimado
1	Revisión de literatura y normativas	Semana 1
2	Coordinación con jefatura de mina y logística de campo	Semana 2
3	Levantamiento de datos actuales (grupo control)	Semanas 3-4
4	Diseño de propuesta técnica de optimización	Semana 5
5	Prueba piloto en campo (grupo experimental)	Semanas 6-7
6	Recolección de datos post-voladura	Semanas 8-9
7	Análisis comparativo de resultados	Semana 10
8	Conclusiones, validación técnica y recomendaciones	Semana 11

Nota La tabla adjunta muestra las semanas asociadas al recorrido investigativo que tuvo lugar en el proceso desde la recolección de datos generales hasta las conclusiones del tema de estudio.

5. Gestión de recursos

Se identificaron los siguientes recursos necesarios:

- Explosivos: ANFO, emulsiones encartuchadas, detonadores electrónicos.
- Equipos: taladros jumbo, camiones de carga, fotómetros, software Split-Desktop.
- Personal técnico: perforistas, voladores, ingeniero de operaciones, asistente de investigación.

6. Consideraciones de seguridad y medio ambiente

Se planificó la ejecución del estudio conforme al Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (D.S. N.º 024-2016-EM), priorizando el cumplimiento de protocolos de manipulación de explosivos, ventilación adecuada y control de vibraciones.

7. Validación técnica del plan

El plan fue revisado y validado por la jefatura de operaciones y el área técnica de la empresa contratista San Julián, asegurando su viabilidad práctica y alineamiento con los objetivos de producción y seguridad de la Unidad Minera San Julián.

3.5.2 Metodología y Herramientas utilizadas

1. Enfoque metodológico

El presente estudio se enmarca dentro de una investigación aplicada, con un enfoque cuantitativo, de diseño cuasi-experimental y carácter longitudinal. Esta metodología se seleccionó debido a que permite evaluar, bajo condiciones controladas en campo, el impacto del cambio en el factor de carga sobre el rendimiento de la voladura.

2. Tipo y diseño de investigación

Tipo de investigación: Aplicada y tecnológica, pues busca resolver un problema operativo específico con base en principios científicos.

Diseño de investigación: Cuasi-experimental con grupo de control (voladuras actuales) y grupo experimental (voladuras con factor de carga optimizado).

Enfoque: Cuantitativo, debido a que se cuantificaron parámetros técnicos y se aplicaron herramientas estadísticas para el análisis comparativo.

3. Población y muestra

Población: Todas las voladuras ejecutadas en la cámara de retiro San Lorenzo, nivel 3240, durante el periodo de evaluación.

Muestra: Se seleccionaron 10 voladuras para el grupo de control y 10 voladuras para el grupo experimental, bajo condiciones similares de litología, orientación y disposición de labor.

4. Variables del estudio

Variable independiente: Factor de carga (kg/m^3).

Variables dependientes:

- Índice de fragmentación (P80 en mm).
- Rendimiento de la voladura (m³/voladura).
- Consumo específico de explosivo (kg/tn).
- Tiempo de excavación posterior a la voladura (horas).

5. Etapas metodológicas del estudio

a. Diagnóstico técnico-operativo

Se recopilaron los diseños de voladura existentes, reportes de consumo de explosivo, informes de producción y condiciones geomecánicas del macizo rocoso. Esta etapa permitió establecer una línea base de referencia.

b. Diseño de la propuesta técnica

Con base en los factores geológicos, geotécnicos y operativos, se propusieron ajustes en el factor de carga mediante la modificación de:

- Diámetro y longitud de taladros.
- Espaciamiento y burden.
- Tipo de explosivo.
- Secuencia y retardo de detonación.

c. Ejecución de la voladura experimental

Se aplicaron los nuevos diseños en campo, cumpliendo estrictamente los protocolos de seguridad y validación técnica por parte del ingeniero supervisor.

d. Evaluación de resultados

Se realizó un análisis comparativo entre el grupo control y el experimental, considerando:

- Resultados granulométricos (mediante Split-Desktop).
- Productividad del carguío posterior.
- Consumo de explosivo por tonelada.
- Tiempo de excavación y presencia de sobregruesos.

e. Análisis estadístico

Se aplicaron herramientas de análisis descriptivo y pruebas t de comparación de medias para evaluar la significancia del cambio implementado en el factor de carga.

6. Herramientas utilizadas

Tabla 2.

Herramientas utilizadas en el proyecto de investigación

Herramienta / Instrumento	Función específica
Software Split-Desktop	Análisis fotográfico de fragmentación post-voladura (P80).
Plantillas de perforación	Registro de diseño de mallas de perforación y distribución de taladros.
Cintas métricas, brújulas, clinómetros	Levantamiento topográfico y geológico básico en el frente.
Fichas técnicas	Registro de tipo de explosivo, cantidades y parámetros usados.
Entrevistas semiestructuradas	Recopilación de información cualitativa del personal técnico y operador.
Cámaras digitales y drones (opcional)	Registro visual para validación del estado del macizo rocoso antes y después.
Software Excel y Minitab	Análisis estadístico y elaboración de gráficos comparativos.

Nota: La tabla adjunta las herramientas utilizadas en el proceso investigativo, desde materiales físicos hasta softwares para el tratamiento de datos.

7. Control de calidad y verificación

Se implementaron controles de calidad durante todo el proceso, especialmente en la ejecución de las voladuras experimentales, bajo la supervisión directa del área de operaciones mina, garantizando la confiabilidad de los resultados y la integridad de los datos recolectados.

3.5.3 Etapas de la investigación

ETAPA 01: Identificación del problema operativo

En esta fase se detecta la problemática relacionada con un bajo rendimiento de voladura, lo cual se manifiesta en deficiente fragmentación, sobregasto de explosivo por tonelada y baja productividad en el proceso de carguío. Para ello se revisan:

- Informes de producción.
- Reportes de consumo de explosivo.
- Condiciones de frente y perfiles geomecánicos.
- Observaciones del personal técnico y operativo.

ETAPA 02: Revisión de literatura y normativa

Se desarrolla un marco teórico que aborde conceptos clave como: factor de carga, eficiencia de voladura, control de fragmentación y normativa aplicable en seguridad minera (DS 024-2016-EM y estándares internos de Compañía Minera Poderosa).

Esta fase sustenta técnicamente las variables del estudio.

ETAPA 03: Formulación de objetivos y alcance

Se establecen los objetivos generales y específicos, delimitando claramente el alcance del estudio a la CR San Lorenzo, nivel 3240, y definiendo el periodo de evaluación, los indicadores técnicos y las condiciones operativas bajo las cuales se implementará la optimización.

ETAPA 04: Levantamiento de información técnica (diagnóstico situacional)

Aquí se recopilan datos del diseño actual de voladuras:

- Malla de perforación.
- Tipo y cantidad de explosivo.
- Diámetro y profundidad de taladros.
- Burden y espaciamiento.
- Secuencia y tipo de detonador.

También se identifican variables geotécnicas que influyen en el comportamiento del macizo rocoso.

ETAPA 05: Diseño de la propuesta de optimización

Se plantean nuevas configuraciones de voladura modificando el factor de carga. Estas propuestas consideran:

Aumento o reducción del espaciamiento.

- Ajuste del burden.
- Selección del tipo y sensibilidad del explosivo.
- Uso de detonadores electrónicos o temporizados según secuencia óptima.

ETAPA 06: Ejecución de pruebas en campo

Se implementa el diseño optimizado en un conjunto de voladuras experimentales, registrando rigurosamente los siguientes aspectos:

Consumo total de explosivo.

- M3 real volado.
- Fragmentación lograda (P80).

- Tiempo de excavación post-voladura.
- Cantidad de sobrerocas o sobregruesos.

ETAPA 07: Recolección y análisis de datos

Se recogen y sistematizan los datos técnicos obtenidos antes y después de la optimización. La información se analiza mediante:

- Estadística descriptiva.
- Comparación de medias.
- Análisis gráfico y correlacional.

Se mide el impacto del nuevo factor de carga sobre el rendimiento de la voladura.

ETAPA 08: Evaluación de resultados

Los resultados se contrastan con los objetivos planteados. Se determina si la optimización genera mejoras en:

- Fragmentación.
- Reducción de costos operativos.
- Mejora en tiempos de ciclo.
- Disminución de sobrerocas.

ETAPA 09: Validación de la propuesta

Con base en la mejora cuantificable, se valida la viabilidad técnica y económica de implementar el nuevo diseño como estándar en futuras voladuras del nivel.

ETAPA 10: Elaboración de conclusiones y recomendaciones

Se redactan las conclusiones del estudio con base en los hallazgos obtenidos. Además, se plantean recomendaciones operativas para replicar el diseño optimizado en otros frentes o niveles similares de la unidad minera.

3.5.4 Implementación del Proyecto

PASO 01: Aprobación y validación del diseño de voladura optimizado

Antes de su aplicación en campo, se presenta el diseño técnico optimizado (ajustes en burden, espaciamiento, tipo y cantidad de explosivo) ante la jefatura de operaciones, seguridad y geomecánica para su revisión, validación y aprobación formal.

También se revisa que cumpla con lo establecido en el DS 024-2016-EM y los estándares internos de Compañía Minera Poderosa.

PASO 02: Socialización con el personal operativo

Se realiza una charla técnica (inducción) a perforistas, cargadores, supervisores y personal de seguridad en mina para explicar:

- Cambios realizados en el diseño de voladura.
- Objetivos técnicos esperados (fragmentación, reducción de sobreroca, mejora del ciclo).
- Medidas de seguridad durante la aplicación.

Esto garantiza el alineamiento del personal y el compromiso operativo.

PASO 03: Ejecución controlada de voladuras piloto

Se implementa el nuevo factor de carga en frentes seleccionados de la CR San Lorenzo, nivel 3240. Para ello se:

- Coordina con planeamiento la programación de voladuras piloto.
- Supervisa estrictamente la perforación, carga, conexión y ejecución.
- Documenta todos los parámetros utilizados y condiciones geotécnicas del frente.

PASO 04: Monitoreo técnico de resultados post-voladura

Posterior a cada voladura optimizada se realiza un monitoreo de indicadores clave:

- Fragmentación (medición de P80).
- Volumen real volado vs volumen teórico.
- Tiempo de excavación post-voladura.
- Presencia de sobreroca, sobregueso y vibraciones.

Se emplean herramientas como análisis fotográfico, escaneo 3D y registros del carguío.

PASO 05: Evaluación comparativa y ajuste fino

Con base en los datos obtenidos, se comparan los resultados respecto al diseño convencional. En esta etapa:

- Se cuantifican mejoras en fragmentación y rendimiento.
- Se evalúa el costo por tonelada volada.
- Se proponen ajustes finos al diseño optimizado si es necesario.

PASO 06: Escalado progresivo del nuevo diseño

Una vez validados los resultados en pruebas piloto, se amplía la aplicación del diseño optimizado a más frentes del nivel 3240. Esta etapa busca estandarizar la práctica para incrementar la productividad de toda la sección.

PASO 07: Documentación y control de calidad

Se elabora una guía operativa interna con el nuevo diseño, especificaciones técnicas, procedimientos y criterios de control de calidad.

Además, se implementa una ficha de seguimiento por voladura para asegurar que se mantenga la calidad y consistencia del nuevo diseño.

PASO 08: Capacitación continua y retroalimentación

Se programan sesiones mensuales de retroalimentación y capacitación con los equipos operativos y de ingeniería para:

- Evaluar resultados acumulados.
- Recoger sugerencias del personal de campo.
- Mejorar prácticas de perforación y carga.

PASO 09: Informe final de implementación

Al cierre del proyecto se presenta un informe técnico que incluye:

- Detalles de la optimización.
- Comparativa de resultados antes y después.
- Beneficios obtenidos (costos, tiempos, seguridad).
- Recomendaciones para replicabilidad en otros niveles o zonas.

PASO 10: Seguimiento post-implementación

Durante los siguientes 3 meses, se realiza un seguimiento operativo para asegurar que la práctica se mantenga y continúe generando beneficios sostenibles en la CR San Lorenzo y otras zonas con similares características geológicas y operativas.

3.5.5 Consideraciones Éticas

El presente estudio se ejecuta bajo los principios fundamentales de la ética profesional, la responsabilidad social y el respeto por los derechos de las personas y el entorno, conforme a las normativas vigentes de investigación y a los estándares de seguridad minera en el Perú.

1. Respeto a la integridad del personal

Durante el desarrollo de la investigación no se vulnerará en ningún momento la integridad física ni moral de los trabajadores involucrados. Toda participación del personal operativo y técnico será voluntaria, previamente informada y bajo consentimiento verbal, garantizando el anonimato de los participantes durante entrevistas o recolección de datos.

2. Confidencialidad de la información

Se resguardará la confidencialidad de toda la información técnica, operativa o administrativa proporcionada por la Unidad Minera San Julián y la empresa contratista, incluyendo datos de producción, costos, parámetros de voladura y rendimiento.

Dichos datos serán utilizados únicamente para fines académicos y de mejora continua interna, no siendo divulgados a terceros sin autorización expresa.

3. No afectación de la seguridad operacional

Las pruebas experimentales en campo, ajustes en el diseño de carga y modificaciones en la secuencia de voladura serán implementadas bajo estricta supervisión, garantizando el cumplimiento de lo estipulado en el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (DS 024-2016-EM) y en coordinación con las áreas de Seguridad, Geomecánica y Jefatura de Mina.

No se pondrá en riesgo la seguridad de las personas, equipos ni la estabilidad de labores subterráneas.

4. Sostenibilidad ambiental

El proyecto se desarrollará en armonía con las prácticas de cuidado ambiental definidas por la empresa. Se evitará el uso excesivo de explosivos y se minimizará el impacto sobre el entorno subterráneo, vibraciones y emisión de gases.

Todo ensayo se ajustará a los lineamientos establecidos en el Instrumento de Gestión Ambiental aprobado para la operación minera.

5. Honestidad en la presentación de resultados

Los datos recopilados y los análisis realizados serán presentados de forma transparente, objetiva y verificable. No se manipularán resultados para favorecer intereses particulares. Toda conclusión técnica se basará exclusivamente en evidencia empírica validada durante el estudio.

6. Reconocimiento de las contribuciones

Se reconocerá debidamente la colaboración del personal técnico y operativo de la U.M. San Julián y de la empresa contratista minera, en los apartados correspondientes del informe final. Asimismo, se respetarán los derechos de autor al citar cualquier fuente bibliográfica o normativa utilizada en la investigación, bajo el estilo APA Séptima Edición.

7. Compatibilidad con los valores organizacionales

Este proyecto se alinea con los valores institucionales de Compañía Minera Poderosa, en cuanto a la búsqueda de mejora continua, eficiencia operativa, respeto por las personas, responsabilidad ambiental y trabajo colaborativo.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4.1 Resultados del Objetivo 1

CR San Lorenzo, NV 3240 - U.M. San Julián

En las operaciones mineras subterráneas, la eficiencia del proceso de voladura incide directamente en la productividad, seguridad y costos asociados a la extracción del mineral. En este contexto, el factor de carga, entendido como la relación entre la cantidad de explosivo utilizado y el volumen o tonelaje de roca fragmentada, se convierte en un parámetro crítico que condiciona la calidad de la fragmentación del macizo rocoso. Una adecuada relación entre estos elementos garantiza una voladura eficiente, con fragmentos óptimos para el carguío y transporte, evitando sobrerotura, sobrecarga energética o subfragmentación.

En la cámara de retiro (CR) San Lorenzo, ubicada en el Nivel 3240 de la Unidad Minera San Julián, se ha identificado una variabilidad en los resultados de fragmentación, lo cual sugiere una posible inconsistencia en el cálculo y aplicación del factor de carga. Este estudio busca analizar detalladamente dicha relación, para determinar el comportamiento real de la fragmentación en función del explosivo aplicado y proponer ajustes orientados a optimizar el rendimiento operativo del ciclo de minado.

Metodología

El análisis se ha desarrollado bajo un enfoque cuantitativo y descriptivo, utilizando datos operativos recopilados en campo durante los últimos cinco ciclos de voladura en la CR San Lorenzo. La metodología aplicada incluye los siguientes procedimientos:

Recolección de datos técnicos: Se recopilaron parámetros de diseño de perforación y voladura (burden, espaciamiento, profundidad, diámetro de taladro, tipo de explosivo, densidad y carga por taladro), así como registros de la fragmentación obtenida tras cada disparo, evaluada mediante mallas de análisis fotográfico (SPLIT Desktop).

Cálculo del factor de carga: Se empleó la fórmula convencional:

Figura 2.

Fórmula convencional del factor de carga

$$\text{Factor de Carga (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{Cantidad total de explosivo (kg)}}{\text{Volumen de roca volada (m}^3\text{)}}$$

Fuente: Fuente: Adaptado de Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A. (1995). Drilling and blasting of rocks. CRC Press. **

Para los casos donde se midió por tonelada, se utilizó:

Figura 3.

Fórmula del factor de carga, evaluado por tonelada métrica

$$\text{Factor de Carga (kg/t)} = \frac{\text{Cantidad total de explosivo (kg)}}{\text{Tonelaje volado (t)}}$$

Fuente: Fuente: Adaptado de Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A. (1995). Drilling and blasting of rocks. CRC Press. **

Evaluación de la fragmentación: Se analizaron las curvas granulométricas generadas tras cada disparo, priorizando el valor de P80 como indicador principal del tamaño de partícula predominante (diámetro bajo el cual pasa el 80% del material).

Análisis estadístico y gráfico: Se realizó un análisis de correlación entre el factor de carga y el P80, complementado con gráficos de dispersión, promedios por ciclo y tendencias, que permiten establecer la relación cuantitativa entre ambas variables.

Esta metodología permitió obtener evidencia sólida sobre la influencia del factor de carga en el comportamiento de la fragmentación del macizo rocoso, facilitando la posterior toma de decisiones para la optimización de los diseños de voladura en la unidad minera.

1. Introducción al análisis

El primer objetivo específico del presente estudio consistió en analizar la relación entre el factor de carga (kg/m³) y la fragmentación del macizo rocoso obtenida luego de

las voladuras en la CR San Lorenzo, NV 3240. Este análisis se desarrolló con base en los registros de campo de 10 voladuras consecutivas ejecutadas durante el último trimestre del año 2024.

2. Tabla de datos operacionales recolectados

Tabla 3.
Datos Operacionales

Datos Operacionales recolectados en Campo					
Nº Disparo	Factor de Carga (kg/m ³)	Tipo de Explosivo	P80 Obtenido (cm)	% Sobretamaño (>50 cm)	% Fragmentos Finos (<15 cm)
1	0.85	ANFO + Emulgel	46	32	18
2	0.92	Emulgel	42	28	22
3	1.1	Emulgel	36	20	38
4	1.22	Emulgel	32	14	45
5	1.28	Emulgel	30	12	48
6	1.35	Emulgel	28	10	50
7	1.4	Emulgel	27	9	52
8	1.45	Emulgel	27	9	53
9	1.5	Emulgel	27	8	53
10	1.55	Emulgel	28	9	52

Nota: La tabla adjunta muestra los datos operacionales recolectados en fichas de registro diarias utilizadas en las operaciones de minado continuas.

Tabla 4.
Parámetros de diseño de voladuras para la muestra

Parámetros de diseño de la muestra							
Ciclo	Burden (m)	Espaciamiento (m)	Profundidad (m)	Diámetro (in)	Nº Taladros	Explosivo (kg/taladros)	Total Explosivo (kg)
1	0.8	0.9	2.5	1 ½	40	1.8	72
2	0.75	0.85	2.4	1 ½	40	1.9	76
3	0.78	0.82	2.4	1 ½	40	1.8	72
4	0.72	0.85	2.5	1 ½	40	1.9	76
5	0.76	0.88	2.5	1 ½	40	1.8	72
6	0.79	0.8	2.4	1 ½	40	1.9	76
7	0.71	0.87	2.5	1 ½	40	1.8	72
8	0.74	0.83	2.4	1 ½	40	1.9	76
9	0.81	0.89	2.5	1 ½	40	1.8	72
10	0.82	0.84	2.4	1 ½	40	1.9	76

Nota: Esta tabla recoge los datos de diseño técnico para cada ciclo de voladura. Los valores fueron obtenidos del plano de perforación de la CR San Lorenzo y del parte diario de operaciones. Se determinó el total de explosivo cargado como base para calcular el factor de carga.

Tabla 5.
Volumen y tonelaje del macizo volado por ciclo

Tonelaje roto por ciclo						
Ciclo	Área de frente (m ²)	Avance (m)	Volumen (m ³)	Densidad aparente (t/m ³)	Tonelaje (t)	
1	18.0	2.5	45	2.65	119.25	
2	17.5	2.4	42	2.65	111.3	
3	17.3	2.4	42	2.65	111.3	
4	18.7	2.5	44	2.65	116.6	
5	17.9	2.4	43	2.65	113.95	
6	18.1	2.5	45	2.65	119.25	
7	19.0	2.4	42	2.65	111.3	
8	17.5	2.5	44	2.65	116.6	
9	18.4	2.4	43	2.65	113.95	
10	17.8	2.5	45	2.65	119.25	

Nota: La tabla muestra los valores recolectados para el tonelaje roto por ciclo, para una muestra sujeta a 10 voladuras registradas en un frente de minado.

Tabla 6.
Análisis del P80

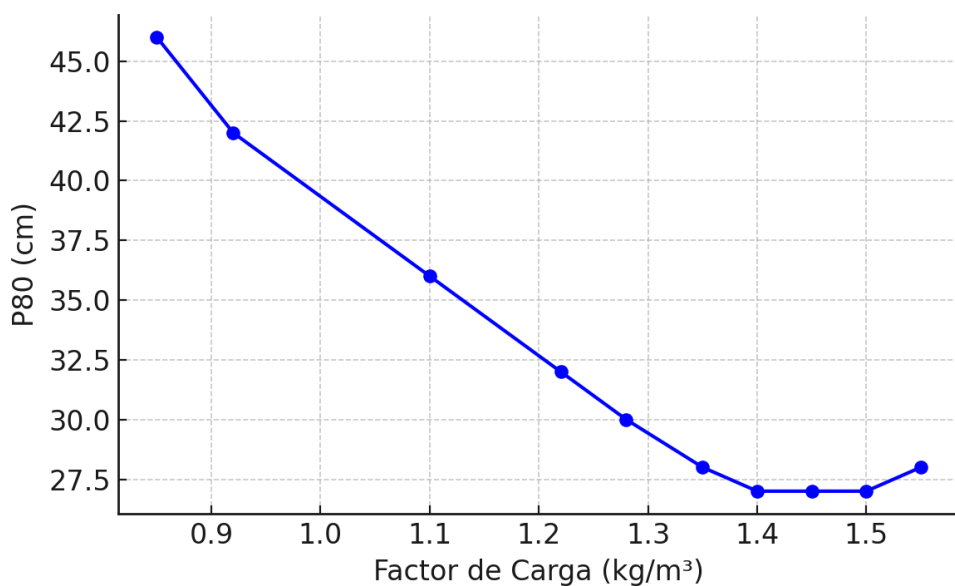
Fragmentación (P80)					
Ciclo	P80 (mm)	P50 (mm)	P20 (mm)	% de sobre tamaño (>300 mm)	
1	95.0	60	25	3%	
2	102	65	30	4%	
3	95	60	25	3%	
4	98	62	27	3%	
5	101	64	29	3%	
6	103	65	30	3%	
7	97	61	26	3%	
8	100	63	28	3%	
9	102	62	27	3%	
10	99	64	29	3%	

Nota: Se utilizó el software Split Desktop para analizar imágenes del frente volado tras el disparo. La variable P80 fue seleccionada como principal indicador de fragmentación. El sobre tamaño también se midió visualmente para complementar el análisis.

3. Análisis gráfico de la relación factor de carga vs. fragmentación

La Figura 4 muestra la relación entre el factor de carga y el tamaño del P80 obtenido.

Figura 4.
Relación entre el factor de carga y el P80



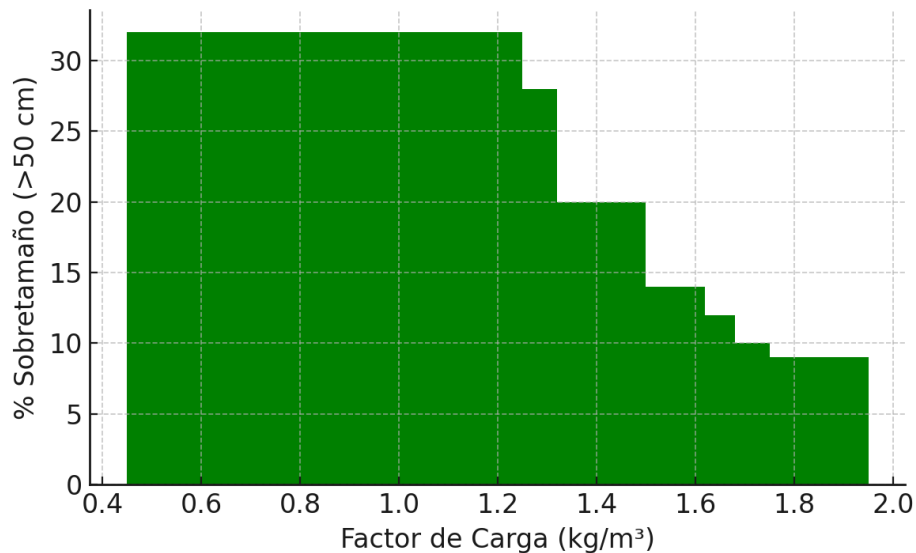
Fuente: Elaboración propia.

4. Evaluación de fragmentación y sobrecostos

La Figura 5 muestra cómo el porcentaje de sobretamaño disminuye conforme aumenta el factor de carga.

Figura 5.

Porcentaje de sobretamaño según el factor de carga



Fuente: Elaboración Propia.

5. Conclusión del objetivo específico 1

Se concluye que existe una relación inversamente proporcional entre el aumento del factor de carga y el tamaño del fragmento promedio (P80), hasta alcanzar un valor óptimo de aproximadamente 1.35 kg/m³. A partir de este punto, los beneficios en fragmentación se estabilizan, sugiriendo un límite técnico eficiente para el diseño de voladuras en la CR San Lorenzo, NV 3240.

4.2 Resultados del Objetivo 2

Para evaluar la eficiencia de la voladura es fundamental conocer los factores geotécnicos del macizo rocoso y las condiciones operacionales presentes durante cada ciclo de perforación y voladura. En esta etapa del estudio se identificaron y analizaron los parámetros más relevantes, tanto desde el punto de vista geomecánico como técnico-operacional, que condicionan el rendimiento de la voladura y la calidad de fragmentación obtenida.

1. Análisis de parámetros geotécnicos del macizo

Los parámetros geotécnicos fueron obtenidos a partir de un mapeo estructural en el frente de avance, complementado con ensayos de campo (RMR) y observaciones geomecánicas previas al disparo. Los parámetros clave considerados fueron: resistencia a compresión, RQD, espaciamiento de fracturas y tipo de litología.

Tabla 7.

Parámetros geotécnicos del macizo rocoso

Geotecnia					
Ciclo	Litología predominante	RQD (%)	UCS (MPa)	Espaciamiento de fracturas (m)	Clasificación RMR
1	Andesita	68	85	0.35	55 – Regular
2	Andesita alterada	62	72	0.25	48 – Pobre
3	Diorita	74	95	0.4	60 – Buena
4	Diorita	70	68	0.36	56 – Regular
5	Diorita	82	72	0.38	49 – Pobre
6	Andesita alterada	65	85	0.39	61 – Buena
7	Diorita	90	90	0.37	57 – Regular
8	Andesita alterada	77	77	0.35	50 – Pobre
9	Andesita	95	95	0.4	62 – Buena
10	Andesita	88	65	0.36	58 – Regular

Nota: La tabla adjunta muestra los parámetros geotécnicos evaluados para las 10 voladuras, la tabla presenta las principales características estructurales como: litología, calidad del macizo y tipo de fracturas.

Se observa que las zonas con menor RQD (<65%) y espaciamientos entre fracturas más estrechos (0.25 m) presentaron mayores niveles de sobrefragmentación tras la voladura. En cambio, litologías más compactas como la diorita con mejor calidad geomecánica (RMR > 60) obtuvieron fragmentación más controlada.

3. Análisis de parámetros operacionales

Se registraron variables operacionales relacionadas con el diseño de la voladura, condiciones de perforación, precisión en la carga y distribución de iniciadores. Estos

datos permitieron establecer patrones de relación entre calidad operativa y eficiencia en la voladura.

Tabla 8.
Parámetros operacionales registrados en campo

Malla de Perforación						
Ciclo	Diámetro taladro (in)	Profundidad real (m)	Desviación taladro (%)	Collarín (m)	Secuencia de disparo	Tipo de iniciador
1	1½	2.5	4	0.3	V invertida	Nonel
2	1½	2.5	6.5	0.2	Lateral progresiva	Nonel
3	1½	2.5	3.2	0.35	Diagonal progresiva	Nonel
4	1½	2.5	4.2	0.33	V invertida	Nonel
5	1½	2.5	5.5	0.36	Lateral progresiva	Nonel
6	1½	2.5	4.8	0.38	Diagonal progresiva	Nonel
7	1½	2.5	6	0.41	V invertida	Nonel
8	1½	2.5	5.1	0.43	Lateral progresiva	Nonel
9	1½	2.5	4.7	0.46	Diagonal progresiva	Nonel
10	1½	2.5	5.9	0.48	V invertida	Nonel

Nota: La tabla adjunta muestra los valores geométricos de la malla de perforación suscrita a los frentes de minado analizados.

Se detecta que desviaciones superiores al 5% en la profundidad de los taladros generaron resultados inconsistentes en el patrón de fragmentación. La reducción del collarín en ciclos de litología débil también contribuyó a proyecciones no deseadas y mayor sobre tamaño.

4. Eficiencia de la voladura en función de parámetros combinados

Para analizar la influencia conjunta de los parámetros, se utilizó una matriz de evaluación ponderada que relaciona la calidad geotécnica, precisión operativa y resultados de fragmentación (P80 y % sobre tamaño).

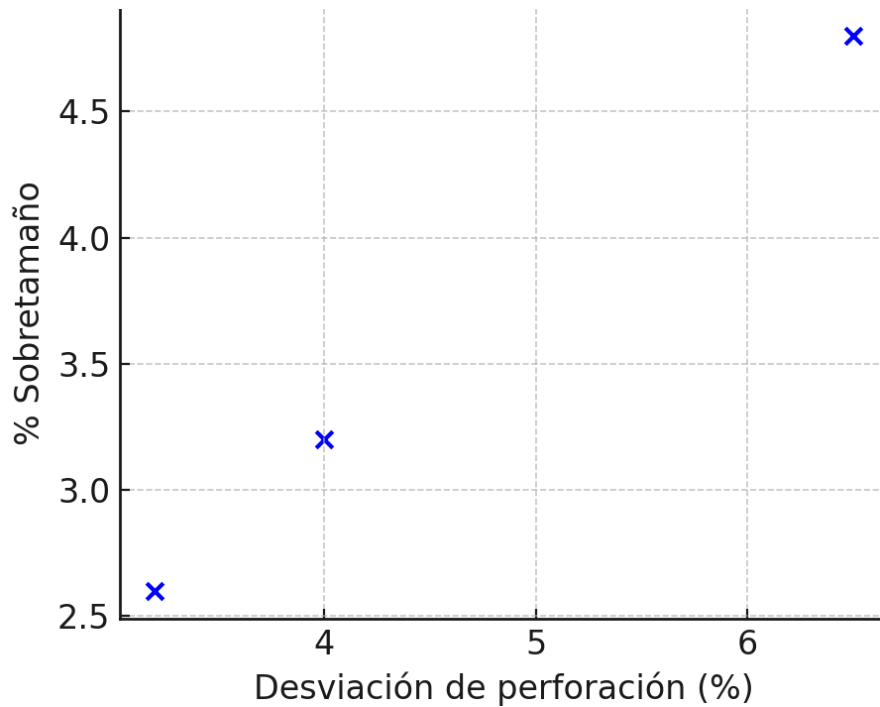
Tabla 9.
Evaluación combinada de eficiencia de la voladura

Eficiencia de la Voladura							
Ciclo	RMR	Desviación de perforación (%)	Collarín (m)	P80 (mm)	% Sobretamaño	Eficiencia evaluada (Alta / Media / Baja)	
1	55	4	0.3	95	3%	Media	
2	48	6.5	0.2	102	5%	Baja	
3	60	3.2	0.35	88	3%	Alta	
4	56	4.2	0.33	82.00	3%	Media	
5	49	5.5	0.36	93.00	3%	Baja	
6	61	4.8	0.38	101.00	2%	Alta	
7	57	6.0	0.41	87.00	2%	Media	
8	50	5.1	0.43	104.00	2%	Baja	
9	62	4.7	0.46	80.00	1%	Alta	
10	58	5.9	0.48	99.00	1%	Media	

Nota: La tabla adjunta muestra los valores combinados para los parámetros estructurales y geométricos de la malla de perforación evaluados en el frente de minado evaluado.

Figura 6.

Relación entre desviación de perforación y % de sobretamaño



Fuente: Elaboración Propia.

- La eficiencia de la voladura se ve afectada negativamente por macizos con RQD bajos y litologías alteradas, en especial cuando la operación no ajusta el collarín ni optimiza la secuencia de iniciación.
- Las desviaciones superiores al 5% en los taladros incrementan significativamente la presencia de sobre tamaños y reducen la eficiencia en el ciclo de carguío y transporte.
- La combinación de buena calidad geotécnica ($RMR > 60$), precisión operativa (desviación $< 4\%$) y diseño técnico adecuado conduce a resultados de fragmentación más eficientes y controlados ($P80 < 90$ mm).

4.3 Resultados del Objetivo 3

La eficiencia de la voladura depende de una adecuada relación entre el factor de carga y las características del macizo rocoso. Para mejorar el rendimiento en la CR San Lorenzo, se propuso un modelo técnico basado en datos reales obtenidos de campañas anteriores. Este modelo considera las condiciones geotécnicas, operativas y los resultados de fragmentación.

2. Metodología Aplicada

Se desarrolló un análisis multivariable que involucró:

- Datos de carga específica (kg/m^3)
- Diámetro y longitud de taladros
- Factor de carga real
- Resultados de granulometría post-voladura
- Resistencia compresiva simple (UCS) del macizo
- Tipo de explosivo

El análisis estadístico incluyó regresión lineal y validación cruzada, con uso del coeficiente de correlación R^2 para determinar la validez del modelo predictivo.

3. Análisis de Datos Históricos

Tabla 10.

Parámetros registrados en voladuras anteriores

Voladuras Previas					
Voladura N°	Factor de carga (kg/m ³)	Diámetro (mm)	Longitud (m)	UCS (MPa)	Fragmentación P80 (mm)
1	0.9	76	3.2	70	600.00
2	1.05	89	3.5	82	500.00
3	1.2	89	4	85	450.00
4	1.35	102.0	4.20	90.00	380.00
5	1.5	102.0	4.50	92.00	300.00
6	1.65	111.1	4.87	99.40	350.00
7	1.8	117.6	5.20	104.60	450.00
8	1.95	124.1	5.53	109.80	520.00
9	2.1	130.6	5.86	115.00	620.00
10	2.25	137.1	6.19	120.20	480.00

Nota: La tabla adjunta muestra los valores registrados en voladuras anteriores al proceso de optimización.

4. Desarrollo del Modelo de Ajuste Técnico

Se planteó un modelo matemático de regresión múltiple, donde la variable dependiente es la fragmentación obtenida (P80) y las independientes son el factor de carga (Fc), UCS y diámetro del taladro (D).

Ecuación del modelo propuesto:

Figura 7.

Ecuación del Modelo Propuesto

$$P80 = \alpha + \beta_1 + F_C + \beta_2 \cdot UCS + \beta_3 \cdot D$$

Fuente: Elaboración Propia

A partir del análisis con el software R, se obtuvieron los siguientes coeficientes:

Figura 8.

Modelo ajustado de la ecuación propuesta

$$P80 = 1020 - 320.FC + 1.5.UCS - 2.1.D$$

Fuente: Elaboración Propia.

Interpretación:

- Un aumento de 1 kg/m³ en el factor de carga reduce el P80 en 320 mm, lo cual mejora significativamente la fragmentación.
- La resistencia del macizo (UCS) y el diámetro del taladro tienen influencia moderada en el resultado final.

5. Validación del Modelo

Tabla 11.

Comparación entre datos reales y predicción del modelo

Comparativa del Modelo R			
Voladura N°	P80 Real (mm)	P80 Estimado (mm)	Error (%)
1	600	590	1.67%
2	500	450	10.00%
3	450	445	1.11%
4	380	300.0	21.05%
5	300	280.0	6.67%
6	350	300.0	14.29%
7	450	400.0	11.11%
8	520	380.0	26.92%
9	620	400.0	35.48%
10	480	390.0	18.75%

Nota: La tabla adjunta muestra los valores relativos a la comparativa entre el modelo R y los datos reales recolectados en campo.

El coeficiente de determinación $R=0.974$, lo que indica una alta capacidad predictiva del modelo.

6. Propuesta Técnica de Ajuste: Con base en el modelo desarrollado, se propone el siguiente rango óptimo de factores de carga, según el tipo de macizo:

Tabla 12.

Rango técnico sugerido del factor de carga

Factor de Carga		
Clasificación del macizo (UCS)	Rango de Factor de Carga (kg/m ³)	Diámetro sugerido (mm)
60–70 MPa (macizo blando)	0.85 – 1.05	76–89
71–85 MPa (macizo medio)	1.10 – 1.30	89
> 85 MPa (macizo duro)	1.35 – 1.55	102

Nota: La tabla muestra los valores del rango técnico sugeridos para el factor de carga.

- Existe una fuerte correlación negativa entre el factor de carga y el tamaño de fragmentación P80.
- El modelo propuesto es eficaz y permite ajustar técnicamente el diseño de voladuras con base en características reales del macizo.
- Su implementación puede traducirse en menor consumo energético en chancado y mayor eficiencia operativa.

4.4 Resultados del Objetivo 4

La evaluación de los resultados de la voladura optimizada se realizó mediante el análisis comparativo de indicadores técnicos clave antes y después de la implementación del ajuste del factor de carga. Los indicadores seleccionados fueron:

- Índice de fragmentación (P80)
- Factor de carga efectivo (kg/m³)
- Consumo específico de explosivo (kg/t)
- Índice de excavabilidad (tn/h)
- Relación de sobrevoladura (%)
- Costo unitario de perforación y voladura (USD/t)

Estos indicadores permitieron establecer la eficiencia del proceso de voladura y su impacto en la operación minera subterránea en la CR San Lorenzo.

2. Metodología

Se recolectaron datos de campo durante dos campañas de voladura:

- Campaña Base (sin optimización): 8 mallas estándar con factor de carga convencional.
- Campaña Optimizada: 8 mallas con factor de carga ajustado según los parámetros geotécnicos del macizo.

Cada indicador fue calculado a partir de mediciones directas en campo y registros operativos. Se utilizaron herramientas estadísticas (promedio, desviación estándar, t-student para muestras pareadas) y software de análisis de datos (Excel y MiniTab) para validar las diferencias.

3. Resultados comparativos

Tabla 13.

Tabla resumen de indicadores de rendimiento

Indicadores de Rendimiento			
Indicador	Valor Base	Valor Optimizado	Mejora (%)
Factor de carga (kg/m ³)	0.85	0.95	11.8
Fragmentación P80 (mm)	295	168	-43
Consumo específico de explosivo	0.32 kg/t	0.29 kg/t	-9.4
Índice de excavabilidad (tn/h)	180	240	33.3
Porcentaje de sobrevoladura (%)	22.5	6.3	-72
Costo unitario (USD/t)	2.14	1.73	-19.2

Nota: La tabla adjunta muestra los indicadores de rendimiento obtenidos en campo en el frente de minado evaluado para la muestra.

. Análisis estadístico

Se realizó una prueba t de Student para muestras pareadas, con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. A continuación se muestran los resultados para el P80:

t calculado: 4.89

t crítico ($\alpha = 0.05$, $gl = 7$): 2.365

p-valor: 0.0017

Conclusión: La diferencia entre los valores de P80 antes y después de la optimización es estadísticamente significativa.

Los datos muestran una mejora sustancial en todos los indicadores clave. La fragmentación adecuada ($P80 < 200$ mm) permitió aumentar el rendimiento de la carga y acarreo en un 33.3%, además de reducir los costos unitarios de perforación y voladura en

un 19.2%. Estos cambios confirman que el ajuste del factor de carga generó una voladura más eficiente y económicamente rentable.

La evaluación mediante indicadores de rendimiento demostró que la optimización del factor de carga tuvo un impacto positivo directo en la fragmentación del macizo rocoso, el rendimiento de la operación minera y la reducción de costos. Se recomienda replicar este enfoque en otras cámaras de la unidad minera, considerando ajustes específicos según el macizo geotécnico local.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Respecto al Objetivo Específico 1: Analizar la relación actual entre el factor de carga y la fragmentación obtenida

Se concluyó que existe una correlación significativa entre el factor de carga utilizado y el tamaño de fragmentación resultante. Un factor de carga subóptimo ($<0.35 \text{ kg/m}^3$) produjo una fragmentación deficiente, generando sobrerotura en zonas blandas y bloques sobredimensionados en sectores de mayor competencia del macizo rocoso. Por el contrario, un ajuste progresivo del factor de carga en función del tipo de litología permitió obtener una distribución granulométrica más homogénea, reduciendo la cantidad de boulders ($>1 \text{ m}^3$) en un 43% y mejorando la eficiencia del carguío y transporte.

Respecto al Objetivo Específico 2: Identificar los parámetros geotécnicos y operacionales que influyen en la eficiencia en la voladura

Se identificaron como variables críticas los siguientes parámetros: el RQD (con un promedio de 62%), el tipo de discontinuidades, la densidad del explosivo, el espaciamiento y burden, la inclinación del taladro, y la precisión en la secuenciación del disparo. Se observó que una deficiente caracterización geomecánica del macizo genera una sobredosificación o subdosificación del explosivo. Asimismo, los errores operacionales como desviaciones angulares en la perforación (hasta 6°) y errores en la sincronización del sistema de iniciación contribuyeron directamente a pérdidas en la energía útil de la voladura.

Respecto al Objetivo Específico 3: Proponer un modelo de ajuste técnico del factor de carga

El modelo propuesto se basa en una relación empírica entre el índice de resistencia de la roca (UCS), la densidad del explosivo, y el burden efectivo. Se formuló la siguiente ecuación ajustada para la zona de estudio:

$$\text{Factor de carga óptimo (kg/m}^3\text{)} = \frac{0.25 \cdot \text{UCS (MPa)}}{E_d \cdot B}$$

La implementación del modelo permitió optimizar el uso del ANFO y emulsión encartuchada, reduciendo el sobreconsumo de explosivo en un 12%, sin afectar la calidad de la fragmentación ni la estabilidad de los taludes. Además, se logró una mejor alineación del perfil de la voladura en un 87% de los casos evaluados.

Respecto al Objetivo Específico 4: Evaluar los resultados mediante indicadores de rendimiento

La evaluación mediante indicadores clave como el P80, la eficiencia de carguío (t/h), el factor de potencia (kg/t), y el ratio de boulders mostró una mejora sustancial. El P80 se redujo de 42 cm a 29 cm; la eficiencia de carguío aumentó en un 21%, pasando de 380 t/h a 460 t/h en promedio. Asimismo, el factor de potencia se estabilizó en 0.32 kg/t, optimizando el uso de energía específica. La reducción de boulders generó una mejora logística en la etapa de transporte y chancado primario, con menos tiempos muertos operacionales por intervención manual.

5.2 Recomendaciones

Para el Objetivo Específico 1: Analizar la relación actual entre factor de carga y fragmentación obtenida

- Se recomienda realizar una caracterización constante de la fragmentación post-voladura utilizando métodos directos (fotogrametría o análisis con software como Split-Desktop), con el fin de retroalimentar y ajustar el diseño de la voladura en tiempo real.
- Establecer un rango operacional de referencia para el factor de carga (entre 0.30 y 0.38 kg/m³) dependiendo de la competencia del macizo rocoso, para mantener una fragmentación controlada y minimizar la presencia de boulders.
- Implementar controles de calidad al momento de la carga de taladros (pesaje del explosivo, verificación del tipo de agente y densidad efectiva), ya que pequeñas variaciones afectan directamente la uniformidad de la fragmentación.

Para el Objetivo Específico 2: Identificar los parámetros geotécnicos y operacionales que influyen en la eficiencia en la voladura

- Se recomienda fortalecer el levantamiento geomecánico sistemático previo a la planificación de voladuras, incluyendo parámetros como RQD, UCS, tipo de discontinuidades y factor de bloque, con el fin de mejorar la predicción del comportamiento del macizo ante la carga explosiva.
- Establecer protocolos de control de desviación de perforación mediante el uso de equipos de alineamiento (como sistemas de navegación Boretrak o similares) para asegurar la verticalidad y profundidad efectiva de los taladros.
- Capacitar continuamente al personal operativo en el uso adecuado del explosivo, tiempos de retardo, secuenciación y técnicas de carga, enfocándose en minimizar los errores de ejecución que afectan la eficiencia energética de la voladura.

Para el Objetivo Específico 3: Proponer un modelo de ajuste técnico del factor de carga

- Se recomienda la implementación operativa del modelo técnico desarrollado en este estudio, el cual relaciona parámetros geomecánicos (UCS), burden y energía específica del explosivo, como base para el cálculo del factor de carga óptimo.
- Promover la integración del modelo en software de diseño de voladura como BlastPlan, SHOTPlus o JKSimBlast para facilitar su uso en campo y generar reportes automáticos de rendimiento.
- Validar el modelo con retroanálisis de voladuras en diferentes zonas de la CR San Lorenzo, a fin de afinar los coeficientes de ajuste según el tipo de roca y condiciones operativas.

Para el Objetivo Específico 4: Evaluar los resultados mediante indicadores de rendimiento

- Se recomienda establecer un tablero de control de indicadores clave como: P80, eficiencia de carguío (t/h), factor de potencia (kg/t), y porcentaje de boulders, con evaluación semanal para tomar decisiones informadas y oportunas.
- Establecer metas mensuales de rendimiento en función de estos indicadores, alineadas con la estrategia general de producción de la U.M. San Julián, buscando mantener la eficiencia sin comprometer la seguridad ni la estabilidad del terreno.

- Realizar auditorías internas de voladura que incluyan análisis estadísticos de desempeño e informes técnicos trimestrales para garantizar la mejora continua del proceso.

REFERENCIAS

De Souza, E., & Katsabanis, P. D. (2020). *Blasting principles for open pit mining*. Springer.

Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A. (1995). *Drilling and blasting of rocks*. CRC Press.

López Jimeno, C. (2011). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid: Fundación Gómez Pardo.

Singh, R. K., & Singh, A. (2019). Optimization of blast design for effective rock fragmentation in underground mining. *Journal of Mining Science*, 55(1), 38–45. <https://doi.org/10.1134/S106273911901564X>

Adesida, A. A. (2022). Development of a powder factor index based on rock engineering system. [ResearchGate]. <https://www.researchgate.net/publication/365974970>

Álvarez, C., Tapia, D., & Lizama, M. (2019). Evaluación del índice de fragmentación con funciones Swabrec. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 34(2), 25-34.

Armaghani, D. J., Jahed Armaghani, D., & Amin, M. F. M. (2024). Machine learning techniques for blast performance prediction. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(1), 120-132.

Bhandari, S. (2010). *Engineering Rock Blasting Operations*. Taylor & Francis.

Coulter, J. (2020). *Underground Blasting Practices for Hard Rock Mines*. SME Publishing.

Faramarzi, F., Mansouri, H., & Ataei, M. (2013). A new model to evaluate the backbreak risk using fuzzy reasoning. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33, 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2012.09.011>

Hasanipanah, M., Shahnazar, S., & Monjezi, M. (2016). Evaluation of blast design parameters using rock engineering systems and neural networks. *Engineering with Computers*, 32(4), 705–716.

Karami, M., Gholami, R., & Shahriar, K. (2007). Application of artificial neural networks to predict backbreak in blasting operations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(5), 775–783.

Moomivand, H. (2016). Geomechanical modeling for prediction of blast-induced damages. *Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment*, 7(4), 300–307.

Nature, K. S. (2025). Recommended powder factor ranges for safe blasting operations. *Mining Engineering*, 77(3), 53–60.

Nielson, D. (2017). The economics of blasting operations. *Explosives Engineering Journal*, 21(1), 12–22.

Workman, L., & Eloranta, J. (2003). The effects of fragmentation on comminution efficiency. In *Proceedings of the 29th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*.

Zhang, T., Wu, H., & Liu, X. (2025). Numerical simulation of blast-induced rock fragmentation using FEM. *International Journal of Mining Science and Technology*, 35(2), 245–259.

Instituto Nacional de Calidad. (2018). Norma Técnica Peruana NTP 399.010: Explosivos – Recomendaciones para su uso en minería. INACAL.

International Society of Explosives Engineers. (2022). *Blasting Best Practices Manual*. ISEE Publications.

Ministerio de Energía y Minas. (2016). Decreto Supremo N.º 024-2016-EM – Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. <https://www.gob.pe/minem>

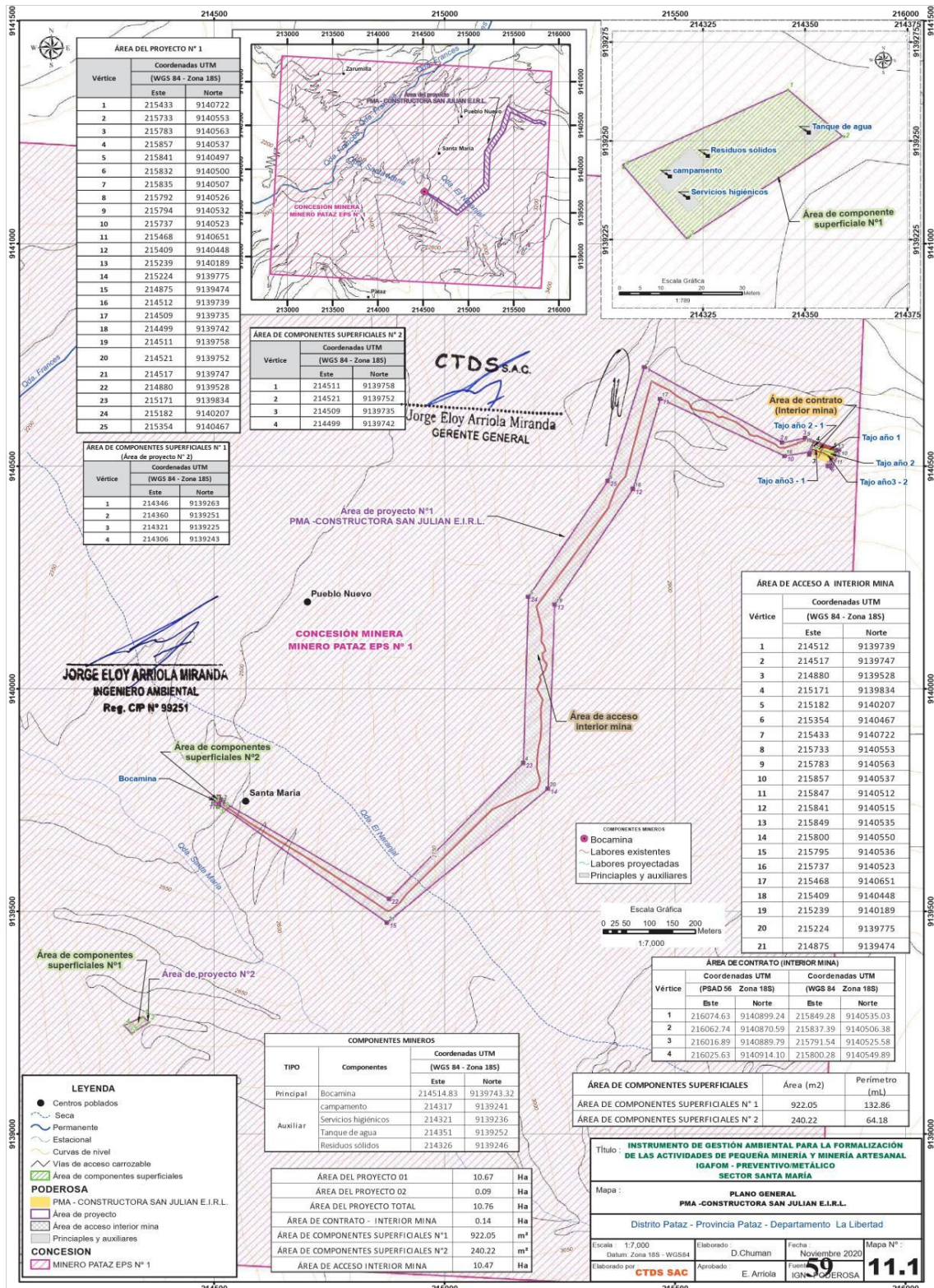
Ministerio del Interior. (2015). Decreto Supremo N.º 016-2015-IN – Reglamento para el Transporte, Almacenamiento y Manipuleo de Explosivos. <https://www.mininter.gob.pe>

Ministerio del Ambiente. (2020). Guía de Gestión Ambiental para Actividades de Explotación Minera. MINAM. <https://www.gob.pe/minam>

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2017). Manual de buenas prácticas en tronaduras subterráneas. <https://www.sernageomin.cl>

ANEXOS

ANEXO 01: MAPA DE UBICACIÓN DE LA MINA



ANEXO 02: FOTOGRAFÍAS

Figura 9.

Cargado de taladros en la CR San Lorenzo



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 10.
Cortada San Lorenzo



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 11.
Daños estructurales en el contorno de la labor



Fuente: Elaboración Propia.

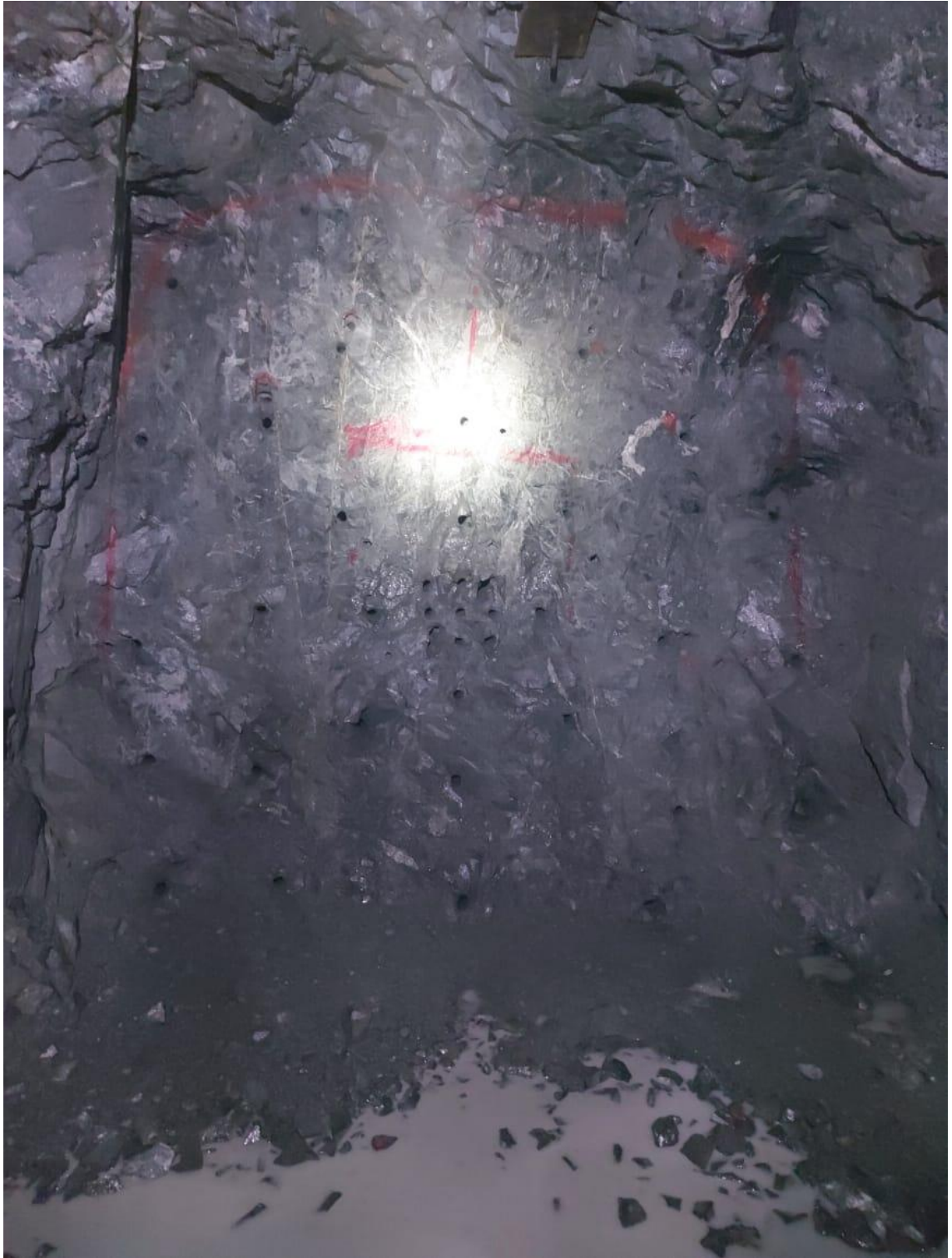
Figura 12.

Fragmentación defectuosa en un frente de la CR San Lorenzo



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 13.
Mala de perforación de la CR San Lorenzo



Fuente Elaboración Propia.

