

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA DE MINAS**

**“OPTIMIZACIÓN EN LA RECUPERACIÓN DE
PILARES DE MINERAL, MEDIANTE EL
SOSTENIMIENTO CON CUADROS DE MADERA
EN LA MINERA CHICAMA MINING – GRAN
CHIMÚ – LA LIBERTAD 2023”**

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Francisco Baruc Ludeña Guillermo
Gian Pier Quiroz Enco

Asesor:

Mg. Ing. Ricardo Antonio Saavedra Zapata
<https://orcid.org/0000-0002-1010-4079>

Trujillo - Perú

2025

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	Jairo Pinedo Taquia
	Nombre y Apellidos

Jurado 2	Mauro Edilberto Cruzado Ramirez
	Nombre y Apellidos

Jurado 3	Ricardo Antonio Saavedra Zapata
	Nombre y Apellidos

Informe de similitud



Página 2 of 55 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trnoid:::1:3286140491




11% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 9 palabras)

Fuentes principales

- 9%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 5%  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

A mi madre, Nilda Cleopatra Guillermo Díaz, por su sacrificio, esfuerzo y dedicación incondicional. Esta tesis está especialmente dedicada a ella, como muestra de gratitud por haber sido mi mayor impulso para alcanzar la meta de convertirme en Ingeniero de Minas.

A mi padrino, Leonardo Severo Ríos Valdiviezo, en reconocimiento a las valiosas enseñanzas y el constante acompañamiento que me brindó en el mundo de la minería.

También dedico este trabajo a mis docentes de la Universidad Privada del Norte, de la Facultad de Ingeniería de Minas. Y, con especial aprecio, a nuestro asesor, el Ing. Ricardo Antonio Saavedra Zapata, por su guía, apoyo y dedicación durante el desarrollo de esta tesis.

Dedico este trabajo con todo mi cariño y gratitud a mi familia, por ser el pilar fundamental de mi vida. A mis padres, Felicita Marcelina Enco Lezma y Luis Antonio Quiroz Hernández, por su amor incondicional, su paciencia y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A mis familiares, quienes siempre me alentaron con palabras de ánimo y gestos sinceros en cada etapa de este camino. A mis amigos, por estar a mi lado en los momentos difíciles, por compartir alegrías, y por ser una parte esencial de esta etapa.

A mis docentes, por su entrega, sabiduría y compromiso, quienes contribuyeron con su guía al desarrollo de mi formación profesional. Y en especial, dedico esta tesis a mi asesor, Ricardo Saavedra Zapata, por su orientación.

A todos ustedes, gracias por ser parte de este logro.

Agradecimiento

Expreso mi profundo agradecimiento a Dios, por brindarme la fuerza y la voluntad necesarias para llevar a cabo este trabajo de investigación. Agradezco infinitamente a mi madre, Nilda Cleopatra Guillermo Díaz, por su apoyo incondicional, su esmero y dedicación para que yo pudiera alcanzar mi formación profesional.

Asimismo, extiendo mi sincero agradecimiento a mi padrino, Leonardo Severo Ríos Valdiviezo, por instruirme e ilustrarme constantemente en los aspectos técnico-operacionales del rubro minero, contribuyendo de manera significativa a mi crecimiento académico y profesional.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, Felicita Marcelina Enco Lezma y Luis Antonio Quiroz Hernández, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser mi mayor fuente de inspiración. Gracias por enseñarme con el ejemplo, por alentarme en cada paso y por creer en mí incluso en los momentos en que yo dudaba.

Este logro no habría sido posible sin su esfuerzo, sacrificio y la fortaleza con la que enfrentaron cada desafío a lo largo de mi formación. Les dedico este trabajo con todo mi corazón, porque esta meta también es de ustedes.

También extiendo mi gratitud a todas las personas que me acompañaron en este camino: docentes, amigos y compañeros que contribuyeron con su apoyo académico, emocional y humano.

Gracias a todos por ser parte de este capítulo tan importante en mi vida.

Tabla de contenido

JURADO EVALUADOR.....	2
INFORME DE SIMILITUD.....	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO	5
TABLA DE CONTENIDO	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE ANEXOS.....	9
RESUMEN	10
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	11
1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA	11
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	22
1.3. OBJETIVOS.....	22
1.3.1. Objetivo general.....	22
1.3.2. Objetivos específicos	22
1.4. HIPÓTESIS	23
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	24
CAPÍTULO III: RESULTADOS	30
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	35
DISCUSIÓN	35
CONCLUSIONES	37
REFERENCIAS.....	39
ANEXOS.....	44

Índice de tablas

Tabla 1 Leyes de mineral de antimonio de los 7 pilares recuperados	31
Tabla 2 Mapeo geomecánica de los pilares de la unidad minera bumerang 887....	31
Tabla 3 Determinación de la resistencia compresión de los pilares de la Unidad M. Bumerang 887.....	31
Tabla 4 Cantidad de madera para los cuadros en la Unidad Minera Bumerang 887	32
Tabla 5 Frecuencia de la recuperación de antimonio de cada pilar explotado real	32
Tabla 6 Balance metalúrgico de la recuperación de mineral antimonio	33
Tabla 7 Eficiencia en la producción de mineral de antimonio	33
Tabla 8 Costos totales de la recuperación de pilares con antimonio en un mes	34
Tabla 9 Indicadores económicos de recuperación de pilares de mineral de antimonio TIR y VAN	34

Índice de figuras

Figura 1 Ubicación de 7 pilares de mineral explotados.....	30
Figura 2 Sostenimiento por cuadro de madera	32

Índice de anexos

Anexo 1 Acondicionando la madera para la fabricación de los cuadros.....	44
Anexo 2 Preparando las maderas para sostenimiento	44
Anexo 3 Instalando los cuadros de madera como sostenimiento	45
Anexo 4 Formato de mapeo geomecánicos RMR y GSI	46
Anexo 5 Costos de recuperación de pilar de mineral de antimonio: Preparación, Madera, Perforación y voladura.	47
Anexo 6 Costos de mano de obra de las operaciones.....	48
Anexo 7 Evaluación económica: Determinación del VAN y el TIR de la recuperación de pilares, mediante el sostenimiento de cuadros de madera de la Unidad minera	49
Anexo 8 Plano de la mina.....	50

RESUMEN

Objetivo del estudio: El propósito de la investigación fue analizar la eficacia de la recuperación de pilares de mineral utilizando cuadros de madera como método de sostenimiento, en la Minera Río Mining, específicamente en la Unidad minera Bumerang, nivel 887.

Metodología aplicada: Se utilizó un enfoque de investigación aplicada, con nivel explicativo-descriptivo y diseño experimental. Se seleccionaron 22 pilares de mineral para el análisis, de los cuales 7 contenían betas de mineral de antimonio, en los que se implementó la técnica del circado para la extracción del mineral.

Resultados obtenidos: Producción de cabeza: Se obtuvo una producción de 53,51 TM de mineral de antimonio. Eficiencia de recuperación: El porcentaje de recuperación fue del 14,1 %. Rentabilidad financiera: Se calcularon indicadores económicos, logrando un VAN de \$22,528.79 y una TIR del 57 %, lo que confirma la viabilidad económica de la extracción, a pesar de la baja eficiencia.

A pesar de que la recuperación de concentrado de antimonio fue baja (14 %), la explotación de estos pilares resultó rentable. Esto resalta la urgencia de optimizar las estrategias de extracción y control en la unidad minera para mejorar la eficacia en la recuperación de minerales.

Es crucial implementar mejoras en las técnicas y procesos de extracción con el fin de maximizar el rendimiento de los recursos y garantizar la sostenibilidad de la operación minera.

PALABRAS CLAVES: Pilares de mineral, optimización y eficiencia

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

En la minera subterránea, los pilares de mineral que albergan vetas de metales valiosos desempeñan un papel crítico en la extracción de recursos naturales. Estos pilares, compuestos por roca de buena ley en minerales, se dejan intencionalmente en su lugar durante la explotación subterránea para garantizar la estabilidad de las labores mineras subterráneas. Con el avance de la tecnología minera, la recuperación de estos pilares se ha vuelto una estrategia cada vez más importante para maximizar la recuperación de metales valiosos. Sin embargo, esta práctica debe llevarse a cabo con un enfoque riguroso en la seguridad y la sostenibilidad, en línea con las regulaciones ambientales y de seguridad en el trabajo conforme a la ley N°29783, para minimizar los riesgos y maximizar los beneficios económicos.

Según Baldwin y Johnson (2021), evaluaron la seguridad y eficiencia de la recuperación de pilares en la minería de carbón en los Apalaches, utilizando una revisión de literatura y entrevistas con expertos. Encontraron que esta práctica representa el 10% de la producción total de carbón, con una eficiencia promedio del 50-70%, aunque también contribuye al 25% de los incidentes mortales en la minería. Concluyeron que, a pesar de su eficacia, es esencial implementar tecnologías avanzadas y mejorar la capacitación para reducir los riesgos asociados.

En la Minera El Brocal de la compañía minera Buenaventura, se dispone de una reserva minera actual de 0.7 millones de toneladas con concentraciones de cobre que superan el 2% en los pilares de la unidad minera Marca Punta. Esta circunstancia obliga a la

organización a buscar la forma de obtener la máxima cantidad de mineral posible con el propósito de incrementar su capacidad de producción de manera sustancial (Instituto de Ingenieros de Minas del Perú [IIMP], 2022).

La problemática de la minera Chicama Mining, que opera en el tajo 323 de la Unidad Minera Bumerang 887 (U.M.), donde se encuentran 22 pilares de mineral que sirven como sostenimiento, dejados por explotaciones anteriores. Estos pilares contienen vetas de mineral polimetálico de alta ley, lo que plantea un desafío significativo en la selección de la técnica de explotación adecuada y el reemplazo del sostenimiento, garantizando la seguridad de los trabajadores. La necesidad de optimizar estos procesos es crucial para minimizar riesgos operacionales y mejorar la eficiencia en la extracción, sin comprometer la integridad del entorno laboral. Para respaldar esta investigación se presenta algunos antecedentes de explotación de pilares similares en diferentes unidades mineras subterráneas.

Según Gutiérrez y Gutiérrez (2020), lograron recuperar los pilares antiguos mediante el método de Explotación por Subniveles con Taladros Largos en la Unidad Operativa Arcata de la Compañía Minera Ares. En los antiguos tajeos, utilizaron el Taladro Largo SIMBA 1254 como equipo principal para la perforación, complementando su trabajo con relleno en pasta de cemento como soporte. La metodología del estudio incluyó una evaluación exhaustiva del proceso de explotación anterior, analizando los equipos, reservas y leyes de mineral, así como el ciclo de explotación y las labores de extracción. Las pruebas, que se llevaron a cabo durante 12 días y 24 turnos, permitieron recuperar 338 toneladas métricas por día, utilizando palas de 3.5 yd³ y 4 yd³ para la carga y camiones con tolvas de 15 m³ para el transporte. Esta estrategia resultó en un beneficio económico diario de \$81,643.50, considerando un precio internacional de \$17.62 por onza troy de plata y \$41.79 por gramo de oro, con una tasa de recuperación del 80%.

Manrique y Branco (2021), llevaron a cabo un estudio centrado en la recuperación de pilares de oro, con el objetivo de satisfacer las necesidades financieras de la empresa. El análisis detallado de Minera El Solitario SAC, su ubicación geográfica, accesibilidad y las diversas actividades mineras que realiza. Para asegurar la seguridad, continuidad y calidad de la producción, se realizó una planificación cuidadosa de las tareas, teniendo en cuenta las características geológicas y geomecánicas del macizo rocoso. Asimismo, se propuso la implementación de un método de sostenimiento con cuadros de madera en las operaciones mineras, buscando proteger a los trabajadores durante la recuperación del mineral. Se estimaron los costos de operación y se determinó la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto. La evaluación económica y financiera, presentó resultados alentadores, con un Valor Actual Neto (VAN) de US\$132,860, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 528%, una Relación Beneficio-Costo (B/C) de 10.8 y un período de recuperación (Payback) de 1.5 meses. Estos indicadores demostraron que el proyecto de explotación pilares de oro, era viable, sino también rentable. En última instancia, la ejecución de las labores de sostenimiento aseguraría la operatividad de la Unidad Minera para futuras tareas de exploración y explotación.

Huaranga (2020), llevó a cabo una investigación para evaluar económicamente la recuperación de pilares de minerales en la veta Cabana, ubicada en el nivel 3125 del sector Chilcas de la mina aurífera Retamas S.A., entre diciembre de 2019 y junio de 2020. El estudio, de enfoque analítico y clasificado como descriptivo-explicativo, reveló las variables operativas y económicas relacionadas con la producción en diversas secciones y la recuperación de pilares. Los datos se obtuvieron a través de la revisión de documentos y la recopilación de información relevante sobre la unidad minera. Se aplicaron métodos de extracción como "Cut and Fill" y "Long Wall", logrando una producción total de 3,159.37

toneladas de mineral, con una ley promedio de 18.09 gramos por tonelada y una dilución del 57.63%. El valor total del mineral recuperado ascendió a \$1,509,427.31, lo que impactó positivamente en la rentabilidad de la empresa y mejoró el valor presente neto de la operación minera, destacando la relevancia económica del estudio.

La extracción de minerales a través de métodos subterráneos es una práctica ampliamente difundida, especialmente cuando los yacimientos se encuentran a gran profundidad. Uno de los métodos más empleados es el de cámaras y pilares, el cual implica abrir cavidades en el macizo rocoso dejando bloques de mineral sin extraer que actúan como soporte estructural. Esta técnica se prefiere por su bajo costo, simplicidad operativa y eficacia en depósitos con geometría regular y a poca profundidad (Hartman & Mutmanský, 2002).

Los pilares de mineral son bloques o columnas de mineral que se dejan sin extraer dentro de la mina subterránea, con el objetivo de proporcionar soporte estructural, mantener la integridad y estabilidad de las aberturas y zonas de explotación, transferir los esfuerzos y cargas generadas por las actividades de minería subterránea, y evitar el colapso de las excavaciones durante la extracción del mineral identificaron pilares de formas cuadrada, rectangular, circular y en patrón en damero, en función de su geometría (Jang y Topal 2018).

Según Basarir et al. (2021), distinguieron entre pilares macizos, escalonados y con aberturas, considerando su configuración estructural. Complementando estas tipologías, Según Naji et al. (2021), señalaron la existencia de pilares regulares, irregulares, escalonados y con aberturas, atendiendo a su forma y disposición, Según Alodan et al. (2022), se enfocaron específicamente en los pilares de carbón presentes en minas subterráneas. Adicionalmente, otros investigadores proponen que las clasificaciones complementarias,

considerando aspectos como la función estructural de los pilares (soporte, seguridad, barrera) y su disposición (individuales, en hilera, en grupo) en el layout de la mina según Kabwe y Wang, (2015); Bieniawski (1992). En conjunto, estas clasificaciones cubren los principales tipos de pilares de mineral reportados en la literatura especializada, brindando una visión integral de las diversas configuraciones empleadas en proyectos de minería subterránea.

El macizo rocoso está constituido por las formaciones geológicas naturales que rodean el área donde se llevan a cabo las actividades mineras subterráneas. Mantener su estabilidad es esencial para asegurar la integridad de las operaciones. Para evaluar dicha estabilidad, se utilizan diversos métodos, entre los cuales destacan los sistemas de clasificación geomecánica como el RMR, desarrollado por Bieniawski en 1989, y el sistema Q propuesto por Barton en 1974. Estos sistemas consideran parámetros como la resistencia de la roca intacta, la orientación y condiciones de las discontinuidades, el índice RQD, y la presencia de agua. La aplicación adecuada de estas herramientas permite definir el tipo y cantidad de sostenimiento necesario para cada condición geológica.

Una vez concluida la explotación principal, se procede a la recuperación de los pilares, con el objetivo de aprovechar el mineral que fue dejado como soporte estructural. Sin embargo, esta actividad conlleva riesgos considerables, ya que puede afectar la estabilidad de las labores subterráneas y aumentar la probabilidad de colapsos, por lo que es fundamental contar con un sistema de sostenimiento bien planificado (De Graaf et al., 2020).

Según Hedayat y Hudyma (2019), desarrollaron un método de modelado numérico para evaluar la estabilidad de pilares de roca en minas subterráneas. Su enfoque permite simular el comportamiento geomecánico de pilares de diferentes formas y dimensiones, optimizando así su diseño y extracción. Según Boshkov y Wright (2021), presentaron una

metodología integrada para la planificación y control de la explotación de pilares en proyectos de minería de carbón. Su propuesta incluye técnicas de monitoreo, análisis de datos y toma de decisiones para garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones.

Según Zhang et al. (2022), estudiaron la influencia de la anisotropía de la roca en la estabilidad de los pilares de mineral. Mediante análisis numéricos y experimentales, establecieron criterios para el diseño de pilares adaptados a las condiciones geológicas específicas de cada yacimiento. Más recientemente, según Karakaş y Özçelik (2023), han explorado el uso de técnicas de inteligencia artificial, como redes neuronales y aprendizaje automático, para predecir el comportamiento y la estabilidad de los pilares de mineral. Esto permite optimizar la toma de decisiones durante la explotación de estos elementos clave en la minería subterránea.

El sostenimiento comprende las diferentes soluciones estructurales y métodos técnicos que se aplican para conservar la estabilidad del macizo rocoso luego de realizar excavaciones. Las alternativas más comunes incluyen el uso de cuadros de madera, pernos, mallas metálicas, concreto proyectado y estructuras metálicas como arcos. La elección del sistema adecuado depende de diversos aspectos, como las características de la roca, la forma de la labor subterránea, el tiempo que estará expuesta y los costos asociados (Singh & Goel, 1999).

El sostenimiento de cuadro de madera en minería subterránea se define como un sistema de soporte estructural que utiliza marcos de madera dispuestos en forma de cuadro para estabilizar las excavaciones y garantizar la seguridad del personal y el equipo. Este método es especialmente útil en terrenos donde las condiciones geológicas permiten el uso

de madera, proporcionando un soporte temporal que puede adaptarse a las variaciones en la presión del terreno según Kaiser et al. (2020)

Los cuadros de madera utilizados con sostenimiento constituyen una técnica tradicional y ampliamente empleada en obras subterráneas, especialmente en minería y túneles, debido a su capacidad para proporcionar soporte estructural temporal o permanente en entornos inestables. Estos cuadros, conformados por marcos de madera ensamblados que se adaptan a la geometría de la excavación, permiten distribuir las cargas del terreno de manera uniforme, reduciendo el riesgo de colapsos y facilitando la seguridad operativa durante el avance de las labores subterráneas. El uso de madera como material principal responde tanto a su disponibilidad como a sus propiedades mecánicas, como su capacidad de absorción de energía y su comportamiento dúctil frente a esfuerzos súbitos, lo que la hace ideal para aplicaciones de sostenimiento en condiciones geotécnicas complejas (Kovári & Fritz, 2005). Sin embargo, su durabilidad puede verse comprometida por factores ambientales como la humedad y la presencia de organismos biodegradadores, lo que ha motivado investigaciones y desarrollos enfocados en tratamientos protectores y en la integración de elementos mixtos con acero o concreto (González de Vallejo & Ferrer, 2011). Desde una perspectiva de diseño, los cuadros de sostenimiento deben dimensionarse en función de parámetros como la presión del terreno, las características del macizo rocoso, el método de excavación y la vida útil esperada de la estructura (Hoek & Brown, 1980). A pesar de la creciente incorporación de sistemas mecanizados y nuevos materiales en la ingeniería subterránea, los cuadros de madera siguen teniendo relevancia en proyectos de bajo presupuesto o en zonas donde se requiere flexibilidad, rapidez de instalación y fácil disponibilidad de recursos locales (Jiménez, 2014). Así, su estudio no solo permite

comprender una técnica con gran valor histórico y práctico, sino también explorar soluciones adaptadas a las necesidades contemporáneas de sostenimiento en obras civiles y mineras.

En las labores de sostenimiento subterráneo, la elección del tipo de madera es crucial para garantizar la estabilidad de las excavaciones, siendo el pino (*Pinus spp.*) una de las especies más utilizadas debido a su bajo costo, disponibilidad y buena resistencia mecánica, con una resistencia a la compresión paralela a las fibras de entre 30 y 50 MPa y una vida útil de 6 a 12 meses en condiciones húmedas sin tratamiento (González de Vallejo & Ferrer, 2011). El eucalipto (*Eucalyptus spp.*), de uso frecuente en regiones tropicales, posee una resistencia a la compresión de 60 a 80 MPa, destacando por su dureza y durabilidad, aunque suele requerir tratamiento para extender su vida útil más allá de un año en ambientes agresivos (Jiménez, 2014). El roble (*Quercus spp.*), aunque menos común por su alto peso y costo, presenta una resistencia superior de hasta 90 MPa y puede mantenerse funcional entre 2 y 3 años en condiciones subterráneas con adecuada protección (Hoek & Brown, 1980). El castaño (*Castanea sativa*), conocido por su resistencia natural a la humedad y a los organismos xilófagos, alcanza resistencias de 50 a 70 MPa y tiene una vida útil cercana a los 24 meses sin necesidad de tratamiento intensivo (Martínez & González, 2009). Por su parte, el abeto (*Abies spp.*) se utiliza en sostenimientos temporales, ya que ofrece una resistencia más baja (25–40 MPa) y una durabilidad limitada a menos de 6 meses sin tratamiento (Kovári & Fritz, 2005). Finalmente, el cedro (*Cedrela spp.*), con una resistencia de 40–60 MPa y buena resistencia a la humedad, puede durar entre 1 y 2 años en condiciones moderadas, siendo valorado por su estabilidad dimensional y resistencia biológica (Jiménez, 2014). La adecuada selección y tratamiento de estas maderas permite optimizar su desempeño en el sostenimiento, equilibrando factores técnicos y económicos según el tipo de obra y las condiciones del terreno.

Según Ataei et al. (2020), el sistema de cuadros de madera sigue siendo ampliamente utilizado en la minería subterránea, especialmente en operaciones de pequeña a mediana escala. Estos investigadores han estudiado el uso de técnicas de aprendizaje automático para optimizar el diseño de estos sistemas de sostenimiento, buscando mejorar su desempeño y seguridad. Por su parte, según Ghasemi et al. (2021) han desarrollado modelos numéricos avanzados para simular el comportamiento de los cuadros de madera bajo diferentes condiciones de carga y deformación del macizo rocoso. Estos modelos permiten evaluar de manera más precisa la capacidad portante y estabilidad del sistema de sostenimiento. Recientemente según Kidybinski y Róžański (2022), han explorado el uso de materiales compuestos como alternativa a la madera tradicional en la construcción de los elementos del sistema de cuadros. Estos nuevos materiales podrían ofrecer mejoras en términos de resistencia, durabilidad y adaptabilidad a las condiciones de la mina.

La mejora de los procesos mineros tiene como objetivo principal aumentar la eficiencia operativa mediante una gestión más efectiva de la planificación, ejecución y supervisión de las tareas. En lo que respecta a la recuperación de pilares, esta optimización busca obtener la mayor cantidad de mineral posible sin poner en riesgo la estabilidad del terreno ni la integridad del personal. Para ello, se aplican enfoques como el Kaizen, el análisis del rendimiento operativo y la gestión de riesgos, los cuales ayudan a detectar ineficiencias, minimizar tiempos improductivos y fortalecer las condiciones de sostenimiento. Todo esto contribuye a mantener un balance adecuado entre productividad y seguridad (Vanek et al, 2015).

En el contexto peruano, las operaciones mineras deben cumplir con lo dispuesto en el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (DS N.º 024-2016-EM), el cual proporciona directrices esenciales para identificar riesgos geomecánicos, aplicar medidas de

sostenimiento y asegurar condiciones seguras en las labores subterráneas. A esto se suman los aportes técnicos de entidades como el Instituto de Seguridad Minera (ISEM) y el INGEMMET, que difunden manuales especializados y buenas prácticas orientadas a fortalecer la seguridad en el desarrollo de las actividades mineras subterráneas (Ministerio de Energía y Minas, 2016).

Los minerales de antimonio tienen gran importancia económica a nivel global. China es el principal productor y proveedor, abarcando alrededor del 80% de la oferta mundial. Los precios internacionales de este metal han experimentado significativas fluctuaciones, relacionadas a factores como la demanda industrial, restricciones en la oferta y especulación financiera. El antimonio tiene aplicaciones clave en diversas industrias como aleaciones, productos ignífugos, baterías y vidrio, lo que genera una demanda sostenida. El comercio internacional involucra a países productores, refinadores y consumidores, siendo los principales flujos comerciales entre China, Estados Unidos, Japón y algunos países europeos. Algunos países han implementado medidas para asegurar el abastecimiento de este mineral estratégico, como reservas nacionales o restricciones a la exportación Baskaran y Schwartz, (2024).

Diversos autores han caracterizado el Valor Actual Neto (VAN) como una herramienta esencial para analizar la viabilidad de proyectos de inversión. Brigham y Houston (2019) establecen que el VAN se determina como "el valor presente de los flujos de efectivo entrantes menos el valor presente de los flujos de efectivo salientes, incluyendo la inversión inicial". Estos autores enfatizan que el VAN es una medida del valor añadido que un proyecto puede generar, lo que lo convierte en un criterio clave para la toma de decisiones de inversión. De manera similar, Bodie et al. (2020) lo definen como "la diferencia entre el valor presente de los flujos de efectivo entrantes y el valor presente de los

flujos de efectivo salientes, incluyendo la inversión inicial". Estos autores también subrayan que el VAN es una métrica que indica el valor añadido de un proyecto, lo que la hace un factor crucial al evaluar oportunidades de inversión.

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es un concepto importante en la evaluación de inversiones. Según Damodaran (2021), la TIR "es la tasa de descuento que hace que el valor presente de los flujos de efectivo entrantes sea igual a la inversión inicial". Este autor señala que esta métrica indica el rendimiento que se puede esperar de la inversión en un proyecto específico. Por otro lado, Bodie y sus colegas (2020) definen la TIR como "la tasa de descuento que iguala el valor presente de los flujos de efectivo entrantes con el valor presente de los flujos de efectivo salientes, incluida la inversión inicial". Estos autores enfatizan que la TIR es una medida de rentabilidad útil para evaluar la viabilidad de un proyecto de inversión, convirtiéndola en un indicador esencial para la toma de decisiones en este ámbito.

En este presente trabajo de investigación lo fundamental es la recuperación de pilares de antimonio a través de la aplicación de un sostenimiento de cuadro de madera es un tema de gran relevancia teórica, metodológica y práctica en el campo de la minería subterránea. Desde una perspectiva teórica, esta investigación permitirá profundizar en el conocimiento sobre las propiedades físico-mecánicas de los pilares de mineral y las técnicas más efectivas para su recuperación, contribuyendo al desarrollo de la ciencia minera. Desde el punto de vista metodológico, este proyecto de investigación se basó en un enfoque integral que combina métodos cuantitativos y cualitativos, incluyendo estudios geológicos, geomecánicos y de estabilidad, así como pruebas de laboratorio y simulaciones numéricas. Todo ello, con el fin de desarrollar un protocolo sistemático y confiable. En el aspecto práctico, tiene el potencial de generar un impacto significativo en la industria minera, optimizando el aprovechamiento de este recurso estratégico. Además, los resultados de este

estudio podrían ser aplicables a otros contextos mineros y materiales, contribuyendo a la sostenibilidad y la competitividad del sector.

1.2. Formulación del problema

¿De qué manera es la optimización de la recuperación de pilares de mineral, mediante el sostenimiento con cuadros de madera en la Minera Chicama Mining – Gran Chimú – La Libertad 2023?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Elaborar la optimización de la recuperación de pilares de mineral, mediante el sostenimiento con cuadros de madera en la Minera Chicama Mining – Gran Chimú – La Libertad 2023

1.3.2. Objetivos específicos

Realizar un diagnóstico situacional de los pilares de mineral en la Unidad Minera Bumerang nivel 887.

Evaluar el sostenimiento con cuadros de madera en la recuperación de pilares de mineral, analizando su aplicabilidad en la Unidad Minera Bumerang nivel 887.

Calcular el rendimiento y la eficiencia operativa de la recuperación de pilares de mineral utilizando el método de sostenimiento con cuadros de madera Unidad Minera Bumerang nivel 887.

Determinar la viabilidad económica de la recuperación de pilares de mineral con sostenimiento de cuadros de madera en la Unidad Minera Bumerang nivel 887.

1.4. Hipótesis

Para el presente trabajo de investigación no se propone elaboración de hipótesis, en vista que se va a realizar un enfoque descriptivo, cuyo propósito no es la comparación de una hipótesis en sí, sino la característica mediante técnicas cualitativas y cuantitativas del objeto de interés de la investigación Hernández et al. (2014).

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, caracterizado por la recolección y análisis de datos numéricos que permiten medir variables y establecer relaciones entre ellas. Este enfoque es fundamental en el contexto de la minería, donde se busca obtener información objetiva y precisa sobre la situación de los pilares con mineral de antimonio en la U.M. Bumerang, nivel 887. A través de métodos estadísticos, se pretende abordar tanto la evaluación de técnicas de sostenimiento como el cálculo de la eficiencia operativa y la viabilidad económica, proporcionando así resultados generalizables y aplicables en la práctica minera según Hernández et al. (2022).

La investigación aplicada es un tipo de estudio que busca resolver problemas específicos mediante la aplicación de conocimientos científicos, dirigidos a adquirir nuevos conocimientos con el fin de solucionar problemas concretos. la investigación aplicada es fundamental para el desarrollo de políticas públicas, la innovación tecnológica y la mejora de procesos en diferentes ámbitos, Frascati (2015).

El presente estudio se desarrolló bajo un nivel descriptivo, ya que se orientó a observar y caracterizar la situación actual del proceso de recuperación de pilares en la unidad minera Chicama Mining. Según Hernández, Fernández y Baptista (2014,p.92), “el nivel descriptivo se orienta a la caracterización de hechos, fenómenos o situaciones, describiendo sus componentes y funcionamiento sin intervenir directamente sobre ellos”.

Según el nivel, es de tipo aplicada, ya que se orienta a resolver un problema concreto en un entorno real de trabajo, como es el caso de la mejora en los procesos de recuperación de pilares en minería subterránea. Este tipo de investigación se fundamenta en conocimientos

teóricos, pero su finalidad es práctica, ya que busca generar soluciones técnicas que optimicen la productividad y la seguridad en la operación minera. Como señalan Hernández, Fernández y Baptista (2014).

El alcance de la investigación es delimitado y operativo, centrado exclusivamente en la etapa de recuperación de pilares remanentes dentro de un sector específico de la mina, donde se han identificado inestabilidades debido a la falta de un sistema adecuado de sostenimiento. El estudio no aborda el diseño integral del método de explotación ni el sostenimiento general de toda la mina, sino únicamente la optimización del proceso de recuperación de mineral mediante la implementación de cuadros de madera. Este tipo de investigación se orienta hacia problemas prácticos y específicos, abordando soluciones técnicas en contextos definidos sin extrapolarlos a poblaciones o sistemas más amplios (Tamayo & Tamayo, 2004, p. 137).

Según el alcance temporal, es de tipo transversal, ya que recolecta datos en un único momento o en un período específico del tiempo, correspondiente al año 2023, con el objetivo de analizar la situación existente respecto al uso del sostenimiento con cuadros de madera y su influencia en la recuperación de pilares. Este tipo de estudio permite describir y explicar relaciones entre variables en un punto determinado, sin hacer seguimiento longitudinal a lo largo del tiempo. De acuerdo con Sampieri, Collado y Lucio (2022).

El diseño experimental fue una estrategia de investigación que permitió establecer relaciones causales entre variables mediante la manipulación de la variable independiente y el control de otras variables que podrían influir en el resultado, según Cohen et. al (2011), señalaron que "El diseño experimental se caracteriza por la asignación aleatoria de sujetos a diferentes grupos, lo que permite controlar las variables extrañas y aumentar la validez

interna del estudio".

La población de esta investigación está compuesta por la U.M. bumerang 887 y tomando un conjunto de los 22 pilares de mineral ubicados en el tajo 323, los cuáles albergan mineral de antimonio. Para el cual se tomó una muestra de 7 pilares de mineral que exhiben una concentración significativamente alta de antimonio. Ésta muestra se eligió para asegurar la representatividad y considerando la accesibilidad a la zona. resalta el interés de la investigación, especificando aquellos pilares (tabla 1), que esta elección de muestra el interés de la investigación por aquellos pilares con mayores contenidos de antimonio.

En esta investigación se empleó la técnica de observación como método principal para la recopilación de datos. Para llevar a cabo esta observación utilizó el instrumento denominado "ficha de observación". Además, se complementó esta la recolección de datos con el informe de análisis de laboratorios y cálculos destinados a determinar las cantidades y costos del mineral valioso. Es importante destacar que, en cuanto a la ficha de observación, no se considera necesaria la validación por parte de expertos, ya que se utilizarán las fichas que la Minera Chicama Mining ha aprobado específicamente para la explotación.

El procedimiento de reinicio de las labores en la U.M. se consideró nuevas instalaciones de infraestructura para el inicio de labores mineras.

Preparación del área de trabajo: Inspección iniciar con todos los equipos de protección personal, verificando la estabilidad del terreno y la ausencia de riesgos como el desprendimiento de rocas o acumulación de gases, procediendo con el desatado de rocas en el tajo 323 y la ventilación adecuada en la labor. Se coloca señales visuales al delimitar el área de trabajo y advertir sobre los riesgos de la zona.

Evaluación y análisis de pilares: se tomaron los 22 pilares para la evaluación de los

cuales 7 pilares resultaron con un indicador favorable en la recuperación de antimonio. Considerando los análisis de laboratorio se decidió la recuperación de dichos pilares.

Se realizó pruebas geomecánicas de las muestras de pilares seleccionados para identificar el comportamiento mecánico del macizo rocoso, siendo así, se empleó las clasificaciones geomecánicas RMR, Q y GSI de Bieniawski (tabla 2 y anexos) para determinar el tipo de roca, luego, se realizó pruebas de resistencia a la compresión para analizar qué tan resistente es la roca y evaluar el tipo de sostenimiento (Tabla 3), en este caso se utilizó sostenimiento por cuadro de madera.

Se empezó a adquirir los equipos, materiales y herramientas necesarios para la operación, los cuales se visualizan en los anexos: costos de recuperación de pilar de mineral de antimonio (preparación, madera, perforación, voladura, mano de obra).

Para la operación se empezó a colocar alrededor de cada pilar 4 puntales de madera de 6 a 8 pulgadas de caja techo a caja piso en forma vertical como pre-sostenimiento, luego, se inició la explotación utilizando la técnica del circado, lo cual consiste en extraer en primer lugar la parte mineralizada, para posteriormente extraer el desmonte, seguido a ello, se tiende a preparar madera para armar dicho cuadro de sostenimiento (poste, sombrero, tirante, solera, encribado), cabe resaltar que este armado de sostenimiento por cuadro de madera se realiza minuciosamente con precisión y medidas exactas que encajen y ejerzan presión en la sección del área de trabajo, por ende, se entiende que a medida que se extraía el mineral, los pilares fueron reemplazados por cuadros de madera que actuaron como sostenimiento, proporcionando el soporte necesario para prevenir colapsos. Esta técnica permitió distribuir las tensiones de manera más uniforme en el terreno, reduciendo así el riesgo de hundimientos y asegurando un entorno de trabajo seguro. Además, se llevó a cabo un monitoreo constante

de las condiciones geológicas para ajustar las operaciones según fuera necesario, lo que garantizó una extracción eficiente y segura del mineral, maximizando la recuperación de antimonio de alta ley. Es importante destacar que este procedimiento se realizó siguiendo las normativas y prácticas de seguridad específicas de la industria minera. Se contó con la supervisión y asesoramiento de profesionales especializados en el diseño y aplicación de métodos de circado y sostenimiento. De esta manera, se garantizó la eficiencia, seguridad y estabilidad en las operaciones mineras.

Al término de la explotación de los 7 pilares, se realizó el carguío y acarreo manual de la materia explotada a los carros mineros, los cuáles son transportados por rieles (vía cauville) hacia la superficie para que el material sea depositado en la parrilla de mineral.

Por consiguiente, el mineral es transportado hacia planta beneficio para su recuperación mineralizada en valor económico.

Luego de ser procesado el mineral obtenemos la frecuencia de la recuperación de antimonio de cada pilar explotado real 53,51 Tn/m (Tabla 5), como también, el balance metalúrgico para verificar el producto de mineral (Tabla 6), y la eficiencia en la producción de mineral de antimonio 14.1% (Tabla 7).

Se procede a calcular los costos totales de la recuperación de pilares en 1 mes, involucrando en el costo total: costo mina, costo planta, costo de transporte, costo de fijos, gastos administrativos, luego, calculamos nuestros Indicadores económicos de recuperación de pilares de mineral de antimonio VAN y TIR.

Finalmente, observamos cuál fue nuestra recuperación del antimonio, en valor económico (Anexo 4).

Los datos obtenidos de la experimentación fueron analizados con estadísticos

descriptivos, donde se utilizó los softwares Excel para llevar a cabo cálculos estadísticos variados y presentar los resultados de manera más comprensible, a través de tablas y gráficos. Esto se realizó con el propósito de facilitar la interpretación de los resultados, los cuales se documentaron en Microsoft Word.

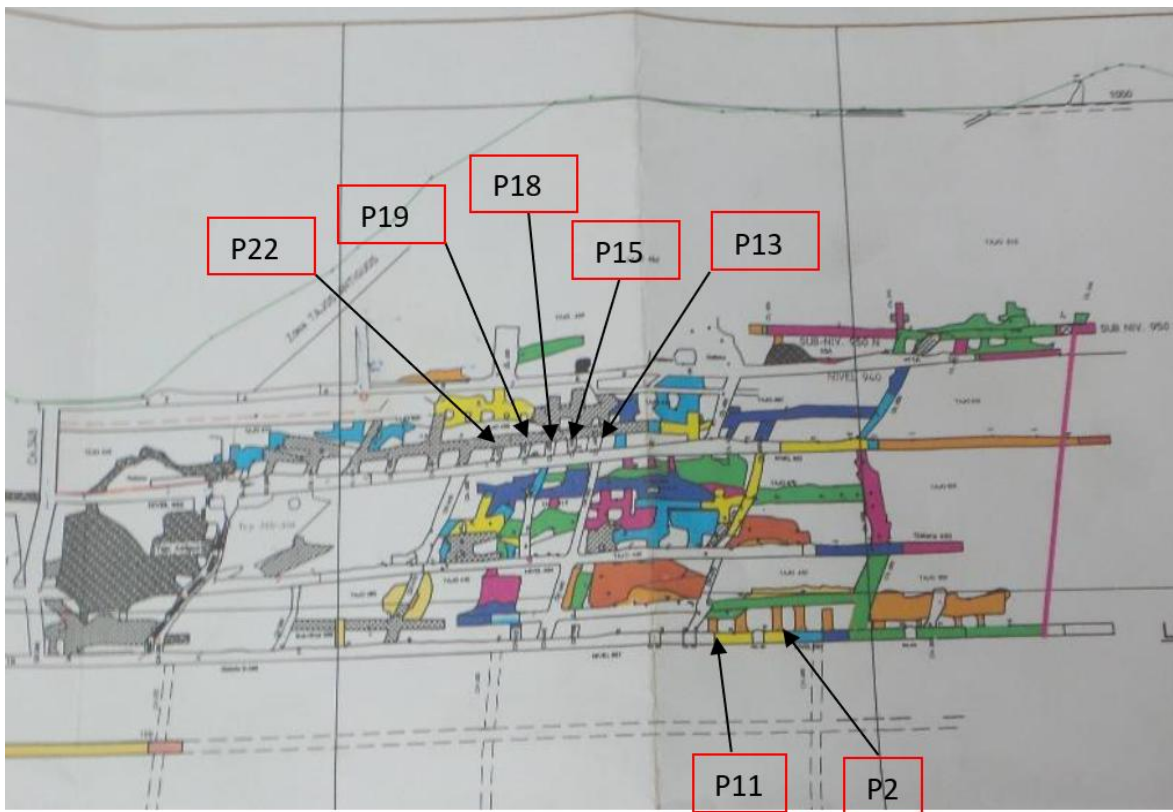
La presente investigación ha sido desarrollada respetando los principios fundamentales de ética profesional y responsabilidad social. En primer lugar, se garantizó la confidencialidad de la información proporcionada por la empresa minera, no divulgando datos sensibles ni estratégicos relacionados con operaciones, reservas o aspectos económicos. Asimismo, se obtuvo el permiso expreso por parte de los responsables de la unidad minera Chicama Mining para realizar observaciones in situ, entrevistas técnicas y recopilación de datos operacionales, respetando en todo momento los protocolos de seguridad industrial y salud ocupacional establecidos por la normativa vigente (DS N.º 024-2016-EM). No se realizó ningún tipo de experimento que pusiera en riesgo la integridad física de las personas ni del entorno. Las propuestas de mejora presentadas en esta investigación tienen como objetivo optimizar procesos bajo condiciones seguras y sostenibles, sin comprometer la estabilidad del macizo rocoso ni el ecosistema adyacente. Finalmente, el trabajo ha sido elaborado de forma honesta, autónoma y libre de conflictos de intereses, cumpliendo con los estándares académicos de integridad y evitando cualquier tipo de plagio o manipulación de datos.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

La población de esta investigación está compuesta por 22 pilares de mineral ubicados en el tajo 323 en la Unidad minera Bumerang 887, los cuales albergan vetillas de mineral de antimonio. Para el cual se tomó 7 pilares de mineral que exhiben una concentración significativamente alta de antimonio.

Figura 1

Ubicación de 7 pilares de mineral explotados



Nota. Se puede apreciar los pilares de la Unidad Minera Bumerang 887, los pilares marcados son los pilares recuperados.

Tabla 1

Leyes de mineral de antimonio de los 7 pilares recuperados

Pilares	Ley de mineral de antimonio (% Sb)
P2	12,60
P11	15,69
P13	18,78
P15	13,14
P18	17,15
P19	24,51
P22	8,79

Nota. Resultados de análisis mineral en los 7 pilares de la unidad minera Bumerang Se evaluó la técnica de sostenimiento con cuadros de madera en la recuperación de pilares de mineral, analizando su aplicabilidad en la bocamina Bumerang 887.

Tabla 2

Mapeo geomecánica de los pilares de la unidad minera bumerang 887

Macizo	RMR	GSI	Q	Tipo de roca
rocoso				
Pilares	41	47	10,63	III Buena

Nota. Datos extraídos del formato de mapeo geomecánicos de RMR, GSI y Q (Bieniawski, 1992).

Tabla 3

Determinación de la resistencia compresión de los pilares de la Unidad M. Bumerang 887

Pilares	K	S1 (Kpa)	Sn(Kpa)	Sp(Kpa)	F	Tr (%)
P2	20124,61	22008,54	49739,31	18644,89	2,67	0,67
P11	20124,61	22008,54	109162,37	12815,94	8,52	0,51
p13	20124,61	22008,54	164623,90	20693,78	7,96	0,70
P15	20124,61	22008,54	24649,57	76309,54	0,32	0,92
P18	20124,61	22008,54	82752,12	17318,96	4,78	0,64
P19	20124,61	22008,54	37854,69	42374,96	0,89	0,85
P22	20124,61	22008,54	51720,08	15154,4	3,41	0,59

Nota. En los cálculos se aplicaron las ecuaciones de Bieniawski

Tabla 4

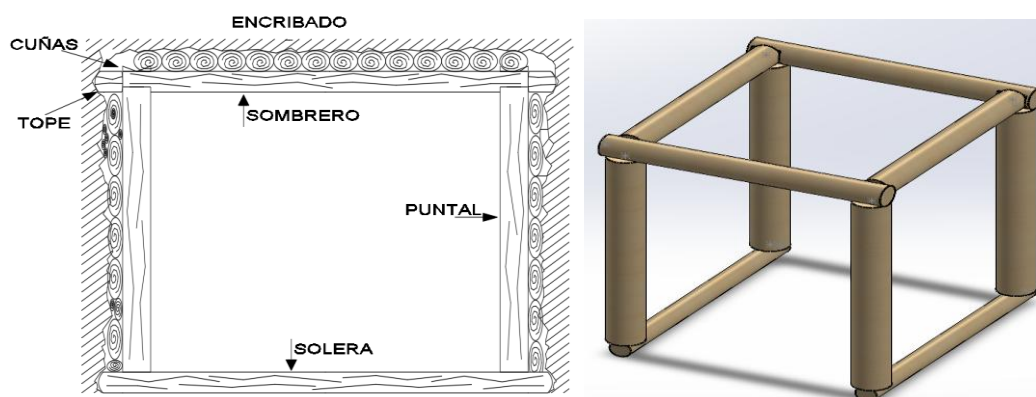
Cantidad de madera para los cuadros en la Unidad Minera Bumerang 887

Madera	Diámetro (pulg)	Longitud (m.)	Cantidad
Poste	10	3	30
Sombrero	8	3	15
Tirante	8	3	15
Solera	6	3	15
Encribado	4	3	30

Nota. datos obtenidos de la Unidad Minera Bumerang

Figura 2

Sostenimiento por cuadro de madera



Nota. La eficiencia operativa de la recuperación de pilares de mineral utilizando el método de sostenimiento con cuadros de madera en la Unidad Minera Bumerang 887.

Tabla 5

Frecuencia de la recuperación de antimonio de cada pilar explotado real

Pilar	Mineral (Tn/m)	Porcentaje %
P2	9,91	18,5
P11	13,39	25

P13	2,326	4,3
P15	0,85	1,6
P18	5,46	10,2
P19	6,804	12,7
P22	14,774	27,6
Total	53,51	100

Nota. Datos registrado y calculado por los autores de la explotación de pilares en la unidad minera bumerang (2023)

Tabla 6

Balance metalúrgico de la recuperación de mineral antimonio

PRODUCTO	TMS	Ley	Peso (t)	% R
Cabeza	53,51	15,8	8,45	100
Concentrado	12,76	58,3	7,54	87,19
Relave	40,75	2,65	0,91	12,81

Nota. Cálculo realizado por los autores (2023)

Tabla 7

Eficiencia en la producción de mineral de antimonio

Total, de producción bruta (TM)	Total de antimonio recuperado (TM)	Eficiencia (%)
53,51	7,54	14,1%

Nota. datos tomados de balance metalúrgico para calcular la eficiencia

Viabilidad económica de la recuperación de pilares de mineral con sostenimiento de cuadros de madera en la Unidad Minera Bumerang 887

Tabla 8

Costos totales de la recuperación de pilares con antimonio en un mes

Descripción	costos unitarios (\$)	Producción mineral TM	total \$
Costos mina	162.40	53.51	8690.02
Costos planta	45.00	53.51	2407.95
Costo de transporte	25.40	53.51	1359.15
costo de fijos	121.00	53.51	6474.71
Gastos administrativos	43.00	53.51	2300.93
Total			21232.77

Nota. Los costos unitarios fueron proporcionados por la Unidad Minera Bumerang 887

Tabla 9

Indicadores económicos de recuperación de pilares de mineral de antimonio TIR y VAN

Indicadores	Valores
VAN	\$ 22,528.79
TIR	57%

Nota: se usaron los datos de la tabla de costos totales y una proyección a 4 meses con un 12% de tasa de recuperación

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

DISCUSIÓN

La evaluación de la optimización en la recuperación de pilares de mineral, mediante el sostenimiento con cuadros de madera en la Minera Chicama Mining – Gran Chimú – La Libertad 2023, se sustenta en el análisis de indicadores económicos clave como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), los cuales alcanzaron valores de \$22,528.79 y 57%, respectivamente, demostrando la viabilidad financiera del proyecto. Estos hallazgos se alinean con lo indicado por Manrique y Branco (2021), quienes resaltaron que la implementación de cuadros de madera como método de sostenimiento en la recuperación de pilares de oro permitió alcanzar un VAN de US\$132,860 y una TIR del 528%, confirmando la rentabilidad y viabilidad del proyecto. Asimismo, los resultados del presente estudio refuerzan lo señalado por Gutiérrez y Gutiérrez (2020), quienes, al aplicar el método de circado y relleno en pasta de cemento, lograron una tasa de recuperación del 80% y beneficios económicos diarios significativos, destacando la importancia de una planificación técnica y económica integral. En la misma línea, Huaranga (2020) evidenció que una adecuada evaluación técnico-económica permitió recuperar más de US\$1.5 millones en pilares con ley media, ratificando que la rentabilidad no depende exclusivamente de una alta eficiencia metalúrgica, sino de una combinación de factores operacionales y financieros. De igual forma, lo expuesto por Baldwin y Johnson (2021), en cuanto a la necesidad de implementar tecnologías avanzadas para garantizar la seguridad y eficiencia en la recuperación de pilares, coincide con el enfoque de este trabajo al utilizar cuadros de madera con monitoreo geomecánico constante para reducir riesgos. Por tanto, los resultados de esta

investigación coinciden con los aportes de los autores revisados en el Capítulo I, al resaltar que la viabilidad técnica y económica son factores interdependientes, y que su análisis conjunto es esencial para tomar decisiones responsables y sostenibles en contextos de recuperación minera subterránea.

Una de las principales limitaciones enfrentadas durante la elaboración de la presente tesis fue el acceso restringido a determinados sectores operativos de la Unidad Minera Bumerang 887, lo cual condicionó la selección de los pilares a evaluar únicamente a aquellos que presentaban condiciones de accesibilidad y seguridad adecuadas, reduciendo la muestra a siete pilares de los veintidós disponibles en el tajo 323. Asimismo, la disponibilidad económica para llevar a cabo las actividades propuestas dependía exclusivamente del presupuesto asignado por la propia unidad minera, lo que limitó la escala de implementación del sostenimiento con cuadros de madera y restringió el tiempo operativo del estudio. En cuanto a la precisión de algunos datos geomecánico y económicos proporcionados por la empresa, estos se basaron en registros internos y estimaciones previas, por lo que no siempre fue posible contrastarlos con datos experimentales más detallados. Además, las condiciones operativas propias del entorno minero, como la inestabilidad del terreno, la ventilación limitada y la exposición a ambientes húmedos, representaron desafíos constantes que exigieron ajustes en el cronograma y en la metodología planificada. No obstante, estas limitaciones fueron superadas mediante una planificación estratégica de los recursos disponibles, el uso de herramientas de análisis técnico y económico validadas en minería, y una coordinación continua con el personal de la unidad minera, lo que permitió adaptar el estudio a las condiciones reales del entorno y asegurar la validez de los resultados obtenidos.

Las implicancias de la presente investigación son operativas, lo que implementa mejoras significativas para el desarrollo de prácticas más eficientes y sostenibles en la

minería subterránea, particularmente en la recuperación de pilares de mineral mediante el uso de sostenimiento con cuadros de madera. Los resultados obtenidos no solo confirman la viabilidad técnica y económica de esta metodología, sino que también abren la posibilidad de replicar y escalar este enfoque en otras unidades mineras con condiciones geomecánicas similares. Además, el estudio aporta una base técnica que puede ser utilizada para el diseño de protocolos estandarizados de recuperación de pilares, optimizando el uso de recursos y mejorando la seguridad en operaciones futuras. Esta investigación también sugiere la necesidad de incorporar tecnologías de monitoreo geotécnico y análisis predictivo, lo que permitirá una mayor precisión en la toma de decisiones operativas. En el ámbito académico, los hallazgos pueden servir como referencia para futuras investigaciones orientadas al desarrollo de nuevos materiales de sostenimiento o a la evaluación comparativa entre diferentes métodos de explotación de pilares, contribuyendo así al avance del conocimiento en ingeniería de minas y a la mejora continua del sector

Conclusiones

El diagnóstico de los pilares de mineral de antimonio en la Unidad Minera Bumerang 887 evidenció concentraciones significativas de este recurso, con leyes que oscilan entre 8,79% y 24,51%. Los pilares P19 y P13 destacaron por su alto potencial, con leyes de 24,51% y 18,78% respectivamente, mientras que la mayoría de los pilares analizados presentaron leyes superiores al 10%.

En cuanto a la resistencia de los pilares, se identificó parámetros constantes pero una variabilidad en el factor de seguridad (F), lo que subraya la necesidad de realizar estudios individualizados. Los pilares recuperados fueron reemplazados por un sistema de sostenimiento con cuadros de madera, que garantizó la adecuada resistencia y estabilidad

para preservar la integridad de la estructura minera. Este enfoque optimizó las estrategias de extracción y minimizó los riesgos operativos.

Desde el punto de vista metalúrgico, se logró una alta eficiencia en la recuperación del antimonio (87,19%). Sin embargo, el relave aún contiene una proporción significativa del mineral (2,65%), lo que plantea posibilidades de mejora en los procesos. Actualmente, solo se ha recuperado el 14,1% de la producción total del antimonio, representando un desafío crítico para la planificación y control de la explotación.

El análisis financiero del proyecto de recuperación de pilares mostró resultados alentadores, con un valor actual neto (VAN) de \$22,528.79 y una tasa interna de retorno (TIR) del 57%, lo que confirma su elevado potencial de rentabilidad.

En conclusión, se acepta la estrategia de optimización para la recuperación de pilares de mineral mediante el sostenimiento con cuadros de madera, planteada en la minera Chicama Mining – Gran Chimú – La Libertad 2023, como un enfoque clave para garantizar la sostenibilidad del proyecto y la certidumbre en la recuperación del capital durante su ejecución.

REFERENCIAS

- Alodan, H. I., Aljuhani, Y. A., & Alqahtani, F. A. (2022). Reliability-based design optimization of coal pillars in underground coal mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(1), 163-177. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.06.007> (Consultado 13 Agosto del 2024)
- Ataei, M., Khalokakaie, R., Hossieni, M., & Aalaei, A. (2020). Optimization of timber sets support design in underground mines using machine learning techniques. *Journal of Mining and Environment*, 11(1), 83-94. <https://doi.org/10.22044/jme.2019.8776.1793> (Consultado 01 Agosto del 2024)
- Baldwin, A., y Johnson, B. (2021). Evaluación de la seguridad y eficiencia en la recuperación de pilares en la minería de carbón en los Apalaches. *Journal of Appalachian Mining Safety*, 15(3), 123-130. (Consultado 13 Agosto del 2024)
- Barton, N. (1974). *Rock characterization, testing and monitoring (Vol. 1: Rock Quality, Tunnel Support and Field Stress Determination)*. Norwegian Geotechnical Institute.
- Basarir, H., Tutluoglu, L., & Karpuz, C. (2021). Stability analysis of irregular coal pillars in underground coal mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 31(2), 355-368. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.12.010> (Consultado 3 Agosto del 2024)
- Baskaran, G., & Schwartz, M. (2024). China's antimony export restrictions: The impact on U.S. national security. Center for Strategic and International Studies. <https://www.csis.org/analysis/chinas-antimony-export-restrictions-impact-us-national-security> [Fecha de revisión: 3 de enero de 2025]
- Bieniawski, Z. T. (1992). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers*. Wiley. Recuperado el 2 de marzo de 2025, de [https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=pejDUvjwPdMC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Bieniawski,+Z.+T.+\(1992\).+Engineering+rock+mass+classifications.+Wiley](https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=pejDUvjwPdMC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Bieniawski,+Z.+T.+(1992).+Engineering+rock+mass+classifications.+Wiley) (Consultado 13 noviembre del 2024)
- Brigham, E. F., & Houston, J. F. (2019). *Fundamentals of financial management (15th ed.)*. Boston, MA: Cengage Learning. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Boshkov, S. H., & Wright, F. D. (2021). Integrated approach to pillar planning and control in coal mining. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 35(5), 325-342. <https://doi.org/10.1080/17480930.2021.1874130> (Consultado 13 noviembre del 2024)
- Bodie, Z., Kane, A., & Marcus, A. J. (2020). *Investments* (12th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004> (Consultado 13 noviembre del 2024)
- Damodaran, A. (2021). *Corporate finance: Theory and practice* (4th ed.). Hoboken, NJ: Wiley. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004> (Consultado 7 noviembre del 2024).
- De Graaf, J., Smith, R., & Thomas, E. (2020). Risk management in pillar recovery. *International Journal of Mining Science*, 45(3), 230–249.
- Ghasemi, E., Ataei, M., & Khalokakaie, R. (2021). Numerical modeling of timber sets support in underground mines. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(5), 3697-3713. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02196-5> (Consultado 9 noviembre del 2024)
- González de Vallejo, L. I., & Ferrer, M. (2011). *Geotecnia: fundamentos e investigaciones*. Madrid: Ediciones UPC
- Gutiérrez J. y Gutiérrez W. (2019). *Recuperación de pilares, rellenos antiguos y mineral con el método de perforación por taladros largos en la unidad operativa arcata – vía minera ares* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano] <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/12397> (Consultado 6 noviembre del 2024)
- Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). *Introductory mining engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Hernández-Sampieri, R. & Mendoza, C (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*, Ciudad de México, México: Editorial Mc Graw Hill: ISBN: 978-1-4562-6096-5, 714 p. (Consultado 13 diciembre del 2024)

- Huaranga B. (2020). Evaluación económica de la recuperación de pilares de mineral en la explotación de la veta Cabana – nivel 3125 de Minera Aurífera Retamas S. A.
<https://hdl.handle.net/20.500.12394/8733> . (Consultado 13 diciembre del 2024)
- Hedayat, A., & Hudyma, M. (2019). Numerical evaluation of the stability of rock pillars in underground mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(2), 361-374. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.11.002> . (Consultado 13 diciembre del 2024)
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). *Underground excavations in rock*. London: Institution of Mining and Metallurgy.
- Instituto de Ingenieros de Minas del Perú [IIMP]. (2022, 5 de diciembre). El Brocal proyecta recuperar más de 500 mil toneladas de cobre de alta ley con sistema de perforación Wassara. <https://iimp.org.pe/noticias/el-brocal-proyecta-recuperar-mas-de-500-mil-toneladas-de-cobre-de-alta-ley-con-sistema-de-perforacion-wassara> . (Consultado 5 diciembre del 2024)
- Jang, H., & Topal, E. (2018). A novel approach using decision trees to predict coal pillar stability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 106, 74-83. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.04.004> . (Consultado 13 diciembre del 2024)
- Jiménez, R. (2014). *Túneles: diseño y construcción*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Karakaş, A., & Özçelik, Y. (2023). Predicting the stability of coal pillars in underground coal mines using artificial intelligence techniques. *Journal of Sustainable Mining*, 22(1), 37-48. <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1359> . (Consultado 13 diciembre del 2024)
- Kaiser, P. K., et al. (2020). Risk management in underground mining. *Mining Engineering*, 72(6), 1-6. <https://www.smenet.org/> [Fecha de revisión: 5 de enero de 2025]
- Kabwe, E., & Wang, Y. (2015). Review on rockburst theory and types of rock support in rockburst prone mines. *Open Journal of Safety Science and Technology*, 5(4), 104-121. <https://doi.org/10.4236/ojsst.2015.54013> . (Consultado 30 diciembre del 2024)

- Kidybinski, A., & Rózański, Z. (2022). Composite materials as an alternative to wood in timber sets for underground mines. *Sustainability*, 14(4), 2151. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14042151> . (Consultado 12 diciembre del 2024)
- Kovári, K., & Fritz, P. (2005). Timber supports in underground excavations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(6), 583–591. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.04.004>
- Manrique, T. y Branco, L. (2021). Recuperación de pilares con cuadros de madera como elemento de sostenimiento en labor minera Galería Chapi – nivel 2310 - veta La Raja unidad minera El Solitario S.A.C. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Agustín Arequipa] <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/3e9a18b7-ad0c-4a03-b02d-8b4de1515df6> . (Consultado 5 diciembre del 2024)
- Martínez, J., & González, M. (2009). *Propiedades físicas y mecánicas de maderas empleadas en minería subterránea*. *Revista de Ingeniería Geotécnica*, 25(2), 89–97
- Ministerio de Energía y Minas. (2016). Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (DS N.º 024-2016-EM). Lima, Perú: Gobierno del Perú. Recuperado de <https://www.gob.pe/minem>
- Naji, A. M., Almahayni, T., & Basarir, H. (2021). Determination of the optimum shape and dimensions of pillars in underground mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(4), 807-817. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.003> . (Consultado 4 diciembre del 2024)
- Tamayo y Tamayo, M. (2004). El proceso de la investigación científica (5.ª ed.). Editorial Limusa.
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, M. P. B. (2022). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta (7.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Singh, B., & Goel, R. K. (1999). *Rock mass classification: A practical approach in civil engineering*. Elsevier.
- Vanek, et al (2015). Continuous improvement management for mining companies. *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(1), 119–123. <https://doi.org/10.17159/2225-6253/2015/v115n1a9>

Zhang, Y., Zhao, T., Xu, W., & Tang, C. (2022). Effects of rock anisotropy on the stability of rock pillars in underground mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 149, 104963. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.104963> .
(Consultado 13 diciembre del 2024)

ANEXOS

Imágenes de preparación y armado de cuadro de madera

Anexo 1

Acondicionando la madera para la fabricación de los cuadros



Anexo 2

Preparando las maderas para sostenimiento



Anexo 3

Instalando los cuadros de madera como sostenimiento



Nota. Fotografías tomadas de los autores

Mapeo geo mecánicos

Anexo 4

Formato de mapeo geomecánicos RMR y GSI

FORMATO DE MAPEO GEOMECANICO RMR, Q y GSI										ESTACION	
Nombre del Proyecto: PROYECTO BUMEORANG										E-1	
Nivel: 887										Litología: SLICEA	
Labor: TS-145										Altura (teórica) (h): 254	
Ejecutado por: LUDENA GUILLERMO FRANCISCO BARRAL										Rc / Sv: 7.83	
Fecha: 15 / 05 / 22										RQD (%): 79.1	
SISTEMA RMR										DONDE: $RQD = 100 \times e^{-0.075J} (0.12 + 1)$	
PARAMETROS										MARTILLO SCHMIDT (INDICE DE REBOTE)	
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa): 98										A B C D PROMEDIO	
RQD (%): 85%										32 34 37 40 35.75	
Especificamiento de discontinuidades (cm): 80 cm										38 33 39 37 36.75	
CONDICION DE DISCONTINUIDADES										35 37 36 38 36.5	
Familia										39 34 37 36 37	
Buza										D	
ID. Buza										SISTEMA DE DIACLASA	
f/m										Fm	
Persistencia										C	
Abertura										CONTACTO	
Rugosidad										MICRO FALLA	
Relleño										UCS	
Alteración										RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE	
Agua subterránea										ESFUERZO VERTICAL	
Orientación										RESISTENCIA DE LA ROCA	
RMR _B (Basico) = 48										Sv=0.027*h	
RMR _C (Corregido) = 41										Donde: h=Altura litostática	
RMR _S (Condiciones Secas) = 49										Sv= Esfuerzo Vertical	
CONDICIONES SECAS										0.027*Constante Universal	
JRC (BAYTON BAYTON)										SKETCH	
SISTEMA DE CLARIFICACION Q											
PARAMETROS											
RQD %										RANGO VALOR	
Número de discontinuidades										RQD 85 % 85	
Número de rugosidad										Jn 4D 10	
Número de alteración										Jr Liquidosa 3	
Número de agua subterránea										Ja Liq. Entempe. 3	
Factor de reducción de esfuerzos (estado tensional)										Jw Humedo 1	
Q = (RQD/Jn) x (Ja/Jr) x (Jw/SRF)										SRF Fract. fluida 2	
Q = 10.63										Q = 10.63	
Q = 21.25										Q = 21.25	
RMR = 9 Ln Q + 44										RMR = 66	
RMR = 9 Ln Q + 44										RMR = 74	
DESCRIPCION										DESCRIPCION	
EXCEPCIONALMENTE BUENA										EXCEPCIONALMENTE BUENA	
EXTRAMODERAMENTE BUENA										EXTRAMODERAMENTE BUENA	
MUY BUENA										MUY BUENA	
BUENA										BUENA	
REGULAR										REGULAR	
POBRE										POBRE	
MUY POBRE										MUY POBRE	
EXTRAMODERAMENTE POBRE										EXTRAMODERAMENTE POBRE	
EXCEPCIONALMENTE POBRE										EXCEPCIONALMENTE POBRE	
INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA										GSI = RMR _S - 9 40	
TABLA GEOMECANICA (GSI)										VALORES SIMILAR	
GSI										RMR	
43										41-40	
10.63										10.63	
OBSERVACIONES										GSI	
NINGUNA										47R	

Costos de explotación

Anexo 5

Costos de recuperación de pilar de mineral de antimonio: Preparación, Madera, Perforación y voladura.

CANT	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO	TOTAL	
1	azuela herragro	45	45	
1	serrucho corvina marca jupiter	190	190	
1	barreta hexagonal 1.20M	35	35	
1	barreta lisa hexagonal 1.50M	40	40	
1	barreta hexagonal 1.80M	48	48	
2	palana cuchara tramontina	25	50	
2	carretilla oro	190	380	
1	comba de 6 lb	45	45	
1	comba de 12 lb	85	85	
2	punta corrugada 3/4	6	12	
			930	250.67

CANT	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO	cantidad	TOTAL
30	postes de 3 metros x 4" en base	7	30	210
14	postes de 3 metros x 6" en base	20	15	300
14	postes de 3 metros x 8" en base	90	30	2700
20	postes de 3 metros x 10" en base	120	30	3600
30	tablas de eucalipto de 8x8x2"	60	30	1800
			8610	2320.75

CANT	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO	TOTAL	
1	rotomartillo makita a batería SDS MAX HR5212-19	6500	6500	
5	juego de brocas dewalt 40 mm y 80 mm	680	3400	
			9900	2668.46

CANT	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO	TOTAL	
1	Caja dinamita famesa semigelatina 65	1200	1200	
1	Caja mecha de seguridad – famesa	1500	1500	
4	Caja fulminante común – famesa	150	600	
2	Saco nitrato de amonio estabilizado	265	530	
2	Galón petróleo	21	42	
			3872	1043.67

Anexo 6

Costos de mano de obra de las operaciones

Mano de obra	\$/dia	total
Ayudantes	28.66	859.87
Maestro	32.35	970.35
Total		1830.22

Descripcion	Costo Unitario	Produccion Minera	Total
Costo Mina	162.4	53.51	8690.02
costo planta	45	53.51	2407.95
Costo de transporte	25.4	53.51	1359.15
costos fijos	121	53.51	6474.71
gastaos administrativos	43	53.51	2300.93
Total			21232.77

$$TIR = \sum_{T=0}^n \frac{Fn}{(1+i)^n} = 0$$

Fn= Flujo de efectivo anual
n= vida útil del proyecto

$$VAN = \sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{(1+TIR)^n} - I = 0$$

Donde:

Q_n = es el flujo de caja en el periodo n.

n = es el número de periodos.

I = es el valor de la inversión inicial

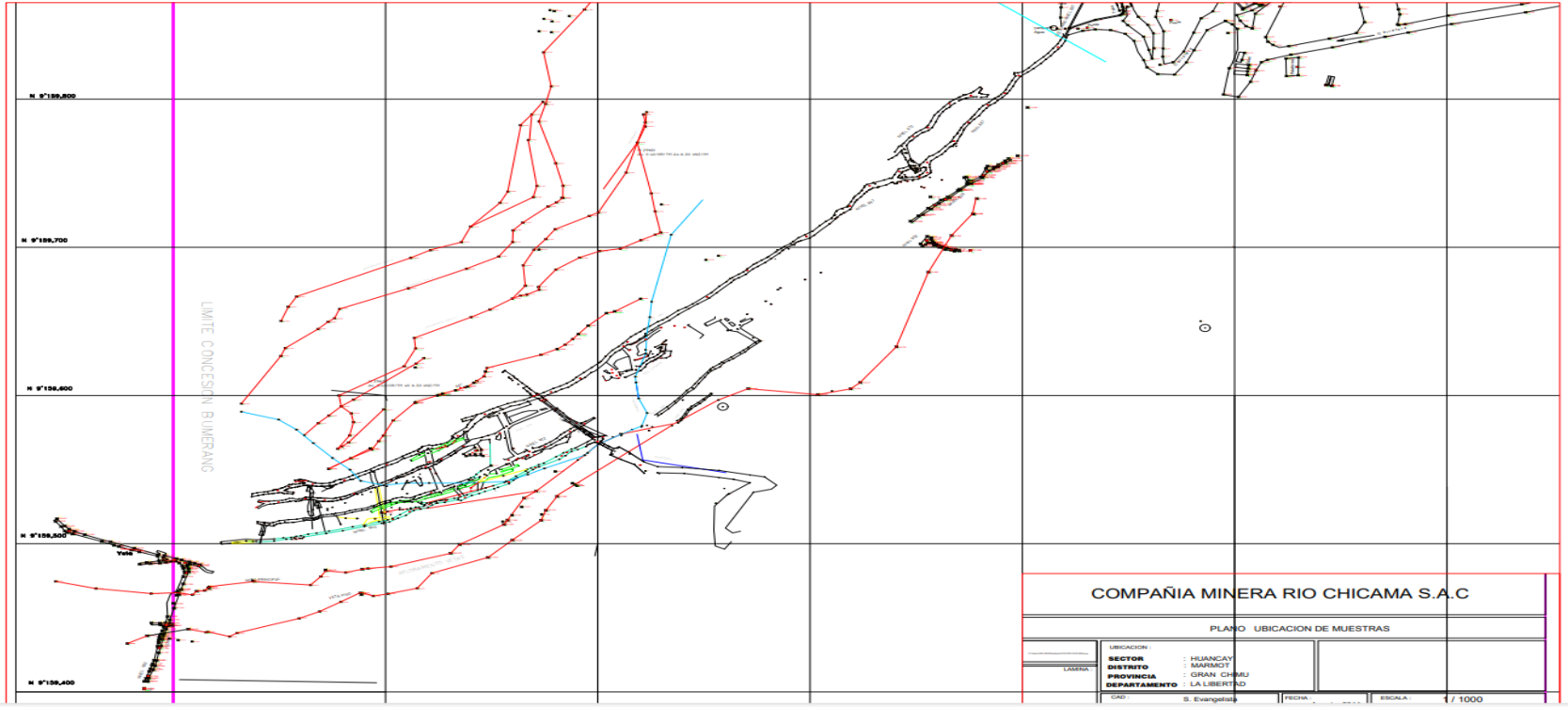
Anexo 7

Evaluación económica: Determinación del VAN y el TIR de la recuperación de pilares, mediante el sostenimiento de cuadros de madera de la Unidad minera

	0	1	2	3	4
INGRESOS	0	35640.5814	35640.5814	35640.5814	35640.5814
Produccion		7.5366	7.5366	7.5366	7.5366
Valor del mineral		4729	4729	4729	4729
EGRESOS	21232.77	21232.77	21232.77	21232.77	21232.77
Costo mina		8690.02	8690.024	8690.024	8690.024
Costo planta		2407.95	2407.95	2407.95	2407.95
Costo trsporte		1359.15	1359.154	1359.154	1359.154
Costos fijos		6474.71	6474.71	6474.71	6474.71
Gastos administrativos		2300.93	2300.93	2300.93	2300.93
Flujo de caja	-21232.77	14407.81	14407.81	14407.81	14407.81
VAN	\$22,528.79	=VNA(0.12;I12:L12)+(H12)		VAN>0 Proyecto aceptable	
TIR	57%	=TIR(H12:L12)		TIR> i Proyecto aceptable	

Anexo 8

Plano de la mina



Nota: Plano de ubicación de muestra proporcionada por la unidad minera bumerang. (2023)