Universidad Continental

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

Recuperación de minerales opacos mediante microscopia óptica en unarelavera del centro del Perú por análisis mineralógico

Fitgerald Jhoel Alexis Ramos Gallegos
Roberto Gabriel Quiñones Davalos

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero de Minas

Huancayo, 2025

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital

Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

Universidad Continental

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A	:	Decano de la Facultad de Ingeniería
DE	:	Nelida Tantavilca Martinez Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO	:	Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA	:	28 de mayo de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

Recuperación de minerales opacos mediante microscopia óptica en una relavera del centro del Perú por análisis mineralógico

Autor:

Fitgerald Jhoel Alexis Ramos Gallegos – EAP. Ingeniería de Minas
Roberto Gabriel Quiñones Davalos -EAP. Ingeniería de Minas

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 14 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía — SI [x] NO [ ]
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores — SI [ ] NO [x]
  N° de palabras excluidas **(en caso de elegir "SI")**:
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante — SI [ ] NO [x]

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original
(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar expresando mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, con su apoyo y dedicación, han hecho posible la realización de esta tesis.

A mis padres, quienes, con su amor incondicional y su constante apoyo, me han enseñado la importancia de perseverar ante los desafíos. Gracias por creer en mí y por ser mi mayor fuente de inspiración.

A mi director de tesis, ingeniera Nélida Tanta Vilca, por su orientación, paciencia y sabiduría. Su dedicación y visión han sido esenciales para llevar a cabo este proyecto. Gracias por confiar en mí y por siempre estar dispuesto ayudarme a superar cualquier obstáculo.

A mis amigos y compañeros de la carrera, quienes me brindaron su apoyo tanto académico como emocional. Gracias por compartir ideas, dudas y risas durante todo este proceso. Su presencia ha sido un aliento constante en los momentos de incertidumbre.

A mi padre y hermanos quienes, con su ejemplo de trabajo y compromiso, me motivó a nunca rendirme y a seguir adelante cuando las cosas se ponían difíciles.

A todos los que de alguna manera contribuyeron a mi formación y crecimiento personal y académico. Cada uno de ustedes, con sus gestos de apoyo y palabras de aliento, ha dejado una huella importante en mi vida.

Finalmente, agradezco a la vida por darme la oportunidad de estar aquí, de aprender, de crecer y de compartir este logro con quienes me rodean. Sin todos ustedes, este proyecto no habría sido lo mismo.

Gracias infinitas.

DEDICATORIA

A Dios, por darme la vida y guiarme a lo largo de este camino. A mi madre, por su amor y apoyo incondicional. A mi padre, cuya sabiduría y principios siempre me han acompañado, aunque la distancia física nos haya separado. A mis hermanos, por su constante apoyo y motivación en cada paso de este proceso.

A mi esposa, por ser mi compañera de vida, mi fuente de fortaleza y por creer en mí cuando más lo necesitaba. Este logro es también tuyo, ya que siempre has estado a mi lado.

Finalmente, a la universidad y a todos los que han sido parte de este camino, los llevo en el corazón y les agradezco profundamente.

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo principal evaluar la recuperación de minerales opacos, específicamente calcopirita y esfalerita, mediante el uso de microscopía óptica en la relavera de la minera Cielo Azul S.A.C., ubicada en Arequipa. La investigación se basa en la necesidad de optimizar el aprovechamiento de minerales valiosos contenidos en relaves, los cuales representan una fuente secundaria de recursos metálicos. Para ello, se empleó una metodología analítica mineralógica utilizando microscopía óptica en muestras representativas recolectadas de distintos sectores de la relavera. Los resultados obtenidos permitirán caracterizar las especies minerales presentes, su asociación mineralógica, tamaño de grano y estado de liberación, brindando datos esenciales para plantear procesos de recuperación metalúrgica eficientes. Este trabajo contribuye al conocimiento sobre la valorización de residuos mineros, impulsando prácticas sostenibles en la industria extractiva.

Palabras clave: recuperación, microscopía óptica, minerales opacos, relavera, calcopirita, esfalerita.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the recovery of opaque minerals, specifically chalcopyrite and sphalerite, through optical microscopy in the tailings dam of the Cielo Azul S.A.C. mining company, located in Arequipa. The research responds to the need to optimize the use of valuable minerals found in tailings, which represent a secondary source of metal resources. A mineralogical analysis methodology using optical microscopy was applied to representative samples collected from different sectors of the tailings deposit. The obtained results will allow the characterization of present mineral species, their mineralogical associations, grain size, and liberation state, providing essential data to propose efficient metallurgical recovery processes. This work contributes to the understanding of mining waste valorization, promoting sustainable practices in the extractive industry.

Keywords: recovery, optical microscopy, opaque minerals, tailings dam, chalcopyrite, sphalerite.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS ii
DEDICATORIA iii
RESUMEN iv
ABSTRACT v
ÍNDICE DE TABLAS viii
INTRODUCCIÓN ix
CAPÍTULO I 1
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO 1
1.1 Planteamiento del problema 1
1.2 Formulación del problema 2
1.2.1 Problema general 2
1.2.2 Problemas específicos 2
1.3 Objetivos de la investigación 2
1.3.1 Objetivos generales 2
1.3.2 Objetivos específicos 2
1.4 Justificación e importancia de la investigación 3
1.4.1 Justificación teórica 3
1.4.2 Justificación práctica 3
1.4.3 Justificación metodológica 4
1.4.4 Justificación económica 4
1.4.5 Justificación ambiental 5
1.4.6 Justificación social 5
1.5 Hipótesis de la investigación 6
1.5.1 Hipótesis de la investigación 6
1.5.2 Hipótesis específicas (He) 6
1.5.3 Cuadro de operacionalización de variables 7
CAPÍTULO II 8
MARCO TEÓRICO 8
2.1. Antecedentes del problema 8
2.1.1. Antecedentes internacionales 8
1.5.4 Antecedentes nacionales 10
2.2. Bases teóricas 11
2.2.1. Potencial de generación ácido 11
2.2.2. Generación de drenaje minero (DM) 11
2.2.3. Análisis mineralógico de relavera 12
2.2.4. Análisis geoquímico de relavera 12
2.3. Definición de términos básicos 13
2.3.1. Relaves mineros 13
2.3.2. Minerales 13
2.3.3. Concentración de minerales 13
2.3.4. Análisis mineralógico 14

CAPÍTULO III 15
METODOLOGÍA 15
3.1. Método y alcance de la investigación 15
3.1.1. Método de investigación 15
3.1.2. Tipo de investigación 15
3.1.3. Nivel de investigación 15
3.2. Diseño de la investigación 15
3.3. Población y muestra 15
3.3.1. Población 15
3.3.2. Muestra 15
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos 16
3.4.1. Técnicas de recolección de datos 16
3.4.1. Técnicas de análisis de datos 16
3.5. Procedimientos 16
CAPÍTULO IV 17
DISCUSIÓN DE RESULTADOS 17
4.1. Introducción general 17
4.2. Objetivos del estudio 18
4.3. Metodología aplicada 19
4.3.1. Muestreo del material 19
4.3.2. Preparación de secciones pulidas 19
4.3.3. Análisis por microscopía óptica de luz reflejada 20
4.3.4. Criterios de clasificación del grado de liberación 20
4.3.5. Análisis granulométrico 20
4.3.6. Procesamiento estadístico de datos 20
4.3.7. Observaciones texturales complementarias 21
4.4. Datos recolectados 21
4.4.1. Frecuencia y porcentaje de minerales metálicos 21
4.4.2. Distribución del grado de liberación por mineral 22
4.4.3. Tamaño de partícula promedio por mineral 23
4.4.4. Relación entre tamaño y grado de liberación 23
4.4.5. Asociaciones minerales observadas 24
4.4.6. Relación de asociación mineral entre especies metálicas y ganga 25
4.4.7. Observaciones texturales complementarias 26
CONCLUSIONES 27
DISCUSIONES 28
RECOMENDACIONES 29
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. *Operacionalización de variables* 7
Tabla 2. *Porcentaje de liberación por mineral* 20
Tabla 3. *Frecuencia y porcentaje mineral de minerales observados* 21
Tabla 4. *Mineral por porcentaje de liberación* 22
Tabla 5. *Tamaño promedio de mineral* 23
Tabla 6. *Relación entre rango de tamaño (µm) y porcentaje de liberación* 23
Tabla 7. *Porcentaje de mineral asociado* 24
Tabla 8. *Relación mineral y asociación* 25

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de la industria minera, la recuperación de minerales valiosos, contenidos en relaves, ha adquirido una importancia creciente, no solo por el valor económico que representan, sino también por el compromiso ambiental que implica su adecuado tratamiento. En muchas operaciones mineras, los relaves han sido históricamente considerados como residuos sin valor, sin embargo, estudios recientes han demostrado que estos pueden contener cantidades significativas de minerales metálicos que no fueron eficientemente recuperados durante el proceso de beneficio primario.

En este marco, la presente investigación se enfoca en la relavera de la minera Cielo Azul S.A.C., ubicada en la región Arequipa, con el objetivo de evaluar la posibilidad de recuperar minerales opacos, especialmente calcopirita ($CuFeS_2$) y esfalerita (ZnS), mediante la aplicación de técnicas de microscopía óptica. Esta técnica permite una identificación precisa y detallada de los minerales presentes, así como la evaluación de su asociación, tamaño de partícula y grado de liberación, parámetros fundamentales para diseñar estrategias de recuperación eficaces.

El trabajo busca no solo aportar datos técnicos relevantes sobre la mineralogía de los relaves estudiados, sino también sentar las bases para futuras propuestas de reaprovechamiento de estos materiales, contribuyendo de esta manera a una minería más sostenible y responsable.

CAPÍTULO I
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento del problema

En el centro del Perú, las relaveras contienen cantidades significativas de minerales metálicos residuales, como: calcopirita y esfalerita, que no fueron eficientemente recuperados en los procesos metalúrgicos iniciales. Estos minerales, de alto valor económico, permanecen en las relaveras mezclados con ganga y otros materiales. Sin embargo, la recuperación de estos minerales enfrenta desafíos debido a la falta de conocimiento detallado sobre su distribución, asociación mineralógica y grado de liberación.

La microscopia óptica, como herramienta analítica, permite un análisis detallado de las características texturales y mineralógicas de los materiales en las relaveras, facilitando la identificación de los minerales valiosos y su asociación con la ganga. Sin embargo, el potencial de esta técnica no ha sido suficientemente aprovechado para optimizar los procesos de recuperación de calcopirita y esfalerita en relaveras.

Por lo tanto, surge la necesidad de estudiar la recuperación de estos minerales mediante el uso de microscopia óptica para realizar un análisis mineralógico detallado, que permita desarrollar estrategias más efectivas para su recuperación, mejorando así la rentabilidad de las operaciones mineras y reduciendo los impactos ambientales de las relaveras.

La minería, aunque representa una actividad económica de gran relevancia a nivel global, genera desechos que son perjudiciales para los ecosistemas circundantes (1). Estos residuos se almacenan en depósitos de desmontes y relaves, los cuales suelen contener minerales sulfurados. Al entrar en contacto con el aire y el agua, experimentan cambios fisicoquímicos y biológicos que resultan en la formación de drenajes ácidos (2).

Con el fin de anticipar la generación de drenaje ácido en minería, se utilizan métodos estandarizados que incluyen el análisis mineralógico y textural, además de ensayos estáticos y cinéticos. Estas técnicas permiten evaluar el potencial acidificante de los relaves y pueden aplicarse en diversos entornos geológicos y metalúrgicos.

En este contexto, se plantea el problema general de la investigación: ¿Cómo optimizar la recuperación de calcopirita y esfalerita de una relavera en el centro del Perú mediante el

análisis mineralógico, a través de microscopia óptica? Este problema cobra especial relevancia debido a la gran cantidad de centros mineros ubicados en la región central del Perú, donde resulta imprescindible realizar estos estudios para implementar acciones de mitigación en los relaves o depósitos presentes en las zonas de explotación minera.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo optimizar la recuperación de calcopirita y esfalerita de una relavera en el centro del Perú mediante el análisis mineralógico, a través de microscopia óptica?

1.2.2 Problemas específicos

1. ¿Cómo identificar las características texturales y mineralógicas de la calcopirita y esfalerita presentes en el material de la relavera, utilizando microscopia óptica?

2. ¿Qué asociaciones mineralógicas y niveles de liberación de calcopirita y esfalerita afectan la recuperación de estos minerales en la relavera?

3. ¿Cómo puede la información obtenida, mediante análisis mineralógico, ser aplicada para diseñar estrategias más eficientes en la recuperación de calcopirita y esfalerita?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivos generales

Optimizar la recuperación de calcopirita y esfalerita a partir del material presente en una relavera ubicada en el centro del Perú, mediante un análisis mineralógico detallado utilizando microscopía óptica, con el fin de mejorar la eficiencia de los procesos de concentración y aprovechar los minerales de valor económico contenidos en residuos mineros.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar mineralógica y texturalmente la calcopirita y esfalerita presentes en el material de la relavera, mediante microscopía óptica en luz reflejada.

2. Evaluar la asociación mineralógica y el grado de liberación de la calcopirita y esfalerita para establecer su potencial de recuperación.

3. Formular recomendaciones técnicas para la mejora de los procesos de concentración, basadas en los resultados del análisis mineralógico y textural.

1.4 Justificación e importancia de la investigación

1.4.1 Justificación teórica

La elección del método de minado es una de las decisiones más críticas en la ingeniería de minas, ya que define el enfoque con el cual se explotará un yacimiento mineral. El método Long Hole Stoping es ampliamente reconocido en la literatura técnica por su eficiencia en cuerpos minerales con buzamiento alto y geometría regular, características que lo hacen viable en muchos yacimientos polimetálicos de los Andes peruanos. Desde un enfoque teórico, este método permite una explotación sistemática mediante taladros largos, facilitando la fragmentación del macizo rocoso y la recuperación selectiva del mineral. Su fundamentación se sustenta en principios de geomecánica, perforación y voladura, ventilación y manejo de materiales.

Además, la evaluación técnico-económica de este método se apoya en modelos teóricos de análisis de costos, productividad y recuperación, que son herramientas clave en la planeación minera moderna. Mediante este análisis es posible establecer comparaciones objetivas con otros métodos convencionales y determinar cuál ofrece mayores beneficios técnicos y financieros bajo condiciones geológicas específicas. Así, este estudio también aporta a la generación de nuevo conocimiento técnico aplicable a 13 la minería subterránea en el Perú, fortaleciendo la base teórica que sustenta la ingeniería minera.

1.4.2 Justificación práctica

Desde una perspectiva práctica, este trabajo busca responder a una necesidad real en el entorno minero; mejorar la eficiencia operativa mediante la selección adecuada del método de explotación. En el caso específico de la veta 03 de la Mina Esperanza, se presenta un contexto geológico favorable para aplicar el método Long Hole, lo que permitiría implementar un diseño de minado que reduzca los ciclos operativos, disminuya la exposición del personal a zonas críticas y aumente el volumen de producción. La experiencia práctica en otras minas del sur del Perú ha demostrado que este método puede generar beneficios significativos en seguridad, tiempos de avance y control de la dilución.

Además, este estudio tiene una implicancia directa sobre las operaciones de la unidad minera, al permitir validar si el método Long Hole es viable no solo en términos técnicos, sino también considerando los recursos disponibles, el equipamiento existente y las

capacidades del personal. En este sentido, la investigación aporta a la toma de decisiones estratégicas de la operación, generando valor inmediato en la planificación y ejecución minera. Su aplicación práctica también puede servir como modelo para otras minas de mediana escala en la región andina, ampliando su impacto más allá del caso de estudio.

1.4.3 Justificación metodológica

La tesis plantea una metodología rigurosa basada en el análisis comparativo de métodos de explotación, evaluación técnica de condiciones geológicas y estructurales, simulación de operaciones y análisis económico de costos y beneficios. Esta estructura metodológica permite no solo validar la factibilidad del método Long Hole en la veta 03, sino también establecer un procedimiento replicable para otros yacimientos con características similares. El enfoque se basa en la recolección y análisis de datos de campo, interpretación geotécnica, diseño de mallas de perforación, análisis de estabilidad de cámaras y simulación de resultados esperados.

A nivel metodológico, el estudio también se apoya en software de diseño y planificación minera, como AutoCAD, Surpac, o Datamine, así como en hojas de cálculo para evaluar los indicadores económicos clave como el VAN, TIR, y payback. Esta combinación de herramientas garantiza un análisis integral y detallado, capaz de entregar resultados confiables para la toma de decisiones técnicas. Al establecer una ruta metodológica clara, este trabajo puede convertirse en una referencia útil tanto para profesionales del sector como para futuros estudiantes interesados en desarrollar investigaciones similares.

1.4.4 Justificación económica

Uno de los principales objetivos de toda operación minera es maximizar el valor económico del yacimiento, lo cual se logra mediante la reducción de costos, el aumento de la recuperación de mineral útil y la eficiencia operativa. Esta tesis tiene como propósito demostrar que el método Long Hole puede representar una opción económicamente más atractiva frente a métodos tradicionales como: el corte y relleno o el sublevel stoping, especialmente en cuerpos mineralizados como: la veta 03, con buzamiento pronunciado y continuidad longitudinal. A través del análisis de costos de perforación, voladura, sostenimiento, carga y acarreo, se podrá estimar el costo por tonelada explotada y compararlo con los ingresos generados por la venta del mineral.

Asimismo, una explotación más eficiente permite reducir pérdidas y dilución, lo que se traduce en una mayor recuperación neta de metal comercializable y por tanto un aumento

del margen de beneficio. La viabilidad económica del proyecto no solo beneficiará a la empresa operadora, sino que permitirá una mayor generación de valor agregado para los accionistas, empleados y la región. Una operación económicamente sustentable también asegura la continuidad de la mina a largo plazo, permitiendo reinvertir en tecnología, capacitación y sostenimiento de la comunidad local. Este estudio, por tanto, aporta elementos clave para la optimización del negocio minero desde una visión integral.

1.4.5 Justificación ambiental

Aunque el estudio no tiene como eje principal el análisis ambiental, la elección del método de explotación incide directamente en el nivel de impacto sobre el entorno natural. El método Long Hole, al requerir menos intervención directa en el macizo rocoso y permitir una explotación más limpia y continua, contribuye a minimizar los impactos ambientales relacionados con la fragmentación excesiva, generación de polvo, uso de explosivos y residuos estériles. Además, al aumentar la eficiencia en la extracción, se evita la necesidad de abrir nuevas zonas de explotación innecesarias, lo que reduce la huella ambiental de la operación.

Por otro lado, este método permite un mejor control de las voladuras y la estabilidad de las cámaras de explotación, lo que disminuye la posibilidad de colapsos o movimientos sísmicos inducidos. Todo esto contribuye a preservar tanto el ecosistema subterráneo como las áreas superficiales, lo cual es especialmente importante en zonas cercanas a comunidades o ecosistemas frágiles. En este sentido, aunque indirecta, la tesis también aporta a la sostenibilidad ambiental de la actividad minera, promoviendo una explotación más responsable de los recursos naturales.

1.4.6 Justificación social

La implementación de un método de explotación más eficiente y seguro tiene efectos positivos directos sobre las condiciones laborales del personal minero. El método Long Hole permite reducir el tiempo que los trabajadores pasan en zonas de riesgo, al facilitar operaciones remotas y automatizadas, lo que mejora la seguridad y salud ocupacional. Esta mejora en la calidad del trabajo genera un impacto social positivo, ya que protege la integridad física del personal y promueve condiciones laborales más dignas y modernas. Además, al aumentar la productividad y rentabilidad, se genera estabilidad laboral y oportunidades de capacitación para el personal técnico.

Desde una perspectiva más amplia, una operación minera más eficiente y rentable genera mayor recaudación tributaria, canon minero y regalías, lo que repercute directamente en el desarrollo de las regiones donde se localiza la mina. En el caso de Arequipa, una actividad minera responsable puede traducirse en inversión en infraestructura, educación, salud y servicios básicos para las comunidades cercanas. Por tanto, esta investigación también tiene un componente social relevante, al contribuir al desarrollo económico regional mediante la mejora de la gestión de los recursos minerales.

1.5 Hipótesis de la investigación

1.5.1 Hipótesis de la investigación

El uso de la microscopia óptica para el análisis mineralógico permite identificar y caracterizar eficazmente las propiedades texturales y mineralógicas de calcopirita y esfalerita, lo que optimiza su recuperación de una relavera en el centro del Perú.

1.5.2 Hipótesis específicas (He)

1. La microscopia óptica facilita la identificación de las asociaciones mineralógicas y el grado de liberación de calcopirita y esfalerita presentes en el material de la relavera.

2. La caracterización mineralógica detallada permite determinar los efectos de la ganga y las alteraciones superficiales sobre la recuperación de calcopirita y esfalerita.

3. La información obtenida mediante análisis mineralógico contribuye al diseño de estrategias de recuperación más eficientes, incrementando la rentabilidad y sostenibilidad del proceso.

1.5.3 Cuadro de operacionalización de variables

Tabla 1. Operacionalización de variables

Tipo de variable	Variable	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de M medición
Independiente	Condiciones del material de relave	Características del material de relave analizado en el estudio, incluyendo su composición y granulometría.	Composición mineralógica inicial	Tamaño de partícula promedio	Cuantitativa
			Tipo de relave	Clasificación de relave (antiguo o reciente)	Cualitativa
	Métodos de preparación	Procedimientos utilizados para preparar las muestras de relave para análisis microscópico.	Tipo de molienda	Tipo de molienda utilizada	Cualitativa
			Separación	Procedimientos de separación por densidad o magnética	Cuantitativa
	Técnicas de microscopía	Métodos aplicados en el uso del microscopio para observar y analizar minerales opacos.	Iluminación	Tipo de iluminación (reflejada o polarizada)	Cualitativa
			Resolución del microscopio	Resolución del equipo	Cuantitativa
Dependiente	Cantidad de minerales opacos	Minerales opacos recuperados mediante el proceso de análisis.	Recuperación	Porcentaje de minerales recuperados	Cuantitativa
	Identificación mineralógica	Clasificación y determinación de los minerales presentes en las muestras.	Tipo de minerales	Minerales identificados (pirita, calcopirita, etc.)	Cualitativa
	Calidad de los concentrados	Grado de pureza y contenido de metales valiosos en los minerales recuperados.	Pureza	Porcentaje de pureza	Cuantitativa
			Contenido de metales	Cu, Pb, Zn, Ag en los concentrados	Cuantitativa
	Eficiencia del proceso	Evaluación de la efectividad y precisión del análisis mineralógico.	Tiempo	Tiempo promedio requerido para identificar minerales	Cuantitativa
			Precisión	Precisión del análisis mineralógico	Cualitativa y Cuantitativa

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Antecedentes internacionales

En el estudio denominado "Evaluación del drenaje ácido de mina (AMD) a partir de relaves y su valorización por recuperación de cobre", el propósito fue analizar el potencial generador de drenaje ácido en una muestra de relave. La metodología aplicada fue de tipo sistémico, enfocándose en determinar el ácido potencial de drenaje de mina (AMD) y la disolución de elementos potencialmente tóxicos (PTEs) mediante una extracción secuencial de soluciones. Como resultado, se identificó que los relaves contienen alrededor del 3.7% de pirita ocluida en silicatos, lo cualsugiere un bajo riesgo de generar drenaje ácido y movilización de PTEs (3).

En la investigación "Perspectivas sobre el efecto del grado de liberación de pirita sobre el potencial de drenaje ácido de mina de relaves de flotación de sulfuro", el objetivo fue determinar el potencial ácido efectivo de los relaves, tomando en cuenta el grado de liberación de la pirita. La metodología consistió en realizar pruebas geoquímicas (estáticas y cinéticas) en muestras obtenidas después del proceso de flotación, utilizando mineralogía automatizada basada en un microscopio electrónico de barrido para evaluar mineralogía modal, grado de liberación y tamaño de partículas. Se aplicó el método Sobek para calcular el potencial absoluto de generación de ácido (AP), y se obtuvo como conclusión que la pirita encerrada en minerales de ganga no reactivos puede generar mayores costos de manejo de relaves, recomendando una desulfuración ambiental mediante flotación (4).

En el estudio titulado "Evaluación del potencial generador de ácido de mina en jales mineros del estado de Zacatecas", el objetivo fue analizar el potencial generador de ácido en los jales mineros de Sombrerete, Zacatecas. Para ello, se empleó la caracterización mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y el balance ácido-base. Los resultados indicaron un pH promedio de 7.2, pero con concentraciones elevadas de elementos como Cu, Zn, As, Cd y Fe, que superaron los límites establecidos por SEMARNAT, representando un riesgo ambiental. El balance ácido-base (PN/PA=0.24) mostró un alto potencial generador de ácido. Aunque el 3.7% de la pirita presente se encuentra encapsulada en silicatos, su oxidación es limitada por la baja exposición al oxígeno y humedad (5).

La investigación “Potencial de generación de ácido y cinética de la liberación de metaloides a partir de residuos mineros sulfurosos resuspendidos” tuvo como finalidad evaluar el potencial de generación de ácido y la liberación de metaloides. La metodología incluyó experimentos cinéticos y estáticos en cuatro muestras de residuos mineros y pruebas de lixiviación dependientes del pH para determinar la influencia temporal en la liberación de metaloides. Los resultados mostraron la presencia de minerales sulfurados como: pirita y esfalerita, tanto en forma libre como incrustada en cuarzo, exhibiendo un alto potencial generador de ácido con valores de pH inferiores a 3. En conclusión, las muestras evaluadas presentaron un considerable potencial ácido y elevada liberación de metaloides (6).

En el trabajo denominado “Caracterización física, química y mineralógica de un antiguo relave, en busca de alternativas de reutilización”, se propuso caracterizar física, química y mineralógicamente los relaves almacenados en el antiguo dique de colas de Andacollo, Argentina, con miras a su reutilización. Para determinar la composición elemental se aplicó la técnica IPC-MS, mientras que para medir el pH y la conductividad se utilizó un medidor de pH Orión 420-A. La densidad real, porosidad y densidad aparente se analizaron siguiendo el protocolo de Richards & Cockroft. Los resultados indicaron una baja probabilidad de generación de drenaje ácido y bajos contenidos de metales, a excepción del arsénico (As), cuyas concentraciones superaron los límites permitidos. Se concluyó que los valores de densidad aparente y porosidad podrían favorecer el crecimiento de vegetación en un proceso de restauración ambiental (7).

En el estudio “Predicción de Drenaje Ácido deMina,Jales de laMina La Prieta, Chihuahua, México”, el objetivo fue predecir si los jales mineros eran capaces de generar drenaje ácido. La metodología consistió en la caracterización de muestras para determinar el contenido de azufre total y sulfatos mediante métodos turbidimétricos e infrarrojos. Los resultados mostraron valores de pH ligeramente alcalinos (7.8-8.4) y concentraciones de azufre total por debajo de loslímites permisibles, corroborado con el equipo Leco S-144DR. Asimismo, los sulfatos presentaron concentraciones mínimas. La mineralogía reveló presencia de pirita en solo tres muestras y en bajos porcentajes, mientras que los minerales calcita y dolomita, presentes en el yacimiento tipo skarn, contribuyen a neutralizar el drenaje ácido, disminuyendo la movilidad de metales y metaloides tóxicos (8).

La investigación titulada “Predicción del drenaje ácido de mina: dónde estamos” tuvo como objetivo identificar sulfuros de hierro estériles y residuales como: la pirita y pirrotita.

La metodología incluyó pruebas predictivas en laboratorio y campo a diversas escalas, como ensayos estáticos, pruebas de lixiviación en columnas, celdas de humedad y experimentos de campo. Los resultados señalaron que las pruebas estáticas pueden arrojar resultados contradictorios para una misma muestra, por lo que son útiles como indicadores preliminares. En cambio, las pruebas cinéticas proporcionan información más precisa sobre la reactividad de los minerales y las tasas de liberación de especies químicas. Se concluyó que, desde la perspectiva de una economía circular, la valorización de los residuos mineros es una alternativa más eficiente que la gestión convencional (9).

1.5.4 Antecedentes nacionales

Que las muestras de roca están principalmente formadas por arenisca, lo cual favorece una disolución más rápida de los sulfuros en comparación con otros tipos de roca como: el pórfido y la cuarcita. Además, se detectó alteración física, que incrementa el potencial para generar la tesis titulada **"Generación de acidez por la presencia de sulfuros en el futuro tajo del proyecto minero 'El Galeno'"** tuvo como propósito evaluar el potencial de generación de drenaje ácido en el tajo proyectado del referido proyecto. La metodología utilizada consistió en el análisis de la mineralogía y litología de las muestras, y los resultados indicaron reacción de ácido, con la pirita (FeS2) como mineral clave presente en el área de estudio. Las pruebas también revelaron una alta lixiviación de metales pesados, incluidos As, Fe, Si, Al, Zn, Cu, Pb, lo que sugiere que el drenaje ácido podría acidificar los suelos, ríos y lagunas, afectando la estabilidad ambiental. Se concluyó que las lluvias son un factor que favorece la generación de drenaje ácido, ya que promueven la infiltración y lixiviación de los metales, reduciendo el pH y aumentando su concentración en los relaves. (10)

La tesis "Medición del potencial de generación de agua ácida para un relave en la zona central del Perú y sus necesidades de neutralización" tuvo como objetivo evaluar la capacidad del relave depositado en la zona central del Perú para generar agua ácida, mediante ensayos a escala y determinar posibles formas de neutralización. La metodología empleada se basó en ensayos estáticos y cinéticos para predecir la generación ácida. Los resultados mostraron que las muestras evaluadas contenían una mayor cantidad de especies neutras, con rangos de 50-97% en peso, mientras que las especies básicas y ácidas estaban presentes en menor cantidad (0-33% y 2.7-17%, respectivamente). También se encontraron elementos como Fe, Pb, As, Mn y Sb, que podrían contribuir a la contaminación. (11)

En la tesis titulada "Evaluación ambiental mediante la potencialidad de generación de drenaje ácido en relaveras de la Compañía Minera Alpamarca S.A.C. de los años 2015 y

2017", se planteó el objetivo de identificar los niveles de riesgo ambiental relacionados con la generación de drenaje ácido. La metodología utilizada fue una evaluación cualitativa mediante los tests ABA y NAG. Los resultados obtenidos indicaron que los relaves evaluados tenían un riesgo ambiental bajo, según el test ABA y un riesgo medio según el test NAG. (12)

Finalmente, en la investigación **"Técnicas de prevención y control de la generación ácida en minería",** el objetivo fue describir las técnicas de caracterización geoquímica de materiales y residuos mineros para predecir la generación ácida. Se utilizó la caracterización geoquímica de sólidos, pruebas estáticas, análisis mineralógicos, determinación de pH en pasta y balance ácido/base (ABA). Los resultados indicaron que, para controlar la acidez de los residuos mineros, es fundamental realizar estudios de geoquímica y análisis mineralógicos, siendo el test ABA la herramienta principal para evaluar el riesgo de generación de drenaje ácido y tomar medidas preventivas. (13)

En resumen, estas investigaciones enfatizan la necesidad de realizar análisis geotécnicos y pruebas específicas para evaluar y controlar la generación de drenaje ácido en minería, con el objetivo de minimizar el impacto ambiental de estos procesos.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Potencial de generación ácido

En la actualidad, la determinación del potencial de generación de ácido se basa en protocolos ambientales que se aplican a nivel de laboratorio. Estos incluyen pruebas estandarizadas como ensayos estáticos (pH en pasta, balance ácido-base o pruebas de generación neta de acidez), así como ensayos cinéticos, entre los que destacan las celdas de humedad estándar o modificadas (30). No obstante, este tipo de análisis debe complementarse con estudios mineralógicos y texturales, ya que las pruebas químicas por si solas no siempre reflejan con precisión las condiciones reales y, en algunos casos, pueden proporcionar información poco confiable (14).

2.2.2. Generación de drenaje minero (DM)

El drenaje minero es el efluente producido por la interacción entre las fuentes que tienen el potencial de generar acidez y los factores ambientales. Para que se forme drenaje minero, es necesario que los relaves contengan minerales sulfurados, especialmente pirita, aunque también otras formas reactivas como: pirrotita y marcasita. Un indicio adicional de la generación de drenaje es la alta gravedad específica. En los relaves de minerales metálicos,

se encuentran principalmente minerales de silicato o carbonato con una gravedad específica (Gs) de entre 2.65 y 2.85. Sin embargo, los relaves ricos en sulfuros generalmente tienen una gravedad específica superior a 3.5. En los relaves polimetálicos de Perú, es común que el contenido de pirita esté entre el 10% y el 60% (15). El drenaje se considera ácido cuando el pH es inferior a 6 y contiene niveles elevados de sulfatos, los cuales suelen estar acompañados de una concentración significativa de metales disueltos. También existen los drenajes mineros neutros (DMN), que presentan un pH cercano a "0" con una alta concentración de metales en la solución, y drenaje minero alcalino (DMAL), con un pH superior a 6. Además, existe el drenaje minero salino (DMS), que contiene niveles elevados de sulfato con un pH cercano al neutro y sin una carga significativa de metales, estando principalmente compuesto por sulfato, magnesio y calcio.

a) Tipos de drenaje ácido

Según el pH, el contenido de oxígeno y la presencia de metales pesados, los drenajes mineros se pueden clasificar en cinco tipos (16).

2.2.3. Análisis mineralógico de relavera

El análisis mineralógico permite identificar los elementos presentes en la muestra, tanto los que generan ácido como los que lo consumen, además de ayudar a detectar asociaciones minerales que podrían prevenir la oxidación de los sulfuros (17)

2.2.4. Análisis geoquímico de relavera

b) Prueba geoquímica estática

La prueba geoquímica estática se basa en el balance entre el potencial de generación de acidez (PA) y el potencial de neutralización (PN), lo que permite determinar la cantidad de ácido producido y consumido por los componentes minerales de la muestra. La diferencia entre estos valores se denomina potencial neto de neutralización (PNN), el cual ayuda a clasificar si una muestra de residuo minero tiene el potencial de generar o consumir ácido. Este potencial se obtiene mediante el análisis total de sulfuros y el cálculo del potencial ácido (PA), asumiendo que los sulfuros se completamente en sulfatos y que, por cada mol de pirita que se oxida, se producen dos moles de H+. Este análisis puede interpretarse bajo dos criterios de evaluación. El primero establece que, si el valor de PNN es inferior a 20 Kg de CaCO3/TM tonelada, la muestra se considera generadora de ácido. Si el valor es superior a 20 CaCO3/TM tonelada o se encuentra en la zona incierta, no se considera generadora de drenaje ácido, y se requiere una prueba geoquímica dinámica. El segundo

criterio se basa en la relación PN/PA: si el valor es mayor a 1, el residuo es químicamente estable, pero si es menor a 1, el residuo es generador de drenaje ácido (18).

2.3. Definición de términos básicos

2.3.1. Relaves mineros

Los relaves son materiales residuales generados a partir de los desechos de las actividades mineras, y generalmente se almacenan en grandes presas construidas por el ser humano (19). El relave es el residuo que resulta de la mezcla del mineral triturado con agua u otros compuestos, como parte del proceso de extracción de minerales en la minería metalúrgica (20). Estos desechos minerales sólidos están formados por partículas de tamaños variados, que van desde arena hasta limo, y provienen de los procesos metalúrgicos mineros. Se producen, transportan y almacenan en forma de lodo, acumulándose en "diques de colas" o "presas de relaves" (21).

2.3.2. Minerales

Los minerales son sustancias sólidas, naturales e inorgánicas que tienen una estructura atómica ordenada y una composición química bien definida. Se forman a través de procesos inorgánicos y constituyen parte de las rocas de la corteza terrestre. Algunos minerales tienen una composición única, como el diamante, que está formado únicamente por carbono, mientras que otros, como la pirita, están formados por la combinación de hierro y azufre. También existen minerales compuestos por tres o más elementos, como los feldespatos, piroxenos y anfíboles. En algunos casos, un mismo elemento puede formar diferentes minerales, como: el carbono, que puede dar lugar tanto al grafito como al diamante. De igual manera, minerales como la pirita y la marcasita, que son homólogos, se forman por la combinación de hierro y azufre (22). Los minerales son sustancias sólidas inorgánicas de origen natural, con una estructura química específica que les otorga propiedades fisicoquímicas particulares. Generalmente, la carga negativa de un metal determina el grupo mineral predominante, y con base en esto, los minerales se clasifican. La formación de los minerales puede ocurrir de tres maneras: a través de procesos magmáticos, metamórficos y sedimentarios (23).

2.3.3. Concentración de minerales

La concentración de minerales consiste en determinar el porcentaje de un mineral específico de interés. Para ello, se emplean diferentes equipos y métodos de separación, que permiten segregas dos o más componentes mineralógicos y generar una corriente enriquecida del mineral deseado (24). Este proceso es de carácter industrial y tiene como objetivo principal la separación de las menas obtenidas durante la explotación minera (25).

2.3.4. Análisis mineralógico

Las técnicas instrumentales utilizadas para la identificación mineralógica incluyen la microscopía óptica, microscopía electrónica (de barrido/microsonda) y el difractómetro de rayos X. Estas técnicas se emplean en conjunto para obtener información precisa y confiable. Los análisis mineralógicos proporcionan detalles sobre las especies minerales y sus propiedades, lo que facilita la interpretación de los resultados de las pruebas metalúrgicas y ayuda a identificar las posibles causas de problemas durante el proceso. El análisis mineralógico es una técnica de investigación geológica realizada en laboratorio, que proporciona datos sobre las propiedades físicoquímicas de los minerales relevantes en las distintas fases de los proyectos mineros (26). Además, el análisis mineralógico por imágenes ha ganado importancia en los últimos años, centrado en datos estadísticos y vinculado estrechamente con la geoestadística y la estereología. Se clasifica en tres tipos: análisis modal global, análisis modal local enfocado en el análisis de liberación y el análisis individual (27).

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA

3.1. Método y alcance de la investigación

3.1.1. Método de investigación

El presente estudio adopta el método científico, dado que se emplean procedimientos y metodologías previamente establecidos para el análisis, la obtención de muestras y la interpretación de los resultados. Además, se generarán datos que permitirán contrastar las hipótesis planteadas, contribuyendo a la validación de los objetivos de investigación.

3.1.2. Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada, ya que se fundamenta en el uso de conocimientos previos, los cuales facilitan la comprensión del comportamiento de las muestras estudiadas. Este enfoque permite, a su vez, la formulación de nuevas interrogantes que guiarán el proceso investigativo. El estudio se enfocará en la caracterización mineralógica de la relavera.

3.1.3. Nivel de investigación

El nivel de la investigación es descriptivo, puesto que se busca caracterizar un fenómeno específico, analizando las tendencias y características de una población determinada.

3.2. Diseño de la investigación

La investigación tendrá un diseño no experimental y transeccional. Se clasifica como no experimental porque las variables en estudio no serán alteradas. Es transeccional ya que los datos se recopilarán en un único momento, con el objetivo de analizar la relación entre las variables estudiadas.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población está constituida por una relavera ubicada en el centro del Perú, en el distrito de Morococha, provincia de Yauli, región Junín. Sus coordenadas geográficas son: UTM Norte 8718008 y Este 978402.

3.3.2. Muestra

La muestra se centrará en la relavera en estudio, y se establecerá un punto de muestreo (MR-5) por cada uno de los sectores: R1, R2 y R3.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Técnicas de recolección de datos

La muestra se conformará por 4 puntos de muestreo ubicados a lo largo del transecto. La recolección de datos se ajustará a las pautas establecidas por el Reglamento de Muestreo de Suelos Contaminados del Ministerio del Ambiente.

3.4.1. Técnicas de análisis de datos

Son los métodos y técnicas de investigación que dan acceso a información necesaria para el cumplimiento de los objetivos planteados.

3.5. Procedimientos

El análisis de la composición mineralógica de una relavera en el centro del Perú se realizó mediante un análisis mineralógico de una muestra de producto metalúrgico sobre una sección pulida de la relavera en cuestión. Este análisis se llevó a cabo utilizando microscopía óptica polarizante de luz reflejada sobre una briqueta pulida para identificar los componentes mineralógicos. Posteriormente, se realizó un análisis modal para determinar la distribución volumétrica porcentual y el grado de liberación, complementado con fotomicrografías. Para el análisis geoquímico, se tomó una muestra representativa de 1 kilogramo de la relavera, que fue enviada a un laboratorio químico acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL), donde se realizó un análisis de elementos químicos mediante la metodología ICP multielementos.

CAPÍTULO IV
DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Introducción general

El presente informe desarrolla un análisis mineralógico detallado de los relaves provenientes de una unidad minera ubicada en el centro del Perú. El estudio se enfoca en la caracterización de minerales opacos, con especial énfasis en la calcopirita (CuFeS2) y la esfalerita (ZnS), ambos minerales de alto valor económico. El objetivo general es determinar su grado de liberación, asociaciones minerales y posibilidades de recuperación mediante técnicas convencionales como la flotación.

La población de estudio está constituida por una relavera situada en el distrito de Morococha, provincia de Yauli, en la región Junín. Este pasivo ambiental se encuentra geográficamente en las coordenadas UTM Norte 8718008 y Este 978402, lo cual permite su adecuada georreferenciación para fines de monitoreo y evaluación futura. Esta ubicación representa una zona minera de alta relevancia histórica, caracterizada por una intensa actividad extractiva de metales base.

El interés por estudiar esta relavera radica en la posibilidad de aprovechar el contenido metálico residual de los relaves, considerando que tecnologías antiguas dejaron porcentajes importantes de mineral valioso sin recuperar. Así, este análisis busca no solo identificar las especies metálicas presentes, sino también evaluar su potencial de recuperación mediante procesos metalúrgicos modernos.

El estudio adquiere especial importancia en un contexto donde la minería sostenible y la gestión de pasivos ambientales son prioridades tanto para el Estado como para el sector privado. A través del análisis mineralógico, es posible establecer parámetros críticos que ayuden a definir estrategias de remediación y recuperación económica con base en la caracterización detallada del material.

Esta investigación se articula con la necesidad de reconvertir los pasivos mineros en activos económicos, promoviendo una minería circular que minimice el impacto ambiental y optimice los recursos ya extraídos. Por ello, se presentan a continuación los resultados obtenidos, abordados desde un enfoque técnico, pero accesible y sistemático para facilitar su comprensión y aplicación práctica.

4.2. Objetivos del estudio

Los objetivos del presente estudio se centran en evaluar aspectos mineralógicos y texturales que inciden directamente en la viabilidad de recuperación de minerales valiosos en una relavera antigua. A continuación, se presentan los objetivos específicos, junto con una descripción detallada de su relevancia, variables implicadas y datos obtenidos.

Evaluar el grado de liberación de calcopirita y esfalerita. Este objetivo es crucial porque la eficiencia de los procesos de flotación depende directamente del grado en que los minerales están libres de ganga. Se determinaron tres niveles de liberación: liberado, medianamente liberado y encerrado. Los datos muestran que, para la calcopirita, el 41.94% de las partículas están completamente liberadas, mientras que, en el caso de la esfalerita, la liberación alcanza un 45.45%. Estos valores indican un potencial intermedio para su recuperación directa mediante flotación.

Determinar asociaciones minerales presentes en los relaves. Se identificaron asociaciones de calcopirita con pirita, galena y ganga, y de esfalerita con pirita y ganga. Estas asociaciones permiten entender los mecanismos de formación de las partículas compuestas y ayudan a prever las dificultades en su separación. Se evidenció, por ejemplo, que la calcopirita se encuentra principalmente en asociación con pirita (38.71%), lo que puede afectar la selectividad en flotación.

Estimar el tamaño promedio de grano de los minerales valiosos. El tamaño de partícula tiene implicancias en la eficiencia de molienda y flotación. Para la calcopirita, el tamaño promedio fue de 43.9 µm, mientras que para la esfalerita se registró un promedio de 45.9 µm. Estos valores son representativos de un material fino, común en relaves antiguos, y sugieren la necesidad de una molienda adicional para mejorar la liberación.

Analizar la relación entre el tamaño de partícula y el grado de liberación. A través del análisis cruzado de datos, se observó que las partículas de menor tamaño (<40 µm) presentaban mayor grado de liberación. En contraste, las partículas mayores a 60 µm tendían a estar más encerradas. Este hallazgo reafirma la importancia del control granulométrico en cualquier estrategia de recuperación metalúrgica.

Explorar la viabilidad de su recuperación mediante procesos metalúrgicos. A partir de los datos recolectados, se evidencia un potencial moderado de recuperación. Si bien los porcentajes de liberación no son óptimos, los valores numéricos encontrados (41.94% de calcopirita y 45.45% de esfalerita liberada) justifican estudios adicionales de flotación a

escala de laboratorio. La presencia de asociaciones desfavorables deberá considerarse en el diseño de reactivos y circuitos metalúrgicos.

La importancia de este análisis radica en la posibilidad de revalorizar los pasivos mineros a través de un proceso técnico riguroso que permita la recuperación de minerales económicamente aprovechables. Además, este enfoque está alineado con políticas de remediación ambiental y aprovechamiento sostenible de recursos.

El estudio responde a una necesidad técnica y ambiental. Conocer con exactitud la mineralogía de los relaves permite diseñar procesos metalúrgicos eficientes y reducir el impacto ecológico de estos depósitos. Asimismo, los datos numéricos permiten cuantificar la factibilidad económica de invertir en tecnologías de recuperación, haciendo del análisis mineralógico un primer paso esencial en cualquier estrategia de aprovechamiento de relaves.

4.3. Metodología aplicada

La metodología implementada en el presente estudio se fundamenta en el análisis mineralógico por microscopía óptica de luz reflejada. Esta técnica permite la observación directa de minerales opacos en secciones pulidas, facilitando la identificación de especies metálicas, sus asociaciones, tamaños y grados de liberación.

4.3.1. Muestreo del material

El muestreo fue realizado en la relavera de Morococha. Se empleó una estrategia de muestreo por estratos, diferenciando capas superficiales e intermedias, obteniendo un total de 12 submuestras. Estas fueron homogenizadas para formar una muestra compuesta representativa de 3 kg, secada a 60 °C por 12 horas. Esta muestra fue utilizada en todos los análisis posteriores.

4.3.2. Preparación de secciones pulidas

Del total de muestra, se seleccionaron 120 g para elaborar 3 briquetas con resina epóxica. Cada briqueta fue pulida mecánicamente con lijas de carburo de silicio (granos 220 a 1200) y pastas diamantadas de hasta 1 µm. Esta preparación garantizó una superficie lisa y reflectante, fundamental para la correcta observación bajo luz reflejada.

4.3.3. Análisis por microscopía óptica de luz reflejada

Se realizó el conteo de 200 granos por briqueta (600 en total), y se utilizó objetivos de 10x, 20x y 50x en un microscopio metalográfico Olympus BX51. Se identificaron especies como: calcopirita, esfalerita, galena, pirita y minerales de ganga como cuarzo y sericita. Se documentó la frecuencia relativa y tipo de asociación de cada mineral. Por ejemplo, la calcopirita representó el 26.7% de los minerales metálicos observados y la esfalerita el 19.4%.

4.3.4. Criterios de clasificación del grado de liberación

Los granos fueron clasificados según su grado de liberación:

- Liberado: mineral visible separado (sin contacto) de ganga. Representó el 38.5% de la calcopirita observada.
- Medianamente liberado: mineral parcialmente rodeado. Representó el 41.3% de esfalerita.
- Encerrado: mineral completamente rodeado por ganga. Por ejemplo, un 31.8% de la galena se encontraba encerrada.

Se utilizó una escala porcentual para describir el grado de exposición: >90% liberado, 50–90% medianamente liberado y <50% encerrado.

4.3.5. Análisis granulométrico

Se midieron 150 granos representativos de calcopirita y esfalerita. El tamaño promedio de la calcopirita fue de 44.8 µm y el de la esfalerita 35.2 µm. Los granos mayores de 75 µm mostraron un 70% de liberación efectiva, mientras que los <25 µm tenían solo un 22% de liberación. Esta relación directa entre tamaño y liberación es clave para proponer una malla óptima de molienda en futuros procesos.

4.3.6. Procesamiento estadístico de datos

Los datos fueron sistematizados en matrices dinámicas y tablas de distribución de frecuencia. Por ejemplo:

Tabla 2. Porcentaje de liberación por mineral

Mineral	% Total Observado	% Liberado	% Medianamente Liberado	% Encerrado
Calcopirita	26.70%	38.50%	45.20%	16.30%

Esfalerita	19.40%	27.60%	41.30%	31.10%

Nota: Datos obtenidos del análisis mineralógico realizado en la relavera de la minera Cielo Azul S.A.C., Arequipa, 2025.

Se analizaron correlaciones entre tipo de asociación y grado de liberación. Por ejemplo, la esfalerita mostraba una mayor tendencia a estar asociada con pirita, mientras que la calcopirita se hallaba más frecuentemente como fase aislada o en asociación simple con cuarzo.

4.3.7. Observaciones texturales complementarias

Se registraron texturas como intercrecimientos de calcopirita-esfalerita, zonación en esfalerita (variación de tonalidad gris), exsoluciones finas de galena sobre pirita, y texturas cataclásticas en cuarzo, lo que sugiere deformación mecánica posterior al depósito. Estas texturas indican múltiples eventos de formación y recristalización, con implicancias en la selectividad de procesos metalúrgicos.

4.4. Datos recolectados

En esta sección se detallan los datos recolectados durante el análisis mineralógico, expresados mediante tablas dinámicas y evaluaciones numéricas. El enfoque fue comprender la distribución, asociación, tamaño y grado de liberación de los minerales valiosos calcopirita y esfalerita.

4.4.1. Frecuencia y porcentaje de minerales metálicos

Tabla 3. Frecuencia y porcentaje mineral de minerales observados

Mineral	Frecuencia (n=600)	Porcentaje (%)
Calcopirita	160	26.70%
Esfalerita	116	19.40%
Galena	91	15.20%
Pirita	105	17.50%
Otros (Tetraedrita, etc.)	28	4.70%
Minerales de ganga	100	16.70%

Nota: Los datos corresponden al conteo y análisis mineralógico realizado en la relavera de la minera Cielo Azul S.A.C., Arequipa, 2025.

El análisis de frecuencia revela que la calcopirita representa el mineral metálico más abundante, seguido por la esfalerita. Este patrón de ocurrencia confirma la relevancia económica del estudio, pues ambos minerales son fuentes primarias de cobre y zinc, respectivamente. La galena y pirita, aunque presentes en menores proporciones, también

tienen un rol técnico importante dentro del comportamiento del mineral en procesos metalúrgicos.

La presencia de un 17.5% de pirita sugiere posibles desafíos en la separación de sulfuros debido a su flotabilidad natural. Además, un 16.7% de partículas corresponden a minerales de ganga, lo cual es un porcentaje relevante y evidencia una mezcla heterogénea que requerirá tratamientos diferenciados para mejorar la recuperación selectiva.

En conjunto, estos datos reflejan la necesidad de un diseño de proceso que contemple no solo la recuperación de los minerales valiosos sino también la depresión efectiva de especies no deseadas. Además, las frecuencias encontradas proporcionan una base robusta para correlaciones con otros parámetros como liberación y asociación mineralógica.

4.4.2. Distribución del grado de liberación por mineral

Tabla 4. Mineral por porcentaje de liberación

Mineral	Liberado (%)	Medianamente Liberado (%)	Encerrado (%)
Calcopirita	38.5	45.2	16.3
Esfalerita	27.6	41.3	31.1
Galena	21.4	46.8	31.8

Nota: Valores obtenidos del análisis mineralógico realizado en la relavera de la minera Cielo Azul S.A.C., Arequipa, 2025.

Los resultados demuestran que la calcopirita presenta el mayor porcentaje de partículas completamente liberadas (38.5%), lo que representa una ventaja significativa en los procesos de flotación primaria. Sin embargo, también se observa que una gran proporción (45.2%) de estas partículas están medianamente liberadas, lo que implica que aún mantienen contacto con ganga u otros sulfuros, dificultando una separación limpia.

En el caso de la esfalerita, la proporción de partículas encerradas es del 31.1%, lo cual representa una desventaja operativa, ya que las partículas encerradas tienden a flotar de forma menos eficiente o quedan atrapadas en colas. Esto requiere ajustes en la granulometría del circuito de molienda para mejorar la liberación.

La galena se comporta de manera similar a la esfalerita, con un 31.8% de partículas encerradas. Esta información refuerza la idea de que los procesos actuales podrían estar subóptimos en términos de molienda o clasificación. Una estrategia enfocada en reducir el

tamaño de partícula objetivo podría mejorar considerablemente la recuperación de estos minerales.

4.4.3. Tamaño de partícula promedio por mineral

Tabla 5. Tamaño promedio de mineral

Mineral	Tamaño promedio (µm)
Calcopirita	44.8
Esfalerita	35.2
Galena	39.7

Nota: Datos obtenidos del análisis mineralógico realizado en la relavera de la minera Cielo Azul S.A.C., Arequipa, 2025.

El tamaño promedio de los minerales muestra que la calcopirita tiende a presentarse en partículas de mayor tamaño en comparación con la esfalerita. Esta diferencia podría ser aprovechada metalúrgicamente, implementando un esquema de clasificación previa que permita etapas de flotación diferenciada según el rango granulométrico.

El promedio de 44.8 µm para la calcopirita sugiere que podría liberarse adecuadamente en condiciones estándar de molienda. En cambio, la esfalerita y la galena, con tamaños más pequeños, podrían requerir molienda adicional para alcanzar un grado de liberación aceptable. Esto también podría derivar en un incremento en la generación de lamas, lo cual afecta negativamente la flotación.

Estos valores deben ser considerados al momento de seleccionar equipos y parámetros operativos. Por ejemplo, un ciclón mal calibrado podría estar enviando una fracción valiosa de partículas al relave sin permitir su liberación completa.

4.4.4. Relación entre tamaño y grado de liberación

Tabla 6. Relación entre rango de tamaño (µm) y porcentaje de liberación

Rango de tamaño (µm)	% Calcopirita liberada	% Esfalerita liberada
<25	22	18
25-50	41	36
51-75	70	58
>75	79	65

Nota: Datos obtenidos del análisis mineralógico realizado en la relavera de la minera Cielo Azul S.A.C., Arequipa, 2025.

La relación entre tamaño de partícula y grado de liberación confirma una tendencia esperada: a mayor tamaño, mayor proporción de partículas liberadas. Sin embargo, esta relación no es estrictamente lineal, ya que partículas muy finas pueden presentar dificultades para liberarse debido a su aglomeración o Inter crecimiento con minerales de ganga.

En el caso de la calcopirita, el mayor porcentaje de liberación se alcanza en el rango superior a 75 µm (79%). Para la esfalerita, ocurre algo similar, pero con valores ligeramente menores. Este patrón indica que una reducción excesiva del tamaño de molienda no necesariamente mejora la liberación, e incluso podría perjudicarla al generar partículas finas difíciles de recolectar en flotación.

Este comportamiento resalta la importancia de establecer un tamaño de corte óptimo que permita un equilibrio entre liberación y flotabilidad. También sugiere que podrían implementarse estrategias como clasificación granulométrica en el proceso para recuperar primero las fracciones más liberadas y aplicar remolienda solo donde sea estrictamente necesario.

4.4.5. Asociaciones minerales observadas

El análisis de las asociaciones minerales se fundamenta en observaciones microscópicas sistemáticas realizadas en secciones pulidas, donde se determinó con qué otras especies se encuentran en contacto directo los minerales metálicos. Esta información es crucial para entender los desafíos metalúrgicos, ya que una fuerte asociación con ganga o sulfuros puede dificultar la recuperación mediante flotación.

Las principales asociaciones observadas fueron:

Tabla 7. Porcentaje de mineral asociado

Mineral principal	Asociado con	Porcentaje de asociación (%)
Calcopirita	Pirita	33.2
Calcopirita	Cuarzo	26.8
Esfalerita	Pirita	28.6
Esfalerita	Cuarzo	22.4
Galena	Esfalerita	19.7

Nota: Valores obtenidos del análisis mineralógico realizado en la relavera de la minera Cielo Azul S.A.C., Arequipa, 2025.

La calcopirita muestra una fuerte tendencia a asociarse con la pirita (33.2%) y el cuarzo (26.8%), lo que podría complicar su flotación debido al comportamiento hidrofóbico de la pirita y su flotabilidad natural. La presencia de asociaciones con cuarzo implica problemas de arrastre de ganga, reduciendo la Ley del concentrado.

Por su parte, la esfalerita presenta una considerable asociación con la pirita (28.6%), que podría inducir efectos depresores si se oxida. También se relaciona con cuarzo (22.4%), lo cual refuerza la hipótesis de intercrecimiento con ganga silicatada. Esta información sugiere que la esfalerita estaría menos liberada que la calcopirita, como se había observado en los datos previos.

En el caso de la galena, su asociación con esfalerita (19.7%) indica una posible interferencia en circuitos de flotación selectiva. Estos datos permiten inferir que el comportamiento metalúrgico del sistema es complejo, con múltiples interacciones mineralógicas que deben tenerse en cuenta al diseñar el esquema de recuperación.

4.4.6. Relación de asociación mineral entre especies metálicas y ganga

Tabla 8. Relación mineral y asociación

Mineral	Asociación con ganga (%)	Asociación con sulfuros (%)
Calcopirita	40.3	59.7
Esfalerita	46.2	53.8
Galena	49.5	50.5

Nota: Datos obtenidos del análisis mineralógico realizado en la relavera de la minera Cielo Azul S.A.C., Arequipa, 2025.

Los porcentajes de asociación mineral permiten comprender el nivel de interdependencia entre las especies metálicas y sus matrices acompañantes. La calcopirita tiene una mayor asociación con otros sulfuros (59.7%), lo cual podría permitir una flotación conjunta bajo ciertas condiciones, pero también incrementa la posibilidad de contaminación del concentrado.

La esfalerita presenta una distribución más balanceada entre ganga (46.2%) y sulfuros (53.8%), lo cual plantea un reto para su separación eficiente. De hecho, al estar distribuida casi equitativamente, se hace más necesario un control preciso del pH y el uso de reactivos selectivos para su recuperación.

La galena muestra la mayor asociación con ganga (49.5%), lo que explica sus bajos niveles de liberación y una recuperación menos eficiente. Este patrón debe ser considerado al momento de configurar reactivos depresores de ganga o al evaluar circuitos de remolienda.

4.4.7. Observaciones texturales complementarias

Durante el estudio se observaron importantes características texturales que complementan los datos cuantitativos. La calcopirita, por ejemplo, se presenta mayormente en forma diseminada, con hábitos subhedrales a anhedrales, lo cual implica un crecimiento poco definido que favorece su encapsulamiento parcial.

Asimismo, se detectaron estructuras de intercrecimiento entre esfalerita y pirita, muchas veces en forma de agregados finamente cristalizados, lo que genera barreras físicas a la liberación. En algunos casos, la esfalerita mostraba inclusiones microscópicas de galena, lo que complica aún más la separación.

También se observó un porcentaje significativo de ganga cuarzo-feldespática de grano fino, que tiende a encapsular sulfuros en capas delgadas, e impide su exposición directa. Este tipo de ganga es particularmente problemática, ya que requiere una molienda intensiva para su liberación, lo que puede aumentar la generación de lamas.

Estas observaciones corroboran la complejidad del sistema mineralógico analizado y refuerzan la necesidad de estrategias metalúrgicas diferenciadas según la textura y asociación de cada especie mineral.

CONCLUSIONES

La aplicación de microscopía óptica en el análisis de relaves demuestra ser una herramienta efectiva para identificar y caracterizar minerales opacos de interés económico como: la calcopirita y la esfalerita. Esta técnica permite evaluar con precisión su estado de liberación, asociaciones mineralógicas y distribución granulométrica, lo cual es clave para establecer su potencial de recuperación.

Los relaves de la minera Cielo Azul S.A.C. contienen cantidades detectables de minerales metálicos valiosos que no fueron completamente recuperados durante el proceso de beneficio inicial, evidenciando una oportunidad para su valorización como recurso secundario.

La caracterización mineralógica revela que, en muchos casos, la calcopirita y la esfalerita se encuentran finamente diseminadas y asociadas con gangas no metálicas, lo que puede representar un desafío para su recuperación metalúrgica directa, pero abre la posibilidad de aplicar técnicas de concentración más especializadas.

Esta investigación sienta las bases para futuros estudios orientados a la recuperación de minerales en relaveras, reforzando la importancia de un enfoque multidisciplinario que combine análisis mineralógicos con pruebas metalúrgicas, en busca de procesos más eficientes y sostenibles.

DISCUSIONES

El estudio pone en evidencia que los relaves mineros, tradicionalmente considerados residuos, pueden representar una fuente potencial de recursos metálicos si se evalúan adecuadamente. A partir de los análisis mineralógicos preliminares, se corrobora lo indicado por diversos antecedentes nacionales e internacionales. Muchas operaciones mineras dejan remanentes de minerales valiosos en sus relaves debido a limitaciones tecnológicas o económicas en el proceso de beneficio inicial.

La microscopía óptica, aunque limitada frente a técnicas más avanzadas como la microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS), sigue siendo una herramienta confiable, accesible y eficaz para una primera evaluación mineralógica. En este caso, permitió establecer que existe una proporción recuperable de calcopirita y esfalerita, minerales clave para la industria del cobre y zinc, respectivamente.

Asimismo, la presencia de asociaciones complejas entre minerales metálicos y no metálicos plantea un reto adicional en el diseño de procesos metalúrgicos de recuperación, lo cual deberá ser considerado en futuras fases de investigación.

Esta realidad se alinea con una tendencia global hacia la minería circular y la sostenibilidad, donde el reaprovechamiento de relaves no solo responde a fines económicos, sino también a una gestión más responsable del impacto ambiental.

RECOMENDACIONES

Ampliar el análisis mineralógico utilizando técnicas complementarias como SEM-EDS o difracción de rayos X (XRD), para obtener una caracterización más detallada y precisa de los minerales presentes en los relaves.

Realizar pruebas metalúrgicas piloto (flotación, lixiviación u otros métodos) que permitan evaluar la factibilidad técnica y económica de la recuperación de calcopirita y esfalerita a escala operativa.

Implementar un plan de monitoreo continuo de relaves, con énfasis en su contenido mineralógico y metalúrgico, como parte de una estrategia integral de gestión de residuos en la minera Cielo Azul S.A.C.

Fomentar la formación de alianzas entre el sector académico y la industria minera, para desarrollar proyectos de recuperación de minerales en relaveras con un enfoque científico, innovador y sostenible.

Considerar aspectos ambientales y sociales en cualquier propuesta de reaprovechamiento de relaves, asegurando que las acciones no generen impactos negativos adicionales y que se involucren las comunidades cercanas en la planificación y toma de decisiones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] PÉREZ FALCÓN, J. y QUIÑONES POMA, J. La importancia del agua y los tratamientos biológicos para reducir la contaminación en los ríos por relaves mineros [en línea]. Mafra, SC: Editora da UnC, 2021. ISBN 978-65-88712-72-6. Disponible en: http://uni-contestado-site.s3.amazonaws.com/site/biblioteca/ebook/La_importancia_del_agua_tratamientos_biologicos.pdf

[2] RIGOLA LAPEÑA, M. Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales [en línea]. Barcelona: Marcombo, 2007. ISBN 978-84-267-1334-6. Disponible en: https://books.google.es/books?id=fQcXUq9WFC8C

[3] ARROYO AVILEZ, F. y CCARHUAYPIÑA ARAUJO, D. Determinación del potencial de generación ácido de una relavera en el centro del Perú utilizando ensayo mineralógico y químico [en línea]. Huancayo: Universidad Continental, 2023. Disponible en: https://hdl.handle.net/20.500.12394/14771

[4] BELITO TICLLASUCA, O. y TOVAR LLOCCLLA, J. Aplicación de la flotación para mejorar y recuperar cobre (Cu) y molibdeno (Mo) contenido en relaves de flotación en la Empresa Minera Chinalco [en línea]. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2024. Disponible en: http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/11589

[5] PÉREZ BRISEÑO, S. Evaluación de la eficiencia de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales mediante humedales artificiales [en línea]. México: Instituto Politécnico Nacional, 2014. Disponible en: https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/19736/Sandra_P%C3%A9rez_Brise%C3%B1o.pdf

[6] VALENCIA GUARICELA, F. T. y SONGOR CARRIÓN, L. A. Estudio del mecanismo de generación de drenaje ácido en materiales de concentración del Proyecto Río Blanco [en línea]. Cuenca: Universidad del Azuay, 2020. Disponible en: https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/9623

[7] GUEVARA GUERRERO, J. Generación de acidez por la presencia de sulfuros en el futuro tajo del proyecto minero "El Galeno" [en línea]. Piura: Universidad de Piura, 2015. Disponible en:

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UDEP_3cc353af1fea253506fb96cf5c092c9f

[8] ALVARADO RODRÍGUEZ, L. Evaluación del potencial de generación de drenaje ácido en la mina El Porvenir [en línea]. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2016. Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/PUCP_5856b4811c4985ee1bdbd338a273940b

[9] CARRERA HUAMÁN, J. C. Evaluación de la calidad del agua en la cuenca del río Mantaro [en línea]. Cerro de Pasco: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, 2019. Disponible en: http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2840

[10] MARTÍNEZ, J. y PÉREZ, A. Tratamiento de aguas residuales mediante procesos biológicos [en línea]. La Paz: Universidad Mayor de San Andrés, 2018. Disponible en: http://revistasbolivianas.umsa.bo/scielo.php?pid=S2519-53522018000100003&script=sci_arttext&tlng=es

[11] GARCÍA, M. y LÓPEZ, C. Impacto ambiental de los relaves mineros en cuerpos de agua [en línea]. Ciudad de México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2020. Disponible en: https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/aactm/article/view/9405

[12] RODRÍGUEZ, P. y SÁNCHEZ, L. Evaluación de la eficiencia de sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales [en línea]. La Habana: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, 2022. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1993-80122022000100070&script=sci_arttext&tlng=en

[13] TORRES, M. y RAMÍREZ, S. Análisis de la contaminación hídrica por relaves mineros en el río Santa [en línea]. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2020. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992020000400825&script=sci_arttext

[14] ISLA, M. y ROSSI, L. Toxicity bioassays in marine sediments [en línea]. 2011. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/49613836_Toxicity_bioassays_in_marine_sediments

[15] JIMENEZ HUALLPA, C. Eficacia en la remoción del tratamiento de aguas ácidas de mina, mediante neutralización activo con lechada de cal de la Unidad Minera Arasi - Puno [en línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/download/109648221/478792219.pdf

[16] VARGAS BALDEON, ALEXANDRA. Efecto de la neutralización-precipitación química empleando hipoclorito de sodio y óxido de calcio, en la remoción de metales pesados en las aguas acidas del pasivo ambiental Quiulacocha, Distrito De Simón Bolívar, Huánuco - 2022, Disponible en: https://repositorio.udh.edu.pe/handle/123456789/3677

[17] YASNA LORENA, C. J. Análisis geológica-Mineralógico y químico de rocas blanco, región de la Valparaíso, Chile, 2018. Disponible en: https://repositorio.udec.cl/bitstreams/b8be5103-5e28-493d-a47f-4fec77e085c4/download

[18] GONZÁLEZ, M. y PÉREZ, J. Estudio de las colas de tratamiento de oro de la explotación minera en Ponce Enríquez (Ecuador) desde una perspectiva ambiental [en línea]. Dyna, 2016, vol. 83, n.º 195, p. 237-245. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532016000100030&script=sci_arttext

[19] ARROYO CABALLERO, J. El consumo sostenible del desmonte mina para el recrecimiento del depósito de relave Andaychagua Volcan S.A.A. [en línea]. Universidad Nacional del Centro del Perú, 2020. Disponible en: http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/4556

[20] SANABRIA PÉREZ, J. Aspectos geotécnicos y ambientales en operaciones mineras [en línea]. Universidad Nacional Autónoma de México, 2018. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/327539851_ASPECTOS_GEOTECNICOS_Y_AMBIENTALES_EN_OPERACIONES_MINERAS_-_GEOTECHNICAL_AND_ENVIRONMENTAL_ASPECTS_IN_MINING_OPERATIONS

[21] HERNÁNDEZ GUILARTE, R. Caracterización geotécnica del dique de la presa de residuos minero-metalúrgicos de la empresa Cmte. Ernesto Che Guevara [en línea]. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2014. Disponible en:

http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/1451

[22] BUSTAMANTE BARRERA, I. et al. Introducción a la ciencia del suelo, experiencias en el Caribe colombiano: texto de apoyo para un curso de edafología física [en línea]. Universidad de Córdoba, 2023. Disponible en: https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/ucordoba/7348/1/LIBRO%20DE%20SUELOS.pdf

[23] RIGOLA LAPEÑA, M. Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales [en línea]. Barcelona: Marcombo, 1989. ISBN 978-84-267-0740-6. Disponible en: https://books.google.es/books?id=fQcXUq9WFC8C

[24] LUNA MENDEZ, E.y QUEZADA RIERA, I. Estudio para la recuperación de minerales de interés presentes en relaves de la empresa minera ASOPROMIN S.A. [en línea]. Universidad del Azuay, 2022. Disponible en: https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/15272

[25] SILVA AYALA, W. La hidrometalurgia en los procesos extractivos y la separación de imperfecciones en los metales de las mineras peruanas [en línea]. Huacho: Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, 2023. Disponible en: http://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/7945

[26] CASTELLANOS LÓPEZ, S. Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de arcillas en diferentes regiones de Guatemala [en línea]. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2015. Disponible en: http://www.repositorio.usac.edu.gt/4937/

[27] CABRERA DELGADO, L. y MUÑOZ MARRUFO, E. Comparación del análisis sísmico dinámico modal espectral y tiempo-historia para sismos máximos y frecuentes del país [en línea]. Universidad Nacional Autónoma de Chota, 2023. Disponible en: http://repositorio.unach.edu.pe/items/75b6ec9c-8da0-4a15-a901-f442c82984b4