

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Análisis y recuperación de minerales opacos en  
relaves mineros del centro del Perú mediante la  
técnica de microscopía óptica**

David Alexander Laureano Garcia  
Elvis Jesus Maita Quispe  
Gary Vincenzo Rivera Leiva

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" .

## INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

**A** : Decano de la Facultad de Ingeniería  
**DE** : Nelida Tantavilca Martínez  
Asesor de trabajo de investigación  
**ASUNTO** : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación  
**FECHA** : 23 de Abril de 2025

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

**Título:**

Análisis y Recuperación de Minerales Opacos en Relaves Mineros del Centro del Perú Mediante la Técnica de Microscopía Óptica

**Autores:**

1. David Alexander Laureano Garcia – EAP. Ingeniería de Minas
2. Elvis Jesus Maita Quispe – EAP. Ingeniería de Minas
3. Gary Vincenzo Rivera Leiva – 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 19 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI  NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores  
Nº de palabras excluidas (**en caso de elegir "SI"**): 10 SI  NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI  NO

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)

## **ASESOR**

Nelida Tantavilca Martinez

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación, principalmente, a mi madre que pese a no estar presente conmigo, me está cuidando desde el más allá. A mi padre y hermanos que se encuentran a mi lado; por apoyarme en el trayecto de mi carrera y que confían en que saldé adelante, por otro lado, a los ingenieros que pusieron las enseñanzas y orientaron cada vez que lo necesité.

David

La culminación de este trabajo de investigación es el resultado del esfuerzo conjunto que ha involucrado el apoyo incondicional de mi familia y la guía experta de mis profesores. Mis padres, han sido mi pilar fundamental, brindándome el apoyo para dedicarme a realizar este proyecto. La confianza inquebrantable en mi capacidad ha sido mi mayor motivación. ¡Este logro es para ustedes también!

Elvis

Este trabajo se lo dedico a mis padres, abuelos y a mi hermano por todo su apoyo incondicional a lo largo de estos años, pero sobre todo dedicárselo a mi abuelita: Elsa Cira García Miranda, que no está a mi lado, pero siempre en mi corazón y en mi pensamiento, se lo dedico a ustedes que siempre confiaron en mí y nunca me dejaron renunciar. ¡Este logro es para ustedes también!

Gary

## **AGRADECIMIENTO**

El presente trabajo de investigación representa la culminación de una etapa muy bonita e importante en nuestras vidas, que no ha sido para nada sencilla, que nos ha costado; sudor, lágrimas e infinidad de amanecidas, que dieron como resultado las personas que somos hoy. Durante todo este proceso hemos atravesado grandes dificultades y retos, los cuales hemos ido superándolos con optimismo y dedicación, los mismos que nos sirvieron para fortalecernos como personas y futuros ingenieros. Todo esto nos sirvió para aprender muchas cosas que actualmente sabemos y aplicamos en nuestro día a día.

Agradecemos a todos nuestros familiares, que han sido nuestro pilar en todo este tiempo, nos han apoyado en momentos tristes amaneciéndose con nosotros, en frustraciones, llantos, pero también han estado con nosotros en momentos felices festejando el logro de nuestro trabajo o aprobando y aprendiendo el curso que pensábamos imposible.

Por último, damos gracias a nuestra alma mater por albergarnos durante los años de estudio de pregrado, a todos nuestros maestros con los que alguna vez compartimos una clase o una conversación, por la constante exigencia y motivación para dar todo de nosotros, confiando en nuestras capacidades, siempre ayudándonos con una sonrisa motivadora, impartiéndonos todos sus conocimientos y experiencias a lo largo de nuestra vida universitaria.

Además, agradecemos por su entrega y compromiso con nosotros desde el primer día a nuestra querida Ing. Nelida Tantavilca, asesora de tesis y maestra en nuestra vida universitaria, que vio de cerca nuestro desarrollo y avance paso a paso.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ASESOR	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	xiv
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	15
1.1. Planteamiento y formulación del problema	15
1.1.1. Planteamiento del problema	15
1.2. Formulación del problema	16
1.2.1. Problema general	16
1.2.2. Problemas específicos	16
1.3. Objetivos	16
1.3.1. Objetivo general	16
1.3.2. Objetivos específicos	17
1.4. Justificación e importancia	17
1.4.1. Justificación ambiental	17
1.4.2. Justificación social - práctica	17
1.4.3. Justificación tecnológica	18
1.4.4. Justificación académica	18
1.4.5. Justificación económica	18
1.5. Hipótesis de la investigación	19
1.5.1. Hipótesis general	19
1.5.2. Hipótesis específicas	19
1.6. Identificación de las variables	19
1.6.1. Variable independiente	19
1.6.2. Variable dependiente	19
1.6.3. Matriz de operacionalización de variables	20
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	22
2.1. Antecedentes del problema	22
2.1.1. Antecedentes internacionales	22
2.1.2. Antecedentes nacionales	26

2.1.3. Antecedentes locales _____	27
2.2. Generalidades de la unidad minera _____	29
2.2.1. Bases teóricas del estudio _____	29
2.2.1.1. Potencial de generación ácido _____	29
2.2.1.2. Generación de drenaje minero (DM) _____	29
2.2.1.3. Análisis mineralógico de relavera _____	29
2.2.1.4. Análisis geoquímico de relavera _____	30
2.2.1.4.1. Tipos de drenaje ácido: _____	30
2.2.1.4.2. Prueba geoquímica estática _____	30
2.3. Definiciones teóricas del estudio _____	30
2.3.1. Relaves mineros. _____	30
2.3.2. Minerales _____	30
2.3.3. Concentración de minerales _____	31
2.3.4. Análisis mineralógico _____	31
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN _____	32
3.1. Método y alcances de la investigación _____	32
3.1.1. Método de la investigación _____	32
3.1.2. Nivel de la investigación _____	32
3.1.3. Diseño de la investigación _____	32
3.1.4. Tipo de investigación _____	32
3.2. Población y muestra _____	33
3.2.1. Población _____	33
3.2.2. Muestra _____	33
3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos _____	33
3.3.1. Técnicas utilizadas en la recolección de datos _____	33
3.3.2. Instrumentos utilizados en la recolección de datos _____	35
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN _____	36
4.1. Resultados _____	36
4.2. Análisis de laboratorio y muestra _____	36
4.2.1. Volúmenes y grados de liberación de los minerales observados _____	36
4.2.1.1. Principales hallazgos _____	38
4.2.2. Tipos de entrelazamiento de los minerales y sus posibilidades de liberación completa _____	38
4.2.2.1. Principales hallazgos _____	40
4.2.3. Minerales presentes en la muestra 1 _____	40
4.2.3.1. Principales hallazgos _____	43
4.2.4. Minerales presentes en la muestra 2 _____	43
4.2.4.1. Principales hallazgos _____	45

4.3. Caracterización mineralógica de las muestras	45
4.3.1. Muestra 1	45
4.4. Muestra 2	46
4.5. Tipos de entrelazamiento y posibilidades de liberación**	47
4.6. Análisis microscópico: fotomicrografías	47
CONCLUSIONES	51
RECOMENDACIONES	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXOS	56

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables.....	20
Tabla 2. Volúmenes y grados de liberación .....	37
Tabla 3. Entrelazamiento de mineral.....	39
Tabla 4. Estudios de muestra 1.....	41
Tabla 5. Estudio muestra 2.....	44
Tabla 6. Minerales presentes en la muestra 1 .....	45
Tabla 7. Minerales presentes en la muestra 2 .....	46
Tabla 8. Tipos de entrelazamiento en la muestra .....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partícula de oro entrelazada con goethita (fotomicrografía 1: partícula entrelazada de calcopirita (cp) con la covelita (cv) y partícula libre de ganga (GGs). 500X.).....	48
Figura 2. Calcopirita en contacto con bornita y pirita fotomicrografía: 2. Partícula mixta de oro (Au) con goethita (Gt). 500X.).....	48
Figura 3. Pirita y ganga en partículas mixtas (fotografía. 3. Partícula mixta de calcopirita (Cp) con la bornita (Bn) con la pirita (Py) y con la ganga (GGs). 500X.).....	49

## RESUMEN

La presente investigación aborda la problemática de los relaves mineros en el centro del Perú, los cuales contienen cantidades significativas de minerales valiosos como calcopirita y esfalerita, que no fueron completamente recuperados en los procesos metalúrgicos iniciales. La falta de un análisis detallado sobre la distribución, asociación mineralógica y grado de liberación de estos minerales ha limitado las posibilidades de su recuperación. El objetivo del estudio es optimizar la recuperación de estos minerales mediante la aplicación de técnicas de microscopía óptica, lo que permitirá caracterizar sus propiedades mineralógicas y texturales. Se han realizado análisis microscópicos en muestras representativas de relaves, identificando la composición mineralógica, la distribución volumétrica y los tipos de entrelazamiento mineral. Los resultados indican que la calcopirita y la esfalerita presentan una liberación parcial, lo que sugiere la necesidad de procesos adicionales de molienda y flotación para mejorar su separación de la ganga. Asimismo, se ha determinado que la fuerte asociación de la calcopirita con minerales oxidados como la goethita y la pirita representa un reto metalúrgico que debe ser abordado mediante estrategias específicas de procesamiento. La implementación de técnicas de flotación selectiva y pretratamiento de desulfuración se propone como una alternativa viable para maximizar la eficiencia del proceso y minimizar la generación de drenaje ácido. Los hallazgos de este estudio destacan la importancia de la caracterización mineralógica en la optimización de los procesos de recuperación de minerales opacos en relaves. Además de mejorar la eficiencia metalúrgica y la rentabilidad económica, esta investigación contribuye a la reducción del impacto ambiental asociado a la acumulación de residuos mineros, promoviendo un enfoque más sostenible en la gestión de relaveras.

**Palabras clave:** relaves mineros, calcopirita, esfalerita, microscopía óptica, flotación, recuperación de minerales, impacto ambiental.

## ABSTRACT

This research examines the issue of mining tailings in central Peru, which contain significant amounts of valuable minerals such as chalcopyrite and sphalerite that were not fully recovered during the initial metallurgical processes. The lack of a detailed analysis of the distribution, mineralogical associations, and degree of liberation of these minerals has limited their recovery potential. The study aims to optimize the recovery of these minerals through the application of optical microscopy techniques, allowing for a detailed characterization of their mineralogical and textural properties. Microscopic analyses were conducted on representative tailing samples to determine mineralogical composition, volumetric distribution, and mineral interlocking types. The results indicate that chalcopyrite and sphalerite exhibit partial liberation, suggesting the need for additional grinding and flotation processes to enhance their separation from gangue minerals. Furthermore, the strong association of chalcopyrite with oxidized minerals such as goethite and pyrite pose a metallurgical challenge that must be addressed through specific processing strategies. The implementation of selective flotation techniques and pre-desulfurization treatment is proposed as a viable alternative to maximize process efficiency and minimize acid drainage generation. The findings of this study highlight the importance of mineralogical characterization in optimizing the recovery processes of opaque minerals from tailings. Beyond improving metallurgical efficiency and economic profitability, this research contributes to reducing the environmental impact associated with mining waste accumulation, promoting a more sustainable approach to tailings management.

**Keywords:** mining tailings, chalcopyrite, sphalerite, optical microscopy, flotation, mineral recovery, environmental impact.

## INTRODUCCIÓN

La minería es una de las actividades económicas más importantes del Perú, contribuyendo significativamente al desarrollo del país. Sin embargo, el impacto ambiental derivado de los residuos mineros, particularmente los relaves, representa un desafío para la sostenibilidad del sector. Los relaves mineros contienen minerales de valor económico que no fueron recuperados en los procesos de extracción primaria, generando oportunidades para su reaprovechamiento mediante técnicas avanzadas de caracterización y recuperación.

En el centro del Perú, los depósitos de relaves contienen sulfuros de metales como calcopirita y esfalerita, que permanecen atrapados en la ganga mineral y no han sido eficientemente separados. Su recuperación es esencial no solo por su rentabilidad económica, sino también por la reducción del impacto ambiental asociado con la oxidación de sulfuros, que puede generar drenaje ácido. Para abordar este problema, es fundamental contar con un análisis mineralógico detallado que permita identificar la distribución, asociaciones y grados de liberación de estos minerales.

La microscopía óptica se presenta como una herramienta clave para el análisis mineralógico de los relaves, ya que permite la identificación y caracterización detallada de los minerales opacos presentes en las muestras. Su aplicación en la recuperación de calcopirita y esfalerita ofrece una alternativa eficiente para optimizar los procesos metalúrgicos, mejorando la eficiencia en la recuperación de estos minerales y minimizando la pérdida de recursos valiosos.

Este estudio tiene como objetivo principal optimizar la recuperación de calcopirita y esfalerita mediante un análisis detallado de su morfología y grado de liberación en los relaves del centro del Perú. Para ello, se emplearán técnicas de microscopía óptica y análisis geoquímico, con el fin de evaluar las características texturales y mineralógicas de los materiales estudiados.

Los resultados de esta investigación no solo contribuirán a mejorar la eficiencia de los procesos metalúrgicos, sino que también proporcionarán información valiosa para la implementación de estrategias sostenibles en la gestión de relaves. Además, se espera que los hallazgos sirvan como base para futuras investigaciones orientadas a la recuperación de minerales a partir de residuos mineros, promoviendo así un enfoque más sostenible y rentable en la industria minera.

# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

### **1.1. Planteamiento y formulación del problema**

#### **1.1.1. 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, su recuperación enfrenta desafíos debido a la falta de conocimiento detallado sobre su distribución, asociación mineralógica y grado de liberación.

La microscopía 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. No obstante, 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 microscopía 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).

Para predecir el drenaje ácido minero, se emplean ensayos estandarizados como la caracterización mineralógica y textural, así como pruebas estáticas y cinéticas. Estas herramientas permiten determinar el grado de acidez de los relaves y son aplicables en distintos contextos geo minero-metalúrgicos (3).

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 microscopía 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 microscopía óptica?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- ¿Cómo identificar las características texturales y mineralógicas de la calcopirita y esfalerita presentes en el material de la relavera utilizando microscopía óptica?
- ¿Qué asociaciones mineralógicas y niveles de liberación de calcopirita y esfalerita afectan la recuperación de estos minerales en la relavera?
- ¿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**

### **1.3.1. Objetivo general**

Optimizar la recuperación de calcopirita y esfalerita de una relavera en el centro del Perú mediante el análisis mineralógico utilizando microscopía óptica con el fin de mejorar la eficiencia de los procesos de extracción y el aprovechamiento de recursos minerales residuales.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Identificar las características texturales y mineralógicas de la calcopirita y esfalerita presentes en la relavera mediante microscopía óptica.
- Determinar la asociación mineralógica y el grado de liberación de la calcopirita y esfalerita en el material de la relavera.
- Proponer estrategias basadas en el análisis mineralógico para mejorar los procesos de recuperación de calcopirita y esfalerita.

## **1.4. Justificación e importancia**

### **1.4.1. Justificación ambiental**

La minería genera grandes volúmenes de residuos que, si no son gestionados adecuadamente, pueden representar un riesgo ambiental significativo. Los relaves mineros, al contener sulfuros, pueden generar drenaje ácido y liberar metales pesados al medio ambiente, afectando los suelos y fuentes de agua cercanas. Recuperar los minerales valiosos de estos residuos no solo optimiza el uso de los recursos, sino que también reduce la cantidad de material residual y, por ende, el impacto ambiental.

Además, al aplicar técnicas avanzadas de análisis mineralógico como la microscopía óptica, se pueden diseñar estrategias más sostenibles para la recuperación de metales, evitando la necesidad de nuevos procesos extractivos agresivos con el entorno. Esto contribuye a la reducción de la contaminación y a una mejor gestión de los pasivos ambientales de la minería.

### **1.4.2. Justificación social - práctica**

La recuperación de minerales de relaveras no solo tiene un impacto positivo en la industria minera, sino también en las comunidades locales. El aprovechamiento de estos residuos puede generar oportunidades de empleo en la zona, promoviendo el desarrollo de tecnologías especializadas y fomentando la capacitación de profesionales en el área de análisis mineralógico.

Por otro lado, el manejo adecuado de los relaves reduce los riesgos para la salud de las poblaciones cercanas, quienes muchas veces están expuestas a contaminantes provenientes de los residuos mineros. Mejorar los procesos de recuperación de metales implica reducir la presencia de sustancias tóxicas en el ambiente, contribuyendo al bienestar de las comunidades y al fortalecimiento de prácticas responsables en la industria minera.

### **1.4.3. Justificación tecnológica**

La microscopía óptica representa una herramienta fundamental para el análisis detallado de los minerales presentes en los relaves, permitiendo obtener información precisa sobre su composición, grado de liberación y posibilidades de recuperación. A pesar de su potencial, esta técnica aún no ha sido completamente aprovechada en el contexto de la recuperación de minerales residuales, por lo que este estudio busca demostrar su eficacia y fomentar su aplicación en la industria minera.

El desarrollo de métodos optimizados de caracterización mineralógica permitirá avanzar en la implementación de tecnologías más eficientes para la separación y recuperación de minerales valiosos, reduciendo costos operativos y aumentando la precisión en los procesos de beneficio mineral.

### **1.4.4. Justificación académica**

Desde un enfoque científico, esta investigación contribuye al conocimiento sobre la caracterización mineralógica mediante microscopía óptica aplicada a relaveras, un área poco explorada en la literatura minera. La identificación precisa de los minerales presentes en los residuos mineros y la evaluación de su grado de liberación pueden servir como referencia para futuras investigaciones relacionadas con la optimización de procesos metalúrgicos y la sostenibilidad minera.

Además, el estudio ofrece información relevante para la formación de nuevos profesionales en el campo de la ingeniería de minas, brindando herramientas actualizadas sobre técnicas de caracterización y recuperación de minerales, lo que fortalecerá el desarrollo de conocimientos en el ámbito académico y profesional.

### **1.4.5. Justificación económica**

Desde una perspectiva económica, la recuperación de minerales desde relaveras representa una oportunidad para incrementar la rentabilidad de las operaciones mineras. La optimización de los procesos de recuperación permite reducir las pérdidas de metales valiosos, maximizando su aprovechamiento sin necesidad de nuevas exploraciones o extracciones que impliquen mayores costos.

Asimismo, al minimizar la acumulación de residuos y mitigar sus impactos ambientales, se pueden evitar sanciones regulatorias y costos asociados a la gestión de pasivos ambientales. De esta manera, la aplicación de técnicas avanzadas como la microscopía óptica no solo contribuye

a la sostenibilidad del sector, sino que también ofrece un enfoque más eficiente y económicamente viable para la recuperación de recursos mineros.

## **1.5. Hipótesis de la investigación**

### **1.5.1. Hipótesis general**

El uso de la microscopía óptica como técnica de análisis mineralógico permite caracterizar con mayor precisión la distribución, asociación y grado de liberación de calcopirita y esfalerita en los relaves mineros del centro del Perú, lo que facilita el diseño de estrategias más eficientes para su recuperación y optimización en procesos metalúrgicos.

### **1.5.2. Hipótesis específicas**

- La microscopía óptica permite identificar las características texturales y mineralógicas de la calcopirita y esfalerita en los relaves mineros, proporcionando información clave para mejorar su separación y recuperación.
- La caracterización mineralógica mediante microscopía óptica facilita la determinación de los niveles de liberación y las asociaciones mineralógicas de la calcopirita y esfalerita, lo que influye directamente en la eficiencia del proceso de recuperación.
- La información obtenida a través del análisis mineralógico puede ser utilizada para diseñar estrategias de recuperación más precisas y sostenibles, reduciendo la pérdida de minerales valiosos y optimizando la gestión de relaves.

## **1.6. Identificación de las variables**

### **1.6.1. Variable independiente**

- Condiciones del material de relave
- Métodos de preparación
- Técnicas de microscopía

### **1.6.2. Variable dependiente**

- Cantidad de minerales opacos
- Identificación mineralógica
- Calidad de los concentrados
- Eficiencia del proceso

### 1.6.3. Matriz de operacionalización de variables

**Tabla 1. Operacionalización de variables**

Tipo de variable	Variable	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de 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	Tipo de minerales	Minerales identificados (pirita, calcopirita, etc.)	Cualitativa

Tipo de variable	Variable	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
		minerales presentes en las muestras.			
	Calidad de los concentrados	Grado de pureza y contenido de metales valiosos en los minerales recuperados.	Pureza Contenido de metales	Porcentaje de pureza Cu, Pb, Zn, Ag en los concentrados	Cuantitativa Cuantitativa
	Eficiencia del proceso	Evaluación de la efectividad y precisión del análisis mineralógico.	Tiempo Precisión	Tiempo promedio requerido para identificar minerales Precisión del análisis mineralógico	Cuantitativa Cualitativa y Cuantitativa

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes del problema**

##### **2.1.1. Antecedentes internacionales**

Alvarado y León (2022) desarrollan una evaluación técnica orientada a la recuperación de cobre mediante cementación con chatarra de hierro, a partir del drenaje ácido de mina (DAM) de la bocamina San Luis en Michiquillay. El objetivo principal del proyecto fue determinar la eficiencia de la cementación del cobre en condiciones específicas del DAM con el fin de proponer una alternativa viable de recuperación metálica que, a su vez, contribuya a la mitigación ambiental. La investigación plantea una solución tecnológica de bajo costo que pueda ser aplicada en contextos similares de minería artesanal y pequeña minería. La metodología empleada se alinea con el enfoque cuantitativo, descriptivo-experimental según la clasificación de Hernández y Sampieri. Se realizaron muestreos del DAM, caracterización físico-química y ensayos de cementación con chatarra de hierro en condiciones controladas. La fase experimental incluyó la variación de parámetros como el pH, la relación masa/volumen de hierro y cobre, y el tiempo de reacción, con el propósito de optimizar el proceso. Los resultados indicaron una eficiencia de recuperación de cobre superior al 85% bajo condiciones óptimas, lo cual demuestra la factibilidad técnica del proceso. Asimismo, se observaron reducciones importantes en la acidez del drenaje post-tratamiento, lo que evidencia un efecto sinérgico en el control de la contaminación ambiental. En conclusión, los autores sostienen que la cementación con chatarra de hierro no solo es una opción económica para recuperar metales valiosos, sino que también contribuye a la neutralización parcial del DAM. Este estudio aporta significativamente al campo de la remediación de pasivos ambientales mineros y se relaciona directamente con el título de investigación al abordar un enfoque sustentable para el tratamiento de efluentes ácidos y la valorización de residuos metálicos (4).

Senese, Negrelli e Hidalgo (2021) elaboran un estudio centrado en la predicción y análisis del drenaje ácido de mina (DAM) generado sobre minerales presentes en escombreras, con el objetivo de anticipar su comportamiento geoquímico y contribuir a la planificación de medidas preventivas en la gestión de residuos mineros. La investigación se desarrolló con el propósito de comprender la cinética de generación de ácido y la liberación de metales pesados desde estos depósitos, destacando la necesidad de evaluar el potencial contaminante a largo plazo de materiales aparentemente inertes. La metodología aplicada corresponde al enfoque cuantitativo y diseño no experimental de tipo longitudinal, de acuerdo con la tipología de Hernández y Sampieri. Los autores realizaron ensayos de laboratorio que incluyeron pruebas de lixiviación estática y cinética, acompañadas de análisis mineralógicos y geoquímicos. Estos métodos permitieron modelar la generación de ácido y metales en función del tiempo, así como identificar los minerales sulfurados responsables de la reactividad del material. Los resultados mostraron una clara tendencia a la acidificación progresiva de los lixiviados y una liberación sostenida de metales como hierro, cobre y zinc. Se determinó que la mineralogía de las escombreras influye de manera decisiva en la velocidad de generación de ácido, siendo los sulfuros de hierro los principales catalizadores de la reacción oxidativa. Asimismo, el estudio evidenció que ciertos factores ambientales, como la humedad y la temperatura, intensifican el proceso de alteración geoquímica. En sus conclusiones, los autores destacan la urgencia de incorporar protocolos de monitoreo preventivo en proyectos de cierre de minas, así como la necesidad de aplicar técnicas de encapsulamiento o neutralización para mitigar los impactos del DAM. El aporte más relevante de este estudio reside en la integración de herramientas predictivas para la gestión ambiental de residuos mineros, lo que guarda una estrecha relación con el título de investigación propuesto, al sustentar técnicamente la necesidad de identificar, evaluar y controlar el potencial generador de ácido en materiales residuales mineros (5).

Ruiz, Juárez y Lapidus (2022) evalúan el potencial generador de ácido en jales mineros del estado de Zacatecas con el propósito de determinar el riesgo ambiental que representan estos residuos mediante el análisis de su composición geoquímica y su comportamiento frente a procesos de oxidación. El objetivo principal fue establecer una caracterización técnica que permita identificar materiales con alta capacidad de generación de drenaje ácido de mina (DAM), contribuyendo así a la prevención de pasivos ambientales en zonas mineras activas y abandonadas. La metodología se basó en un enfoque cuantitativo, con diseño no experimental y alcance descriptivo, de acuerdo con los lineamientos metodológicos de Hernández y Sampieri. Se realizaron análisis mineralógicos mediante difracción de rayos X, pruebas de acidez neta potencial (NAPP), ensayos ABA (acid-base accounting), y test de lixiviación estática. Estos procedimientos permitieron obtener información precisa sobre la capacidad de neutralización de los jales y su potencial de generar acidez en condiciones ambientales

simuladas. Los resultados indicaron que una parte significativa de las muestras analizadas posee un alto contenido de sulfuros, especialmente pirita, lo que las convierte en fuentes potenciales de generación de ácido. Las conclusiones destacan la necesidad de incorporar técnicas de encapsulamiento de jales o aditivos neutralizantes para prevenir procesos de oxidación en ambientes húmedos. Este antecedente se vincula estrechamente con el presente estudio, ya que proporciona una base científica sólida para evaluar el comportamiento de residuos mineros en cuanto a la generación de ácido, facilitando la identificación de zonas críticas y posibles estrategias de mitigación (6).

Arroyo (2023) desarrolla una investigación orientada a la determinación del potencial de generación ácido (PGA) en una relavera ubicada en la región central del Perú, con el fin de identificar el grado de riesgo ambiental asociado a este depósito minero. El objetivo central del estudio fue establecer el PGA mediante pruebas geoquímicas y mineralógicas, permitiendo así proponer medidas correctivas o de prevención frente a la posible generación de drenaje ácido de mina (DAM) en el largo plazo. La metodología adoptada corresponde a un enfoque cuantitativo, con diseño no experimental y nivel descriptivo, según los criterios metodológicos establecidos por Hernández y Sampieri. Se realizaron pruebas de laboratorio como el test ABA (acid-base accounting), ensayos de lixiviación estática y análisis de difracción de rayos X para caracterizar las muestras de relave. Además, se evaluaron parámetros fisicoquímicos como el pH, la conductividad eléctrica y la concentración de metales disueltos en los lixiviados obtenidos. Los resultados revelaron que el relave posee una cantidad significativa de minerales sulfurados y un bajo potencial de neutralización, lo cual incrementa el riesgo de generación de DAM en condiciones ambientales naturales. La investigación concluye que es indispensable implementar controles ambientales en las relaveras que presenten condiciones similares, tales como coberturas impermeables o técnicas de revegetación. Este antecedente es relevante para el presente estudio ya que aporta datos precisos sobre la evaluación del PGA en depósitos mineros, contribuyendo directamente a la formulación de estrategias para la gestión sostenible de residuos mineros y prevención de contaminación hídrica por DAM (7).

Cordero, Marchevsky, Chiacchiarini y Giaveno (2022) elaboran un estudio detallado sobre la caracterización física, química y mineralógica de un antiguo relave con el propósito de explorar alternativas de reutilización sustentable. El objetivo de la investigación fue determinar las propiedades del relave para evaluar su viabilidad como material aprovechable y, al mismo tiempo, identificar su potencial contaminante, especialmente en relación con la generación de drenaje ácido de mina (DAM). La metodología empleada se enmarca dentro del enfoque cuantitativo, con diseño no experimental y alcance descriptivo, conforme a la clasificación metodológica de Hernández y Sampieri. Se llevaron a cabo análisis

granulométricos, difracción de rayos X, espectroscopía de fluorescencia de rayos X y pruebas geoquímicas, incluyendo determinaciones del potencial de acidez y contenido de metales pesados. El estudio también consideró observaciones de campo para contextualizar el estado actual del depósito y su interacción con el entorno. Los resultados mostraron que el relave contiene minerales con valor económico residual, como la calcopirita y la esfalerita, junto con una fracción significativa de sulfuros capaces de generar ácido. Asimismo, se identificó una textura fina y pobre compactación del material, lo que facilita la infiltración de agua y, por tanto, la oxidación de sulfuros. En sus conclusiones, los autores plantean que, además del riesgo ambiental, existen oportunidades de recuperación de metales mediante tecnologías apropiadas, siempre que se implementen medidas de control ambiental. Este antecedente se relaciona directamente con el estudio en desarrollo, ya que demuestra la importancia de la caracterización integral de los residuos mineros tanto para su aprovechamiento como para la prevención del DAM (8).

Salas, Guadarrama, Fernández, González y Barraza (2020) presentan una investigación enfocada en la predicción del drenaje ácido de mina (DAM) a partir de jales provenientes de la mina La Prieta, ubicada en Chihuahua, México. El propósito del estudio fue identificar el potencial generador de ácido de los jales mediante la aplicación de pruebas estandarizadas, permitiendo estimar su impacto ambiental futuro y establecer lineamientos para su adecuada gestión. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con diseño no experimental y nivel correlacional-descriptivo, según lo establecido en la metodología de Hernández y Sampieri. Se realizaron pruebas ABA (acid-base accounting), ensayos de lixiviación estática, determinaciones del contenido de carbono orgánico e inorgánico, y análisis mineralógico mediante técnicas espectroscópicas. Además, se compararon los resultados con estándares internacionales para determinar el nivel de riesgo ambiental asociado a los jales. Los resultados evidenciaron un alto potencial ácido en las muestras analizadas, debido a la presencia dominante de sulfuros como la pirita y la arsenopirita, y a la baja capacidad de neutralización observada en los jales. Las conclusiones de los autores advierten sobre la posibilidad de formación de efluentes ácidos en condiciones de exposición natural prolongada, lo que podría desencadenar procesos de lixiviación de metales tóxicos hacia cuerpos de agua cercanos. Este antecedente es de especial importancia para la investigación en curso, ya que aporta evidencia concreta sobre los mecanismos de predicción del DAM y refuerza la necesidad de estrategias preventivas para el manejo de residuos mineros (9).

Martínez (2018) elabora un protocolo técnico-metodológico para la caracterización y predicción del drenaje ácido en depósitos de relaves mineros con el objetivo de proporcionar

una guía sistemática que permita evaluar el comportamiento geoquímico de estos residuos frente a condiciones de oxidación natural. La propuesta busca estandarizar procedimientos de muestreo y análisis, facilitando la toma de decisiones en el marco de la gestión ambiental minera y la prevención de impactos a largo plazo. La metodología adoptada responde a un enfoque cuantitativo, con diseño no experimental y alcance propositivo-descriptivo, de acuerdo con la clasificación planteada por Hernández y Sampieri. El protocolo contempla etapas como la selección de puntos de muestreo, caracterización física y mineralógica, pruebas de potencial ácido-base (ABA), ensayos de lixiviación estática y cinética, y análisis de parámetros hidrometalúrgicos. También se incluyen recomendaciones sobre la interpretación de resultados y la definición de criterios de riesgo. Los resultados de la aplicación del protocolo en estudios piloto demostraron su eficacia para identificar zonas críticas dentro de depósitos de relaves, con alta probabilidad de generar DAM. Las conclusiones destacan la utilidad del enfoque propuesto como herramienta preventiva dentro de planes de cierre de minas, especialmente en contextos donde no se cuenta con información histórica detallada. Este antecedente resulta particularmente valioso para la presente investigación, ya que proporciona una base metodológica integral que puede ser adaptada o aplicada directamente en el análisis de potencial ácido en residuos mineros, fortaleciendo el rigor técnico y la fiabilidad de los resultados (10).

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

Guevara (2015) presentó 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 acción de ácido, con la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) 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 (11).

Lilin (2013) presentó la tesis titulada: «*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 (12).

Vizcarra (2017) presentó 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 test 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 (13).

Anduviri (2018) presentó la investigación titulada: «*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 (14).

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

### **2.1.3. Antecedentes locales**

Romero y Amanda (2015) llevó a cabo un estudio sobre la rehabilitación ambiental de relaves mineros mediante la plantación de Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), tuvo el objetivo de evaluar su viabilidad en la recuperación de áreas degradadas en la región Junín. La investigación se basó en un análisis teórico sobre el impacto de los relaves en el suelo, la hidrosfera y la atmósfera, así como en la implementación de la fitoestabilización para mitigar estos efectos. Se abordaron aspectos jurídicos y tecnológicos relacionados con la revegetación, proponiendo lineamientos para la siembra y conservación del Kikuyo en terrenos afectados por la actividad minera. Los resultados demostraron que el Kikuyo contribuye significativamente a la recuperación ambiental y económica de las canchas de relaves, al mejorar la cobertura vegetal y fomentar el regreso de la fauna autóctona. Entre los beneficios observados se incluyen el

aumento de áreas verdes, la captura de CO<sub>2</sub>, la mejora del hábitat para flora y fauna, y la estabilización del terreno mediante la revegetación natural. La investigación concluyó que la implementación de este tipo de tratamiento permite el restablecimiento del ecosistema, la reducción de la contaminación minera y la integración de técnicas sostenibles en la gestión de pasivos ambientales (15).

Cajahuamán (2021) desarrolló una investigación sobre la aplicación del ciclo Deming en la mejora de la productividad del proceso de flotación Bulk en la empresa Alpamarca. Su objetivo fue determinar en qué medida la implementación de este ciclo (basado en las fases de planear, hacer, verificar y actuar) incrementaría la eficiencia del proceso metalúrgico. Para ello, se empleó un diseño preexperimental de enfoque cuantitativo, analizando la productividad antes y después de la implementación del ciclo durante 12 semanas. El estudio involucró a 30 trabajadores entre obreros y supervisores, quienes participaron en la ejecución de pruebas de flotación con diferentes colectores. Los resultados indicaron que la recuperación de plata mejoró entre 2 y 3 puntos porcentuales, alcanzando una recuperación de 87-88 % con una calidad de 125 Oz/TMS. Asimismo, se logró un incremento del 7,21 % en la productividad general del proceso de flotación. Las pruebas con los colectores Flottec 8020 y Aero Phine 3418 permitieron optimizar el factor metalúrgico, lo que representó un beneficio económico significativo para la empresa. Se concluyó que la implementación del ciclo Deming es una estrategia efectiva para mejorar la eficiencia operativa y la rentabilidad del proceso metalúrgico en unidades mineras (16).

Ricra (2019) llevó a cabo un estudio sobre el análisis minerográfico del concentrado de zinc en la Compañía Minera Huarón, con el propósito de evaluar la recuperación del mineral y la necesidad de remolienda para optimizar su procesamiento. La metodología consistió en la identificación y cuantificación de las especies minerales presentes en el concentrado mediante técnicas de análisis microscópico. Se determinó que la esfalerita normal representa el 92,50 % del zinc total, mientras que la esfalerita con inclusiones de sulfosales de plata y calcopirita corresponden al 4,36 % y 3,14 %, respectivamente. El estudio evidenció que el concentrado de zinc presenta un alto porcentaje de partículas mixtas y asociadas, lo que sugiere una oportunidad de mejora en la recuperación del metal a través de una remolienda adicional. Se calculó un grado de liberación ponderado de 15,74, indicando la necesidad de optimizar el proceso de molienda para mejorar la separación de los minerales valiosos. Además, se identificaron impurezas como sulfosales de plata y cobre gris, lo que resalta la importancia de estrategias de refinamiento en la flotación del zinc. Se concluyó que la implementación de una remolienda controlada podría aumentar la eficiencia del proceso y mejorar la calidad del concentrado final (17).

## **2.2. Generalidades de la unidad minera**

### **2.2.1. Bases teóricas del estudio**

#### **2.2.1.1. 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 sí solas no siempre reflejan con precisión las condiciones reales y, en algunos casos, pueden proporcionar información poco confiable (18).

#### **2.2.1.2. 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 (19). 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 % (20). 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.

#### **2.2.1.3. 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 (21).

#### **2.2.1.4. Análisis geoquímico de relavera**

##### **2.2.1.4.1. 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 (tabla 2) (22).

##### **2.2.1.4.2. 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 completan en sulfatos y que, por cada mol de piritita que se oxida, se producen dos moles de H<sup>+</sup>. Este análisis puede interpretarse bajo dos criterios de evaluación. El primero establece que, si el valor de PNN es inferior a 20 Kg de CaCO<sub>3</sub>/TM tonelada, la muestra se considera generadora de ácido. Si el valor es superior a 20 CaCO<sub>3</sub>/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 (23).

### **2.3. Definiciones teóricas del estudio**

#### **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 (35). 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 (36). 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" (24).

#### **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 feldspatos, 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 (37). 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 (25).

### **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 (49). Este proceso es de carácter industrial y tiene como objetivo principal la separación de las menas obtenidas durante la explotación minera (26).

### **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 (27). El análisis mineralógico es una técnica de investigación geológica realizada en laboratorio, que proporciona datos sobre las propiedades físico-químicas de los minerales relevantes en las distintas fases de los proyectos mineros (28). 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 (29).

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Método y alcances de la investigación**

##### **3.1.1. Método de la 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. Nivel de la 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.

##### **3.1.3. 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.

##### **3.1.4. 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.

## **3.2. Población y muestra**

### **3.2.1. 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.

### **3.2.2. 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.

## **3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

### **3.3.1. Técnicas utilizadas en la recolección de datos**

Para la presente investigación, se implementaron diversas técnicas de extracción de datos con el fin de obtener información precisa sobre la composición y características mineralógicas de los relaves mineros en estudio. Estas técnicas abarcaron procedimientos de muestreo, análisis microscópico y pruebas geoquímicas, asegurando un enfoque integral en la caracterización de los minerales presentes en la relavera.

#### **1. Muestreo y preparación de muestras**

El proceso de extracción de datos comenzó con un muestreo representativo del material de la relavera ubicada en el centro del Perú. Para ello, se seleccionaron cuatro puntos de muestreo distribuidos en distintas secciones de la relavera, asegurando que la muestra fuera representativa de la heterogeneidad del depósito. El muestreo se realizó siguiendo los protocolos establecidos en el Reglamento de muestreo de suelos contaminados del Ministerio del Ambiente.

Las muestras obtenidas fueron sometidas a un proceso de preparación previo al análisis. Esto incluyó el secado a temperatura ambiente, el triturado y la molienda hasta obtener un tamaño de partícula adecuado para los análisis mineralógicos. Posteriormente, se elaboraron secciones pulidas de las muestras, las cuales fueron utilizadas para el análisis mediante microscopía óptica y caracterización geoquímica.

#### **2. Análisis mineralógico mediante microscopía óptica**

El análisis mineralógico fue llevado a cabo utilizando microscopía óptica polarizante de luz reflejada. Esta técnica permitió la identificación y caracterización de los minerales presentes en las muestras, así como la evaluación de su distribución y grado de liberación. Se realizaron

observaciones detalladas en diferentes aumentos, permitiendo registrar la asociación mineralógica de la calcopirita y esfalerita con otros minerales presentes en la muestra, como la pirita y la goethita.

Además, se realizaron fotomicrografías de las partículas minerales, lo que permitió documentar visualmente las interacciones entre los minerales de interés y la ganga. A través del análisis modal, se determinó la composición mineralógica en términos de volumen porcentual y grado de liberación, información clave para la optimización de los procesos metalúrgicos.

### 3. Análisis geoquímico multielemental

Para complementar el análisis mineralógico, se llevó a cabo un estudio geoquímico en un laboratorio acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL). Se empleó la técnica de espectrometría de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), la cual permitió determinar la concentración de elementos químicos presentes en la muestra, tales como cobre, zinc, hierro y otros metales asociados.

Adicionalmente, se realizaron pruebas de lixiviación con el objetivo de evaluar la movilidad de los metales en condiciones ambientales. Estas pruebas son fundamentales para predecir el comportamiento de los relaves a largo plazo y su posible impacto en el medio ambiente.

### 4. Evaluación de tipos de entrelazamiento mineral

Uno de los aspectos clave de la investigación fue la identificación de los tipos de entrelazamiento de los minerales de interés con la ganga. Para ello, se clasificaron las partículas en función de su grado de liberación, diferenciando entre partículas libres, parcialmente liberadas y completamente entrelazadas. Se determinó que la calcopirita y la esfalerita presentaban un grado de liberación parcial, lo que sugiere la necesidad de una molienda adicional para mejorar su separación de la ganga.

Los datos obtenidos a partir de este análisis fueron organizados en tablas que reflejan la proporción de minerales entrelazados y su nivel de dificultad de liberación. Esto permitió establecer correlaciones entre la estructura mineralógica de los relaves y la eficiencia de los procesos de recuperación.

### 5. Integración y análisis de datos

Finalmente, los datos recolectados a partir de las diferentes técnicas de extracción fueron integrados en una matriz de operacionalización de variables. Se compararon los resultados

obtenidos mediante microscopía óptica y análisis geoquímico, estableciendo relaciones entre la composición mineralógica, el grado de liberación y la recuperación potencial de los minerales.

Este enfoque permitió identificar los principales desafíos en la recuperación de calcopirita y esfalerita, así como proponer estrategias para optimizar su aprovechamiento. Los resultados obtenidos proporcionaron información clave para la toma de decisiones en el diseño de estrategias de procesamiento y recuperación de minerales a partir de relaves mineros.

### **3.3.2. Instrumentos utilizados en la recolección de datos**

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**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. Resultados**

El análisis microscópico es una herramienta fundamental en la caracterización de muestras metalúrgicas, ya que permite identificar los minerales presentes, evaluar sus distribuciones volumétricas y analizar sus grados de liberación. En este estudio, se han examinado dos muestras mediante microscopía óptica polarizante de luz reflejada, lo que ha facilitado la determinación de la composición mineralógica y la evaluación de los entrelazamientos presentes en cada partícula.

Los resultados obtenidos permiten comprender mejor la naturaleza de los minerales presentes en las muestras y su potencial de recuperación metalúrgica. Además, se presentan las fotomicrografías correspondientes que ilustran visualmente la morfología y distribución de los minerales en las muestras.

Este capítulo sigue una estructura procedural, comenzando con la descripción de la composición mineralógica de cada muestra, seguida de la distribución volumétrica y los grados de liberación, para luego analizar los tipos de entrelazamientos y sus implicaciones en la recuperación de metales valiosos. Finalmente, se presentan las fotomicrografías obtenidas y se brindan conclusiones derivadas del estudio.

#### **4.2. Análisis de laboratorio y muestra**

##### **4.2.1. Volúmenes y grados de liberación de los minerales observados**

**Tabla 2. Volúmenes y grados de liberación**

Muestra: HUGO MOSCOS																								
MINERALES		ORO		ALCOPIRITA		BORNITA		ALCOCITA		OVELITA		PIRITA		EMATITA		RUTILO		OETHITA		ANGAS				
		N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V			
Total de partículas libres	819	0		7		0		0		0		203		0		0		91		518				
% Volumen partículas libres	83.31	0.0		0.71		0.0		0.00		0.00		20.6		0.0		0.0		9.26		52.69				
TOT.PARTICULAS	NUMERO	VOLUMEN PORCENTUAL		ORO		ALCOPIRITA		BORNITA		ALCOCITA		COVELITA		PIRITA		HEMATITA		RUTILO		GOETHITA		GANGAS		
ENTRELAZADAS	PARTICUL.	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	
Au-py	2	0.05	0.01									1.95	0.20											
Cp-Cv	14	1.42		12.60	1.28					1.40	0.14													
Cv-Py	7	0.71								0.35	0.04	6.65	0.68											
Py-GGs	49	4.98										8.47	0.86									40.53	4.12	
Hm-GGs	7	0.71												2.80	0.28							4.20	0.43	
Gt-GGs	42	4.27																13.70	1.39			28.30	2.88	
Rt-GGs	2	0.20														1.98	0.20					0.02	0.00	
Cp-Cc-GGs	7	0.71		0.70	0.07			0.70	0.07													5.60	0.57	
Py-Gt-GGs	14	1.42										5.25	0.53					1.40	0.14			7.35	0.75	
Hm-Gt-GGs	3	0.31												1.20	0.12			1.20	0.12			0.60	0.06	
Cp-Bn-Cc-GGs	7	0.71		1.40	0.14	0.70	0.07	0.70	0.07													4.20	0.43	
Cp-Bn-Py-GGs	3	0.31		0.18	0.02	0.50	0.05	0.20	0.02			1.80	0.18									0.90	0.09	
Cp-Cv-Py-GGs	7	0.71		0.35	0.04					0.07	0.01	5.18	0.53									1.40	0.14	
TOTAL ENTREL.	164	16.69	0.05	0.01	15.23	1.55	0.85	0.09	1.40	0.14	1.82	0.19	29.30	2.98	4.00	0.41	1.98	0.20	16.30	1.66	93.10	9.47		
TOT.LIB+ENLZ	983	100.00	0.05		22.23		0.85		1.40		1.82		232.30		4.00		1.98		107.30		611.10			
TOT.VOL.PORCENTUAL		100.00	0.01		2.26		0.09		0.14		0.19		23.63		0.41		0.20		10.92		62.16			
GRADOS DE LIB.PORCENTUAL			0.0		31.49		0.0		0.00		0.0		87.39		0.0		0.0		84.81		84.77			
Símbolos :	N = Número de partículas libres y entrelazadas contabilizadas. %V = Volumen porcentual de las partículas libres y entrelazadas.																							

Esta tabla presenta los volúmenes porcentuales y los grados de liberación de los minerales identificados en las muestras de relaves analizadas. La información está estructurada en dos secciones principales:

Cantidad y porcentaje de volumen de partículas libres: representa el porcentaje de cada mineral que se encuentra en estado libre, es decir, sin estar fuertemente asociado con la ganga u otros minerales.

Cantidad y porcentaje de volumen de partículas entrelazadas: muestra el porcentaje de cada mineral que se encuentra parcialmente o completamente atrapado en la matriz mineralógica de la ganga, lo que dificulta su recuperación mediante procesos convencionales de flotación o lixiviación.

#### **4.2.1.1. Principales hallazgos**

La pirita es el mineral dominante, representando un 23.63 % del volumen total, con un alto grado de liberación (87.39%), lo que facilita su recuperación.

La calcopirita, que es uno de los minerales de interés económico, tiene un 2.26 % del volumen total, pero su grado de liberación es 31.49%, indicando la necesidad de procesos adicionales de molienda para mejorar su recuperación.

El oro representa solo el 0.01 % del volumen total, pero se encuentra completamente atrapado en goethita y pirita, lo que sugiere dificultades en su extracción sin tratamientos especiales.

La goethita y hematita tienen altos grados de liberación (84.81% y 84.77%, respectivamente), lo que implica que su separación de los minerales de valor puede realizarse con relativa facilidad.

#### **4.2.2. Tipos de entrelazamiento de los minerales y sus posibilidades de liberación completa**

**Tabla 3. Entrelazamiento de mineral**

Minerales entrelazados	Tipo	Num.	Dist.	Posibilidades de liberación
	Entr.	Part.	Porc.	Completa
Partículas Libres		819	83.32	
Au-Py	1aI	1	0.10	Fácil
	1eII	1	0.10	Muy difícil a imposible
Cp-Cv	1bII	7	0.71	Moderadamente fácil
	2aI	5	0.51	Muy difícil a imposible
	4aI	2	0.20	Muy difícil
Cv-Py	1aII	7	0.71	Fácil
Py-GGs	1bIV	14	1.42	Moderadamente fácil
	1dII	14	1.42	Imposible
	1eI	7	0.71	Muy difícil a imposible
	1eII	7	0.71	Muy difícil a imposible
	3dII	7	0.71	Muy difícil a imposible
Hm-GGs	1bI	7	0.71	Moderadamente fácil
Gt-GGs	1aI	7	0.71	Fácil
	1dII	7	0.71	Imposible
	1eI	7	0.71	Muy difícil a imposible
	1eII	7	0.71	Muy difícil a imposible
	3dII	7	0.71	Muy difícil a imposible
	3dIII	7	0.71	Muy difícil a imposible
Rt-GGs	1eII	2	0.20	Muy difícil a imposible
Cp-Cc-GGs	4cII	5	0.51	Muy difícil a imposible
	4cIII	2	0.20	Muy difícil a imposible
Py-Gt-GGs	1bII	7	0.71	Moderadamente fácil
	3dII	7	0.71	Muy difícil a imposible
Hm-Gt-GGs	3dII	3	0.31	Muy difícil a imposible
Cp-Bn-Cc.GGs	4cI	7	0.71	Muy difícil a imposible
Cp-Bn-Py-GGs	3dII	3	0.31	Muy difícil a imposible
Cp-Cv-Py-GGs	3dII	7	0.71	Muy difícil a imposible
<b>T O T A L</b>		<b>983</b>	<b>100.00</b>	

Esta tabla clasifica los tipos de entrelazamiento de los minerales presentes en la relavera y la facilidad con la que pueden ser liberados mediante procesos metalúrgicos como la molienda o la flotación. Se detalla la cantidad de partículas analizadas, su distribución porcentual y la dificultad de liberación según el tipo de mineral.

#### **4.2.2.1. Principales hallazgos**

- Oro-pirita: se observa una fuerte asociación entre estos dos minerales, con una muy baja posibilidad de liberación. Esto sugiere que el oro requerirá técnicas avanzadas como molienda ultrafina o biooxidación para su recuperación.
- Calcopirita-covelita: este tipo de entrelazamiento representa un 1.42 % del total de partículas y se clasifica como moderadamente fácil de liberar. Esto indica que con una molienda controlada se puede mejorar su recuperación.
- Pirita-gangas: estas asociaciones representan un 4.98 % del total, pero su liberación es imposible o muy difícil en la mayoría de los casos. Esto puede interferir en los procesos de flotación si no se aplican estrategias adecuadas de pretratamiento.
- Hematita-gangas: se encuentra en una proporción de 0.71 % y su liberación es moderadamente fácil, lo que indica que su separación puede lograrse con ajustes en el proceso de molienda.
- Goethita-gangas: presenta una distribución del 4.27 % y su liberación varía entre fácil e imposible, dependiendo del grado de asociación con otros minerales.

La presencia de minerales entrelazados en distintas proporciones y con diferentes dificultades de liberación tiene un impacto directo en la eficiencia de los procesos de recuperación. La optimización de la molienda y la selección de colectores adecuados en la flotación son estrategias clave para mejorar la separación de los minerales valiosos.

#### **4.2.3. Minerales presentes en la muestra 1**

**Tabla 4. Estudios de muestra 1**

MINERALES			ORO		CALCOPIRITA		GALENA		PIRITA		HEMATITA		GOETHITA		GANGAS	
			N	% V	N	% V	N	% V	N	% V	N	% V	N	% V	N	% V
Total de Partículas Libres	645		0		10		0		30		10		15		580	
% Volumen Partículas libres		85.66		0.00		1.33		0.00		3.98		1.33		1.99		77.03
TOT.PARTICULAS	NUMERO	VOLUMEN	ORO		CALCOPIRITA		GALENA		PIRITA		HEMATITA		GOETHITA		GANGAS	
ENTRELAZADAS	PARTICUL.	PORCENTUAL	N	% V	N	% V	N	% V	N	% V	N	% V	N	% V	N	% V
Au-Py	3	0.40	0.03	0.00					2.97	0.39						
Au-Gt	3	0.40	0.15	0.02									2.85	0.38		
Cp-Py	5	0.66			1.00	0.13			4.00	0.53						
Gn-Py	5	0.66					0.25	0.03	4.75	0.63						
Py-Gt	5	0.66							0.25	0.03			4.75	0.63		
Py-GGs	10	1.33							0.75	0.10					9.25	1.23
Hm-Gt	5	0.66									2.50	0.33	2.50	0.33		
Hm-GGs	10	1.33									2.25	0.30			7.75	1.03
Gt-GGs	45	5.98											15.05	2.00	29.95	3.98
Au-Gn-Py	1	0.13	0.03	0.00			0.10	0.01	0.87	0.12						
Au-Gt-GGs	10	1.33	0.15	0.02									9.50	1.26	0.35	0.05
Gn-Py-GGs	1	0.13					0.10	0.01	0.30	0.04					0.60	0.08
Hm-Gt-GGs	5	0.66									1.00	0.13	1.50	0.20	2.50	0.33
TOTAL ENTREL.	108	14.34	0.36	0.05	1.00	0.13	0.45	0.06	13.89	1.84	5.75	0.76	36.15	4.80	50.40	6.69
TOT.LIB+ENLZ	753	100.00	0.36		11.00		0.45		43.89		15.75		51.15		630.40	
TOT.VOL.PORCENTUAL		100.00		0.05		1.46		0.06		5.83		2.09		6.79		83.72

GRADOS DE LIB.PORCENTUAL

0.00

90.91

0.00

68.35

63.49

29.33

92.01

Símbolos :

N = Número de partículas libres y entrelazadas contabilizadas.

%V = Volumen porcentual de las partículas libres y entrelazadas.

Esta tabla presenta la composición mineralógica de una de las muestras analizadas, detallando el porcentaje de volumen de cada mineral y su respectivo grado de liberación.

#### **4.2.3.1. Principales hallazgos**

- Pirita (23.63%) es el mineral dominante en la muestra, con un alto grado de liberación (87.39%).
- Calcopirita (2.26%) tiene un bajo grado de liberación (31.49%), lo que indica que la mayoría de sus partículas se encuentran asociadas con otros minerales, dificultando su separación.
- Goethita (10.92%) presenta un alto grado de liberación (84.81%), lo que sugiere que su separación de los minerales de interés es factible con procesos convencionales.
- Gangas (62.16%) constituyen la mayor parte del volumen de la muestra y presentan un grado de liberación del 84.77%, lo que facilita su separación en los procesos de beneficio mineral.

Esta tabla permite comprender la composición y características de la muestra en términos de mineralogía y grado de liberación, lo que es crucial para determinar las estrategias más efectivas para la recuperación de los minerales de interés.

#### **4.2.4. Minerales presentes en la muestra 2**

**Tabla 5. Estudio muestra 2**

MINERALES ENTRELAZADOS	TIPO ENTR.	NUM. PART.	DIST. PORC.	POSIBILIDADES DE LIBERACION COMPLETA
Partículas Libres		645	85.66	
Au-Py	1eII	3	0.40	Muy difícil a imposible
Au-Gt	1dI	2	0.27	Imposible
	1eI	1	0.13	Muy difícil a imposible
Cp-Py	3dII	5	0.66	Muy difícil a imposible
Gn-Py	1aI	5	0.66	Fácil
Py-Gt	1eI	5	0.66	Muy difícil a imposible
Py-GGs	1dII	10	1.33	Imposible
Hm-Gt	3dII	5	0.66	Muy difícil a imposible
Hm-GGs	1dII	5	0.66	Imposible
	1dIII	5	0.66	Imposible
Gt-GGs	1aI	5	0.66	Fácil
	1eI	10	1.33	Muy difícil a imposible
	1eII	5	0.66	Muy difícil a imposible
	3dII	10	1.33	Muy difícil a imposible
	4cII	15	1.99	Muy difícil a imposible
Au-Gn-Py	1bII	1	0.13	Moderadamente fácil
Au-Gt-GGs	1eII	10	1.33	Muy difícil a imposible
Gn-Py-GGs	1bII	1	0.13	Moderadamente fácil
Hm-Gt-GGs	1bIV	5	0.66	Moderadamente fácil
T O T A L		753	100.00	

Esta tabla es similar a la anterior, pero presenta la composición mineralógica de una segunda muestra de relave. Se detallan los minerales presentes junto con su fórmula química y su porcentaje de volumen.

#### 4.2.4.1. Principales hallazgos

- En comparación con la primera muestra, esta presenta galena (PbS), lo que sugiere la posibilidad de recuperación de plomo además del cobre y el oro.
- La calcopirita y la pirita siguen siendo los minerales dominantes en términos de interés económico, aunque su grado de liberación sigue siendo bajo en su mayoría.
- Se confirma la fuerte presencia de minerales oxidados como goethita y hematita, lo que puede influir en la eficiencia de los procesos de recuperación.

La presencia de galena en esta muestra indica un potencial para la recuperación de plomo, además de los metales previamente identificados. La similitud en la composición con la primera muestra sugiere que las estrategias de procesamiento deben considerar el tratamiento conjunto de los relaves para maximizar la recuperación de todos los elementos de valor.

### 4.3. Caracterización mineralógica de las muestras

#### 4.3.1. Muestra 1

Para esta muestra, se han identificado 1 minerales cuyas fórmulas químicas se presentan en la tabla 1. La composición mineralógica permite determinar la presencia de minerales de interés económico y su asociación con otros minerales de menor valor. La presencia de sulfuros como la calcopirita y la pirita es relevante para el tratamiento metalúrgico.

**Tabla 6. Minerales presentes en la muestra 1**

MINERALES	VOLUMEN (%)	GRADO DE LIBERACION (%)
Oro	0.01	0.00
Calcopirita	2.26	31.49
Bornita	0.09	0.00
Calcocita	0.14	0.00
Covelita	0.19	0.00
Pirita	23.63	87.39

Hematita	0.41	0.00
Rutilo	0.20	0.00
Goethita	10.92	84.81
Gangas	62.16	84.77
TOTAL	100,00	

Esta tabla presenta la composición mineralógica de la primera muestra analizada, expresada en porcentaje de volumen y grado de liberación. Se observa que la pirita es el mineral dominante, con un alto grado de liberación del 87.39 %, lo que facilita su recuperación. En contraste, la calcopirita, de interés económico, tiene un grado de liberación menor (31.49%), lo que indica posibles dificultades en su separación. También se identifican minerales oxidados como la goethita y la hematita, que podrían influir en la eficiencia de los procesos metalúrgicos.

La identificación de estos minerales es crucial para comprender la composición de la muestra y prever su comportamiento en procesos de flotación y lixiviación. La pirita, por ejemplo, es un mineral que puede influir negativamente en la recuperación del oro si no se maneja adecuadamente. La goethita y la hematita son indicativas de procesos de oxidación que han afectado la muestra.

#### 4.4. Muestra 2

En la muestra 2 se observa una composición similar a la muestra anterior, aunque con la presencia adicional de galena, un mineral importante en la extracción de plomo. En la tabla 7 se resumen los minerales observados y su composición química.

**Tabla 7. Minerales presentes en la muestra 2**

MINERALES	FÓRMULA	ABREVIATURA
Oro	Au	Au
Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	Cp
Galena	PbS	Gn
Pirita	FeS <sub>2</sub>	Py
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hm
Goethita	FeO.OH	Gt
Gangas		GGs
Gangas		GGs

Esta tabla muestra la composición de la segunda muestra, que presenta una distribución mineralógica similar a la primera, pero con la adición de galena (PbS). La presencia de este mineral sugiere un potencial de explotación para plomo, además del cobre y el oro identificados previamente. La distribución de los minerales oxidados también es un factor clave, ya que su presencia puede afectar la recuperación de los metales valiosos.

La inclusión de la galena en esta muestra sugiere que podría estar asociada a un yacimiento polimetálico con potencial de explotación para plomo, cobre y oro. La proporción de minerales oxidados, como la goethita y la hematita, también puede influir en los procesos metalúrgicos utilizados para la recuperación de metales valiosos.

#### 4.5. Tipos de entrelazamiento y posibilidades de liberación\*\*

El entrelazamiento de los minerales en una muestra puede influir significativamente en la eficiencia del proceso de separación. La tabla 8 muestra los tipos de entrelazamientos identificados en la muestra 1.

**Tabla 8. Tipos de entrelazamiento en la muestra**

Minerales enlazados	Distribución (%)	Dificultad de liberación
Oro - Pirita	0.1	Muy difícil a imposible
Calcopirita - Covelita	0.71	Moderadamente fácil
Pirita - Gangas	1.42	Imposible
Hematita - Gangas	0.71	Moderadamente fácil

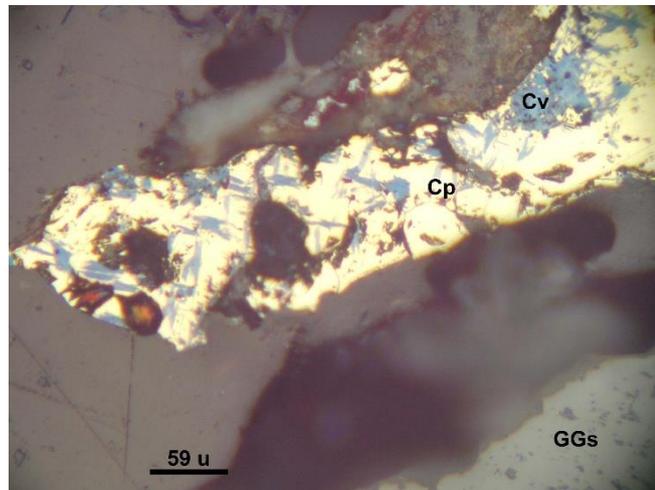
Esta tabla detalla la distribución de los minerales entrelazados en la primera muestra y la dificultad de su liberación. Se observa que el oro se encuentra fuertemente entrelazado con la pirita, lo que dificulta su recuperación. En cambio, la calcopirita presenta una asociación moderadamente fácil con la covelita, lo que sugiere que un adecuado proceso de molienda podría mejorar su liberación. Los datos indican la necesidad de estrategias de molienda y separación más selectivas para optimizar la recuperación de los minerales valiosos.

Estos datos indican que ciertos minerales requieren procesos de molienda más agresivos para alcanzar una liberación completa.

#### 4.6. Análisis microscópico: fotomicrografías

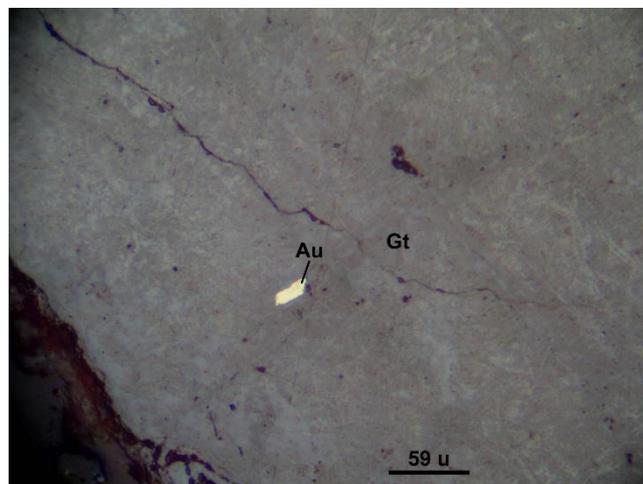
Se presentan a continuación las fotomicrografías obtenidas mediante el análisis

microscópico. Estas imágenes permiten visualizar la estructura de los minerales en las muestras y corroborar los datos obtenidos mediante el análisis numérico.



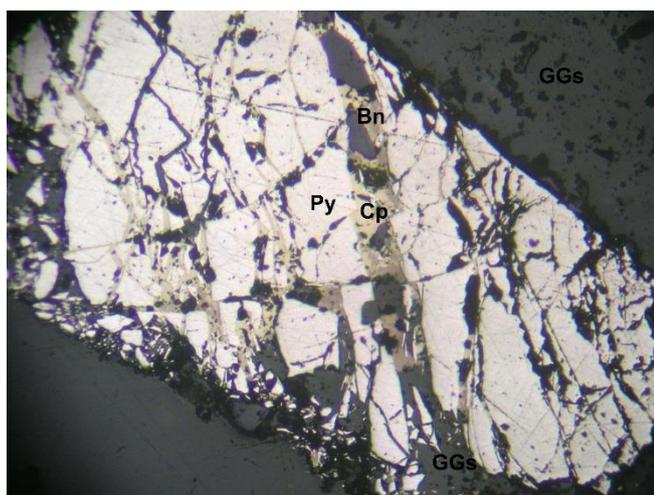
**Figura 1. Partícula de oro entrelazada con goethita (fotomicrografía 1: partícula entrelazada de calcopirita (cp) con la covelita (cv) y partícula libre de ganga (GGs). 500X.)**

Esta imagen microscópica muestra la disposición del oro dentro de la matriz mineral, indicando que se encuentra atrapado en goethita. Esto sugiere que la separación del oro mediante procesos convencionales podría ser complicada, requiriendo técnicas adicionales como la molienda ultrafina o la lixiviación selectiva para mejorar su recuperación.



**Figura 2. Calcopirita en contacto con bornita y pirita fotomicrografía: 2. Partícula mixta de oro (Au) con goethita (Gt). 500X.)**

La fotomicrografía ilustra una partícula de calcopirita en contacto directo con bornita y pirita, lo que podría influir en su flotabilidad y en la eficiencia del proceso de concentración. Este tipo de asociación mineralógica es importante para definir estrategias de flotación selectiva y reducir pérdidas de cobre en los relaves.



*Figura 3. Pirita y ganga en partículas mixtas (fotografía. 3. Partícula mixta de calcopirita (Cp) con la bornita (Bn) con la pirita (Py) y con la ganga (GGs). 500X.)*

Esta imagen evidencia la presencia de partículas mixtas de pirita con ganga, lo que puede afectar la eficiencia del proceso de flotación. La fuerte asociación entre estos componentes indica que la separación selectiva de la pirita podría requerir condiciones de molienda más precisas para evitar la pérdida de material valioso en los residuos.

Estas imágenes proporcionan evidencia visual del grado de liberación de los minerales y la presencia de asociaciones complejas que pueden afectar la recuperación metalúrgica.

El análisis de la muestra revela que el oro representa apenas el 0.01 % del volumen total. Sin embargo, la totalidad de este oro se encuentra entrelazada en la matriz mineral, sin ninguna fracción libre. Esto se debe a la compleja geometría de los entrelazamientos minerales, lo que impide su liberación natural. Esta característica tiene implicaciones significativas en los procesos de recuperación, ya que el oro atrapado requiere métodos avanzados de molienda y separación para su extracción eficiente.

En cuanto a la calcopirita, su presencia es del 2.26 % en la muestra. De este volumen, el 31.49 % se encuentra en estado libre, lo que indica que esta fracción podría ser recuperada sin necesidad de procesos de liberación adicionales. No obstante, el 68.51 % restante permanece atrapado en la estructura mineral, lo que sugiere la necesidad de una molienda más fina o de tratamientos específicos para su adecuada separación y aprovechamiento.

La bornita, a pesar de representar solo el 0.09 % del volumen total de la muestra, muestra un comportamiento similar al del oro en cuanto a su liberación. La totalidad de este mineral se encuentra entrelazada, sin ninguna fracción libre. Esto implica que su recuperación será compleja y dependerá de la eficiencia del proceso de molienda y la interacción con otros

minerales presentes en la matriz.

Situación similar presenta la calcocita, que constituye el 0.14 % de la muestra. Al igual que la bornita y el oro, la calcocita está completamente atrapada en la estructura mineral, lo que impide su recuperación directa. Esto resalta la importancia de analizar los tipos de entrelazamiento y diseñar estrategias de procesamiento adecuadas para maximizar la recuperación de este mineral.

La covelita, con un volumen del 0.19 %, también se encuentra en su totalidad entrelazada en la matriz mineral, lo que la hace inaccesible sin un proceso de liberación eficiente. Este comportamiento es común en minerales con alta afinidad por la matriz rocosa, lo que exige un enfoque especializado para su recuperación.

Por otro lado, la pirita, que representa el 23.63 % de la muestra, tiene una mayor proporción de liberación. Un 87.39 % de su volumen se encuentra en estado libre, lo que facilita su separación mediante procesos convencionales. Sin embargo, el 12.61 % sigue atrapado en la estructura mineral, lo que podría requerir un ajuste en la molienda para mejorar su recuperación.

En el caso de la hematita y el rutilo, que ocupan el 0.41 % y 0.20 % de la muestra respectivamente, ninguno de estos minerales se encuentra en estado libre. Esto sugiere que están fuertemente integrados en la matriz mineral y su extracción requerirá procesos de disgregación o tratamientos específicos para lograr una liberación efectiva.

Finalmente, los minerales de ganga representan el 62.16 % del volumen total de la muestra. De este porcentaje, el 84.77 % se encuentra en estado libre, lo que facilita su separación durante el procesamiento. Sin embargo, el 15.23 % permanece entrelazado, lo que indica la necesidad de evaluar el impacto de estos minerales en la eficiencia del proceso metalúrgico y su posible interferencia en la recuperación de los minerales de valor económico.

## CONCLUSIONES

1. A través de la microscopía óptica, se logró identificar con precisión los minerales presentes en la relavera, incluyendo calcopirita, esfalerita, pirita y goethita. Se determinó que la calcopirita y la esfalerita presentan un grado de liberación parcial, lo que sugiere la necesidad de procesos adicionales de molienda y flotación selectiva para mejorar su recuperación. Asimismo, la fuerte asociación de la calcopirita con minerales de ganga como la goethita implica desafíos metalúrgicos que deben ser abordados con estrategias de procesamiento optimizadas.
2. Los análisis demostraron que los minerales valiosos se encuentran entrelazados con ganga en distintas proporciones, siendo la pirita el mineral dominante con un 23.63 % de volumen y un 87.39 % de liberación. En contraste, la calcopirita, a pesar de representar el 2.26 % del volumen, solo tiene un 31.49 % de liberación, lo que implica la necesidad de una remolienda controlada para mejorar su separación. La presencia de oro con un 0.01% y su total encapsulación en goethita indica que métodos convencionales de recuperación pueden no ser efectivos sin una molienda ultrafina o técnicas alternativas de extracción.
3. Basado en los resultados mineralógicos, se propusieron estrategias de optimización de procesos, incluyendo la implementación de una molienda más fina para mejorar la liberación de la calcopirita y la esfalerita, además del uso de colectores específicos en la flotación. Se identificó que la presencia de pirita puede interferir en la recuperación selectiva, por lo que es recomendable un pretratamiento de desulfuración para evitar pérdidas de cobre y zinc en los relaves.
4. La recuperación efectiva de calcopirita y esfalerita a partir de relaves mineros no solo permitiría optimizar la eficiencia del proceso metalúrgico, sino también aumentar la rentabilidad de la operación minera. Adicionalmente, la revalorización de estos residuos contribuye a la reducción del impacto ambiental al disminuir la generación de drenaje ácido y minimizar la acumulación de desechos en relaveras, alineándose con prácticas de minería sostenible.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar pruebas piloto con distintas configuraciones de molienda para evaluar la liberación óptima de los minerales de interés. Estudios previos como el de Ricra (2019) han demostrado que una remolienda adecuada puede incrementar la recuperación de metales valiosos en un 15.74 %.
2. Aplicando un enfoque similar, se sugiere reducir el tamaño de partícula a rangos inferiores a 74 micras, lo que facilitaría la separación de la calcopirita y esfalerita de la ganga. Dado que la pirita representa un alto porcentaje del volumen mineralógico (23.63%), es recomendable aplicar una etapa de flotación diferencial para su eliminación previa. Estudios como el de Cajahuamán (2021) evidencian que la optimización del proceso de flotación Bulk puede incrementar la recuperación de plata en 2-3 % y mejorar la calidad del concentrado.
3. Se recomienda evaluar el uso de depresores específicos para la pirita y ajustar el pH del medio para mejorar la selectividad del proceso. Dado que el oro identificado en la muestra se encuentra completamente atrapado en goethita y pirita, se recomienda considerar procesos como la lixiviación a presión o la biooxidación para mejorar su recuperación. Según investigaciones previas, la oxidación de sulfuros mediante bacterias puede incrementar la extracción de oro en más del 80 %.
4. . Este enfoque puede ser viable para el tratamiento de los relaves con alta presencia de minerales sulfurados. Considerando que los relaves analizados presentan potencial de generación de drenaje ácido debido a la presencia de pirita y otros sulfuros, se recomienda implementar programas de monitoreo ambiental periódico. Investigaciones como la de Romero Rey (2015) sugieren que la revegetación con gramíneas como el Kikuyo puede estabilizar químicamente los relaves y reducir la acidez superficial.
5. Esta estrategia podría complementar la recuperación de minerales al mismo tiempo que mejora la sostenibilidad ambiental de la mina. Se recomienda desarrollar modelos geoestadísticos basados en los datos mineralógicos obtenidos para predecir la eficiencia de recuperación y diseñar estrategias más precisas en la flotación y molienda. Modelos como los aplicados en estudios internacionales sobre predicción de drenaje ácido han demostrado ser efectivos en la gestión de residuos mineros. Implementar un enfoque similar permitiría optimizar la toma de decisiones y mejorar la rentabilidad del procesamiento de relaves.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ROMERO, Angélica y VILLAMARÍN, Juan. Caracterización del potencial de generación de acidez en rocas presentes al oriente del municipio de Titiribí, Antioquia. Tesis (Título de Geólogo). Medellín: Universidad EAFIT, 2022, 49 pp.
2. ESPÍN, Damián, JARRÍN, Jaime y ESCOBAR, Olga. Manejo, gestión, tratamiento y disposición general de relaves mineros generados en el proyecto Río Blanco. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*. 2020, II (4) p. 13.
3. LÓPEZ, E., ADUVIRE, O. y BARETTINO, D. Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*. 2002,1131(1), 3–21.
4. ALVARADO, Dennis y LEON, Laksmi. Evaluación técnica para la recuperación de cobre por cementación con chatarra de hierro a partir del drenaje ácido de mina de la bocamina San Luis en Michiquillay, Cajamarca 2020. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Cajamarca: Universidad Privada del Norte, 2022, 51 pp.
5. SENESE Leiva, A, NEGRELLI, M. e HIDALGO, N. Predicción y estudio de drenaje ácido de mina sobre mineral de escombrera. *Revista Colombiana de Materiales*, 202, 18, 3 -20.
6. RUIZ, Ángel, JUÁREZ, Julio, LAPIDUS, Gretchen. Evaluación del potencial generador de ácido de mina en jales mineros del estado de Zacatecas. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 2022, 9 (9). Disponible en: <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/aactm/article/view/9405>
7. ARROYO, Fany y CCARHUAYPIÑA, DIANA. Determinación del potencial de generación ácido de una relavera. Tesis (Título de Ingeniero Ambiental). Huancayo: Universidad Continental, 2023, 71 pp.
8. CORDERO, Cintia, MARCHEVSKY, Natalia, CHIACCHIARINI, Patricia, GIAVENO, María. Caracterización física, química y mineralógica de un antiguo relave, en busca de alternativas de reutilización. *Minería y Geología*, 2022, 38, (1), 70 -82.
9. SALAS, Fernando, GUADARRAMA, Pedro, FERNÁNDEZ, Gorgina, GONZÁLEZ, Jesús, BARRAZA, Luis. Predicción de drenaje ácido de mina, jales de la mina La Prieta, Chihuahua, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 2020, 36, (4), 825 – 834.
10. MARTÍNEZ, Paula. Protocolo de Caracterización para Predicción de Drenaje Ácido en Depósitos de Relaves Mineros. Tesis (Máster Oficial en Geología y Gestión Ambiental de Recursos Minerales). Andalucía: Universidad Internacional de Andalucía, 2018, 62 pp.
11. GUEVARA Guerrero, J. C. Generación de acidez por la presencia de sulfuros en el futuro tajo del proyecto minero "El Galeno". Tesis (Maestría en Gestión y Auditorías Ambientales). Piura: Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, 2015.

12. LI LIN, Sergio. Medición del potencial de generación de agua ácida para un relave en la zona central del Perú y sus necesidades de neutralización. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2013.
13. VIZCARRA, Wilbert. Caracterización hidrogeológica del área de emplazamiento del depósito de relaves de la Mina Alpamarca, Yauli – Junín. Tesis (Título de Ingeniero Geólogo – Geotécnico). Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, 2017.
14. ADUVIRI, Osvaldo. Técnicas de prevención y control de la generación ácida en minería. *REV. MAMYM*, 2018, 4, pp.24-31. ISSN 2519-5352.
15. ROMERO, Amanda. Tratamiento de relaves mineros contaminados con plantación de gramíneas (Kikuyo) para convertirlos en áreas verdes en las minas de la Región Central del Perú. Tesis (Maestría en Seguridad y Medio Ambiente en Minería). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2015.
16. CAJAHUAMÁN, José. Aplicación del ciclo Deming para mejorar la productividad del proceso de la flotación Bulk en la empresa Alpamarca, Junín 2021. Tesis (Título de Ingeniero Industrial). Lima: Universidad César Vallejo, 2021.
17. RICRA, Anderson. Análisis microscópico cuantitativo para la recuperación de zinc a nivel de laboratorio metalúrgico en la Compañía Minera Huarón – Pasco – 2019. Tesis (Título de Ingeniero Metalurgista). Cerro de Pasco: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Facultad de Ingeniería, 2019.
18. MORALES, Carlos. Evaluación de la generación de drenaje ácido de roca (DAR) en botaderos de mina: aplicación de pruebas estáticas y cinéticas. Tesis (Título de Ingeniero Civil de Minas). Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2010.
19. SERNAGEOMIN. *Guía Metodológica de Química. Servicio Nacional de Geología y Minería*, 2012. [en línea]. 2012. [Fecha de consulta: 23 de abril de 2024] Disponible en: [https://fliphtml5.com/aleob/tyrp/GuiaMetodologicaQuimica\\_SERNAGEOMIN/](https://fliphtml5.com/aleob/tyrp/GuiaMetodologicaQuimica_SERNAGEOMIN/)
20. DE LA TORRE, Ale. Drenaje ácido de minas. Química General y Laboratorio. *Blog de Química general y laboratorio*, 2015. [en línea]. [Fecha de consulta: 2 de mayo de 2024] Disponible en: <https://quimicageneralylaboratorio.wordpress.com/2015/11/05/drenaje-acido-de-minas/>
21. SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (SERNAGEOMIN). Guía metodológica para la estabilidad química de depósitos de relaves. Santiago: SERNAGEOMIN, 2014. [en línea]. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2024] Disponible en: <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2017/11/GuiaMetodologicaQuimica.pdf>
22. WIKIPEDIA. Relave. Wikipedia, la enciclopedia libre, 2025. [en línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Relave> Wikipedia, la enciclopedia libre

23. BARRICK. Presa de colas. Un lugar de valor, 2022. [en línea]. [Fecha de consulta: 25 de mayo de 2024] Disponible en: <https://puebloviejolutardevvalor.com/wp-content/uploads/2022/05/Ebook-Presa-de-colas.pdf>
24. SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO. Los minerales. [en línea]. [Fecha de consulta: 16 de abril de 2024] Disponible en: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Los-minerales.html>
25. GEOSFERA. Minerales, definición, clasificación y propiedades. [en línea]. [Fecha de consulta: 20 de junio de 2024] Disponible en: <https://proyectogeosfera.es/minerales-definicion-clasificacion-propiedades/>
26. SERVICIO GEOLÓGICO MINERO ARGENTINO. Concentración de minerales. [en línea]. [Fecha de consulta: 3 de julio de 2024] Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/doc13.pdf>
27. UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. Concepto de concentración. Operaciones auxiliares. [en línea]. [Fecha de consulta: 18 de junio de 2024] Disponible en: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2439/course/section/2474/6\\_operaciones\\_auxiliares.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2439/course/section/2474/6_operaciones_auxiliares.pdf)
28. SÁNCHEZ, M. Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de Mineralogía*, 2010, 22, (1), pp. 5-20. [en línea]. Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-33222010000100002&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-33222010000100002&script=sci_arttext)
29. UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID. Técnicas de caracterización mineral. Facultad de Ciencias Geológicas, 2025. [en línea]. [Fecha de consulta: 17 de agosto de 2024] Disponible en: <https://geologicas.ucm.es/estudios/grado-geologia-plan-800779>

## **ANEXOS**

# Anexo 1

## Gráfico de análisis geométrico

TIPOS GEOMETRICOS DE INTERCRECIMIENTOS ENTRE MINERALES										
POSIBILIDADES DE LIBERACION COMPLETA										
MALLAS < 150										
	I	II	III	IV	LIBERACION	I	II	III	IV	LIBERACION
1a SIMPLE					FACIL					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE
1b AMEBOIDE					MODERADAMENTE FACIL					MODERADAMENTE FACIL A DIFICIL
1c GRAFICO					IMPOSIBLE					IMPOSIBLE
1d DISEMINADO					IMPOSIBLE					IMPOSIBLE
1e INCLUSION					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE
2a CORONA					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE					MUY DIFICIL
2b SUB-CORONA					MUY DIFICIL					MODERADAMENTE DIFICIL
2c CONCENTRICO					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE
						4c INTERSTICIAL				MUY DIFICIL A IMPOSIBLE

## Anexo 2

### Volumen y grado de liberación

Muestra:		HUGO MOSCOS																					
MINERALES		ORO		ALCOPIRITA		BORNITA		ALCOCITA		OVELITA		PIRITA		HEMATITA		RUTILO		GOETHITA		GANGAS			
		N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V		
Total de partículas libres	819	0		7		0		0		0		203		0		0		91		518			
% Volumen partículas libres		83.31	0.00	0.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.65	0.00	0.00	9.26								52.69		
TOT.PARTICULAS	NUMERO	VOLUMEN		ORO		ALCOPIRITA		BORNITA		ALCOCITA		COVELITA <sup>A</sup>		PIRITA		HEMATITA		RUTILO		GOETHITA		GANGAS	
ENTRELAZADAS	PARTICUL.	PORCENTUAL		N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V		
Au-py	2	0.20		0.05	0.01							1.95	0.20										
Cp-Cv	14	1.42				12.60	1.28					1.40	0.14										
Cv-Py	7	0.71										0.35	0.04	6.65	0.68								
Py-GGs	49	4.98										8.47	0.86							40.53	4.12		
Hm-GGs	7	0.71												2.80	0.28					4.20	0.43		
Gt-GGs	42	4.27																13.70	1.39	28.30	2.88		
Rt-GGs	2	0.20														1.98	0.20				0.02	0.00	
Cp-Cc-GGs	7	0.71				0.70	0.07			0.70	0.07									5.60	0.57		
Py-Gt-GGs	14	1.42										5.25	0.53					1.40	0.14	7.35	0.75		
Hm-Gt-GGs	3	0.31												1.20	0.12			1.20	0.12	0.60	0.06		
Cp-Bn-Cc-GGs	7	0.71				1.40	0.14	0.70	0.07	0.70	0.07									4.20	0.43		
Cp-Bn-Py-GGs	3	0.31				0.18	0.02	0.15	0.02			1.80	0.18							0.90	0.09		
Cp-Cv-Py-GGs	7	0.71				0.35	0.04					0.07	0.01	5.18	0.53					1.40	0.14		
TOTAL ENTREL.	164	16.69	0.05	0.01	15.23	1.55	0.85	0.09	1.40	0.14	1.82	0.19	29.30	2.98	4.00	0.41	1.98	0.20	16.30	1.66	93.10	9.47	
TOT.LIB+ENLZ	983	100.00	0.05		22.23	0.85		1.40	1.82			232.30	4.00	1.98		107.30				611.10			
TOT.VOL.PORCENTUAL		100.00	0.01		2.26	0.09		0.14	0.19			23.63	0.41		0.20				10.92		62.16		
GRADOS DE LIB.PORCENTUAL			0.00		31.49	0.00		0.00	0.00			87.39	0.00		0.00				84.81		84.77		
Símbolos :		N = Número de partículas libres y entrelazadas contabilizadas.																					
		%V = Volumen porcentual de las partículas libres y entrelazadas.																					

### Anexo 3

## Tipos geométricos de entrelazamientos de los minerales

### Muestra 1

MINERALES	TIPO	NUM.	DIST.	POSIBILIDADES DE LIBERACION
ENTRELAZADOS	ENTR.	PART.	PORC.	COMPLETA
Partículas Libres		819	83.32	
Au-Py	1aI	1	0.10	Fácil
	1eII	1	0.10	Muy difícil a imposible
Cp-Cv	1bII	7	0.71	Moderadamente fácil
	2aI	5	0.51	Muy difícil a imposible
	4aI	2	0.20	Muy difícil
Cv-Py	1aII	7	0.71	Fácil
Py-GGs	1bIV	14	1.42	Moderadamente fácil
	1dII	14	1.42	Imposible
	1eI	7	0.71	Muy difícil a imposible
	1eII	7	0.71	Muy difícil a imposible
	3dII	7	0.71	Muy difícil a imposible
Hm-GGs	1bI	7	0.71	Moderadamente fácil
Gt-GGs	1aI	7	0.71	Fácil
	1dII	7	0.71	Imposible
	1eI	7	0.71	Muy difícil a imposible
	1eII	7	0.71	Muy difícil a imposible
	3dII	7	0.71	Muy difícil a imposible
	3dIII	7	0.71	Muy difícil a imposible
Rt-GGs	1eII	2	0.20	Muy difícil a imposible
Cp-Cc-GGs	4cII	5	0.51	Muy difícil a imposible
	4cIII	2	0.20	Muy difícil a imposible
Py-Gt-GGs	1bII	7	0.71	Moderadamente fácil
	3dII	7	0.71	Muy difícil a imposible
Hm-Gt-GGs	3dII	3	0.31	Muy difícil a imposible
Cp-Bn-Cc.GGs	4cI	7	0.71	Muy difícil a imposible
Cp-Bn-Py-GGs	3dII	3	0.31	Muy difícil a imposible
Cp-Cv-Py-GGs	3dII	7	0.71	Muy difícil a imposible
TOTAL		983	100.00	

## Anexo 4

### Volúmenes y grados de liberación de los minerales observados

Muestra:																	
MINERALES		ORO		CALCOPIRITA		GALENA		PIRITA		HEMATITA		GOETHITA		GANGAS			
		N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V		
Total de partículas libres	645	0		10		0		30		10		15		580			
% Volumen partículas libres	85.66	0.00		1.33		0.00		3.98		1.33		1.99		77.03			
TOT.PARTICULAS	NUMERO	VOLUMEN		ORO		CALCOPIRITA		GALENA		PIRITA		HEMATITA		GOETHITA		GANGAS	
ENTRELAZADAS	PARTICUL.	PORCENTUAL	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	
Au-Py	3	0.40	0.03	0.00					2.97	0.39							
Au-Gt	3	0.40	0.15	0.02									2.85	0.38			
Cp-Py	5	0.66			1.00	0.13			4.00	0.53							
Gn-Py	5	0.66					0.25	0.03	4.75	0.63							
Py-Gt	5	0.66							0.25	0.03			4.75	0.63			
Py-GGs	10	1.33							0.75	0.10					9.25	1.23	
Hm-Gt	5	0.66									2.50	0.33	2.50	0.33			
Hm-GGs	10	1.33									2.25	0.30			7.75	1.03	
Gt-GGs	45	5.98											15.05	2.00	29.95	3.98	
Au-Gn-Py	1	0.13	0.03	0.00			0.10	0.01	0.87	0.12							
Au-Gt-GGs	10	1.33	0.15	0.02									9.50	1.26	0.35	0.05	
Gn-Py-GGs	1	0.13					0.10	0.01	0.30	0.04					0.60	0.08	
Hm-Gt-GGs	5	0.66									1.00	0.13	1.50	0.20	2.50	0.33	

<b>TOTAL ENTREL.</b>	<b>108</b>	<b>14.34</b>	<b>0.36</b>	<b>0.05</b>	<b>1.00</b>	<b>0.13</b>	<b>0.45</b>	<b>0.06</b>	<b>13.89</b>	<b>1.84</b>	<b>5.75</b>	<b>0.76</b>	<b>36.15</b>	<b>4.80</b>	<b>50.40</b>	<b>6.69</b>
<b>TOT.LIB+ENLZ</b>	<b>753</b>	<b>100.00</b>	<b>0.36</b>		<b>11.00</b>		<b>0.45</b>		<b>43.89</b>		<b>15.75</b>		<b>51.15</b>		<b>630.40</b>	
<b>TOT.VOL.PORCENTUAL</b>		<b>100.00</b>		<b>0.05</b>		<b>1.46</b>		<b>0.06</b>		<b>5.83</b>		<b>2.09</b>		<b>6.79</b>		<b>83.72</b>
<b>GRADOS DE LIB.PORCENTUAL</b>			<b>0.00</b>		<b>90.91</b>		<b>0.00</b>		<b>68.35</b>		<b>63.49</b>		<b>29.33</b>		<b>92.01</b>	

Símbolos : N = Número de partículas libres y entrelazadas contabilizadas.

%V = Volumen porcentual de las partículas libres y entrelazadas.

## Anexo 5

### Tipos geométricos de entrelazamientos de los minerales y sus posibilidades de liberación completa

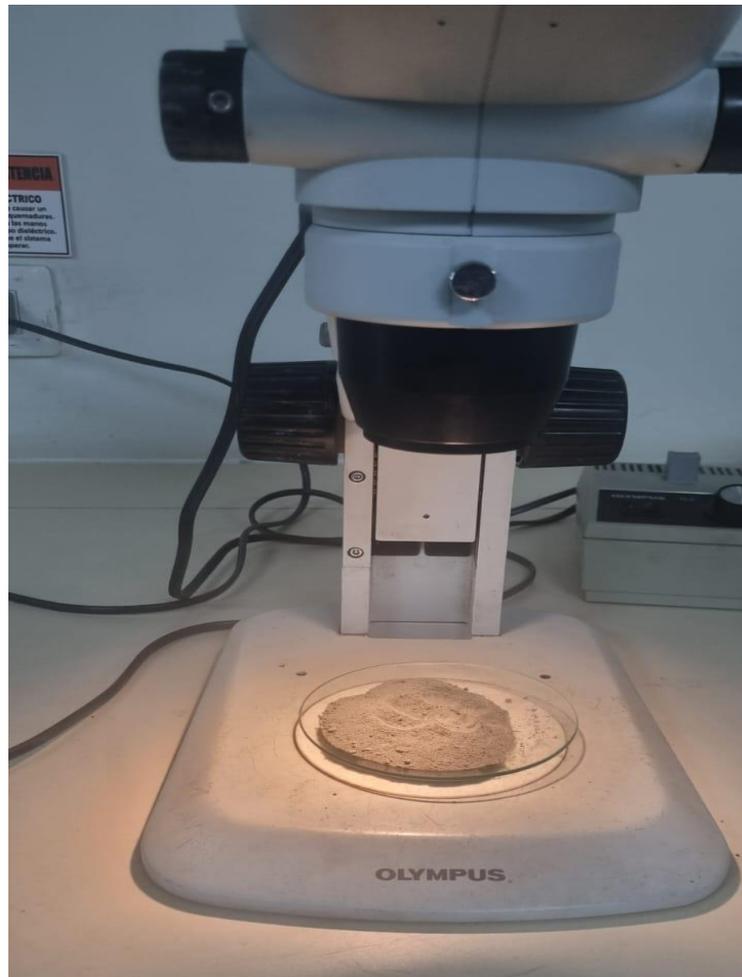
Muestra No. : 1				
MINERALES	TIPO	NUM.	DIST.	POSIBILIDADES DE LIBERACION
ENTRELAZADOS	ENTR.	PART.	PORC.	COMPLETA
Partículas Libres		645	85.66	
Au-Py	1ell	3	0.40	Muy difícil a imposible
Au-Gt	1dl	2	0.27	Imposible
	1el	1	0.13	Muy difícil a imposible
Cp-Py	3dll	5	0.66	Muy difícil a imposible
Gn-Py	1al	5	0.66	Fácil
Py-Gt	1el	5	0.66	Muy difícil a imposible
Py-GGs	1dll	10	1.33	Imposible
Hm-Gt	3dll	5	0.66	Muy difícil a imposible
Hm-GGs	1dll	5	0.66	Imposible
	1dIII	5	0.66	Imposible
Gt-GGs	1al	5	0.66	Fácil
	1el	10	1.33	Muy difícil a imposible
	1ell	5	0.66	Muy difícil a imposible
	3dll	10	1.33	Muy difícil a imposible
	4cII	15	1.99	Muy difícil a imposible
Au-Gn-Py	1bII	1	0.13	Moderadamente fácil
Au-Gt-GGs	1ell	10	1.33	Muy difícil a imposible
Gn-Py-GGs	1bII	1	0.13	Moderadamente fácil
Hm-Gt-GGs	1bIV	5	0.66	Moderadamente fácil
<b>TOTAL</b>		<b>753</b>	<b>100.00</b>	

## Anexo 6

### Vista macroscópica de la muestra



### Vista del muestreo en microscopio



**Vista macroscópica de la muestra**



**Vista macroscópica de la muestra**



**Vista macroscópica de la muestra**

