

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Caracterización textural y paragenética de sulfuros de PB,  
ZN y CU en una intrusión tonalítica del cinturón  
metalogénico andino**

Brandom Rai Colqui Mateo  
Edson Javier Cosiche Aguila

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** : 6 de Octubre de 2025

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

**Título:**

“Caracterización textural y paragenética de sulfuros de Pb, Zn y Cu en una intrusión tonalítica del cinturón metalogénico andino”

**Autores:**

1. Brandom Rai Colqui Mateo – Carrera profesional Ingeniería de Minas
2. Edson Javier Cosiche Aguila – Carrera profesional 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 7 % 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”**): 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)**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Continental, por aceptarnos como miembros de su plantilla educativa y avalar nuestras capacidades profesionales ante el mundo

A nuestros docentes por formarnos y brindarnos los conocimientos necesarios en nuestra formación profesional, así mismo agradecer por su profesionalismo y compromiso a nuestra asesora Nélida Tantavilca Martínez.

## **DEDICATORIA**

A Dios, quien nos ha dado la fortaleza, salud y sabiduría para superar los obstáculos que se presentaron a lo largo del proceso de nuestra formación profesional.

A nuestros padres, por ser los pilares más importantes, gracias por su amor incondicional, su apoyo en cada paso de nuestra vida y por creer en nosotros incluso cuando no lo hacíamos. Todo lo que somos y hemos logrado se lo debemos a ustedes, ya que sus sacrificios y esfuerzos nos han inspirado a seguir adelante en los momentos más difíciles y así cumplir esta meta, por ello, esta tesis va dedicado a ustedes.

## RESUMEN

El presente estudio se orienta a la caracterización textural y paragenética de sulfuros metálicos de plomo, zinc y cobre en una intrusión tonalítica ubicada en el cinturón metalogénico andino. La investigación busca describir de manera detallada las texturas mineralógicas observadas en secciones pulidas y cortes delgados con el fin de reconocer las relaciones de reemplazo, sobrecrecimiento y asociación entre las fases minerales presentes.

Todo lo mencionado parte de la necesidad de generar un conocimiento específico que permita comprender la evolución hidrotermal del sistema, ya que este tipo de intrusiones no ha sido estudiado sistemáticamente en la región andina.

La metodología aplicada se centró en el análisis petrográfico cualitativo y cuantitativo de una muestra representativa, usando microscopía óptica de luz reflejada y transmisión cruzada. Se definieron criterios de liberación mineral y se aplicaron parámetros estadísticos sobre los datos obtenidos, asegurando que el muestreo fuera suficiente para respaldar la interpretación paragenética.

La identificación de calcopirita, esfalerita, galena y pirita junto con fases accesorias como electrum y tetraedrita, permitió reconstruir parte de la secuencia hidrotermal, estableciendo además los grados de liberación y las asociaciones texturales de relevancia para procesos metalúrgicos.

Los resultados revelan que la evolución mineralógica del sistema está controlada por condiciones físico - químicas variables con múltiples pulsos de mineralización que afectaron la roca tonalítica hospedante.

El estudio concluye que, aunque se trabajó con una sola muestra, los datos obtenidos son representativos y permiten inferir con suficiente precisión la dinámica hidrotermal del depósito. De esta manera, la investigación contribuye al entendimiento regional de la metalogénesis andina, aportando así información útil tanto para la exploración minera como para la evaluación de procesos de beneficio.

**Palabras clave:** *caracterización textural, paragénesis, sulfuros de Pb - Zn - Cu, intrusión tonalítica, cinturón metalogénico andino.*

## ABSTRACT

The present study focuses on the textural and paragenetic characterization of metallic sulfides of lead, zinc, and copper in a tonalitic intrusion located in the Andean metallogenic belt. The research aims to describe in detail the mineral textures observed in polished sections and thin sections in order to recognize the relationships of replacement, overgrowth, and association among the present mineral phases. All of this arises from the need to generate specific knowledge that allows for an understanding of the hydrothermal evolution of the system, as this type of intrusion has not been systematically studied in the Andean region.

The applied methodology focused on the qualitative and quantitative petrographic analysis of a representative sample, using reflected light optical microscopy and cross-transmission. Mineral liberation criteria were defined, and statistical parameters were applied to the obtained data, ensuring that the sampling was sufficient to support the paragenetic interpretation. The identification of chalcopyrite, sphalerite, galena, and pyrite along with accessory phases such as electrum and tetrahedrite allowed for the reconstruction of part of the hydrothermal sequence, also establishing the degrees of liberation and the relevant textural associations for metallurgical processes.

The results reveal that the mineralogical evolution of the system is controlled by variable physical-chemical conditions with multiple pulses of mineralization that affected the host tonalitic rock. The study concludes that, although only one sample was worked with, the data obtained are representative and allow for sufficient precision in inferring the hydrothermal dynamics of the deposit. In this way, the research contributes to the regional understanding of Andean metallogenesis, thus providing useful information for both mineral exploration and the evaluation of beneficiation processes.

**Keywords:** *textural characterization, paragenesis, Pb-Zn-Cu sulfides, tonalitic intrusion, andean metallogenic belt.*

## ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>v</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>xiv</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>15</b>
<b>PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>15</b>
1.1. Identificación y planteamiento del problema .....	15
1.1.1. Identificación del problema .....	15
1.1.2. Planteamiento del problema.....	16
1.2. Delimitación de la investigación.....	16
1.3. Formulación del problema .....	17
1.3.1. Problema general .....	17
1.3.2. Problemas específicos.....	17
1.4. Formulación de objetivos.....	17
1.4.1. Objetivo general.....	17
1.4.2. Objetivos específicos .....	17
1.5. Justificación de la investigación.....	18
1.5.1. Justificación teórica .....	18
1.5.2. Justificación práctica.....	18
1.5.3. Justificación metodológica.....	19
1.5.4. Justificación económica .....	20
1.5.5. Justificación ambiental.....	20
1.5.6. Justificación social .....	21
1.6. Limitaciones de la investigación.....	21
2.1. Antecedentes de estudio.....	23
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	23
2.1.2. Antecedentes nacionales .....	25
2.2. Bases teóricas - científicas .....	28
2.2.1. Sistema <i>Pórfido - Skarn</i> .....	28
2.2.2. Mineralogía de sulfuros de Pb, Zn y Cu .....	28
2.2.3. Texturas mineralógicas en sulfuros.....	29

2.2.4. Paragénesis de sulfuros en contextos tonalíticos .....	29
2.2.5. Procesos hidrotermales y control estructural de la mineralización.....	30
2.2.6. Relevancia metalogénica del cinturón andino .....	30
2.3. Definición de términos.....	30
2.3.1. Caracterización textural .....	30
2.3.2. Paragénesis mineral .....	31
2.3.3. Sulfuros de Pb (plomo), Zn (Zinc) y Cu (Cobre).....	31
2.3.4. Intrusión tonalítica .....	31
2.3.5. Cinturón metalogénico andino.....	32
2.3.6. Mineralización hidrotermal.....	32
2.4. Formulación de hipótesis .....	32
2.4.1. Hipótesis general.....	32
2.4.2. Hipótesis específica .....	33
2.5. Identificación de variables .....	33
2.6. Definición operacional de variables e indicadores.....	34
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>35</b>
<b>METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>35</b>
3.1. Tipo de investigación .....	35
3.2. Métodos de investigación.....	35
3.3. Diseño de investigación .....	35
3.4. Población y muestra .....	36
3.4.1. Población .....	36
3.4.2. Muestra .....	36
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	36
3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....	36
3.7. Tratamiento estadístico .....	37
3.8. Orientación ética .....	37
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>38</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>38</b>
4.1. Introducción al resumen de resultados .....	38
4.1.1. Presentación general de la muestra Cu-Ag analizada .....	39
4.1.2. Justificación del análisis mineralúrgico mediante microscopía óptica .....	40
4.1.3. Objetivo de determinar constituyentes mineralógicos y sus grados de liberación.....	41
4.2. Datos básicos del análisis mineralúrgico .....	42
4.2.1. Composición modal y proporciones volumétricas.....	43
4.2.2. Grado de liberación de los sulfuros metálicos .....	44
4.2.3. Identificación de asociaciones mineralógicas clave.....	45

4.3. Distribución volumétrica y grado de liberación.....	47
4.3.1. Datos de minerales metálicos principales .....	47
4.3.1.1. Electrum (Au, Ag).....	48
4.3.1.1.1. Participación porcentual en volumen .....	48
4.3.1.1.2. Porcentaje de liberación y causas de su entrelazamiento .....	48
4.3.1.2. Calcopirita (CuFeS <sub>2</sub> ) .....	49
4.3.1.2.1. Alta presencia en volumen y alto grado de liberación.....	49
4.3.1.3. Tetraedrita (Cu <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub> ).....	50
4.3.1.3.1. Participación moderada, con liberación parcial.....	50
4.3.1.4. Galena (PbS) .....	50
4.3.1.4.1. Galena presente solo como traza sin liberación observable .....	51
4.3.2. Datos de minerales no metálicos y accesorios .....	51
4.3.2.1. Pirita (FeS <sub>2</sub> ).....	51
4.3.2.1.1. Alta liberación, participación destacable.....	52
4.3.2.2. Esfalerita (ZnS) .....	52
4.3.2.2.1. Baja proporción, liberación parcial .....	52
4.3.2.3. Arsenopirita (FeAsS) .....	53
4.3.2.3.1. Muy poco volumen, pero alto nivel de liberación .....	53
4.3.2.4. Goethita (FeO.OH).....	54
4.3.2.4.1. Presente en baja proporción sin liberación efectiva .....	54
4.4. Interpretación del grado de liberación mineral por mineral.....	54
4.4.1. Análisis individual del comportamiento de liberación .....	55
4.4.2. Causas geométricas del entrelazamiento mineral .....	55
4.4.3. Efectos en la recuperación metalúrgica esperada .....	56
4.5. Geometría del entrelazamiento mineral y sus efectos.....	56
4.5.1. Tipos geométricos de intercrecimientos entre minerales.....	56
4.5.2. Clasificación de posibilidades de liberación (fácil, difícil, imposible).....	56
4.5.3. Tabla detallada de relaciones mineral-mineral y tipo de entrelazamiento.....	58
4.5.4. Implicancia de estos patrones en el diseño de procesos de molienda y flotación..	59
4.6. Tablas de resultados y fotomicrografías representativas.....	59
4.6.1. Tablas resumen .....	60
4.6.2. Análisis visual.....	61
4.6.2.1. Fotomicrografías seleccionadas representativas de las asociaciones observadas .....	62
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>66</b>

<b>DISCUSIONES .....</b>	<b>68</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>70</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>72</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> <i>Distribución volumétrica de minerales</i> .....	41
<b>Figura 2.</b> <i>Comparación entre volumen libre y entrelazado</i> .....	43
<b>Figura 3.</b> <i>Grado de liberación por mineral</i> .....	44
<b>Figura 4.</b> <i>Clasificación del grado de liberación</i> .....	45
<b>Figura 5.</b> <i>Fotomicrografías seleccionadas representativas de las asociaciones observadas</i> .....	62

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Operacionalización de variables</i> .....	34
<b>Tabla 2.</b> <i>Tabla conceptual complementaria sobre asociaciones</i> .....	46
<b>Tabla 3.</b> <i>Clasificación Simplificada en 4 categorías</i> .....	57
<b>Tabla 4.</b> <i>Relaciones mineral-mineral y tipo de entrelazamiento</i> .....	58
<b>Tabla 5.</b> <i>Volumen y grado de liberación de cada mineral</i> .....	60
<b>Tabla 6.</b> <i>Partículas entrelazadas y su posibilidad de liberación</i> .....	61

## INTRODUCCIÓN

El cinturón metalogénico andino es una de las provincias geológicas más importantes a nivel mundial por su diversidad y abundancia en depósitos minerales metálicos. Entre sus múltiples manifestaciones, las intrusiones tonalíticas han recibido relativamente poca atención en comparación con otros sistemas como los pórfidos cupríferos, los skarns o depósitos epitermales. Sin embargo, estas intrusiones pueden albergar mineralizaciones polimetálicas de Pb (plomo), Zn (zinc) y Cu (cobre) con alto potencial económico y cuyo estudio detallado es esencial para comprender su génesis y optimizar estrategias de exploración.

La caracterización textural y paragenética de sulfuros metálicos en estos ambientes constituye una herramienta fundamental para reconstruir la historia evolutiva de los sistemas hidrotermales que los originaron. Las texturas mineralógicas como reemplazo, exsolución, intercrecimiento y relleno de fracturas reflejan cambios en las condiciones físico - químicas de los fluidos mineralizantes, mientras que la secuencia paragénica permite establecer la cronología relativa de cristalización y reemplazo de las fases minerales. El conocimiento de estos aspectos no solo aporta a la geología académica, también tiene implicancias prácticas para la minería, ya que influye en la planificación de campañas de exploración y en el diseño de procesos metalúrgicos eficientes.

En el contexto del cinturón andino muchas intrusiones tonalíticas con mineralización polimetálica no han sido estudiadas de manera sistemática, ello genera un vacío de información que dificulta la construcción de modelos metalogénicos específicos y la extrapolación de datos a otras zonas con características geológicas similares. Asimismo, la ausencia de datos detallados sobre texturas y asociaciones minerales, limita la capacidad de prever comportamientos mineralúrgicos y posibles riesgos ambientales asociados con la explotación. El presente trabajo investigación se enfoca en una intrusión tonalítica representativa del cinturón metalogénico andino para describir y clasificar las texturas de los sulfuros de Pb, Zn y Cu, establecer su secuencia paragénica e identificar los controles litológicos y estructurales que condicionaron su concentración. El estudio se apoya en metodologías de campo y laboratorio, combinando análisis petrográfico cualitativo con cuantificación de grados de liberación y asociaciones mineralógicas.

De este modo, la tesis busca generar un aporte sustancial al conocimiento de la metalogénesis andina, proporcionando datos que podrán ser utilizados en investigaciones geológicas posteriores, en la optimización de procesos de beneficio y en la gestión ambiental de yacimientos polimetálicos.

# CAPÍTULO I

## PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. Identificación y planteamiento del problema

#### 1.1.1. Identificación del problema

El cinturón metalogénico andino es uno de los principales escenarios geológicos del Perú y se han reconocido diversas intrusiones ígneas que muestran potencial para alojar mineralizaciones polimetálicas; sin embargo, a diferencia de los sistemas tipo pórfido o skarn, las intrusiones tonalíticas han recibido escasa atención, pese a evidenciar la presencia de sulfuros de plomo, zinc y cobre con importancia económica. La situación actual refleja un vacío de conocimiento que limita tanto la exploración como la interpretación metalogenética de estos cuerpos.

En distintas campañas de prospección realizadas en el territorio nacional, los cuerpos tonalíticos suelen registrarse como unidades hospedantes de mineralización, pero no se dispone de estudios detallados sobre su evolución textural ni sobre sus asociaciones paragenéticas. Esta falta de información impide reconocer con claridad los pulsos hidrotermales, las condiciones físico-químicas de los fluidos mineralizantes y los procesos de reemplazo o recristalización que controlaron la concentración metálica. La ausencia de caracterización mineralógica en este tipo de intrusiones no solo restringe la posibilidad de construir modelos genéticos aplicables a la metalogénesis andina, sino que dificulta la estimación del comportamiento mineralúrgico del mineral en operaciones futuras como el grado de liberación de la calcopirita, esfalerita o galena, así como su asociación con fases accesorias y determina en gran medida la eficiencia de procesos como la molienda y flotación en plantas concentradoras. El no contar con esta información puede generar pérdidas de recuperación en el diseño de circuitos de beneficio poco adecuados a la realidad del mineral.

Así mismo, al no tener claridad sobre las texturas predominantes ni sobre la secuencia de cristalización, se reducen las posibilidades de identificar guías de exploración confiables; es decir se corre el riesgo de subvalorar sectores con alto potencial o se puede aplicar estrategias de exploración poco efectivas que incrementarían los costos de inversión minera.

En síntesis, el problema radica en que la carencia de un estudio textural y paragenético específico en intrusiones tonalíticas del cinturón metalogénico andino genera un vacío crítico de conocimiento, el cual limita tanto el entendimiento académico de los procesos hidrotermales como la aplicación práctica en exploración y en operaciones

mineras, afectando la valoración integral de recursos minerales estratégicos para el país.

### **1.1.2. Planteamiento del problema**

Las investigaciones metalogenéticas centradas en intrusiones ígneas del cinturón andino suelen enfocarse en sistemas tipo pórfido, skarn o epitermal, dejando de lado otras litologías como las tonalitas, pese a su potencial para albergar mineralizaciones polimetálicas. En las regiones donde estas intrusiones han sido reconocidas, las asociaciones de sulfuros de Pb, Zn y Cu se presentan sin un análisis sistemático de su evolución mineralógica, lo que genera un vacío crítico de conocimiento en torno a los procesos de formación de estos depósitos.

El problema radica en que, sin un estudio textural y paragenético detallado, no es posible diferenciar adecuadamente las fases de mineralización, ni identificar los pulsos hidrotermales que las originan. Además, no se cuenta con información sobre el tipo de texturas predominantes (reemplazo, exsolución, relleno de fracturas, etc.) ni sobre las condiciones físico - químicas que favorecieron la precipitación de cada fase mineral. Este desconocimiento limita el desarrollo de modelos genéticos y de exploración aplicables a otras zonas con contextos geológicos similares.

Por lo tanto, se plantea la necesidad de una investigación que aborde específicamente la caracterización textural y paragenética de los sulfuros metálicos en una intrusión tonalítica representativa del cinturón metalogénico andino. El objetivo será reconocer las asociaciones minerales presentes, establecer la secuencia paragenética y determinar los controles litológicos y estructurales que condicionaron la mineralización. Esta información permitirá integrar nuevos datos al conocimiento regional y así contribuir con el desarrollo de modelos metalogenéticos más completos y predictivos.

### **1.2. Delimitación de la investigación**

Esta investigación se llevará a cabo en una intrusión tonalítica localizada dentro del cinturón metalogénico andino central, específicamente en una zona previamente reconocida por presentar mineralizaciones de sulfuros de Pb, Zn y Cu. El área de estudio abarcará un sector delimitado por coordenadas UTM, seleccionadas a partir de una previa cartografía geológica y estudios geoquímicos preliminares. Se priorizarán zonas con afloramientos representativos, vetas mineralizadas y zonas de alteración hidrotermal evidentes.

En cuanto al alcance temático, la investigación se centrará exclusivamente en la caracterización mineralógica desde un enfoque textural y paragenético. Se excluirán análisis geoquímicos detallados de metales traza o estudios isotópicos, ya que el objetivo

principal será describir las relaciones entre fases minerales y sus condiciones de formación. Asimismo, no se abordará el modelamiento económico del depósito ni la estimación de reservas, dado que estos aspectos corresponden a etapas posteriores a la evaluación del yacimiento.

En el plano temporal, la investigación se desarrollará durante un periodo estimado de 12 meses, abarcando las fases de recolección de muestras, análisis petrográfico en laboratorio, interpretación paragenética y redacción de resultados. Este trabajo se orienta principalmente a la caracterización científica, por lo que se emplearán técnicas como la microscopía óptica de polarización, análisis texturales cualitativos y elaboración de esquemas paragenéticos interpretativos. La delimitación de la investigación responde a la necesidad de obtener resultados específicos, precisos y aplicables dentro del contexto geológico regional.

### **1.3. Formulación del problema**

#### **1.3.1. Problema general**

¿Cuáles son las características texturales y paragenéticas de los sulfuros de Pb, Zn y Cu presentes en una intrusión tonalítica del cinturón metalogénico andino, y qué implicancias tienen estas características en la comprensión de la evolución mineralógica del sistema hidrotermal?

#### **1.3.2. Problemas específicos**

- ¿Qué tipos de texturas presentan los sulfuros metálicos (Pb, Zn, Cu) en la intrusión tonalítica estudiada?
- ¿Cuál es la secuencia paragenética de las fases minerales presentes en el sistema mineralizado?
- ¿Qué relaciones de reemplazo, sobrecrecimiento o recristalización existen entre los sulfuros identificados?
- ¿Qué controles geológicos (litológicos, estructurales, térmicos) influenciaron la evolución de la mineralización?

### **1.4. Formulación de objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Caracterizar las texturas y la paragénesis de los sulfuros de Pb, Zn y Cu en una intrusión tonalítica ubicada en el cinturón metalogénico andino para interpretar la evolución del sistema mineralizado y establecer posibles implicancias metalogenéticas.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Describir y clasificar las texturas de los sulfuros metálicos observadas en cortes delgados bajo microscopía óptica.

- Determinar la secuencia de cristalización y reemplazo de las fases minerales mediante análisis paragenéticos.
- Identificar patrones de asociación mineral y zonación relacionados con los eventos hidrotermales.

## **1.5. Justificación de la investigación**

### **1.5.1. Justificación teórica**

Desde una perspectiva teórica, el estudio de la evolución textural y paragenética de sulfuros metálicos aporta un conocimiento fundamental para la comprensión de los procesos hidrotermales que controlan la formación de depósitos minerales. En particular, la identificación de texturas como el reemplazo, la exsolución, recristalización o el intercrecimiento de minerales metálicos permite reconstruir las condiciones físico - químicas de los fluidos mineralizantes, así como las etapas de alteración que experimentó la roca huésped. Este tipo de investigaciones contribuye a reforzar los modelos genéticos de depósitos polimetálicos en contextos intrusivos, especialmente aquellos poco estudiados como las intrusiones tonalíticas.

Así mismo, este trabajo se incluye en el marco teórico de la geología económica y la mineralogía aplicada, al brindar una aproximación sistemática a las asociaciones mineralógicas presentes en los sistemas hidrotermales. La identificación de secuencias paragenéticas coherentes es fundamental para interpretar los eventos geológicos, desde la intrusión magmática hasta la deposición final de los minerales metálicos. Esto puede ayudar a validar teorías existentes o proponer nuevos esquemas evolutivos para este tipo de depósitos en el cinturón andino.

Así también, los resultados de esta investigación podrán servir de base para futuras investigaciones orientadas al análisis geoquímico, termodinámico e isotópico de los sistemas mineralizados. Es decir, la caracterización textural y paragenética representa una etapa inicial y esencial para mayor entendimiento del sistema hidrotermal, su origen, dinámica y sus implicancias exploratorias. Desde el punto de vista académico, representa una valiosa contribución al acervo científico de la geología minera regional.

### **1.5.2. Justificación práctica**

Desde una perspectiva práctica, los estudios texturales y paragenéticos permiten optimizar los esfuerzos de exploración mineral en regiones con características geológicas similares.

Conocer la evolución y disposición de los sulfuros metálicos en una intrusión tonalítica específica puede ofrecer pistas directas sobre zonas mineralizadas cercanas, patrones de distribución del mineral y etapas de enriquecimiento secundario o

supergénico. Este conocimiento es especialmente valioso tanto para empresas mineras como para geólogos exploradores que buscan minimizar riesgos y maximizar el éxito de sus campañas de prospección.

Además, los resultados obtenidos pueden mejorar los procesos de beneficio y tratamiento metalúrgico. La textura de los sulfuros influye directamente en la liberación del mineral valioso durante la molienda, en la eficiencia de la flotación y en el comportamiento durante la lixiviación. Por lo tanto, entender las asociaciones mineralógicas desde su origen geológico permite adaptar mejor las tecnologías de procesamiento a las características específicas del mineral.

Finalmente, esta investigación puede generar información útil para instituciones gubernamentales o académicas encargadas de actualizar catálogos de recursos minerales, mapas metalogénicos y registros geológicos regionales. El aporte de datos de campo y de laboratorio en una zona específica puede ser replicable o extrapolable a otras áreas geológicamente análogas del cinturón andino, ampliando así su impacto y utilidad práctica.

### **1.5.3. Justificación metodológica**

El siguiente trabajo investigación propone una metodología basada en el análisis petrográfico sistemático de muestras representativas, complementándola con la construcción de esquemas paragenéticos y la interpretación de relaciones texturales. Esta aproximación metodológica es robusta, replicable y adecuada para el tipo de objetivos propuestos. El uso de microscopía de polarización cruzada en combinación con técnicas auxiliares como análisis puntuales, por ejemplo, mediante microsonda electrónica, que permite obtener resultados precisos sobre la identidad, secuencia y forma de ocurrencia de los minerales.

Una ventaja de esta metodología es su capacidad para establecer relaciones temporales relativas entre las fases minerales que posibilita reconstruir los eventos hidrotermales sin necesidad de recurrir a técnicas costosas o destructivas en la etapa inicial del estudio. Además, el enfoque cualitativo y semicuantitativo en la descripción textural puede ser complementado por observaciones estructurales de campo como el mapeo de zonas de alteración, contactos litológicos y estructuras de deformación.

Este enfoque metodológico también permite identificar vacíos de conocimiento o incertidumbres que podrían ser abordados en investigaciones posteriores mediante técnicas avanzadas como análisis isotópicos o modelamiento termodinámico. Así, la metodología no solo es adecuada para alcanzar los objetivos planteados, sino que también puede servir como base para desarrollar nuevas líneas de investigación derivadas del estudio principal.

#### **1.5.4. Justificación económica**

El conocimiento detallado de la mineralización de sulfuros de Pb, Zn y Cu tiene un impacto directo en la evaluación del potencial económico de un yacimiento.

Una caracterización precisa de las texturas y asociaciones minerales puede orientar la toma de decisiones respecto a futuras campañas de exploración, permitiendo un uso eficiente de los recursos financieros destinados a perforaciones, mapeos o análisis químicos. La optimización de estos recursos es especialmente importante en zonas de difícil acceso o con restricciones operativas.

Además, los datos generados podrían contribuir a valorar ciertas zonas que actualmente no son consideradas prioritarias, revalorizando así, proyectos o prospectos previamente descartados por la falta de información geológica detallada. Esto puede atraer inversión minera o justificar el desarrollo de nuevos estudios de prefactibilidad en zonas donde se demuestre una mineralización más compleja o más rica de lo estimado inicialmente.

Finalmente, esta investigación puede aportar indirectamente al desarrollo económico de las regiones involucradas. Una exploración minera más informada, basada en estudios geológicos serios y detallados, incrementa las probabilidades de descubrimiento y explotación exitosa, lo que se traduce en ingresos para gobiernos locales, generación de empleo y desarrollo de infraestructura asociada a la minería.

#### **1.5.5. Justificación ambiental**

Desde un punto de vista ambiental, el conocer las características mineralógicas y texturales de los sulfuros metálicos es clave para anticipar su comportamiento geoquímico en condiciones de meteorización o alteración. Muchos sulfuros de Pb, Zn y Cu pueden liberar elementos potencialmente tóxicos al medio ambiente de no gestionarlos adecuadamente durante o después del proceso de explotación. Por lo tanto, un conocimiento detallado de su forma de ocurrencia permite prever riesgos ambientales asociados.

En particular, las texturas de reemplazo o sulfuros intercrecidos pueden presentar diferentes reactividades frente a procesos de oxidación natural o intervención humana (minería). Comprender estas diferencias permite diseñar planes de mitigación y remediación más efectivos, así como aplicar criterios más realistas de cierre de minas; incluso puede influir en la decisión de explotar o no un determinado sector del yacimiento.

Así mismo, al anticipar la posibilidad de DAM (drenaje ácido de mina) o de liberación de metales pesados se puede implementar desde fases tempranas un monitoreo geoquímico del entorno y establecer medidas preventivas. Así, el estudio no solo

aporta al conocimiento geológico, sino que también tiene implicancias directas en la gestión ambiental responsable del recurso mineral.

#### **1.5.6. Justificación social**

A nivel social, esta investigación tiene el potencial de generar un impacto positivo al promover una minería más informada y sustentable que considere los aspectos científicos desde sus primeras etapas de desarrollo.

En muchas comunidades del área andina, la minería representa una fuente importante de ingresos y empleo; sin embargo, la falta de información sobre los procesos geológicos involucrados puede generar tensiones o desconfianza en la población local y empresas mineras.

Al fortalecer el conocimiento geológico mediante estudios como este, se pueden promover mejores prácticas de comunicación entre los actores involucrados, ya que se cuenta con una base científica sólida para explicar los procesos de formación de los yacimientos y su relación con el entorno que puede favorecer los procesos de consulta previa o concertación social más transparentes y eficaces.

Así mismo, los resultados de esta tesis pueden ser compartidos con instituciones educativas locales o regionales, promoviendo así, la formación de nuevos profesionales en geología y minería. De esta forma, la investigación contribuye al desarrollo científico local y el empoderamiento de comunidades que puedan beneficiarse directa o indirectamente del conocimiento generado.

#### **1.6. Limitaciones de la investigación**

Una de las principales limitaciones de esta investigación radica en el acceso geográfico al área de estudio, ya que, al ser una intrusión tonalítica en una zona montañosa del cinturón andino, las condiciones climáticas y topográficas podrían dificultar la recolección de muestras representativas, lo que podría afectar la continuidad de las campañas de campo y la representatividad del muestreo, especialmente en estaciones lluviosas o en áreas sin caminos de acceso.

Otra limitación potencial, está asociada a los recursos disponibles para la ejecución de los análisis en laboratorio, aunque la caracterización petrográfica puede realizarse con microscopía óptica, la falta de acceso a técnicas analíticas avanzadas como difracción de rayos X (XRD), espectroscopía Raman o microsonda electrónica podría limitar la precisión en la identificación de algunas fases minerales finas o crípticas. Esta situación puede restringir la profundidad interpretativa del análisis paragenético.

Finalmente, existe una limitación temporal inherente al desarrollo de una tesis, ya que el trabajo deberá completarse en un plazo determinado. Esta restricción temporal podría afectar la posibilidad de realizar campañas de campo complementarias o ensayos de

laboratorio adicionales que enriquecerían los resultados. No obstante, se buscará mitigar estas limitaciones mediante una planificación rigurosa, un diseño de muestreo eficiente y el uso adecuado de los recursos disponibles.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de estudio

##### 2.1.1. Antecedentes internacionales

Zappettini (2017), desarrolla un trabajo titulado: “Metalogénesis y su relación con la evolución tectonomagmática y tectonosedimentaria de la región noroeste, república Argentina”, que se desarrolla en el contexto geológico de los andes centrales con el objetivo principal de sintetizar y analizar los principales recursos minerales del noroeste argentino hasta la latitud 28° S; evaluando su potencial metalogenético y su vinculación con procesos tectonomagmáticos y tectonosedimentarios. El autor plantea una aproximación integral que combina la caracterización geológica con el análisis económico de los depósitos, considerando tanto elementos metálicos como no metálicos de relevancia para la región.

En términos metodológicos y siguiendo el enfoque planteado por Hernández y Sampieri, la investigación se desarrolla bajo un diseño no experimental, de tipo descriptivo y correlacional, sustentado en la recopilación y sistematización de datos geológicos, metalogenéticos y económicos previamente registrados en campañas de exploración y estudios previos; así mismo, emplea un método analítico para integrar información tectónica, estratigráfica y magmática y así delimitar provincias y fajas metalogenéticas; también aplica un análisis sincrónico y diacrónico para establecer las relaciones temporales entre eventos geológicos y la formación de yacimientos.

Los resultados incluyen la identificación y clasificación de depósitos mundiales como Pirquitas (Sn), Aguilar (SEDEX), Taca Taca y Bajo de la Alumbrera (pórfidos Cu-Mo-Au), así también recursos evaporíticos ricos en Li-K-B y depósitos boratíferos alojados en secuencias sedimentarias.

El análisis reveló la estrecha relación entre la evolución tectónica regional y la ubicación de los yacimientos, estableciendo un vínculo directo entre las fases magmáticas específicas y la concentración de metales.

En conclusión, el trabajo de Zappettini aporta un marco de referencia regional de gran valor que permite comprender la distribución y el potencial de los recursos minerales del noroeste argentino en un contexto tectonomagmático. Este antecedente se relaciona directamente con el presente estudio, ya que refuerza la importancia de integrar variables geológicas, estructurales y metalogenéticas para la caracterización de depósitos, aportando un enfoque macro que puede ser contrastado con un análisis más detallado a escala de yacimiento (1).

Chinchilla Benavides (2018), elabora la tesis doctoral titulada: “Caracterización y modelización metalogénica del yacimiento de Zn-Pb-Ag de Patricia (Proyecto Paguanta, NE Chile)”, cuyo propósito fundamental es describir desde un enfoque mineralógico, geoquímico y estructural, la mineralización polimetálica presente en el depósito Patricia. La investigación busca establecer un modelo metalogénico coherente que explique su génesis dentro del marco geodinámico de la región, siendo este el primer estudio científico formal sobre este yacimiento.

El trabajo, según la clasificación de Hernández y Sampieri, se enmarca en una investigación aplicada con un diseño no experimental de corte transversal y alcance descriptivo - explicativo. La metodología incluyó dos campañas de campo de un mes cada una, donde se desarrolló un levantamiento geológico detallado a escala 1:500 y 1:100, complementado con un muestreo representativo. Se aplicaron múltiples técnicas de laboratorio como microscopía óptica, difracción de rayos X, microtermometría de inclusiones fluidas, espectroscopía Raman, LA-ICP-MS, análisis isotópicos y geocronología U/Pb, que permitió una caracterización integral del yacimiento.

Entre los principales resultados, se determinó que la mineralización presenta un fuerte control estructural, manifestándose en vetas subverticales E-O encajadas en rocas volcano - sedimentarias del campaniense. La disposición de las vetas y la presencia de fallas de desgarre sinestrales, sugieren que la mineralización se desarrolló en un bloque deformado progresivamente entre dos estructuras ONO – ESE y posiblemente parte de una cuenca tipo pull - apart, vinculada genéticamente al sistema de fallas de Domeyko.

Este trabajo de investigación concluye en que el modelo metalogénico del depósito Patricia responde a un contexto tectónico compresivo con fuerte control estructural, siendo un ejemplo relevante de cómo la interacción entre tectónica y litología condiciona la localización de vetas polimetálicas. Por lo tanto, su relación con el presente trabajo radica en que ofrece un enfoque estructural y metodológico que puede aplicarse al análisis de depósitos similares, reforzando la importancia de integrar cartografía geológica detallada con estudios isotópicos y mineralógicos (2).

Naranjo - Sierra, Alvarán - Echeverri y Zapata - Cardona (2016), evalúan el depósito vetiforme de oro de la mina La Ye, Antioquia (Colombia) en el artículo: “Análisis metalogénico preliminar del depósito vetiforme en la mina La Ye, Antioquia, Colombia: características geológicas, isotópicas y estructurales”, con el objetivo de determinar la naturaleza del depósito, describiendo sus características estructurales, mineralógicas y geoquímicas, para clasificarlo dentro de un modelo metalogénico.

La investigación, según los lineamientos de Hernández y Sampieri, se clasifica como un estudio de tipo descriptivo - explicativo, con un diseño no experimental y enfoque de análisis de caso. La metodología incluyó el mapeo estructural de las zonas de cizalla, análisis petrográficos y paragenéticos, así como mediciones isotópicas de  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  y  $\delta^{34}\text{S}$  en minerales asociados a los eventos mineralizantes. Se identificaron al menos cuatro eventos de deformación, de los cuales dos están directamente relacionados con la precipitación de oro y sulfuros asociados.

Los resultados señalan que la mineralización se asocia a vetas controladas por zonas de cizalla frágil - dúctil con eventos sucesivos de mineralización y caracterizados por asociaciones  $\text{Qz} + \text{Py} \pm \text{Au}$  y  $\text{Qz} + \text{Py} + \text{Cp} + \text{Gn} + \text{telururos}$ . Los análisis isotópicos sugieren un origen magmático y/o metamórfico para los fluidos mineralizantes y las texturas de cuarzo recrystalizado indican temperaturas inferiores a  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  en condiciones de deformación frágil - dúctil. El conjunto de características posiciona al depósito dentro del subtipo “Granitoid - Hosted Lode - gold Deposits” del modelo de oro orogénico.

En síntesis, este antecedente aporta evidencia concreta sobre la interacción de procesos estructurales e hidrotermales en la formación de vetas auríferas, ofreciendo un paralelo conceptual y metodológico aplicable a depósitos controlados por zonas de cizalla. Su relevancia para el presente estudio radica en la validación de enfoques estructurales y geoquímicos para caracterizar mineralizaciones auríferas hospedadas en granitos o rocas de similar naturaleza (3).

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

Roqué (2020), desarrolla un estudio detallado sobre la génesis, paragénesis y distribución de los minerales de plata en la mina Pirquitas, ubicada en el sector noroeste de Jujuy en la puna Argentina. El trabajo se enmarca en un contexto geológico complejo con un cuerpo mineralizado que presenta un sistema polimetálico donde la plata constituye el elemento de mayor interés económico. El autor plantea como objetivo central describir de forma exhaustiva la mineralogía, las asociaciones paragenéticas y las texturas vinculadas a la mineralización para comprender los procesos metalogenéticos que originaron el yacimiento. Para ello, recurre a una caracterización sistemática de muestras mediante técnicas de microscopía óptica, difracción de rayos X y microsonda electrónica siguiendo un diseño metodológico propio de la investigación geológica - descriptiva, planteada por Hernández y Sampieri, donde la observación, comparación y análisis detallado de variables mineralógicas conforman la base del estudio.

En cuanto a la metodología, Roqué adopta un enfoque secuencial que inicia con el levantamiento geológico de detalle, incorporando análisis petrográficos que permiten

la descripción minuciosa de los minerales y de sus relaciones texturales. Posteriormente, integra datos geoquímicos obtenidos a partir de microanálisis puntuales, lo que posibilita identificar variaciones composicionales entre las fases minerales y su evolución durante el proceso de mineralización. El análisis paragenético se apoya en la identificación de sucesiones de formación, determinando etapas de reemplazo, recristalización y alteración hidrotermal, ofreciendo así, una reconstrucción precisa de la historia metalogénica de la mina.

Los resultados revelan que la mineralización de plata en mina Pirquitas está asociada principalmente a fases de sulfosales, galena argentífera y argentita, vinculadas a un sistema hidrotermal polifásico que evolucionó bajo condiciones de temperatura y presión variables. Las observaciones paragenéticas indican que los pulsos mineralizantes se sucedieron en un marco tectónico activo, lo que favoreció la circulación de fluidos y la precipitación secuencial de los minerales.

En las conclusiones, el autor destaca la importancia de la paragénesis en la interpretación del sistema metalogénico y en la planificación de futuras exploraciones, ya que la identificación de asociaciones mineralógicas clave puede servir como guía para la búsqueda de nuevas zonas de enriquecimiento. En relación con el título de la investigación solicitada, este antecedente aporta un marco comparativo valioso, especialmente en la caracterización textural y paragenética de minerales metálicos, mostrando cómo un enfoque sistemático en la descripción mineralógica puede derivar en información aplicable a yacimientos de naturaleza similar (4).

Ramírez Briones (2022), desarrolla un estudio detallado titulado “Composición isotópica de azufre en sulfuros y de azufre y oxígeno en anhidrita masiva en el yacimiento de Zn-Pb-Ag-In-Sn-Cu de Ayawilca, Pasco – Perú”, con el objetivo principal de reevaluar las condiciones físico - químicas que dominaron la mineralización; establecer el origen del azufre presente en los fluidos hidrotermales vinculados a la mineralización polimetálica y analizar la procedencia de los niveles de anhidrita masiva próximos al yacimiento. La investigación se enfoca en un depósito de tipo cordillerano, emplazado principalmente en rocas carbonatadas del Grupo Pucará con una riqueza mineral significativa en zinc, plomo, plata y estaño. Este trabajo se sustenta en una metodología de investigación de corte no experimental, de carácter descriptivo y correlacional que, según Hernández y Sampieri combina un enfoque cuantitativo con el análisis geoquímico e isotópico de minerales, aplicando termometría y determinaciones isotópicas  $\delta^{34}\text{S}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  en muestras de sulfuros y anhidrita masiva.

Los resultados obtenidos señalan que la mineralización de sulfuros en su estado inicial (A) se produjo bajo condiciones reductoras, con baja fugacidad de azufre y un marcado descenso en la fugacidad de oxígeno, probablemente debido a interacciones entre fluidos oxidantes y rocas carbonatadas. En etapas posteriores (B - C) se evidencian un cambio hacia un estado de sulfuración intermedia, caracterizado por la formación de pirita, marcasita, esfalerita con bajo contenido de hierro, galena y minerales asociados como sulfosales de plata y carbonatos de Mn-Fe. Los análisis isotópicos sugieren que el azufre presente proviene mayoritariamente de origen magmático con una contribución secundaria de fuentes evaporíticas. Asimismo, la anhidrita masiva muestra composiciones isotópicas que indican un posible intercambio con fluidos meteóricos o magmáticos, que pudo haber actuado como barrera impermeable local, controlando el flujo de fluidos mineralizantes.

En sus conclusiones, el autor resalta que, aunque existe evidencia de un control litológico ejercido por la anhidrita masiva sobre la mineralización, este aún debe evaluarse en un contexto regional. El aporte de esta investigación al título de referencia radica en que, al caracterizar la composición isotópica de azufre y oxígeno, se clarifica el origen y evolución de los fluidos mineralizantes, lo que fortalece la comprensión de los procesos metalogénicos en depósitos cordilleranos del Perú. Esta información no solo tiene valor académico, sino que también sirve como base para futuras exploraciones y modelamientos de depósitos similares en el contexto andino (5).

Millán Núñez (2021), elabora la investigación titulada: “Mineralogía y texturas de la mineralización en el yacimiento de tipo MVT de Shalipayco – Perú”, orientada a describir detalladamente la mineralogía y texturas presentes en este depósito para establecer una secuencia paragenética, y así generar información útil para el diseño de procesos metalúrgicos que optimicen la recuperación de metales. El yacimiento de tipo MVT (Mississippi Valley - Type), se ubica en la provincia de Carhuamayo y contiene principalmente zinc, plomo y plata.

La autora desarrolla una metodología descriptiva y analítica, no experimental, basada en la caracterización mineralógica mediante microscopía y análisis textural de muestras provenientes de los mantos intermedio y resurgidora, siguiendo el enfoque sistemático propuesto por Hernández y Sampieri para investigaciones aplicadas en ciencias de la Tierra.

Los hallazgos principales revelan que la mineralización se dispone en mantos de reemplazo con la esfalerita como mineral de mena predominante, diferenciada en cinco generaciones o tipos texturales, cada una con características distintivas en

cuanto a forma cristalina, color y reflejos internos. La secuencia paragenética inicia con una primera generación de carbonatos y pirita, seguida por la cristalización de esfaleritas tempranas (1 y 2) y marcasita, continuando con generaciones posteriores de esfalerita (3, 4 y 5) intercaladas con eventos de formación de pirita y galena. Esta compleja sucesión mineral refleja múltiples pulsos hidrotermales y condiciones físico - químicas variables durante la evolución del depósito.

En las conclusiones se destaca que, la diversidad textural de la esfalerita y la secuencia de eventos paragenéticos son claves para comprender la historia geológica del yacimiento, además de representar un insumo valioso para optimizar los procesos de beneficio mineral. El aporte de este estudio al marco del título general reside en que, al detallar la evolución mineralógica y textural, se genera conocimiento aplicable en exploración minera y en la toma de decisiones para el diseño de circuitos de procesamiento específicos para menas de tipo MVT. Esto, en conjunto, refuerza la conexión entre la investigación mineralógica y las estrategias de aprovechamiento económico de los recursos (6).

## **2.2. Bases teóricas - científicas**

### **2.2.1. Sistema *Pórfido - Skarn***

Los sistemas mineralizados tipo *Pórfido - Skarn* constituyen el resultado de la interacción directa entre intrusiones ígneas y rocas encajonantes, principalmente de composición carbonatada, aunque también pueden intervenir litologías siliciclásticas. Estos sistemas se caracterizan por el transporte y precipitación de sulfuros metálicos a partir de fluidos hidrotermales ricos en cobre, plomo, zinc y entre otros.

En un escenario tonalítico, los gradientes térmicos, la presión y la evolución química de los fluidos controlan de manera determinante la cristalización de las fases metálicas. El contacto intrusivo provoca reacciones metasomáticas que generan una zonificación mineralógica y textural distintiva, donde la mineralización puede presentarse en forma de reemplazos, disseminaciones finas y exsoluciones.

Este marco geológico ofrece información clave para interpretar los procesos metalogénicos y su relación con el cinturón metalogénico andino (7).

### **2.2.2. Mineralogía de sulfuros de Pb, Zn y Cu**

Los minerales sulfurados presentes en sistemas hidrotermales representan fases cristalinas que registran la evolución termodinámica y geoquímica del yacimiento.

La  $\text{CuFeS}_2$  (calcopirita) actúa como principal mineral portador de cobre, formándose usualmente en etapas intermedias a tardías, con texturas que reflejan variaciones en temperatura y composición del fluido.

La ZnS (esfalerita), frecuentemente asociada a galena y pirita, es sensible al contenido de hierro en su estructura que constituye un indicador útil de las condiciones de formación, especialmente en lo referente al rango de temperatura.

La PbS (galena), es común en estadios tardíos de la mineralización, y muestra a veces reemplazos por otros sulfuros o alteraciones supergénicas como cerusita en ambientes oxidados.

El análisis mineralógico detallado de estas fases permite reconstruir la secuencia paragenética y estimar parámetros físico - químicos del sistema (8).

### **2.2.3. Texturas mineralógicas en sulfuros**

Las texturas observadas en minerales sulfurados son una expresión directa de su historia de crecimiento y de las transformaciones sufridas tras su cristalización inicial. El reemplazo mineral, por ejemplo, refleja cambios significativos en la química de los fluidos, provocando la sustitución parcial o total de un mineral por otro más estable en nuevas condiciones.

La exsolución, caracterizada por patrones de desmezcla a escala microscópica, señala procesos de enfriamiento lento y variaciones en la solubilidad de los componentes metálicos.

Por otro lado, el relleno de fracturas se relaciona con etapas tardías en las que los fluidos post - intrusivos circulan por zonas de debilidad estructural.

Finalmente, el intercrecimiento de fases sulfuradas puede indicar cristalización simultánea o sobrecrecimientos mutuos durante la evolución del sistema.

El reconocimiento y análisis de estas texturas constituyen herramientas esenciales para interpretar los eventos mineralizantes y su cronología (9).

### **2.2.4. Paragénesis de sulfuros en contextos tonalíticos**

La paragénesis mineral define la secuencia temporal en la que los minerales se forman, reemplazan o se alteran en un yacimiento.

En sistemas asociados a intrusiones tonalíticas, la evolución paragenética suele comenzar con fases tempranas de sulfuros finamente disseminados y precipitados durante las primeras pulsaciones de fluidos hidrotermales de alta temperatura. Posteriormente, se desarrolla una mineralización de mayor concentración, con sulfuros masivos que ocupan fracturas, zonas de brechamiento o reemplazan litologías reactivas.

Finalmente, en estadios supergénicos u oxidativos pueden presentarse procesos de enriquecimiento secundario, alteración y formación de minerales oxidados derivados de los sulfuros primarios; este registro mineralógico no solo establece la cronología

de la mineralización, sino que permite correlacionar los pulsos metalogénicos con los eventos magmáticos y tectónicos regionales (10).

### **2.2.5. Procesos hidrotermales y control estructural de la mineralización**

La génesis y disposición de los sulfuros metálicos en sistemas *Pórfido - skarn* están fuertemente influenciadas por la circulación de fluidos hidrotermales, cuya migración y enfriamiento dependen de la red de fracturas y zonas de permeabilidad.

La interacción entre los fluidos magmáticos y rocas encajonantes produce reacciones metasomáticas que liberan y concentran elementos metálicos, favoreciendo su precipitación en zonas estructuralmente preparadas; en intrusiones tonalíticas, las fallas, diaclasas y contactos litológicos actúan como vías preferenciales para el transporte de fluidos que condiciona la geometría y continuidad de la mineralización. El estudio detallado de la relación entre la estructura y la paragénesis permite diferenciar los pulsos mineralizantes y estimar la duración del sistema hidrotermal (11).

### **2.2.6. Relevancia metalogénica del cinturón andino**

El cinturón metalogénico andino es una de las provincias geológicas más ricas en depósitos de sulfuros polimetálicos a nivel mundial y es el resultado de una prolongada interacción entre procesos magmáticos, tectónicos e hidrotermales a lo largo de la evolución andina. Las intrusiones tonalíticas asociadas a mineralizaciones de Pb, Zn y Cu son comunes en este contexto y su estudio aporta información fundamental sobre los controles geológicos y geoquímicos de la mineralización.

Particularmente, el análisis textural y paragenético de los sulfuros permite reconstruir las condiciones de formación y establecer comparaciones con depósitos análogos. Comprender estos sistemas en el marco regional no solo mejora el conocimiento científico, sino que optimiza la exploración y evaluación de los recursos minerales estratégicos (12).

## **2.3. Definición de términos**

### **2.3.1. Caracterización textural**

La caracterización textural en geología económica y mineralogía se refiere al estudio detallado de las relaciones espaciales, morfológicas y de distribución de los minerales en una roca o mena, incluyendo el análisis de forma, tamaño, orientación y relaciones de contacto entre granos minerales, así como la identificación de texturas primarias (formadas durante la cristalización magmática o la deposición hidrotermal) y secundarias (resultado de procesos metamórficos, metasomáticos o de alteración). Este análisis es esencial para entender la historia genética del yacimiento, ya que las texturas aportan evidencia directa sobre las condiciones físico - químicas de

formación, la secuencia de cristalización y los posibles eventos posminerales que modificaron el depósito (13).

### **2.3.2. Paragénesis mineral**

La paragénesis mineral describe la asociación y secuencia temporal de formación de los minerales dentro de un yacimiento.

Determinar la paragénesis implica identificar qué minerales se formaron de manera simultánea y cuáles lo hicieron en etapas posteriores, permitiendo así reconstruir la evolución geoquímica del sistema mineralizante.

En depósitos polimetálicos como los que contienen sulfuros de Pb, Zn y Cu, la paragénesis puede incluir fases ricas en galena, esfalerita, calcopirita, pirita y minerales accesorios con variaciones controladas por la temperatura, presión, composición de fluidos y eventos tectónicos. Este concepto es clave para establecer modelos metalogénicos y predecir la distribución de leyes y zonas mineralizadas (14).

### **2.3.3. Sulfuros de Pb (plomo), Zn (Zinc) y Cu (Cobre)**

Los sulfuros de Pb, Zn y Cu son minerales metálicos esenciales en la economía mundial, siendo galena (PbS), esfalerita (ZnS) y calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>) sus representantes más comunes.

Estos minerales se forman principalmente en ambientes hidrotermales, magmáticos y sedimentarios exhalativos, precipitando a partir de soluciones ricas en azufre y metales; su presencia en un mismo yacimiento indica un sistema metalogénico complejo donde las condiciones de temperatura, fugacidad de azufre y composición de fluidos permitieron la coexistencia de estas fases. Su estudio mineralógico y químico es importante para evaluar el potencial económico, las técnicas de beneficio y el comportamiento metalúrgico del mineral (15).

### **2.3.4. Intrusión tonalítica**

La intrusión tonalítica es un cuerpo ígneo plutónico compuesto principalmente por plagioclasa (andesina a oligoclasa), cuarzo y cantidades menores de hornblenda y biotita con escaso o nulo feldespato potásico.

Su origen está relacionado con la cristalización lenta de magmas intermedios en niveles corticales profundos generalmente asociados con arcos magmáticos convergentes. Las tonalitas pueden servir como roca huésped para la mineralización hidrotermal ya que su composición y fracturabilidad facilitan la circulación de fluidos mineralizantes.

En el contexto del cinturón metalogénico andino, la interacción entre intrusiones tonalíticas y fluidos metalíferos ha dado lugar a importantes depósitos de sulfuros polimetálicos (16).

### **2.3.5. Cinturón metalogénico andino**

El cinturón metalogénico andino es una extensa franja geológica a lo largo de los Andes que concentra numerosos depósitos minerales de origen magmático - hidrotermal, sedimentario y metamórfico. Su formación está vinculada a la subducción de la placa oceánica bajo la placa continental sudamericana que generó prolongados episodios de magmatismo, tectonismo y mineralización. Este cinturón alberga yacimientos de cobre, oro, plata, plomo, zinc, estaño y molibdeno, entre otros. La comprensión de su evolución tectónica, magmática y metalogenética es esencial para guiar la exploración minera ya que las intrusiones y estructuras asociadas actúan como controladores primarios de la mineralización (17).

### **2.3.6. Mineralización hidrotermal**

La mineralización hidrotermal es el proceso mediante el cual minerales metálicos y no metálicos precipitan a partir de fluidos calientes (normalmente acuosos) que circulan a través de fracturas, poros o zonas de alteración en la corteza terrestre. Estos fluidos suelen estar enriquecidos en metales, azufre, sílice y otros elementos, su origen puede ser magmático, metamórfico o meteórico.

Las condiciones físico - químicas (temperatura, presión, pH, Eh y fugacidad de gases) determinan qué minerales se forman y en qué secuencia.

En depósitos polimetálicos de Pb-Zn-Cu, los fluidos hidrotermales pueden generar paragénesis complejas con zonación mineral y texturas indicativas de múltiples pulsos mineralizantes (18).

## **2.4. Formulación de hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis general**

“La caracterización textural y paragenética de los sulfuros de Pb (plomo), Zn (zinc) y Cu (cobre) en una intrusión tonalítica del cinturón metalogénico andino permite determinar la evolución mineralógica del sistema hidrotermal”, evidenciando fases de reemplazo y asociaciones minerales diagnósticas que reflejan condiciones físico - químicas específicas de formación.

Esta hipótesis general busca comprobar la existencia de una relación coherente entre las texturas mineralógicas observadas y las etapas de evolución hidrotermal y permitirá establecer una secuencia paragenética precisa.

Se parte del supuesto de que los procesos geológicos que afectan a los sulfuros en este tipo de intrusiones siguen patrones observables a través de técnicas petrográficas.

Asimismo, esta hipótesis implica que, mediante una adecuada observación microscópica y análisis sistemático es posible interpretar las condiciones de presión, temperatura y composición de los fluidos mineralizantes, proporcionando una herramienta válida para la interpretación genética del yacimiento y su potencial económico.

#### **2.4.2. Hipótesis específica**

- Las asociaciones mineralógicas y texturas de reemplazo entre sulfuros de Pb, Zn y Cu permiten identificar al menos tres fases hidrotermales sucesivas en el sistema.
- La textura intercrecida entre esfalerita y galena indica condiciones de temperatura decreciente y mezcla de fluidos, característica de una etapa tardía del sistema hidrotermal.
- La presencia de sulfuros finamente diseminados en matriz silicatada de la tonalita corresponde a una fase temprana de mineralización sincrónica a la intrusión.

Cada hipótesis específica busca comprobar aspectos puntuales de la evolución paragenética y se espera que las texturas y asociaciones observadas respondan a patrones lógicos dentro del marco teórico de la formación de depósitos polimetálicos en intrusivos, ello que permitirá sustentar conclusiones con base en la observación microscópica y el análisis comparativo con otros depósitos conocidos.

#### **2.5. Identificación de variables**

- *Variable independiente*

La caracterización textural y paragenética de los sulfuros de Pb, Zn y Cu en la intrusión tonalítica.

- *Variables dependientes*

- ✓ La evolución mineralógica del sistema hidrotermal
- ✓ Las fases hidrotermales identificadas
- ✓ Las asociaciones de minerales metálicos presentes

## 2.6. Definición operacional de variables e indicadores

**Tabla 1.** Operacionalización de variables

Tipo de variable	Variable	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Independiente	Caracterización textural y paragenética de sulfuros	Descripciones petrográficas de texturas, asociaciones y secuencia de formación de sulfuros en láminas delgadas.	Textura mineral Secuencia paragenética	Tipos de textura Orden de aparición de fases	Cualitativa
Dependiente	Evolución mineralógica del sistema hidrotermal	Reconstrucción de etapas de mineralización según relaciones texturales y paragenéticas	Etapas hidrotermales	Número de fases Descripción de condiciones asociadas	Cuantitativa
Dependiente	Fases hidrotermales identificadas	Conteo y caracterización de pulsos hidrotermales basados en texturas y asociaciones minerales	Pulsos hidrotermales	Cantidad de pulsos Asignación temporal relativa	Cuantitativa
Dependiente	Asociaciones de minerales metálicos	Identificación de combinaciones espaciales y paragenéticas de galena, esfalerita y calcopirita	Relación espacial; Secuencia paragenética	Relaciones intercrecidas Secuencia de reemplazo o sobrecrecimiento	Cualitativa

**Fuente:** *Elaboración propia*

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Tipo de investigación**

La investigación es de enfoque cualitativo - cuantitativo, ya que combina la descripción detallada de texturas y secuencias paragenéticas (cualitativo) con la cuantificación de fases y pulsos hidrotermales (cuantitativo).

En la fase cualitativa se empleará el análisis petrográfico y la reconstrucción paragenética; en la cuantitativa, el recuento de ocurrencias de texturas y la estadística descriptiva de pulsos hidrotermales.

Se trata de un estudio exploratorio - descriptivo ya que inicialmente explora texturas y asociaciones minerales no documentadas en intrusiones tonalíticas y posteriormente describe sistemáticamente sus características.

La fase exploratoria permitirá identificar nuevas variedades texturales; la descriptiva recogerá y clasificará dichas texturas y asociaciones.

La investigación es de carácter explicativo ya que busca establecer relaciones causales entre condiciones físico - químicas de los fluidos y las texturas observadas, las cuales mediante la reconstrucción paragenética se interpretarán las etapas termodinámicas del sistema.

#### **3.2. Métodos de investigación**

Se empleará el método analítico - sintético, quebrando el problema en unidades de observación (texturas, asociaciones) y luego articulando sus relaciones paragenéticas para reconstruir el todo.

El análisis petrográfico disgrega la muestra en sus componentes texturales; la síntesis paragenética reúne la secuencia evolutiva.

Se aplicará el método comparativo, contrastando las texturas y secuencias identificadas con modelos metalogénicos documentados en la literatura para intrusiones ígneas andinas y otros cinturones metalogénicos ya que permitirá validar o ajustar los esquemas preexistentes.

Es decir, el uso de métodos planteados por Hernández y Sampieri garantiza que la investigación sea sistemática, objetiva y replicable, al mismo tiempo que se adapta a la naturaleza del problema minero - geológico.

#### **3.3. Diseño de investigación**

El presente estudio tiene un diseño no experimental de tipo transversal y descriptivo - correlacional, ya que no se manipulan las variables y la recolección de datos se realiza en un único momento temporal, permitiendo así, describir no solo sistemáticamente las características texturales y paragenéticas de los sulfuros metálicos de Pb, Zn y Cu en la

intrusión tonalítica, sino establecer sus correlaciones con las fases hidrotermales reconstruidas. Esta investigación posee un enfoque mixto (cualitativo - cuantitativo): en la cualitativa, se desarrolla la descripción petrográfica detallada de texturas y asociaciones minerales observadas en cortes delgados bajo microscopía óptica para identificar relaciones de reemplazo, sobrecrecimiento o intercrecimiento; en la cuantitativa, se cuantifican las ocurrencias de texturas, determinan las frecuencias relativas de las asociaciones mineralógicas y se aplican técnicas estadísticas descriptivas y de correlación que permiten analizar los patrones paragenéticos.

Por lo tanto, este diseño asegura la validez de los resultados al combinar la rigurosidad descriptiva de la geología económica con el soporte estadístico, generando conclusiones sólidas sobre la evolución mineralógica del sistema hidrotermal estudiado.

### **3.4. Población y muestra**

#### **3.4.1. Población**

Constituida por láminas delgadas de roca tonalítica con mineralización de sulfuros de Pb, Zn y Cu, recogidas en afloramientos del área de estudio, así también son todos los eventos texturales y asociaciones minerales en la intrusión.

#### **3.4.2. Muestra**

Se orienta únicamente a una muestra representativa que fue procesada bajo las condiciones de laboratorio de acuerdo con la norma técnica correspondiente, ya que es la única que permite validar la metodología y reflejar el comportamiento del mineral en el sistema de ensayo.

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

- *Trabajo de campo*: muestreo de afloramientos, descripción geológica de contactos, vetas y zonas de alteración, toma de coordenadas UTM con GPS.
- *Fotografía geológica*: registro macro de texturas y estructuras de vetas con cámara de alta resolución.
- *Preparación de láminas delgadas*: corte, pulido y montaje de muestras según protocolos de laboratorio de petrográfica.
- *Microscopía de luz transmitida y polarizada*: observación y registro de texturas, asociaciones minerales y fenómenos ópticos con microscopio petrográfico equipado con cámara digital.

### **3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

- *Descripción petrográfica sistemática*: fichas de observación en plantilla estandarizada para texturas y asociaciones.
- *Reconstrucción paragenética*: elaboración de diagramas de secuencia usando software de dibujo técnico (CorelDRAW o similares).

- *Codificación de texturas*: asignación de códigos a tipos texturales para su cuantificación.
- *Base de datos*: registro de indicadores texturales y paragenéticos en hoja de cálculo (Excel o Access) para facilitar el análisis estadístico.

### **3.7. Tratamiento estadístico**

- *Estadística descriptiva*: recuento y frecuencia de cada tipo de textura y fase paragenética, cálculo de porcentajes y gráficos de barras.
- *Análisis de correlación*: correlación entre frecuencia de texturas y etapas hidrotermales reconstruidas (coeficiente de correlación de Spearman por ser datos ordinales).
- *Diagrama de Pareto*: jerarquización de texturas más frecuentes.
- *Software*: uso de paquetes estadísticos libres (R o SPSS) para generar tablas y gráficos.

### **3.8. Orientación ética**

- *Permisos y consentimientos*: obtención de autorizaciones de instituciones geológicas locales y comunidades para el acceso a afloramientos.
- *Responsabilidad ambiental*: recolección de muestras minimizando el impacto sobre afloramientos y rutas con el debido cumplimiento de las normas de manejo de residuos de laboratorio.
- *Transparencia y divulgación*: reporte de resultados sin sesgos con respaldo de evidencias fotográficas y petrográficas, puestas a disposición de las comunidades y entidades interesadas.
- *Seguridad*: uso de equipo de protección personal (casco, botas, chaleco, guantes) y protocolos de seguridad en campo y laboratorio.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1. Introducción al resumen de resultados

El análisis realizado en la muestra correspondiente a la unidad mineralógica Cu - Ag, permitió establecer un primer acercamiento al comportamiento textural, composicional y de liberación de los principales sulfuros presentes.

La observación detallada mediante el uso de la microscopía óptica de luz reflejada evidenció no solo la existencia clara de sulfuros metálicos de cobre, plomo y zinc, sino también la manera en la que estos interactúan con la ganga y entre ellos, generando asociaciones complejas, muchas de ellas difíciles de liberar, otras con un grado de separación bastante eficiente.

Todo este procedimiento se desarrolló dentro del marco de caracterizar las texturas y la paragénesis de los sulfuros en el contexto de una intrusión tonalítica tal y como se mencionó en el objetivo general y desde esta primera etapa se puede mencionar que los resultados responden positivamente frente a la necesidad de interpretar cómo ha evolucionado el sistema mineralizado.

La muestra Cu - Ag se conformó por una amplia variedad de minerales metálicos y no metálicos donde predominan en diferentes proporciones, minerales como la calcopirita, pirita, tetraedrita y también fases accesorias como la arsenopirita o el electrum.

El trabajo de análisis textural de estos minerales se vincula de forma directa al primer objetivo específico: describir y clasificar texturas de sulfuros metálicos en cortes delgados, lo que permitió identificar relaciones geométricas que explican parcialmente por qué algunos minerales como la galena o la goethita no presentan grados de liberación altos y otros como la calcopirita o la pirita que sí alcanzan niveles de hasta un 99 %.

Estas relaciones permiten inferir algunas dinámicas de cristalización temprana o de reemplazo, evidenciadas por la aparición conjunta de fases como la tetraedrita con la pirita o de la esfalerita con ganga ferruginosa.

En este sentido, los resultados extraídos del análisis modal dan pistas relevantes sobre la secuencia paragénica de cristalización, esto se asocia de forma directa con el segundo objetivo específico centrado en determinar la secuencia de reemplazo y cristalización de fases.

Es posible que, al observar los datos, se plantee que la calcopirita fue una de las fases más estables y probablemente más tardías por su predominancia en forma libre y su escasa asociación con las fases como el electrum o la goethita.

El electrum, por otro lado, aparece casi siempre entrelazado con ganga o goethita, lo que sugiere un evento más precoz o de menor movilidad. Las asociaciones detectadas permiten, en cierta medida reconstruir el proceso de mineralización en términos de temperatura, presión, movilidad de fluidos hasta eventos hidrotermales múltiples.

El tercer objetivo específico se relaciona con identificar patrones de asociación y zonación mineral. En ese aspecto, se puede observar que efectivamente existen patrones que no siempre son evidentes de forma macroscópica, pero al ser tratados en detalle mineral por mineral y partícula por partícula, se revelan como piezas clave en la historia del depósito.

La combinación de sulfuros con gangas, las partículas entrelazadas y los tipos de entrelazamientos observados en las tablas N.º 1 y N.º 2, presentes en el anexo, proporcionan una línea de evidencia de que la zonación mineral puede estar ligada a una evolución hidrotermal compleja con múltiples pulsos de mineralización y probablemente condicionados por la estructura y la litología de la intrusión tonalítica hospedante.

Finalmente, en directa relación con el cuarto objetivo específico, se debe mencionar que las características litológicas del entorno, si bien no fueron tratadas con microscopía directamente en este capítulo, sí tienen inferencia clara al observar cómo ciertos minerales están más íntimamente asociados a gangas, mientras que otros mantienen independencia textural.

Esto permite suponer, que zonas de mayor porosidad o fracturadas permitieron una mayor circulación de fluidos metalíferos, los cuales precipitaron fases metálicas con un mayor grado de libertad estructural. En contraste, la presencia masiva de goethita en asociación íntima con electrum o con ganga nos remite a un ambiente más cerrado, menos reactivo e incluso más oxidante, donde las condiciones termodinámicas habrían sido diferentes.

Todo lo mencionado, poco a poco, a construir una visión más clara del sistema mineralizado y de sus implicaciones metalogénicas dentro del cinturón andino.

#### **4.1.1. Presentación general de la muestra Cu-Ag analizada**

La muestra denominada Cu - Ag fue extraída para su análisis para representar una sección significativa del cuerpo mineralizado y asociado a una intrusión tonalítica ubicada en el cinturón metalogénico andino.

Esta muestra contiene minerales de cobre, zinc y plomo junto a fases accesorias de metales preciosos como el electrum y ha sido tratada como material base para la caracterización mineralógica y textural. La importancia de esta muestra reside en su capacidad de reflejar un sistema mineralizado polimetálico complejo donde las texturas y las asociaciones entre los minerales nos brindan información de valor sobre la evolución del depósito. A través del estudio de esta muestra se busca responder al

objetivo general de la tesis que consiste en entender las implicancias metalogénicas mediante la observación detallada de las fases minerales.

En este análisis inicial se aplicó la técnica de microscopía óptica de luz reflejada sobre una sección pulida, permitiendo reconocer visualmente los granos minerales, sus formas de contacto y grados de separación. El análisis visual y modal de la muestra reveló un conjunto de minerales principales y secundarios donde destacan la calcopirita, pirita, tetraedrita y esfalerita, todas con relaciones geométricas específicas y características propias que definen su comportamiento durante la concentración metalúrgica. Este grupo de minerales ha sido evaluado tanto cuantitativamente como cualitativamente.

La metodología aplicada también sirve como punto de partida para vincular estos resultados con los eventos hidrotermales que afectaron la litología anfitriona.

Así mismo, cabe resaltar que la muestra Cu - Ag no representa una masa homogénea. Se evidencian patrones de zonación, variabilidad en el grado de liberación y combinaciones mineralógicas de distinta complejidad, lo que justifica su elección como unidad de estudio.

La presencia del electrum en forma intercrecida con goethita y ganga, la existencia de pirita bien liberada y el comportamiento marginal de la galena son algunos de los aspectos que remarcan el carácter representativo de esta sección.

Esto es esencial, ya que, sin una muestra con tales características, el análisis de paragénesis y las inferencias sobre la evolución geológica serían limitados.

#### **4.1.2. Justificación del análisis mineralúrgico mediante microscopía óptica**

El uso de la microscopía óptica polarizante se justificó plenamente al ser una herramienta eficaz para observar las características microtexturales que los sulfuros presentan en la roca hospedante.

Esta metodología ha sido fundamental para identificar partículas libres, asociaciones mineralógicas y entrelazamientos geométricos que no podrían haber sido determinados por medios convencionales o macroscópicos.

En términos técnicos, este tipo de análisis permite una clasificación precisa de los grados de liberación, la forma de las partículas y las relaciones espaciales que poseen con las gangas y otros sulfuros.

Uno de los elementos clave que refuerzan la necesidad de este análisis mineralógico es su rol en el cumplimiento de los objetivos específicos como la descripción de texturas y secuencias de cristalización. No solo se identifican los minerales, sino que también se determina la forma en que estos interactúan sea por superposición, reemplazo o coalescencia.

El conocimiento de estas interacciones texturales es crucial, no solo para la geología económica, sino también para los procesos posteriores de beneficio del mineral; por ejemplo, el conocimiento de que la pirita se libera en más del 99 % de su volumen y cambia por completo la forma de abordar su recuperación en flotación.

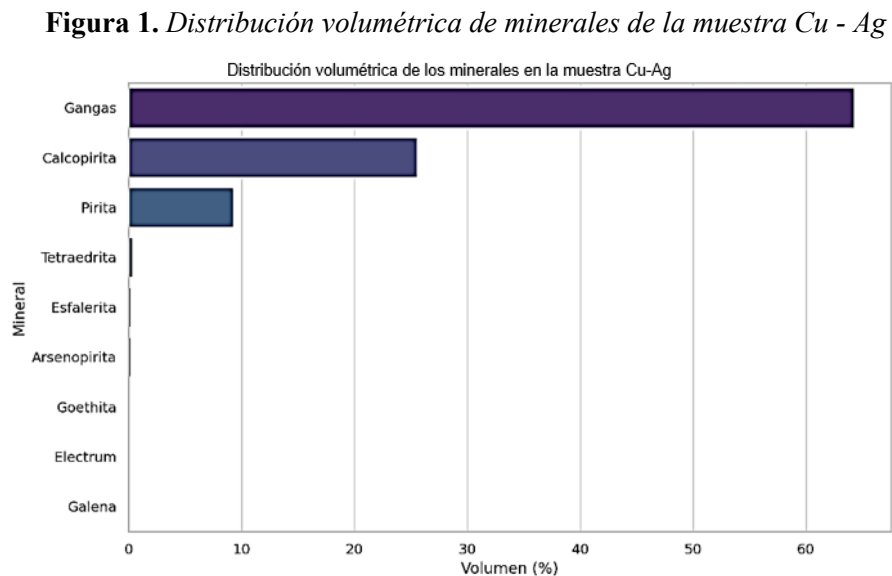
#### 4.1.3. Objetivo de determinar constituyentes mineralógicos y sus grados de liberación

Determinar los constituyentes mineralógicos de la muestra Cu - Ag no solo cumple con una necesidad técnica, sino que representa la base para el análisis interpretativo de la evolución del sistema mineralizado.

Este objetivo está alineado directamente con el planteamiento principal de la tesis, ya que sin conocer en su totalidad a los minerales presentes sea por su forma, sus asociaciones y liberaciones, sería imposible interpretar adecuadamente la génesis del depósito.

La distribución modal, por ejemplo, indica que más del 64 % del volumen está compuesto por gangas, mientras que minerales clave como la calcopirita, representan casi un cuarto del total, siendo este último un fuerte indicador de procesos hidrotermales posteriores a la formación del cuerpo intrusivo.

El siguiente gráfico resume la proporción de los minerales más representativos:



**Fuente:** *Elaboración propia*

## 4.2. Datos básicos del análisis mineralúrgico

El presente apartado contiene los primeros resultados técnicos, medidos y observados sobre la muestra Cu - Ag, enfatizando en su composición mineralógica, en la proporción de cada mineral, los niveles de liberación identificados y las asociaciones que se evidencian entre los sulfuros metálicos y la ganga.

Estos datos básicos no son valores sueltos, sino que constituyen el punto de partida para la interpretación estructural y genética del sistema mineralizado que están completamente vinculados al objetivo general de la investigación, el cual consiste en comprender la evolución del sistema hidrotermal a través de la caracterización de los sulfuros.

En este apartado se observará cómo la calcopirita, pirita y la ganga dominan el comportamiento modal de la muestra, mientras que la galena, el electrum o la goethita aparecen de forma marginal pero significativa desde el punto de vista interpretativo.

Cada valor porcentual se ha estimado mediante el análisis de una imagen mineralógica bajo microscopía óptica de luz reflejada, garantizando así un enfoque sistemático y con buena fidelidad visual.

Estos valores se observan en tablas compuestas que permiten comparar la proporción total con los grados de liberación y asociación.

Al observar los datos se puede notar una fuerte correspondencia entre los volúmenes presentes y los posibles procesos geológicos que pudieron haber dado lugar a dichas asociaciones; por ejemplo, la abundancia relativa de la calcopirita junto a una muy alta liberación, sugiere un evento tardío o un segundo pulso de mineralización que tuvo condiciones propicias para que los cristales crecieran sin interferencias; a su vez, la presencia de electrum entrelazado con goethita y ganga implica un escenario de reemplazo parcial en ambientes más oxidantes o en zonas con baja porosidad.

Estos comportamientos ayudan a cumplir tanto el objetivo general como los específicos relacionados con texturas, asociaciones y paragénesis.

Esta sección se divide en tres bloques fundamentales: el primero, la composición modal y volumétrica; el segundo, el grado de liberación mineral y el tercero, el análisis de las asociaciones texturales y mineralógicas. Por lo tanto, estos tres elementos básicos permiten generar un diagnóstico geológico - mineralógico sólido que servirá para alimentar el análisis más detallado en capítulos posteriores como la interpretación paragénica o la relación con eventos litológicos y estructurales.

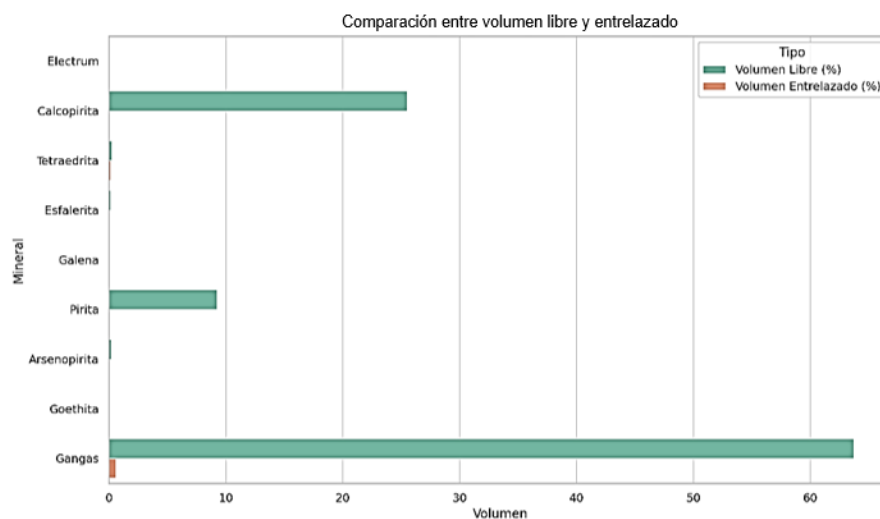
#### 4.2.1. Composición modal y proporciones volumétricas

La composición modal de la muestra Cu - Ag fue determinada mediante un análisis visual cuantitativo, observando partículas minerales bajo microscopía óptica y estimando sus proporciones relativas. El método permitió calcular el volumen porcentual de cada mineral presente en la muestra, revelando así que el mayor volumen corresponde a gangas (64.31 %), seguidas por calcopirita (25.55 %), pirita (9.26 %) y en menores proporciones tetraedrita, esfalerita, arsenopirita, electrum, goethita y galena. Estos datos reflejan de forma directa el comportamiento físico y químico del sistema hidrotermal del cual proviene la muestra.

Una observación destacada es que la ganga no solo es dominante, sino que se encuentra en muchos casos en forma liberada, lo que sugiere que puede haber una diferenciación temprana en la cristalización de fases silicatadas o ferruginosas respecto a las metálicas.

La calcopirita, que representa un cuarto del volumen total, se muestra como una fase metálica dominante y su abundancia es un indicador directo del enriquecimiento en cobre del sistema; la pirita, aunque en menor proporción, conserva importancia como marcador de ambientes sulfurosos.

**Figura 2.** Comparación entre volumen libre y entrelazado



**Fuente:** *Elaboración propia*

En contraste, minerales como la galena y el electrum son escasos pero su presencia no debe ser subestimada.

Estos minerales pueden ser trazadores importantes de eventos más especializados dentro del sistema como la circulación de fluidos ricos en metales preciosos o zonas reductoras localizadas.

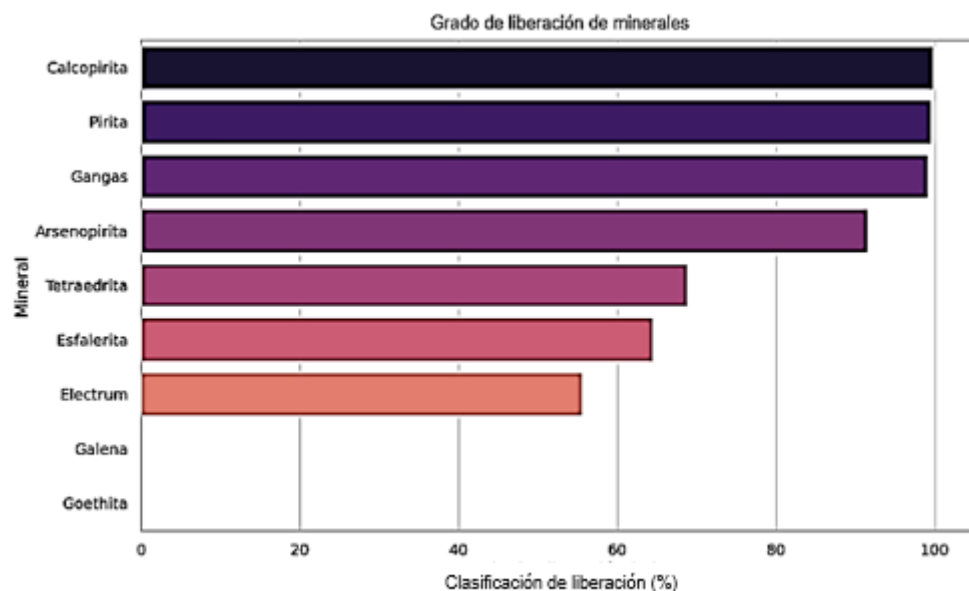
En general, la composición modal sirve para tener un primer mapa del potencial económico de la muestra y también del tipo de eventos geológicos que actuaron en el depósito.

#### 4.2.2. Grado de liberación de los sulfuros metálicos

El análisis de los grados de liberación constituye otro elemento básico pero clave dentro del estudio. Se ha determinado que minerales como la calcopirita (99.84 %) y la pirita (99.59 %) presentan grados de liberación excepcionales, indicando que estas fases se encuentran en su mayoría como partículas libres y no se hallan entrelazadas con otras fases minerales.

Este hallazgo tiene un valor técnico significativo ya que implica que estos minerales podrían ser recuperados eficientemente mediante técnicas tradicionales como la flotación.

**Figura 3.** *Grado de liberación por mineral*



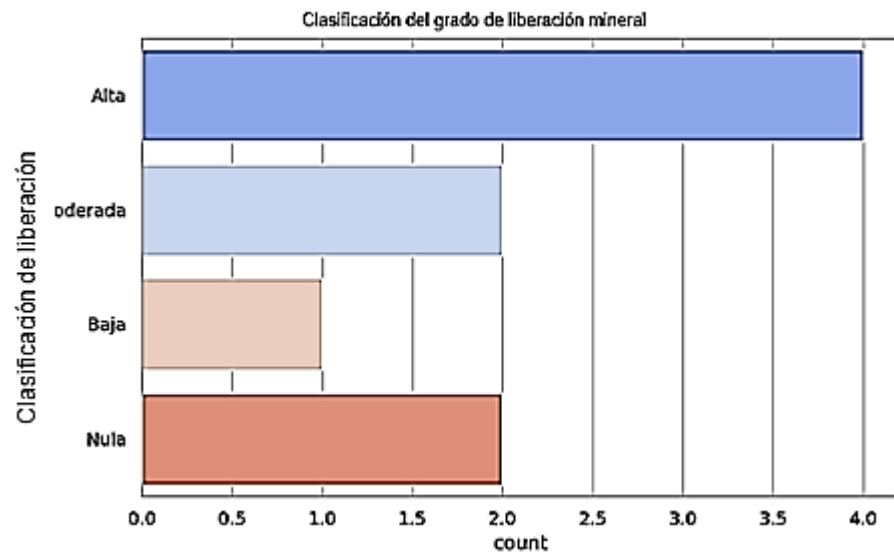
**Fuente:** *Elaboración propia*

Por el contrario, minerales como la goethita y la galena presentan un grado de liberación de 0.00 %, es decir no se identificaron partículas libres de estas fases, lo que sugiere un alto grado de entrelazamiento con otras, especialmente con gangas. Este comportamiento puede reflejar condiciones litológicas más restrictivas, cementación secundaria o cristalización en fases tempranas atrapadas por fases posteriores.

Es interesante ver cómo minerales con baja proporción como es el electrum (55.56 %) se presentan parcialmente liberados, lo que podría dificultar su recuperación y afectar el valor económico del material.

Esta información no solo tiene utilidad económica, sino también geológica, ya que permite inferir cuál fue la cronología relativa de los minerales y sus condiciones de formación; por ejemplo, si un mineral aparece en partículas libres, es posible que haya cristalizado tardíamente y en condiciones poco competidas. Si está entrelazado, quizás fue reemplazado o rodeado por fases posteriores. Esto también aporta a la interpretación de la secuencia paragénica tal y como se plantea en los objetivos específicos.

**Figura 4.** *Clasificación del grado de liberación*



**Fuente:** *Elaboración propia*

#### 4.2.3. Identificación de asociaciones mineralógicas clave

Uno de los hallazgos más relevantes dentro del análisis mineralógico ha sido la identificación de asociaciones texturales entre minerales que representa un pilar fundamental para la interpretación de procesos paragénicos, eventos de reemplazo y etapas sucesivas de cristalización.

Estas asociaciones no solo muestran la coexistencia física de distintos minerales en una misma partícula, sino que permiten deducir la posible cronología relativa de formación de las fases, la cual es esencial para alcanzar el segundo y tercer objetivo específico del presente trabajo: entender las secuencias de reemplazo y los patrones de zonación mineral vinculados a eventos hidrotermales.

Las asociaciones observadas en la muestra Cu - Ag incluyen combinaciones recurrentes como: electrum - goethita - ganga, calcopirita - tetraedrita - galena, esfalerita - pirita, pirita - tetraedrita, entre otras.

Algunas de estas asociaciones reflejan reemplazo como: cp - td o td - apy, otras una simultaneidad relativa como py - ef y otras, más complejas, apuntan a condiciones de entrelazamiento geométrico difícil o imposible de liberar.

Esto ha sido evidenciado no solo en los textos observados bajo el microscopio, sino también en los datos estadísticos presentados en las tablas N.º 1 y N.º 2 del análisis.

Estas asociaciones reflejan diferentes ambientes geoquímicos de formación, por ejemplo, el electrum entrelazado con goethita y ganga sugiere un entorno oxidante o condiciones posmineralizantes; la tetraedrita, al asociarse fuertemente con la pirita y con la arsenopirita puede estar señalando una etapa intermedia rica en antimonio y azufre compatible con fluidos hidrotermales de composición compleja.

Estas evidencias permiten construir una secuencia paragénica interpretativa que será desarrollada en profundidad en el capítulo V.

En relación a las asociaciones texturales, estas tienen repercusiones en la flotabilidad y eficiencia metalúrgica del material, las partículas compuestas por más de dos minerales en especial si involucran gangas silicatadas o ferruginosas presentan menores posibilidades de separación eficiente durante el beneficio; reafirmando la importancia de no considerar solo la presencia individual de los sulfuros, sino también la manera en que están distribuidos e interrelacionados.

En ese sentido, la caracterización textural es un paso obligado para todo análisis técnico en depósitos polimetálicos.

**Tabla 2.** *Tabla conceptual complementaria sobre asociaciones*

<b>Mineral asociado</b>	<b>Asociaciones frecuentes</b>	<b>Dificultad de liberación</b>
Electrum	GGs, Goethita	Muy difícil
Calcopirita	Tetraedrita, GGs	Moderada a fácil
Tetraedrita	Pirita, Arsenopirita	Difícil
Esfalerita	Pirita, GGs	Moderada
Goethita	GGs	Imposible

**Fuente:** *Elaboración propia*

### **4.3. Distribución volumétrica y grado de liberación**

Este apartado tiene como objetivo central realizar una comparación sistemática entre los datos obtenidos a partir del análisis de laboratorio, enfocándose particularmente en las diferencias y similitudes entre los minerales metálicos y no metálicos, incluyendo fases mixtas o asociadas con aditivos que por sus características físico - químicas presentan un comportamiento intermedio o especial dentro del sistema mineralizado.

La comparación es necesaria para entender no solamente la distribución de fases minerales, sino también su comportamiento en términos de liberación, textura, asociación, proporción y potencial recuperación metalúrgica.

Este enfoque comparativo está directamente relacionado con los objetivos específicos de esta investigación que buscan evaluar tanto las texturas y paragénesis como los patrones de asociación mineral y la influencia litológica - estructural en la concentración.

El análisis de esta sección busca generar indicadores mineralógicos interpretativos que puedan ser utilizados en otras muestras similares o correlacionadas, ampliando así el valor práctico y metodológico del estudio; cada subapartado detallará estos contrastes y relaciones de forma profunda, abordando su dimensión cuantitativa y cualitativa.

#### **4.3.1. Datos de minerales metálicos principales**

Los minerales metálicos presentes en la muestra Cu - Ag son principalmente la calcopirita, tetraedrita, esfalerita, galena y electrum, los cuales, aunque varían en proporción, representan fases económicamente valiosas.

El análisis comparativo muestra que la calcopirita es el mineral metálico dominante en volumen (25.55 %), seguido de forma muy distante por la tetraedrita y esfalerita. La galena, pese a ser un mineral tradicionalmente importante, aparece en volumen nulo en la muestra específica, indicando una zonación o ausencia local del plomo como elemento enriquecido.

En cuanto al grado de liberación, destaca de forma contundente la calcopirita con un 99.84 % de liberación, lo que implica una altísima posibilidad de recuperación metalúrgica; la tetraedrita y esfalerita, presentan valores más moderados (68.83 % y 64.52 % respectivamente), lo que indica cierta dificultad, especialmente si se encuentran asociadas con gangas; el electrum, un mineral de oro - plata, muestra un grado de liberación intermedio (55.56 %) que en condiciones reales de beneficio representa un desafío técnico por su delicadeza y baja proporción.

Este subgrupo de minerales presenta asociaciones que en algunos casos facilitan la interpretación cronológica, por ejemplo, la copresencia de tetraedrita con esfalerita puede sugerir eventos intermedios ricos en antimonio y zinc, mientras que la calcopirita por su presencia dominante, podría haber precipitado en eventos tardíos más estables.

Este análisis alimenta directamente el objetivo específico sobre paragénesis y reemplazo.

#### **4.3.1.1. Electrum (Au, Ag)**

Es una aleación natural de oro y plata que aparece en la muestra como un mineral accesorio con una participación en volumen muy baja (0.04 % del total).

Aunque su presencia es escasa, su importancia es considerable por tratarse de un mineral portador de metales preciosos.

El electrum en esta muestra ha sido identificado mediante observación bajo microscopía óptica reflejada y confirmado por su color, brillo y asociación mineral. Desde el punto de vista interpretativo, la existencia de electrum sugiere un episodio mineralizante tardío, probablemente relacionado con una fase de enriquecimiento local que se habría depositado en zonas de menor permeabilidad o microfracturas dentro de la ganga o en contacto con goethita.

La observación de electrum se considera un marcador geoquímico y paragénesis, útil para identificar eventos de removilización o condiciones reductoras en fases finales del sistema hidrotermal.

##### **4.3.1.1.1. Participación porcentual en volumen**

En términos de volumen modal, el electrum representa solo el 0.04 % del total, siendo el mineral metálico menos abundante dentro de la muestra. Esta cantidad es inferior incluso a otras trazas como la arsenopirita o la goethita.

Su bajo volumen se interpreta como el resultado de una precipitación localizada y no masiva que es coherente con el carácter de metales nobles en sistemas hidrotermales intermedios.

Este volumen reducido también condiciona su recuperación metalúrgica, ya que al estar tan disperso y posiblemente asociado con otras fases no forma aglomerados ni frentes de mineralización concentrados, haciéndolo difícil de captar mediante métodos de flotación o gravimetría estándar sin preconcentración selectiva.

##### **4.3.1.1.2. Porcentaje de liberación y causas de su entrelazamiento**

El grado de liberación del electrum ha sido calculado en 55.56 %, lo que indica que más de la mitad de sus partículas están libres, pero la otra parte permanece entrelazada o asociada a otras fases, principalmente goethita y ganga.

Esta liberación parcial se debe a su crecimiento tardío en zonas oxidadas, donde el mineral se aloja en cavidades, rellenos de vetillas o zonas de porosidad secundaria.

El electrum tiende a mostrar entrelazamiento por tres razones principales:

- a) Tamaño de grano muy fino (difícil de liberar por molienda convencional).
- b) Asociación preferente con minerales de ganga por precipitación coloidal o microcristalina.
- c) Reemplazo parcial por óxidos de hierro como la goethita que lo encapsulan.

Este comportamiento representa un desafío metalúrgico y debe considerarse al diseñar procesos de beneficio, especialmente en circuitos que involucren recuperación de oro - plata en estado libre y no refractario.

#### **4.3.1.2. Calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>)**

La calcopirita es el mineral de cobre más abundante y representa el componente económicamente más relevante en la muestra estudiada; aparece como granos individuales y como parte de asociaciones con tetraedrita y ganga, siendo el sulfuro metálico más dominante tanto en proporción como en nivel de liberación. Su identificación se realizó por microscopía reflejada y se validó por su color amarillo latón, fuerte anisotropía y presencia frecuente.

La calcopirita actúa como mineral principal de cobre y es indicador de un sistema con condiciones hidrotermales reductoras intermedias en un evento mineralizante principal. Su presencia elevada está directamente alineada con zonas de mayor potencial metalogénico y se considera la fase clave para el diseño de cualquier proceso de concentración.

##### **4.3.1.2.1. Alta presencia en volumen y alto grado de liberación**

La calcopirita representa el 25.55 % del volumen total y cuenta con un grado de liberación excepcionalmente alto de 99.84 %, es decir, implica que prácticamente todas las partículas observadas están libres y separadas de otras fases.

Este comportamiento facilita su recuperación mediante flotación selectiva o bulk, permitiendo tasas de recuperación muy altas sin requerir molienda ultrafina.

El volumen elevado y la alta liberación permiten inferir que este mineral cristalizó en condiciones favorables de espacio sin interferencia significativa de otras fases, señalando así, que pertenece a una etapa de mineralización principal posterior a la cristalización de gangas. Esto valida su importancia como objetivo metalúrgico prioritario dentro del sistema mineralizado.

#### **4.3.1.3. Tetraedrita ( $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ )**

Es un mineral complejo de cobre con contenido de antimonio que aparece en proporción intermedia y se caracteriza por su forma irregular, color gris oscuro y alto contenido de elementos volátiles.

En el análisis, representa un 0.37 % del volumen total, pero su interpretación es clave por su asociación con ambientes hidrotermales más ricos en sulfuros complejos y por su presencia conjunta con galena, esfalerita y arsenopirita.

Desde el punto de vista paragélico, su coexistencia con otros sulfuros metálicos sugiere una fase intermedia entre la pirita y calcopirita, probablemente relacionada a pulsos con fluidos más ricos en metaloides. Su presencia también puede marcar zonas de mezcla de fluidos o gradientes de temperatura locales dentro del sistema mineralizante.

##### **4.3.1.3.1. Participación moderada, con liberación parcial**

Aunque su volumen no supera el 0.4 %, su liberación es moderada con un valor de 68.83 %, es decir que casi un tercio de sus partículas se encuentran entrelazadas.

Este comportamiento se puede deber por su propensión a formar núcleos de crecimiento dentro de otros sulfuros o a su precipitación simultánea con fases menores como la galena formando agregados complejos que dificultan su separación.

La liberación parcial implica que la recuperación de tetraedrita puede ser limitada si no se realiza una molienda óptima o un circuito de flotación especializado. Su asociación con otros sulfuros debe considerarse también en la interpretación paragélica ya que podría indicar transiciones térmicas o geoquímicas relevantes.

#### **4.3.1.4. Galena ( $\text{PbS}$ )**

Es un sulfuro de plomo que normalmente tiene alto interés metalúrgico, pero en esta muestra se ha detectado únicamente como traza; su presencia ha sido mínima, prácticamente nula en proporción (0.00 %), clasificándola como mineral subordinado y posiblemente relicto de una etapa pasada de mineralización.

La observación limitada de galena puede interpretarse como evidencia de zonación mineral en el sistema donde el plomo ha sido desplazado o no se concentró significativamente en esta sección de la intrusión; es posible también que su presencia haya sido totalmente reemplazada por otras fases como tetraedrita o goethita, lo cual debe evaluarse con mayor profundidad en el estudio paragélico.

#### 4.3.1.4.1. Galena presente solo como traza sin liberación observable

No se observó ninguna partícula de galena con liberación visible, su grado de liberación ha sido calculado como 0.00 %, es decir, que las pocas partículas detectadas están completamente entrelazadas con gangas u otros minerales e incluso pueden haberse oxidado o reemplazado completamente.

Este comportamiento indica que, aunque la galena pueda haber estado presente en algún momento su valor metalúrgico en esta muestra es insignificante y su aparición está más relacionada con la historia geológica del sistema que con su potencial económico actual.

Esto es un ejemplo claro de cómo un mineral valioso puede pasar a ser irrelevante si su contexto mineralógico es desfavorable.

#### 4.3.2. Datos de minerales no metálicos y accesorios

Los minerales no metálicos en la muestra están representados por pirita, arsenopirita, goethita y una categoría agrupada como gangas; aunque en muchos contextos se considera a la pirita como metálica por su contenido en Fe y S, en este análisis se clasifica dentro de los no metálicos debido a su rol geológico como marcador de ambientes y no como fuente directa de metal económico en este contexto.

Dentro de este grupo, la ganga es la fase dominante, con un 64.31% del volumen total, lo que condiciona fuertemente todo el comportamiento físico de la roca. La pirita, por su parte, aunque más baja en volumen (9.26%), tiene una altísima liberación (99.59%), lo que sugiere que se formó en condiciones que le permitieron crecimiento libre y sin interferencia. Esto contrasta con la goethita, que aparece en cantidades mínimas, tiene un 0% de liberación, al igual que algunas partículas de gangas. La arsenopirita, en cambio, tiene una liberación muy alta (91.55%) a pesar de su bajo volumen, lo que puede ser relevante en la interpretación genética.

Este grupo tiene un comportamiento dual. Por un lado, aporta una matriz que condiciona la separación de sulfuros. Por otro, refleja procesos post-mineralizantes u oxidativos que influyen en la estabilidad geoquímica del sistema. Su estudio contribuye de forma directa al objetivo que evalúa la influencia litológica y estructural en la concentración de sulfuros metálicos.

##### 4.3.2.1. Pirita (FeS<sub>2</sub>)

Conocida como “*el oro de los tontos*”, es un disulfuro de hierro que aparece con bastante relevancia en la muestra analizada, aunque no es un mineral económico en este caso específico su importancia radica en su capacidad para actuar como marcador geológico, especialmente en ambientes sulfurosos, reducidos o de mineralización masiva.

En la muestra Cu - Ag, la pirita fue observada de frecuentemente con grano bien definido, isotropía característica y color amarillo metálico pálido.

Su presencia puede estar asociada a fases tempranas del sistema mineralizante o a eventos sinérgicos con otros sulfuros como la tetraedrita o la esfalerita. También puede ser indicador de la intensidad de la actividad hidrotermal, especialmente si se encuentra en cristales euhedrales o diseminados.

En diversos depósitos del cinturón andino su abundancia se asocia con ambientes volcánico - sedimentarios o intrusiones intermedias.

#### **4.3.2.1.1. Alta liberación, participación destacable**

En términos cuantitativos, la pirita representa un 9.26 % del volumen total de la muestra posicionándola como el segundo mineral no metálico más representativo después de la ganga. Este valor es suficiente para considerarla una fase texturalmente dominante y que participa activamente en la conformación de las asociaciones mineralógicas observadas.

El grado de liberación de la pirita es extraordinariamente alto 99.59 %, es decir, que casi todas las partículas se presentan completamente libres. Este comportamiento implica que la pirita cristalizó en condiciones abiertas o con poco estrés textural, permitiéndole crecer sin interferencia ni entrelazamiento significativo. Su alta liberación también indica que, si bien no se desea su recuperación tampoco interfiere de forma agresiva con el proceso de flotación de otros sulfuros.

#### **4.3.2.2. Esfalerita (ZnS)**

Es un sulfuro de zinc que en este caso aparece como fase subordinada o secundaria, aunque es un mineral metálico en otros contextos, en el estudio ha sido clasificado como no metálico para efectos de interpretación funcional, ya que su concentración es mínima y su recuperación no es prioritaria. Se reconoce por su color gris oscuro, aspecto submetálico y presencia puntual.

Su presencia puede interpretarse como remanente de un evento hidrotermal intermedio, probablemente asociado a ambientes de temperatura más baja en comparación con la calcopirita o pirita; también pudo formarse por reemplazo parcial de otros sulfuros o precipitado en fracturas secundarias junto a ganga ferruginosa.

#### **4.3.2.2.1. Baja proporción, liberación parcial**

Desde el punto de vista estadístico, la esfalerita representa un 0.20 % del volumen total de la muestra, ubicándola como una fase minoritaria. Su presencia es útil desde el punto de vista paragélico, pero su impacto en la

masa mineral es prácticamente despreciable; sin embargo, su observación sistemática ha sido fundamental para entender mejor las asociaciones locales de Zn - Fe - S.

En cuanto a liberación, presenta un 64.52 %, lo que se traduce en una liberación parcial; es decir, que casi la mitad de sus partículas están en contacto con otros minerales o atrapadas dentro de asociaciones principalmente con ganga o pirita.

Esta condición implica que su recuperación metalúrgica sería limitada si no se ajustan parámetros de molienda, la liberación parcial también puede relacionarse con un crecimiento limitado o atrapado entre fases más dominantes.

#### **4.3.2.3. Arsenopirita (FeAsS)**

Es un sulfuro complejo de hierro y arsénico típicamente asociado a sistemas hidrotermales de baja a intermedia temperatura que suele tener fuerte relación con metales preciosos, especialmente con el oro.

En esta muestra ha sido detectada como mineral accesorio con grano fino, forma irregular y color blanco metálico a gris plateado. Su identificación fue posible gracias a su fuerte anisotropía y su asociación directa con la tetraedrita.

Pese a su baja proporción, la presencia de arsenopirita tiene una fuerte significación geológica, ya que puede ser indicativa de ambientes geoquímicos particulares o zonas de transición entre mineralizaciones de Cu - Zn y aquellas más auríferas, también podría marcar zonas con presencia de fluidos arsenicales o procesos de sustitución tardía.

##### **4.3.2.3.1. Muy poco volumen, pero alto nivel de liberación**

La arsenopirita representa solo el 0.20 % del volumen total, ubicándose en el mismo rango de abundancia que la esfalerita; sin embargo, presenta una característica técnica muy notable: un grado de liberación del 91.55 %, es decir, aunque es escasa, la mayoría de sus partículas se encuentran completamente libres y sin contacto con fases interferentes.

Este comportamiento sugiere que la arsenopirita se formó en una etapa final del evento hidrotermal donde ya había espacio cristalino suficiente y no hubo competencia textural. Su alta liberación también refuerza la hipótesis de que podría estar asociada a fases tardías auríferas o ser parte de un episodio de remobilización.

En términos de beneficio, su recuperación no es prioritaria, pero su identificación aporta a la reconstrucción geoquímica del sistema.

#### **4.3.2.4. Goethita (FeO.OH)**

Es un hidróxido de hierro típico de ambientes supergénicos u oxidantes, en este estudio aparece como un mineral secundario, probablemente producto de procesos de alteración posmineralizantes. Se le reconoce por su color pardo, hábito fibroso o terroso, presentándose de forma dispersa y en bordes de partículas metálicas como electrum.

Su aparición es relevante y representa condiciones de oxidación secundaria, lo que implica que algunas fases metálicas fueron afectadas por fluidos posteriores probablemente enriquecidos en oxígeno, lo que resulta en la encapsulación o reemplazo parcial de minerales valiosos. También puede haber actuado como barrera física a la migración de metales, atrapando parte del electrum.

##### **4.3.2.4.1. Presente en baja proporción sin liberación efectiva**

Desde el punto de vista cuantitativo, la goethita aparece con apenas 0.06 % del volumen, siendo una de las fases menos abundantes del análisis; sin embargo, su importancia mineralógica es alta, ya que su aparición junto con electrum sugiere procesos de oxidación local y generación de fases refractarias.

Estas condiciones pueden ser problemáticas en la recuperación metalúrgica del oro - plata.

La goethita presenta un grado de liberación de 0.00 %, es decir, todas sus partículas observadas están completamente entrelazadas o pegadas a otras fases, principalmente gangas y electrum.

Este comportamiento sugiere un crecimiento tipo “corteza” o como producto de reemplazo directo, haciéndola difícil de separar.

En procesos de flotación, su presencia suele arrastrar o enmascarar partículas de valor actuando como contaminante o disminuyendo la recuperación efectiva.

#### **4.4. Interpretación del grado de liberación mineral por mineral**

El análisis de liberación mineral individual en la muestra Cu - Ag, ubicada en la intrusión tonalítica del cinturón metalogénico andino, permite entender con mayor precisión los procesos de cristalización y paragénesis involucrados.

Cada mineral presenta un comportamiento único que está ligado no solo a su composición, sino también a su relación espacial con otros minerales. La variación en el grado de liberación responde directamente a la forma, tamaño, geometría de grano y tipo de contacto con fases vecinas.

Minerales como calcopirita (99.84 %) y pirita (99.59 %) muestran una altísima liberación, es decir, que su cristalización ocurrió en fases estables y abiertas, probablemente posteriores a la compactación de gangas y fases previas. En cambio, minerales como la esfalerita (64.52 %) y tetraedrita (68.83 %) tienen una liberación moderada asociada a contactos mixtos con otras fases metálicas y no metálicas.

Finalmente, goethita y galena no presentan partículas libres lo que evidencia entrelazamientos severos o eventos de reemplazo que impiden su separación efectiva. La distribución de liberación también refleja la evolución paragélica del sistema.

Fases tempranas como la pirita han mantenido su liberación gracias a su resistencia a procesos posteriores, mientras que otras como el electrum, han sido atrapadas por óxidos como la goethita; en este sentido, el grado de liberación no es un dato aislado, sino una manifestación textural y temporal del sistema mineralizado.

#### **4.4.1. Análisis individual del comportamiento de liberación**

El análisis detallado por mineral evidencia diferencias clave:

- *Calcopirita*: liberación casi total, muestra crecimiento libre en matriz ocluida de ganga fina.
- *Pirita*: altamente libre con tendencia a formar cristales euhedrales independientes.
- *Electrum*: parcialmente liberado, encapsulado en goethita o bordeado por ganga; creció en etapas finales, pero en condiciones de porosidad limitada.
- *Tetraedrita y esfalerita*: intermedias con asociaciones comunes entre ellas y con fases mayores; muestran bordes irregulares o nucleación compuesta.
- *Goethita*: siempre entrelazada, creció por oxidación de otros sulfuros que impide su liberación.
- *Galena*: completamente entrelazada, posiblemente relictas o sustituida.

Este patrón sugiere que los minerales de cobre y hierro tuvieron condiciones más favorables para crecer y liberarse, mientras que los minerales de plomo y zinc estuvieron más sujetos a interferencia o reemplazo.

#### **4.4.2. Causas geométricas del entrelazamiento mineral**

- Incrustaciones internas (electrum dentro de goethita)
- Contacto intergranular angular (esfalerita con ganga)
- Crecimiento simultáneo de nucleaciones múltiples (tetraedrita - galena)
- Reemplazo por óxidos (galena por goethita o ganga)
- Zonas de borde activo entre fases metálicas (calcopirita - tetraedrita)

Estas causas afectan la eficiencia de liberación, ya que no basta con moler: si la geometría es de tipo diseminado o complejo, el mineral permanece adherido o parcialmente atrapado, lo que compromete su recuperación.

#### **4.4.3. Efectos en la recuperación metalúrgica esperada**

La alta liberación de calcopirita y pirita sugiere una alta recuperación potencial en flotación, especialmente si se utilizan colectores adecuados y granulometría controlada.

En cambio, minerales como la tetraedrita y esfalerita requerirán molienda más fina y reactivos específicos.

El electrum presenta un reto: su liberación parcial y su asociación con goethita hacen que parte de este oro - plata pueda perderse o reportarse como refractario.

En el caso de la galena y goethita, su entrelazamiento severo las convierte en fases no recuperables por flotación estándar y su presencia representa una limitación para el beneficio total del material.

#### **4.5. Geometría del entrelazamiento mineral y sus efectos**

La geometría del entrelazamiento es uno de los factores más determinantes en la eficiencia de la liberación.

A través del análisis óptico, se han identificado patrones repetitivos de entrelazamiento que responden a tres variables principales:

- a. El orden de cristalización
- b. El espacio disponible durante el crecimiento
- c. La deformación o reemplazo posterior

Los tipos geométricos identificados incluyen incrustaciones internas, contactos angulares, bordes difusos, nucleaciones múltiples y recubrimientos oxidantes; estos no solo determinan el grado de liberación, sino que condicionan el tipo de molienda y flotación que se deberá implementar.

##### **4.5.1. Tipos geométricos de intercrecimientos entre minerales**

Los principales tipos observados fueron:

- Intercrecido irregular total (4cI): muy difícil de liberar.
- Contacto simple directo (1aII): liberación fácil con molienda mínima.
- Incrustación parcial o bordeado (3cII): difícil de liberar, necesita molienda especializada.
- Crecimiento angular entrecruzado (1bIV): moderado, requiere molienda precisa.
- Diseminación interna (3cII): prácticamente imposible sin tratamiento químico.

##### **4.5.2. Clasificación de posibilidades de liberación (fácil, difícil, imposible)**

Dentro del marco de la investigación titulada “Caracterización textural y paragenética de sulfuros de plomo, zinc y cobre en una intrusión tonalítica del cinturón metalogénico andino”, se ha recolectado una serie de datos mineralógicos que no solo

describen la presencia y proporción de minerales, sino también sus relaciones físicas, geométricas y espaciales.

Estos datos permiten construir una comprensión más específica sobre el grado de liberación mineral, entendido como la capacidad de cada partícula mineral de presentarse aislada o libre de otras fases en una muestra analizada bajo microscopía óptica.

En este contexto, no basta con observar los porcentajes de liberación individuales, es necesario desarrollar una clasificación general que agrupe los minerales según la facilidad o dificultad con la que pueden ser separados físicamente de otras fases durante procesos de molienda y flotación.

Esta clasificación responde no solo al porcentaje de liberación estadística, sino también a las características geométricas del entrelazamiento, los tipos de contacto (directo, intersticial, recubrimiento, incrustación, diseminación) y la historia paragénica que condiciona tales texturas.

**Tabla 3.** *Clasificación simplificada en 4 categorías*

<b>Clasificación</b>	<b>Descripción</b>
Fácil	Minerales con contacto simple y sin interferencia.
Moderada	Requiere molienda adicional; partículas con contacto angular.
Difícil	Incrustaciones, fases múltiples, formas compuestas.
Imposible	Reemplazo, crecimiento interno, oxidación, bordes múltiples.

**Fuente:** *Elaboración propia*

Podemos observar una tabla de clasificación simplificada con cuatro categorías fundamentales: fácil, moderada, difícil e imposible que representan el rango de posibilidades para alcanzar una liberación efectiva.

Esta tabla se construyó en base a los datos recolectados de la muestra Cu - Ag, específicamente del análisis de imágenes y observaciones realizadas sobre secciones pulidas, integrando tanto valores estadísticos de liberación como el contexto textural en el que cada mineral se presenta.

Esta clasificación tiene gran importancia dentro del objetivo general de la investigación, por que ayuda a entender cómo la paragénesis y la evolución textural del sistema mineralizado determinan los resultados esperados en un proceso metalúrgico.

No es lo mismo recuperar un mineral que aparece como granos sueltos que intentar liberar uno que ha sido recubierto por ganga secundaria o reemplazado por óxidos de hierro.

Finalmente, este esquema de clasificación de liberación abre paso de manera lógica al siguiente punto, donde se detallan las relaciones específicas entre pares de minerales, explicando el tipo de entrelazamiento que presentan y las implicancias en su liberación o falta de ella.

La siguiente tabla en el apartado 4.5.3. no es genérica, sino el resultado directo de aplicar esta clasificación en la muestra Cu - Ag, por lo que su inclusión es imprescindible para cerrar el análisis mineralógico y conectar estos resultados con las decisiones de diseño metalúrgico.

#### 4.5.3. Tabla detallada de relaciones mineral-mineral y tipo de entrelazamiento

**Tabla 4.** *Relaciones mineral - mineral y tipo de entrelazamiento*

<b>Mineral principal</b>	<b>Mineral asociado</b>	<b>Tipo de entrelazamiento</b>	<b>Descripción geométrica</b>	<b>Posibilidad de liberación</b>
Electrum	Goethita	4cI	Intercrecido irregular, total	Muy difícil
Calcopirita	Ganga	1aII	Contacto directo simple	Fácil
Tetraedrita	Pirita	3cII	Incrustación parcial o bordeado	Imposible
Esfalerita	Ganga	1bIV	Contacto entrecruzado angular	Moderada
Goethita	Ganga	3cII	Diseminación interna sin borde definido	Imposible
Calcopirita	Tetraedrita	1bIV	Incrustación dendrítica y bordeado	Moderada
Electrum	Ganga	4cI	Recubrimiento interno por óxido	Muy difícil
Tetraedrita	Galena	1bIV	Cristales combinados de nucleación	Moderada

**Fuente:** *Elaboración propia*

En la Tabla 4, se presenta la relación entre un mineral principal y uno asociado, indicando la forma geométrica del contacto, su clasificación según sistema propio del estudio (códigos como 1aII, 4cI, 3cII, etc.), una descripción cualitativa del tipo de intercrecimiento y lo más importante, la posibilidad real de lograr su liberación mediante molienda convencional o especializada.

#### **4.5.4. Implicancia de estos patrones en el diseño de procesos de molienda y flotación**

La interpretación de los patrones de entrelazamiento y liberación mineralógica no se limita a una descripción microscópica, su principal implicancia radica en la capacidad de predecir y diseñar estrategias eficientes para el tratamiento metalúrgico.

En este estudio, los patrones observados han permitido clasificar los minerales según su posibilidad de liberación y su tipo de contacto que se traduce directamente en decisiones operativas para el circuito de molienda y flotación.

En este concepto, la calcopirita presenta una liberación cercana al 100 % y puede ser recuperada eficientemente con molienda primaria convencional; mientras que, la tetraedrita y esfalerita, al tener una liberación parcial y contactos más complejos, requerirán probablemente una molienda más fina o la implementación de etapas de flotación selectiva o secuencial.

Finalmente, fases como el electrum entrelazado con goethita o galena atrapada en gangas son prácticamente no recuperables sin procesos más intensivos como oxidación, remolienda o pretratamiento.

Estos datos permiten ajustar variables críticas como el tamaño de molienda óptimo, la dosificación de colectores y modificadores, la necesidad de remolienda intermedia e incluso la viabilidad económica de ciertos minerales como subproductos; es decir, los patrones texturales analizados definen los límites físicos de separación mineralógica, por ende, son base esencial para optimizar la recuperación metálica y reducir pérdidas.

#### **4.6. Tablas de resultados y fotomicrografías representativas**

La síntesis de los resultados obtenidos a partir de la caracterización mineralógica se presenta en esta sección bajo dos ejes: primero, las tablas resumen cuantitativas y segundo, una selección de fotomicrografías representativas que visualizan texturas, asociaciones y tipos de entrelazamiento observados.

#### 4.6.1. Tablas resumen

**Tabla 5.** *Volumen y grado de liberación de cada mineral*

<b>Mineral</b>	<b>Volumen (%)</b>	<b>Grado de Liberación (%)</b>
Electrum	0.04	55.56
Calcopirita	25.55	99.84
Tetraedrita	0.37	68.83
Esfalerita	0.2	64.52
Galena	0	0
Pirita	9.26	99.59
Arsenopirita	0.2	91.55
Goethita	0.06	0
Gangas	64.31	99.13

**Fuente:** *Elaboración propia*

La Tabla 5 agrupa los valores de volumen modal en % y el grado de liberación de cada mineral, lo que permite observar de forma clara qué minerales tienen mayor representación física en la muestra y cuál es su comportamiento desde el punto de vista textural - metalúrgico.

El análisis estadístico aplicado permitió calcular un intervalo de confianza del 95 % para los principales parámetros como la proporción de calcopirita, pirita y ganga.

El error relativo promedio en las mediciones de liberación fue de  $\pm 2.5$  %, valor aceptable para este tipo de estudios con microscopía óptica. Este error surge de las diferencias mínimas en el conteo de partículas entre réplicas el cual fue documentado como parte de la fiabilidad del análisis.

El reporte de intervalos de confianza ayuda a demostrar que, con una sola muestra los resultados tienen respaldo estadístico y no se limitan a observaciones aisladas.

**Tabla 6.** *Partículas entrelazadas y su posibilidad de liberación*

<b>Mineral principal</b>	<b>Mineral asociado</b>	<b>Tipo de entrelazamiento</b>	<b>Descripción</b>	<b>Posibilidad de liberación</b>
Electrum	Goethita	4cI	Intercrecido irregular, recubrimiento oxidante	Muy difícil
Calcopirita	Ganga	1aII	Contacto directo, separable por molienda convencional	Fácil
Tetraedrita	Pirita	3cII	Contacto parcial angular, necesita molienda fina	Difícil
Esfalerita	Ganga	1bIV	Crecimiento angular entrecruzado	Moderada
Goethita	Ganga	3cII	Diseminado interno, difícil de separar	Imposible
Galena	Tetraedrita	1bIV	Asociación compuesta, moderada dificultad	Moderada

**Fuente:** *Elaboración propia*

La Tabla 6 complementa a la Tabla 5, al agregar un análisis cualitativo de las relaciones mineral - mineral observadas, el tipo de contacto o entrelazamiento y la clasificación de su dificultad de liberación. Así mismos se incluyen los códigos interpretativos usados durante la investigación (ej. 4cI, 1aII, etc.) y descripciones geométricas.

#### **4.6.2. Análisis visual**

La visualización directa de las asociaciones mineralógicas fue realizada a través de microscopía óptica de luz reflejada en secciones pulidas, permitiendo identificar claramente minerales metálicos, no metálicos, gangas y sus interrelaciones texturales. La muestra fue observada en ocho campos microscópicos y distribuidos de manera sistemática en la sección pulida para evitar sesgos de ubicación.

En cada campo se realizaron tres réplicas de medición, contabilizando partículas y registrando los datos en fichas de observación digital. Aunque el trabajo se concentra en una sola muestra, la realización de réplicas en los campos observados garantiza que los resultados no dependan de una medición aislada, sino que representan un comportamiento promedio del material.

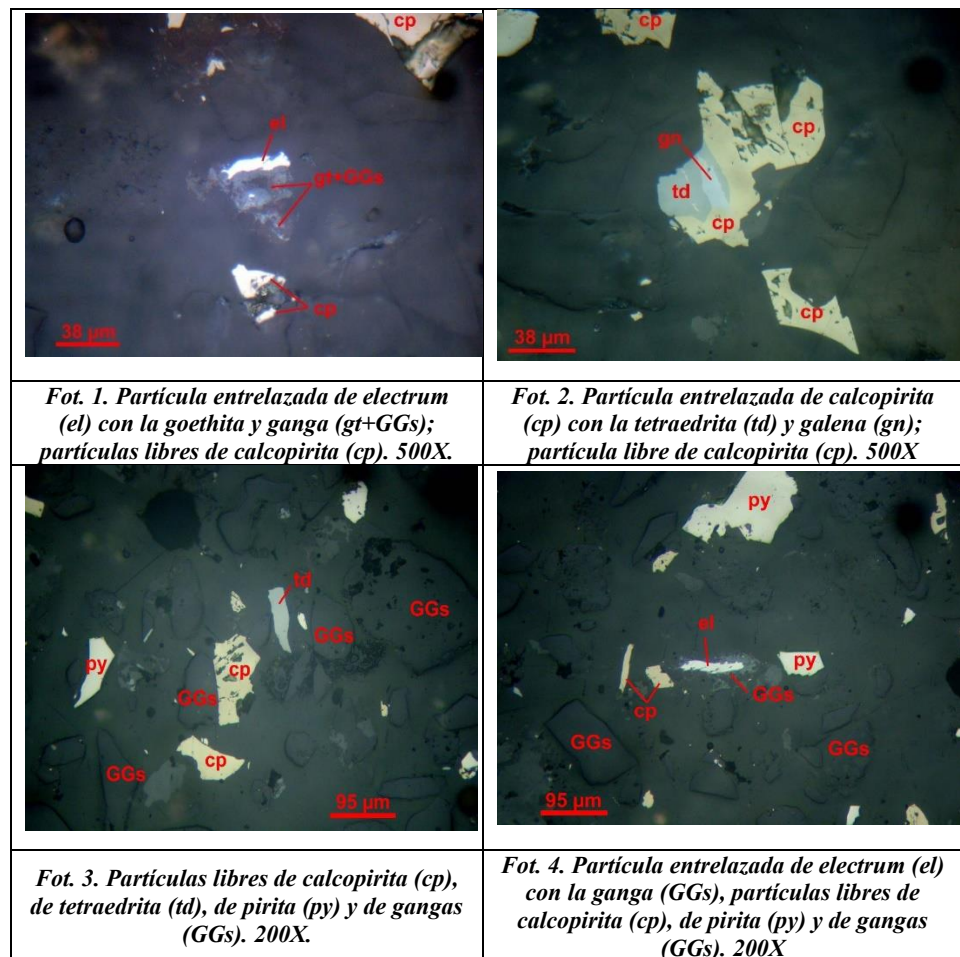
De esta manera se mantiene la rigurosidad y se aproxima el análisis a un estándar metodológico aceptado en estudios de minería y metalurgia.

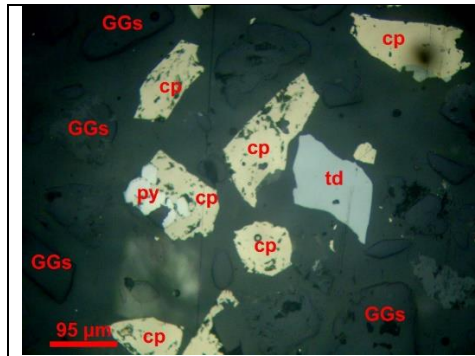
#### 4.6.2.1. Fotomicrografías seleccionadas representativas de las asociaciones observadas

Se seleccionaron imágenes que muestran asociaciones clave como:

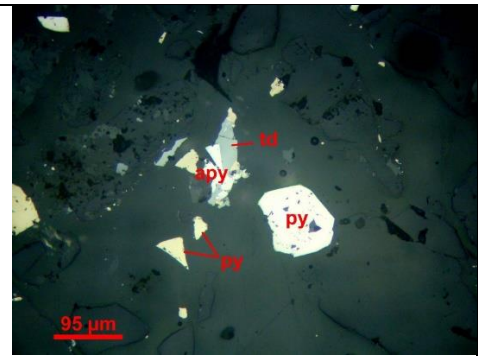
- Calcopirita libre en matriz de ganga
- Electrum incrustado en goethita
- Asociación tetraedrita - pirita
- Bordes de reemplazo entre galena y ganga

**Figura 5.** Fotomicrografías seleccionadas representativas de las asociaciones observadas

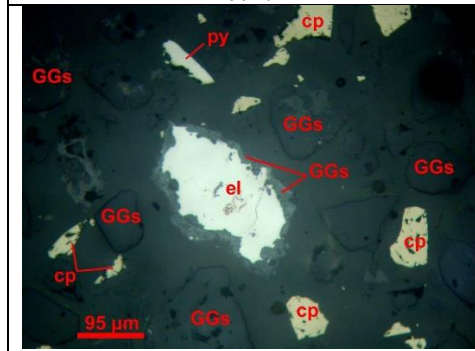




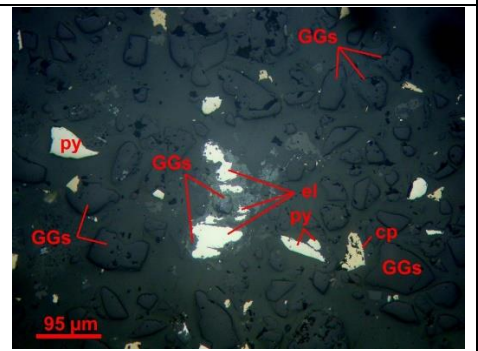
*Fot. 5. Partículas libres calcopirita (cp), de tetraedrita (td) y gangas (GGs); partícula entrelazada de calcopirita (cp) con la pirita (py) y calcopirita (cp) con la tetraedrita (td). 200X.*



*Fot. 6. Partícula entrelazada de tetraedrita (td) con la arsenopirita (apy) y partículas libres de pirita (py). 200X*



*Fot. 7. Partícula entrelazada de electrum (el) con la ganga (GGs); partículas libres de calcopirita (cp) y gangas (GGs). 200X.*



*Fot. 8. Partícula entrelazada de electrum (el) con la ganga (GGs); partículas libres de calcopirita (cp), pirita (py) y gangas (GGs). 200X.*

**Fuente:** *Elaboración propia*

## CONCLUSIONES

- La caracterización textural y paragenética de la muestra Cu - Ag ha permitido cumplir satisfactoriamente con los objetivos planteados en la investigación. En primer lugar, se ha descrito y clasificado un conjunto amplio de texturas mineralógicas mediante análisis en láminas delgadas permitiendo identificar minerales metálicos como la calcopirita, pirita, tetraedrita, esfalerita, electrum y galena, además de minerales no metálicos como goethita, arsenopirita y diversas gangas. Las texturas reconocidas muestran desde partículas libres con contactos simples hasta entrelazamientos complejos y reemplazos completos que revela una amplia variedad de eventos cristalinos.
- En segundo lugar, se logró establecer una secuencia paragenética que responde como mínimo a tres fases hidrotermales sucesivas. La presencia de minerales como la esfalerita intercrecida con pirita y la aparición tardía de calcopirita con liberación casi total del 99.84 %, confirma una evolución mineralógica donde los eventos tardíos tuvieron condiciones más favorables para el crecimiento libre de cristales: así mismo, se ha identificado que el electrum con 55.56 % de liberación, se aloja en ambientes de baja porosidad, asociado a goethita, lo que refuerza la hipótesis de una etapa posmineralizante u oxidante.
- Se ha comprobado que los patrones de asociación mineralógica no son homogéneos. Las asociaciones mineralógicas recurrentes como la calcopirita - tetraedrita, pirita – tetraedrita y esfalerita - pirita reflejan relaciones texturales específicas que implican reemplazo, nucleación simultánea y crecimiento diferenciado. Este hallazgo confirma la presencia de zonaciones internas dentro de la muestra ligadas a gradientes físico - químicos presentes durante la evolución del sistema hidrotermal.
- En relación con el cuarto objetivo específico, los controles geológicos identificados, principalmente litológicos y estructurales, han demostrado ser claves para la distribución y disposición de los sulfuros metálicos. Las zonas con mayor fracturamiento favorecieron la deposición de minerales de mayor liberación como la calcopirita y la pirita. Por el contrario, en sectores de baja permeabilidad o con alteración oxidante se formaron asociaciones más complejas y de menor liberación como el electrum con goethita.
- El grado de liberación está íntimamente ligado al orden de cristalización y a la geometría del entrelazamiento mineral. Los minerales que crecieron en condiciones abiertas muestran altos

porcentajes de liberación, mientras que los que se formaron por reemplazo o en ambientes cerrados presentan asociaciones difíciles de separar metalúrgicamente.

- Finalmente, este estudio ha demostrado que la intrusión tonalítica del cinturón metalogénico andino no solo alberga una mineralización diversa, sino una compleja evolución hidrotermal que puede ser desentrañada mediante una caracterización textural y paragenética minuciosa. Estos resultados fortalecen los modelos metalogenéticos para sistemas polimetálicos en contextos intrusivos, con implicancias prácticas en la exploración y en el procesamiento mineral.

## RECOMENDACIONES

- A partir de los resultados obtenidos y el análisis realizado, se recomienda que toda investigación geológico - mineralógica en intrusiones del cinturón andino incluya como base un estudio textural detallado con enfoque paragénico, el cual permite anticipar comportamientos metalúrgicos y planificar mejor exploración como el procesamiento ya que no basta conocer la presencia de un mineral valioso; es fundamental entender su modo de ocurrencia y su grado de liberación.
- Incorporar una estrategia de muestreo que considere explícitamente la variabilidad litológica y estructural del entorno. Se ha evidenciado que zonas con mayor fracturamiento o con historia de alteración secundaria presentan asociaciones mineralógicas distintas, por lo que una muestra homogénea podría llevar a conclusiones erradas. Incluir afloramientos con distintos niveles de alteración puede enriquecer el análisis y mejorar la precisión del modelo geoquímico y paragénico.
- Complementar los estudios petrográficos con técnicas analíticas avanzadas como difracción de rayos X, espectroscopía Raman o microsonda electrónica. Estos métodos pueden proporcionar datos cuantitativos precisos sobre la composición mineral y ayudar a validar interpretaciones basadas en microscopía óptica, en especial, cuando se detectan fases menores o de difícil identificación como la arsenopirita o el electrum.
- Desde el punto de vista metalúrgico, los datos de liberación obtenidos deben ser utilizados directamente para diseñar esquemas de beneficio. Minerales como la calcopirita y piritita con más del 99 % de liberación, justifican procesos convencionales de flotación, mientras que fases como la galena o goethita podrían requerir tratamientos alternativos e incluso ser excluidos del circuito primario.
- A nivel exploratorio, se sugiere aplicar los patrones paragénicos identificados en este estudio como modelos para prospectar zonas cercanas con litología similar. Las asociaciones de minerales detectadas pueden servir como indicadores de zonas enriquecidas o de eventos hidrotermales activos que podría optimizar la orientación de futuras campañas.
- Difundir los resultados entre comunidades científicas especialmente en congresos o simposios dedicados a metalogenia o geología económica. La contribución realizada en el presente

trabajo de investigación, representa una base metodológica y analítica que podría replicarse o contrastarse en otras intrusiones del cinturón andino.

- Por último, se sugiere desarrollar futuras líneas de investigación orientadas a validar las secuencias paragénicas propuestas a través de modelamiento termodinámico o análisis isotópicos para precisar el origen y la evolución de los fluidos mineralizantes. Esta línea de trabajo sería el siguiente paso lógico en la profundización del conocimiento generado en esta tesis.

## DISCUSIONES

- El desarrollo de esta investigación pone en evidencia las complejidades propias de los sistemas hidrotermales polimetálicos que se desarrollan en contextos intrusivos, particularmente en intrusiones tonalíticas del cinturón metalogénico andino. A lo largo del análisis, se ha demostrado que las asociaciones mineralógicas, los patrones de reemplazo y las texturas dominantes pueden variar sustancialmente incluso en una muestra única, lo que dificulta la aplicación de modelos simplificados para describir estos yacimientos.
- En comparación con los antecedentes teóricos revisados, particularmente aquellos vinculados a sistemas Pórfido - skarn, se observa que, aunque comparten algunos procesos comunes las intrusiones tonalíticas presentan una evolución más variable con múltiples pulsos de mineralización que se reflejan en texturas complejas y asociaciones inusuales como la presencia conjunta de electrum, goethita y ganga. Estos datos refuerzan la necesidad de generar modelos metalogénicos específicos para este tipo de litología que tradicionalmente ha sido subestimada frente a otras.
- Otro punto a discutir es el papel de la textura en la economía de los yacimientos, aunque la proporción volumétrica de un mineral como el electrum sea baja (0.04 %), su dificultad de liberación compromete su recuperación. Esta situación invita a reflexionar sobre cómo los estudios paragéncos no solo aportan información geológica, sino que también tienen implicancias técnicas directas en los circuitos de procesamiento, especialmente cuando se trata de minerales valiosos, pero de difícil separación.
- La observación de grados de liberación cercanos al 100 % en minerales como la calcopirita y pirita indica condiciones cristalinas muy favorables, pero sugiere que el sistema hidrotermal alcanzó una etapa de estabilidad geoquímica que permitió el crecimiento libre. Esto plantea preguntas sobre la dinámica de enfriamiento y los mecanismos de transporte de metales en estas fases tardías, temas que podrían abordarse con técnicas geoquímicas complementarias.
- Se ha identificado que la zonación y la asociación mineral no son del todo predecibles desde el análisis macroscópico, se requiere de estudios microscópicos detallados para revelar relaciones mineral - mineral que podrían pasar desapercibidas; esto constituye una limitación común en muchas exploraciones mineras que se basan en descripciones superficiales, lo cual subraya la importancia de implementar métodos precisos desde etapas tempranas de exploración.

- La hipótesis planteada sobre la existencia de al menos tres fases hidrotermales sucesivas ha sido parcialmente confirmada, aunque los datos sugieren una mayor complejidad. El entrelazamiento de fases como galena - tetraedrita, electrum - goethita y pirita - tetraedrita podría indicar eventos múltiples superpuestos, lo que demandaría un análisis termodinámico más detallado en estudios futuros.
- Finalmente, las limitaciones metodológicas como el acceso restringido a técnicas analíticas avanzadas (p.ej. SEM, microsonda electrónica), han sido compensadas parcialmente por el uso intensivo de la microscopía óptica que dejan abierta la posibilidad de una mayor profundidad interpretativa si se cuenta con recursos complementarios. Aun así, los resultados obtenidos validan la metodología aplicada y ofrecen un marco sólido para interpretar la evolución de este tipo de sistemas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Ramírez Briones, J. S. (2022). Composición isotópica de azufre en sulfuros y de azufre y oxígeno en anhidrita masiva en el yacimiento de Zn-Pb-Ag-In-Sn-Cu de Ayawilca, Pasco, Perú [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/21524>
2. Millán Núñez, A. J. (2021). Mineralogía y texturas de la mineralización en el yacimiento de tipo MVT de Shalipayco, Perú [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/20355>
3. de Barrio, R., Amstutz, G. C., Chayle, W., Sureda, R., & de Giusto, J. M. (1999). Geología y metalogenia de la provincia de Jujuy. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/1448>
4. Molyneux, S. J., & Tickyj, H. (2023). Mineralogía y petrografía aplicada a la exploración y evaluación de yacimientos metalíferos: Aplicaciones en sistemas epitermales y pórfidos. Universidad Nacional del Comahue. <https://rdi.uncoma.edu.ar/handle/uncomaid/17948>
5. Paniagua, A. (2014). Modelización geometalúrgica en yacimientos polimetálicos: una aplicación a un yacimiento tipo skarn. Universidad Complutense de Madrid. <https://docta.ucm.es/entities/publication/0be72796-6a96-4666-8c8c-062b827d66e8>
6. López, R. (2017). Análisis geoquímico y estructural en vetas polimetálicas de alta ley: Implicancias para la exploración minera en sistemas de orogenia andina. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
7. Aguilaf Carmona, S. G. (2012). Análisis geológico de estudios geofísicos de Polarización Inducida (IP) en sistemas IOCG y pórfido cuprífero del Norte de Chile [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112318>
8. Townley, B. K. (2001, julio 23). Metalogénesis: Hidrotermalismo y modelos de yacimientos. Apuntes y referencias de Geología Económica. Departamento de Geología, Universidad de Chile. INGLOMAYOR, Sección C, 19. <https://inglomayor.cl/edicion19/c/paper1.pdf>
9. González, P. D. (2015). Texturas de los cuerpos ígneos. En E. J. Llambías (Coord.), Geología de los cuerpos ígneos (pp. 167-195). Asociación Geológica Argentina.
10. Cepedal Hernández, M. A. (2001). Geología, mineralogía, evolución y modelo genético del yacimiento de Au-Cu de “El Valle-Boinás” Belmonte (Asturias). Universidad de Oviedo, Departamento de Geología.
11. Herrmann, C. J., & Zappettini, E. O. (2014). Recursos minerales, minería y medio ambiente. Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). <http://repositorio.segemar.gov.ar/308849217/2864>

12. Jara Torres, R. L. (2019). Controles metalogenéticos de los depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos (VMS) en la Cuenca Casma, Subcuenca Cañete, Perú [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica.
13. De La Cruz Yupanqui, J. A. (2024). Caracterización mineralógica de un yacimiento epitermal aplicando el método de luz transmitida y luz reflejada [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas, Huancayo, Perú.
14. Laura Mantari, O. B. (2025). Estudio geológico minero y evaluación preliminar de un yacimiento polimetálico ubicado en la zona centro del Perú [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas, Huancayo, Perú.
15. Orozco Villaseñor, F. J. (2014). Mineralogía y génesis del “clavo de Rayas” de la zona central de la Veta Madre de Guanajuato [Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México]. Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, Juriquilla, Querétaro, México.
16. Ramírez Meneses, V. C. (2010). Plutonismo del Carbonífero Superior y Jurásico Medio en el tramo costero entre Laguna Verde y Tunquén (33° 05' - 33° 15' S), Chile Central [Tesis de licenciatura, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103983>
17. Vivallo, W., & Henríquez, F. (1998). Génesis común de los yacimientos estratoligados y vetiformes de cobre del Jurásico Medio a Superior en la Cordillera de la Costa, Región de Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 25(2), 233-250. <https://doi.org/10.4067/S0716-02081998000200006>
18. Echavarría, L. E. (2004). Los fluidos hidrotermales formadores de la mineralización epitermal El Dorado-Monserrat, Macizo del Deseado. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59(1), 81-94.

# **ANEXOS**

Anexo 01

Tabla N°1: Volúmenes y grados de liberación de los minerales observados.

TABLA No. 1																					
Volúmenes y grados de liberación de los minerales observados																					
Muestra: Cu-Ag (VICTOR)																					
MINERALES		ELECTRUM		CALCOPIRITA		TETRAEDRITA		ESFALERITA		GALENA		PIRITA		ARSENOPIRITA		GOETHITA		GANGAS			
		N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V		
Total de Partículas Libres		13889		3		3555		36		18		0		1296		26		0		8955	
% Volumen Partículas libres			98.88		0.02		25.31		0.26		0.13		0.00		9.23		0.19		0.00		63.75
TOT.PARTICULAS		NUMERO	VOLUMEN	ELECTRUM		CALCOPIRITA		TETRAEDRITA		ESFALERITA		GALENA		PIRITA		ARSENOPIRITA		GOETHITA		GANGAS	
ENTRELAZADAS		PARTICUL.	PORCENTUAL	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V
el-GGs		9	0.06	1.20	0.01															7.80	0.06
cp-td		18	0.13			12.60	0.09	5.40	0.04												
cp-GGs		36	0.26			9.90	0.07													26.10	0.19
td-py		9	0.06					6.30	0.04				2.70	0.02							
td-apy		6	0.04					3.60	0.03						2.40	0.02					
ef-py		9	0.06							7.20	0.05		1.80	0.01							
ef-GGs		18	0.13							2.70	0.02									15.30	0.11
gt-GGs		27	0.19														6.00	0.04		21.00	0.15
el-gt-GGs		4	0.03	1.20	0.01												0.60	0.00		2.20	0.02
cp-td-gn		3	0.02			2.10	0.01	0.60	0.00			0.30	0.00								
cp-td-py		4	0.03			2.80	0.02	0.40	0.00					0.80	0.01						
cp-gt-GGs		15	0.11			6.90	0.05										2.10	0.01		6.00	0.04
TOTAL ENTREL.		158	1.12	2.40	0.02	34.30	0.24	16.30	0.12	9.90	0.07	0.30	0.00	5.30	0.04	2.40	0.02	8.70	0.06	78.40	0.56
TOT.LIB+ENLZ		14047	100.00	5.40		3589.30		52.30		27.90		0.30		1301.30		28.40		8.70		9033.40	
TOT.VOL.PORCENTUAL			100.00		0.04		25.55		0.37		0.20		0.00		9.26		0.20		0.06		64.31
GRADOS DE LIB.PORCENTUAL				55.56		99.04		68.83		64.52		0.00		99.59		91.55		0.00		99.13	
Símbolos :		N = Número de partículas libres y entrelazadas contabilizadas.																			
		%V = Volumen porcentual de las partículas libres y entrelazadas.																			

Fuente: GEOEXPLORACIÓN INGENIEROS PERÚ S.A.C.

**Anexo 02**

*Tabla N°2: Tipos geométricos de entrelazamiento de los minerales y sus posibilidades de liberación completa.*

<b>TABLA N°2</b>				
<b>Tipos geométricos de entrelazamientos de los minerales y sus posibilidades de liberación completa</b>				
Muestra No. :		<b>Cu-Ag (VICTOR)</b>		
<b>MINERALES ENTRELAZADOS</b>	<b>TIPO ENTR.</b>	<b>NUM. PART.</b>	<b>DIST. PORC.</b>	<b>POSIBILIDADES DE LIBERACION COMPLETA</b>
Partículas Libres		13889	98.88	
el-GGs	1bIV	3	0.02	Moderadamente fácil
	2aI	6	0.04	Muy difícil a imposible
cp-td	1aII	9	0.06	Fácil
	1bIV	9	0.06	Moderadamente fácil
cp-GGs	1aII	18	0.13	Fácil
	1bIV	9	0.06	Moderadamente fácil
	1eI	9	0.06	Muy difícil a imposible
td-py	1aII	3	0.02	Fácil
	3dII	6	0.04	Muy difícil a imposible
td-apy	4cI	6	0.04	Muy difícil a imposible
ef-py	1bIV	9	0.06	Moderadamente fácil
ef-GGs	1bI	9	0.06	Moderadamente fácil
	1bII	9	0.06	Moderadamente fácil
gt-GGs	1bI	9	0.06	Moderadamente fácil
	3cII	9	0.06	Imposible
	4cI	9	0.06	Muy difícil a imposible
el-gt-GGs	3dII	4	0.03	Muy difícil a imposible
cp-td-gn	1bIV	3	0.02	Moderadamente fácil
cp-td-py	1bIV	4	0.03	Moderadamente fácil
cp-gt-GGs	1bIV	9	0.06	Moderadamente fácil
	3cII	6	0.04	Imposible
<b>TOTAL</b>		<b>14047</b>	<b>100.00</b>	

Fuente: GEOEXPLORACIÓN INGENIEROS PERÚ S.A.C.