

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Estudio de depósito de cobre en capas rojas
aplicando la microscopia óptica de luz reflejada**

Royerd Alexis Laureano Tinoco
Alex Merge Aguilar
Jari Andy Nordman Ortega

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero de Minas

Huancayo, 2024

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 Martinez
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 22 de Noviembre de 2024

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

Título:

ESTUDIO DE DEPÓSITO DE COBRE EN CAPAS ROJAS APLICANDO LA MICROSCOPIA ÓPTICA DE LUZ REFLEJADA

Autor:

1. Nordman Ortega Jari Andy – EAP. Ingeniería de Minas
2. Merge Aguilar Alex – EAP. Ingeniería de Minas
3. Laureano Tinoco Royerd Alexis – EAP. Ingeniería de Minas

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

- | | | |
|---|--|--|
| • Filtro de exclusión de bibliografía | SI <input checked="" type="checkbox"/> | NO <input type="checkbox"/> |
| • Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas (en caso de elegir "SI"): 20 | SI <input checked="" type="checkbox"/> | NO <input type="checkbox"/> |
| • Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante | SI <input type="checkbox"/> | NO <input checked="" type="checkbox"/> |

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,

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos expresar nuestra más profunda gratitud a Dios, quien ha sido nuestra guía constante a lo largo de este camino. Su presencia nos brindó la fuerza, la sabiduría y el aliento necesarios para superar los obstáculos y mantenernos enfocados en la meta. Sin su bendición, este logro no habría sido posible.

A nuestros padres, queremos agradecerles de todo corazón por el apoyo incondicional que nos han brindado a lo largo de este proceso. Han sido nuestra mayor fuente de inspiración y fortaleza. Sus sacrificios, su amor inquebrantable y su fe en nosotros nos impulsaron a seguir adelante en los momentos más difíciles. Este logro no es solo nuestro, sino también de ustedes, que siempre estuvieron a nuestro lado, dándonos las alas para volar.

Nuestra más sincera gratitud también va dirigida a nuestra asesora de tesis, la geóloga Nérida Tantavilca Martínez. Su dedicación, paciencia y constante orientación han sido esenciales para que este trabajo llegara a buen puerto. No solo nos brindó su tiempo y conocimientos, sino también su confianza y su apoyo en cada etapa del proceso. Sin duda, su guía fue un pilar fundamental para la culminación de este proyecto, y le estaremos eternamente agradecidos.

Asimismo, queremos dedicar unas palabras de profundo agradecimiento a la Universidad Continental nuestra alma mater, por ser el espacio donde hemos crecido y aprendido no solo como profesionales, sino también como personas. A lo largo de estos años, nos brindó no solo una educación de calidad, sino también un entorno que fomentó nuestra curiosidad, creatividad y capacidad para enfrentar desafíos. Las oportunidades de aprendizaje que nos ofreció, junto con el apoyo de sus docentes y personal, fueron cruciales para que hoy podamos culminar este proyecto con éxito. Nos sentimos profundamente orgullosos de haber sido parte de esta institución, y siempre llevaremos con nosotros el espíritu de excelencia que fomenta.

Finalmente, no podemos olvidar a todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron a la realización de esta tesis. A nuestros compañeros, amigos y familiares, quienes nos brindaron su apoyo moral y su ayuda desinteresada en los momentos más complicados, les decimos: gracias. Cada palabra de aliento, cada gesto de apoyo y cada consejo fue invaluable para nosotros. Este logro también es suyo.

Este trabajo representa no solo el esfuerzo de los tres integrantes, sino también el de todas aquellas personas que, directa o indirectamente, contribuyeron a su realización. A todos, les extendemos nuestra gratitud más sincera.

Con cariño y humildad, ¡gracias!

DEDICATORIA

Con todo mi amor y gratitud, dedico este esfuerzo y logro a mis padres, cuya inquebrantable fe en mis capacidades y amor incondicional han sido el viento bajo mis alas en cada momento de duda. Su ejemplo de perseverancia y dedicación es la guía que sigo cada día.

Asimismo, a mi hermano, cuyo apoyo y compañerismo han sido un regalo constante en mi vida. Tu aliento en los momentos difíciles y tus celebraciones en los triunfos, pequeños y grandes, han sido esenciales para mí

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	1
DEDICATORIA	2
ÍNDICE.....	3
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
RESUMEN	10
ABSTRACT.....	10
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	13
1.1. Planteamiento del problema.....	13
1.2. Formulación del problema	13
1.2.1. Problema general	13
1.2.2. Problemas específicos.....	13
1.3. Objetivos.....	13
1.3.1. Objetivos generales	13
1.3.2. Objetivos específicos.....	14
1.4. Justificación e importancia	14
1.5. Delimitación del proyecto.....	14
1.5.1. Delimitación espacial.....	14
1.5.2. Delimitación temporal	14
1.5.3. Delimitación conceptual	14
1.5.4. Delimitación metodológica.....	15
1.6. Hipótesis de la investigación	15
1.6.1. Hipótesis específicas.....	15
1.7. Identificación de variables	15
1.7.1. Variable independiente	15
1.7.2. Variable dependiente	15
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	16
2.1. Antecedentes del problema	16
2.2. Bases Teóricas	18
2.2.1. Microscopia óptica.....	18
2.2.2. Naturaleza de la luz	18
2.2.2.2. Polarización	19
2.2.2.3. Refracción y reflexión	20

2.2.3	Cuerpos transparentes, translúcidos y opacos.....	21
2.2.4	Microscopio de polarización.....	21
2.2.5	Preparación de la muestra (secciones delgadas y pulidas).....	24
2.2.6	Generalidades de los minerales	25
2.2.6.1	Minerales isótropos.....	25
2.2.6.2	Minerales anisótropos.....	26
2.2.6.3	Luz linealmente polarizada reflejada en minerales opacos.....	27
2.2.7	Propiedades que se estudian con el microscopio de polarización en minerales ...	28
2.2.8	Estudio con iluminación ortoscópica transmitida.....	29
2.2.8.1	Estudio con nicoles paralelos.....	29
2.2.8.1.1	Color	29
2.2.8.1.2	Pleoroismo	29
2.2.8.1.3	Determinación del índice de refracción	30
2.2.8.1.4	Tamaño	30
2.2.8.1.5	Forma.....	30
2.2.8.1.6	Clivaje.....	32
2.2.8.2	Estudio con nicoles cruzados.....	33
2.2.8.2.1	Anisotropía	33
2.2.8.2.2	Extinción.....	33
2.2.8.2.3	Color de interferencia	34
2.2.8.2.4	Birrefringencia.....	34
2.2.8.2.5	Maclas.....	34
2.2.8.2.6	Desmaclas.....	35
2.2.8.2.7	Zonamiento.....	35
2.2.8.2.8	Inclusiones	35
2.2.8.2.9	Alteraciones	36
2.2.9	Estudio con iluminación conoscopica.....	36
2.2.9.1	Luz conoscopica	36
2.2.9.2	La figura de interferencia uniáxica	36
2.2.9.3	La figura de interferencia biáxica	37
2.2.9.4	Medición de ángulo $2v$	38
2.2.10	Estudio con luz reflejada.....	39
2.2.10.1	Sistemas de iluminación vertical	39
2.2.10.2	Cuidado e instalación de las secciones pulidas.....	40
2.2.10.3	Dureza relativa.....	41
2.2.10.4	Intercrecimiento.....	41
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA		43

3.1 Métodos y alcance de la investigación.....	43
3.2 Diseño de la investigación	43
3.3 Población y muestra.....	43
Población	43
Muestra	43
3.4 Materiales y métodos	44
3.4.1 Materiales	44
3.4.2 Métodos	45
Recolección de muestras.....	45
Preparación de las muestras	46
Análisis mediante microscopía óptica de luz reflejada.....	46
Procesamiento y análisis de datos	46
Justificación de la técnica utilizada: Microscopía óptica de luz reflejada	47
Reconocimiento de las limitaciones y exclusión de técnicas complementarias.....	47
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y CONCLUSIONES	47
5.1. PRESENTACION DE RESULTADOS	48
5.1.1 Muestra N.º 1	48
5.1.1.1 Mineralogía.....	48
5.1.1.2 Distribución volumétrica porcentual	48
5.1.1.3 Textura.....	48
5.1.1.4 Paragénesis	48
5.1.1.5 Observaciones.....	48
5.1.1.6 Fotomicrografías.....	49
5.1.2 Muestra N.º 2	51
5.1.2.1 Mineralogía.....	51
5.1.2.2 Distribución volumétrica porcentual	51
5.1.2.3 Textura.....	51
5.1.2.4 Paragenesis	51
5.1.2.5 Observaciones.....	52
5.1.1.6 Fotomicrografías.....	52
5.1.2 Muestra N.º 3	58
5.1.3.1 Mineralogía.....	58
5.1.3.2 Distribución volumétrica porcentual	58
5.1.3.3 Textura.....	58
5.1.3.4 Paragenesis	58
5.1.3.5 Observaciones.....	58
5.1.3.6 Fotomicrografías.....	59

5.1.2 Muestra N.º 4.....	62
5.1.4.1 Mineralogía.....	62
5.1.4.2 Distribución volumétrica porcentual	62
5.1.4.3 Textura.....	62
5.1.4.4 Paragenesis	62
5.1.4.5 Observaciones.....	63
5.1.4.6 Fotomicrografías.....	63
5.1.5 Muestra N.º 5	67
5.1.5.1 Mineralogía.....	67
5.1.5.2 Distribución volumétrica porcentual	67
5.1.5.3 Textura.....	67
5.1.5.4 Paragenesis	67
5.1.5.5 Observaciones.....	67
5.1.5.6 Fotomicrografías.....	68
5.2. Análisis comparativo de muestras.....	71
Composición mineralógica	71
Texturas observadas	72
Alteraciones mineralógicas.....	72
Tendencias de paragénesis.....	73
Interpretación general	73
CAPÍTULO V DISCUSIÓN DE RESULTADOS	74
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	76
6.1 Conclusiones.....	76
6.2 Recomendaciones	76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
ANEXOS	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades mineralógicas que se estudian en el microscopio de polarización	28
Tabla 2 Distribución volumétrica porcentual muestra N° 1	49
Tabla 3 Distribución volumétrica porcentual muestra N° 2	52
Tabla 4 Distribución volumétrica porcentual muestra N° 3	59
Tabla 5 Distribución volumétrica porcentual muestra N° 4	63
Tabla 6 Distribución volumétrica porcentual muestra N° 5	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Representación de la luz linealmente polarizada, monocromática y blanca	19
Figura 2	Representación de luz linealmente polarizada y elípticamente polarizada	19
Figura 3	Métodos para obtener luz linealmente polarizada	20
Figura 4	Angulo de incidencia(i), de reflexión(I) y de refracción	21
Figura 5	Esquema del microscopio de polarización	22
Figura 6	Microscopio de polarización de luz transmitida	23
Figura 7	Microscopio de polarización de luz reflejada	23
Figura 8	Microscopio de polarización de luz reflejada	24
Figura 9	Desarrollo tridimensional de los minerales	25
Figura 10	Desarrollo de un mineral isótropo puesto en nicoles cruzados y luz transmitida	26
Figura 11	Desarrollo de un mineral anisótropo puesto en nicoles cruzados y luz transmitida	27
Figura 12	Luz linealmente polarizada reflejada sobre una sección de un mineral opaco	28
Figura 13	Forma de cristales según el desarrollo de las caras y forma según el número de dimensiones preferentemente desarrolladas	31
Figura 14	Formas bidimensionales propias de los diferentes sistemas cristalinos	32
Figura 15	Nitidez de las trazas de clivaje y tipos de clivaje	33
Figura 16	Zonamiento de plagioclasa	35
Figura 17	Signo de óptico de los minerales uniáxicos	37
Figura 18	Determinación del signo óptico de minerales biáxicos	38
Figura 19	Determinación y métodos para el ángulo 2V	39
Figura 20	Sistemas de iluminación vertical en el microscopio de luz reflejada	40
Figura 21	Sección pulida vista planta y sección transversal en escala vertical exagerada	41
Figura 22	Tipos geométricos de Inter crecimiento entre minerales	42
Figura 23	Tipos geométricos de Inter crecimiento entre minerales	43
Figura 24	Muestra N° 1 – Foto 1	50
Figura 25	Muestra N° 1 – Foto 2	50
Figura 26	Muestra N° 1 – Foto 3	51
Figura 27	Muestra N° 1 – Foto 4	51

Figura 28 Muestra N° 2 – Foto 1	53
Figura 29 Muestra N° 2 – Foto 2	54
Figura 30 Muestra N° 2 – Foto 3	54
Figura 31 Muestra N° 2 – Foto 4	55
Figura 32 Muestra N° 2 – Foto 5	56
Figura 33 Muestra N° 2 – Foto 6	56
Figura 34 Muestra N° 2 – Foto 7	57
Figura 35 Muestra N° 2 – Foto 8	57
Figura 36 Muestra N° 3 – Foto 1	60
Figura 37 Muestra N° 3 – Foto 2	60
Figura 38 Muestra N° 3 – Foto 3	61
Figura 39 Muestra N° 3 – Foto 4	61
Figura 40 Muestra N° 4 – Foto 1	64
Figura 41 Muestra N° 4 – Foto 2	65
Figura 42 Muestra N° 4 – Foto 3	65
Figura 43 Muestra N° 4 – Foto 4	66
Figura 44 Muestra N° 4 – Foto 5	66
Figura 45 Muestra N° 5 – Foto 1	69
Figura 46 Muestra N° 5 – Foto 2	69
Figura 47 Muestra N° 5 – Foto 3	70
Figura 48 Muestra N° 5 – Foto 4	70
Figura 49 Muestra N° 5 – Foto 5	71
Figura 50 Muestra N° 5 – Foto 6	71

RESUMEN

La presente tesis titulada “Estudio de depósito de cobre en capas rojas aplicando la microscopía óptica de luz reflejada” la microscopía óptica es esencial para identificar minerales, mostrando detalles de su composición, textura y estructura a nivel microscópico. Se preparan secciones delgadas o pulidas de muestras minerales, que se montan en portaobjetos y se observan bajo el microscopio para obtener imágenes con diferentes contrastes y resoluciones que busca establecer el valor económico de la concesión basado en su mineralogía óptica, este trabajo busca contribuir al desarrollo sostenible de la industria minera, evitando impactos ambientales negativos y promoviendo un manejo responsable de los recursos naturales. La correcta identificación de las características geológicas de los yacimientos es fundamental para garantizar el éxito de las operaciones mineras en el futuro. La investigación tuvo como inicio la siguiente problemática: "Caracterización petromineralógica con microscopía óptica de luz reflejada." Teniendo como objetivo identificar los minerales de mena y ganga, la paragénesis y los tipos de alteraciones en depósitos en capas rojas a través de la caracterización petromineralógica utilizando microscopía óptica de luz reflejada. Al finalizar se observa que la hipótesis planteada es positiva y viable.

Palabras claves: Microscopía, luz reflejada, capas rojas, depósito de cobre

ABSTRACT

The following thesis titled "Study of Copper Deposit in Red Beds Applying Reflected Light Optical Microscopy" emphasizes that optical microscopy is essential for identifying minerals, showcasing details of their composition, texture, and structure at a microscopic level. Thin or polished sections of mineral samples are prepared, mounted on slides, and observed under the microscope to obtain images with different contrasts and resolutions. The goal is to establish the economic value of the concession based on its optical mineralogy. This work aims to contribute to the sustainable development of the mining industry, avoiding negative environmental impacts and promoting responsible management of natural resources. Correct identification of the geological characteristics of the deposits is crucial to ensure the success of future mining operations. The research began with the following issue: "Petro-mineralogical characterization with reflected light optical microscopy." The objective was to identify ore and gangue minerals, paragenesis, and types of alterations in red bed deposits through petromineralogical characterization using reflected light optical microscopy. It concludes that the posed hypothesis is positive and viable.

Keywords: Microscopy, Reflected light, Red layers, Copper deposit

INTRODUCCIÓN

En el estimulante campo de la geología económica, el estudio minucioso de los depósitos minerales cobra una importancia capital. Este enfoque no solo promete maximizar la eficiencia de los recursos naturales de nuestro planeta, sino que también pone de relieve las complejidades inherentes a su aprovechamiento responsable. Esta tesis se centra en la exploración exhaustiva de un depósito de capas rojas, cuya historia geológica intrincada y variada composición mineral ofrece una ventana única a los desafíos y oportunidades que estos yacimientos presentan para el avance científico y la práctica industrial.

Los depósitos de capas rojas, con sus secuencias estratigráficas densamente pobladas de minerales y su formación a través de procesos geológicos dinámicos, son particularmente desafiantes de estudiar. Sin embargo, esta complejidad también los convierte en excelentes candidatos para mejorar las técnicas de extracción y procesamiento mineral. Este estudio es crucial no solo para entender los mecanismos que han dado forma a estos depósitos a lo largo de eras geológicas, sino también para aplicar este conocimiento de manera que se puedan extraer y procesar recursos de manera más eficiente y ambientalmente sostenible.

Con este objetivo, la presente investigación proporciona un análisis detallado de la mineralogía y las secuencias de formación de minerales (paragénesis) del depósito seleccionado, aplicando metodologías avanzadas como la microscopía óptica y análisis químico detallado. Al hacerlo, no solo abordamos las preguntas científicas fundamentales sobre la composición y evolución de estos depósitos, sino que también proporcionamos insights que pueden mejorar significativamente la exploración y explotación de recursos minerales.

Además de su contribución académica, este estudio tiene la intención de servir como un puente entre la teoría geológica y la aplicación práctica en la minería y la gestión de recursos naturales. Al ofrecer datos y análisis que pueden ser utilizados directamente por geólogos, ingenieros mineros, y profesionales del medio ambiente, este trabajo fomenta un diálogo interdisciplinario y colaborativo esencial para la planificación y ejecución de operaciones mineras responsables y eficaces.

El documento está estructurado de manera que cada sección contribuye al desarrollo de un entendimiento integral del tema. Iniciamos con una revisión exhaustiva de la literatura, estableciendo un marco teórico que no solo contextualiza nuestro estudio dentro del ámbito actual de la geología económica, sino que también resalta las contribuciones significativas de investigaciones previas. Seguidamente, se presenta una descripción meticulosa de las

metodologías empleadas en la recolección y análisis de las muestras. Los capítulos centrales del trabajo detallan los resultados obtenidos y los discuten en relación con estudios anteriores, evaluando sus implicaciones tanto desde una perspectiva científica como práctica. Finalmente, el estudio culmina con un conjunto de conclusiones que resumen los aportes más significativos y esbozan futuras direcciones para la investigación, proponiendo nuevas líneas de indagación que podrían continuar profundizando y expandiendo nuestro entendimiento de los depósitos minerales.

CAPÍTULO I:

PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

Uno de los problemas más importantes que ocurre en la prospección de yacimientos mineros a nivel nacional e internacional, es el adecuado renacimiento de minerales, rocas y las alteraciones que pueden presentarse para estudios posteriores al yacimiento. Puesto que requieren una mayor inversión de capital.

Por ese motivo, se realizó el trabajo de investigación sobre el estudio de depósito de cobre en capas rojas, aplicando conocimientos en ingeniería de minas y usando herramientas geológicas para obtener resultados fiables sobre la mineralización en dicho lugar.

Por lo tanto, es importante determinar la petromineralogía del afloramiento para poder realizar estudios más complejos.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

- ¿De qué manera se llevaría a cabo la caracterización petromineralógica de un depósito en capas rojas utilizando microscopía óptica de luz reflejada?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Qué minerales de ganga y mena se han identificado a través de la caracterización petromineralógica utilizando el método de microscopía óptica de luz reflejada en un depósito de capas rojas?
- ¿Qué paragénesis fue identificada a través de la caracterización petromineralógica utilizando el método de microscopía óptica de luz reflejada en un depósito de capas rojas?
- ¿Qué alteraciones fueron identificadas a través de la caracterización petromineralógica utilizando microscopía óptica de luz reflejada en un depósito de capas rojas?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos generales

- Efectuar la caracterización petromineralógica de un depósito en capas rojas a través del uso de microscopía óptica de luz reflejada.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar los minerales de mena y ganga a través de la caracterización petromineralógica empleando microscopía óptica de luz reflejada en un depósito de capas rojas.
- Establecer la paragénesis mediante la caracterización petromineralógica utilizando microscopía óptica de luz reflejada en un depósito de capas rojas.
- Determinar las diferentes alteraciones mediante la caracterización petromineralógica utilizando microscopía óptica de luz reflejada en un depósito de capas rojas

1.4. Justificación e importancia

La presente investigación se fundamenta en la carencia de estudios previos que utilicen microscopía óptica de luz reflejada, así como en la limitada información mineralógica disponible sobre el prospecto del depósito en capas rojas. Además, esta tesis cobra relevancia al proporcionar una base sólida para futuros estudios orientados a determinar el valor económico de dicha concesión, a partir del análisis detallado de su mineralogía óptica.

1.5. Delimitación del proyecto

1.5.1. Delimitación espacial

El estudio se centrará exclusivamente en el depósito de cobre en capas rojas localizado en el afloramiento de la zona seleccionada ubicada en el Cerro Jacrun, distrito San Pedro de Cajas, provincia Tarma, departamento Junín. A una altitud de entre 4158 a 4379 m.s.n.m. con una latitud de -11.3 y una longitud de 75.86667. No se incluyen otros tipos de depósitos minerales que no estén clasificados dentro de este contexto.

1.5.2. Delimitación temporal

El proyecto tiene una duración desde su planificación en septiembre de 2023 hasta su culminación en 2024. Las muestras fueron recolectadas durante la expedición realizada en el segundo semestre del 2023, y el análisis de dichas muestras se realizará a lo largo del primer semestre de 2024.

1.5.3. Delimitación conceptual

El proyecto se enfoca en la caracterización petromineralógica de depósitos en capas rojas, usando la microscopía óptica de luz reflejada. Se busca identificar minerales de mena y ganga, así como la paragénesis y alteraciones, excluyendo análisis químicos avanzados como la difracción de rayos X u otros métodos complementarios. Se limita el análisis a los aspectos que pueden observarse y analizarse a través de esta técnica de microscopía.

1.5.4. Delimitación metodológica

La investigación se realizará utilizando el método cualitativo basado en la observación y análisis microscópico de secciones pulidas de las muestras recolectadas. No se contemplan experimentos ni intervenciones en el terreno, más allá de la recolección inicial de muestras. Los minerales estudiados son aquellos específicos del depósito en capas rojas de acuerdo con la clasificación inicial obtenida mediante microscopía óptica.

1.6. Hipótesis de la investigación

- La caracterización petromineralógica mediante el uso de microscopía óptica de luz reflejada en depósitos de capas rojas.

1.6.1. Hipótesis específicas

- Los minerales de mena y ganga serán identificados mediante el uso de microscopía óptica de luz reflejada en depósitos de capas rojas.
- La paragénesis de mena será determinada a través del método de microscopía óptica de luz reflejada en depósitos de capas rojas.
- Las alteraciones serán identificadas utilizando el método de microscopía óptica de luz reflejada en depósitos de capas rojas.

1.7. Identificación de variables

1.7.1. Variable independiente

- Microscopio óptico de luz reflejada.

1.7.2. Variable dependiente

- Identificación de rocas y minerales.

CAPÍTULO II: MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes del problema

Como antecedentes del problema tenemos estos encontrados:

- a) Según CAÑOLA, GALLEGO, BOLÍVAR (2015), en su artículo titulado “CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y MINERALOGÍA DE PROCESOS APLICADA A LA MINA DE VETA “LA ESPERANZA”, UBICADA EN LA VEREDA CEDEÑO PARTE ALTA DEL MUNICIPIO DE TÁMESIS, ANTIOQUIA”, tiene como objetivo la caracterización mineralógica con luz reflejada y electrónica del mineral aurífero sobre secciones delgadas pulidas originario de la Mina La Esperanza. Se concluyó, que el trabajo con un total de 32 muestras y siendo seleccionadas solo 20 secciones, se halló 553 gramos de electrum y plata nativa gracias a una caracterización minuciosa a cada uno de los granos por medio del tamaño, forma y asociación, dando con esta información un mejor soporte para plantear un diseño metalúrgico de beneficio del mineral aurífero para la mina.
(1)
- b) Según ESPINOZA BRUNO Miguel Ángel (2018) en la tesis titulada: “LA CARACTERIZACIÓN MICROSCÓPICA DE MINERALES EN LA PARAGÉNESIS DEL YACIMIENTO SHALIPAYCO “plantea como objetivo: Conocer las características microscópicas de los minerales para determinar la paragénesis del yacimiento Shalipayco. Conclusión La caracterización de la mineralización realizando el estudio de microscopía determina que: La marcasita precipita mayormente antes de la esfalerita roja. La pirita se precipita después de la esfalerita roja y en parte antes de la esfalerita amarilla incolora. ·La esfalerita amarilla incolora está sobre todo desarrollada en espacios abiertos con calcita y yeso. ·La esfalerita roja tiene fe, la esfalerita amarillo incoloro muy poco o nada. ·Todos los sulfosales están relacionados con la galena, pero toda la galena no contiene sulfosales.
- c) Según QUISPE SAEZ, Jaime Wiber (2020). La tesis titulada “Caracterización Mineragráfica de la Veta 722, U.E.A. San Cristóbal – Yauli la Oroya” tiene como objetivo principal describir las propiedades mineralógicas de la veta 722, ubicada en la Unidad Económica Administrativa San Cristóbal. En cuanto a las conclusiones, la caracterización mineragráfica revela que las muestras están compuestas por agregados cristalinos masivos, cuyo porcentaje varía entre las distintas muestras analizadas. Los minerales predominantes son: la pirita, esfalerita, pirrotita, arsenopirita, calcopirita I, hematita I (especularita), que también presenta reemplazo por magnetita, así como hematita II, marcasita, y calcopirita II. Otros minerales, como tetraedrita, bournonita, covelita, hematita II, tenantita y freibergita,

se presentan en forma de diseminaciones, trazas o relictos. Es importante señalar que los minerales presentes en mayor proporción son observables tanto en forma de agregados cristalinos como en manifestaciones de reemplazo, diseminación, venillas finas, relictos y trazas.

- d) Según Quiñones Gagliuffi, Campian (2013), en su artículo “CARACTERIZACIÓN DE ESFALERITAS POR EL MÉTODO DE MICROSCOPIA ÓPTICA” propone como objetivo: Realizar un análisis detallado de las muestras de concentrado de zinc utilizando la técnica de microscopía óptica de luz reflejada. Esta metodología permite identificar los minerales presentes en las muestras a través de sus propiedades ópticas, como color, textura y brillo, facilitando la caracterización mineralógica. La luz reflejada en el microscopio óptico revela información crucial sobre la composición mineral de las muestras, lo que resulta fundamental para evaluar la eficiencia de los procesos metalúrgicos. Además, el uso de la microscopía óptica de luz reflejada permite realizar un análisis detallado de la distribución de minerales opacos, como la esfalerita y la galena, proporcionando datos precisos sobre su tamaño, asociaciones y liberaciones. Esta técnica es esencial para comprender la mineralogía de las muestras y optimizar los procesos de concentración y recuperación de minerales en la planta Paragsha.
- e) Según CUBA GONZALES Liz, POMA LÓPEZ Christopher Hilario y URETA ESPINOZA Ruth Sandy (2021), en su tesis titulada: “CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DEL YACIMIENTO NO METÁLICO APLICANDO EL MÉTODO DE MICROSCOPIA ÓPTICA EN LA CONCESIÓN MINERA SANTA ROSA 94-1 -2021”, propone como objetivo principal de este estudio consiste en clasificar el contenido y mineralogía de cada muestra, incluyendo las alteraciones presentes en estas muestras, provenientes del yacimiento no metálico de la Concesión Minera Santa Rosa 94-1, mediante microscopía óptica. El estudio concluye que las muestras están compuestas por diversos minerales y que el estudio mineralógico de las muestras permite conocer la pureza de la arena de sílice dentro del depósito, lo cual es crucial para su comercialización y distribución. La metodología utilizada en esta investigación involucra un levantamiento topográfico para dimensionar el depósito, seguido de un muestreo aleatorio. Se recogieron un total de nueve muestras, que se pulieron para convertirlas en secciones delgadas y secciones pulidas, y luego se analizaron mediante microscopía óptica. Este estudio es un testimonio del esfuerzo y dedicación de los estudiantes y su asesor, con el objetivo de brindar conocimientos valiosos al campo de la Ingeniería de Minas y a la comunidad local de Llocllapampa. Representa un aporte significativo al campo académico y profesional de la Ingeniería, particularmente en el estudio y caracterización de yacimientos no metálicos.
- f) Según MEJIA PEREZ, ANGELA MAGALY (2019), en su tesis titulada "MICROSCOPIA OPTICA CON EL CRITERIO GRADO DE LIBERACION COMO UNA

HERRAMIENTA IMPORTANTE PARA LA TOMA DE DECISIONES EN PROCESAMIENTO DE MINERALES, MINERA CONSTANCIA – HUDBAY", el objetivo: Se basa en mostrar la aplicación de la microscopía óptica con el criterio grado de liberación como una herramienta importante para la toma de decisiones en las diversas etapas del procesamiento de minerales, destacando la importancia de la luz reflejada en la observación de materiales opacos. Además, se busca generar nuevas alternativas de investigación en la metalurgia del procesamiento de minerales. A nivel específico, se pretende presentar diversos ejemplos de aplicación práctica en casos reales y desarrollar un esquema de estudio de microscopía óptica que sea aplicado con mejor ventaja para la optimización del proceso de flotación.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Microscopia óptica

La microscopía óptica es una técnica fundamental en la identificación de minerales, proporcionando una visión detallada sobre la composición, la textura y la estructura de los minerales y las rocas a nivel microscópico.

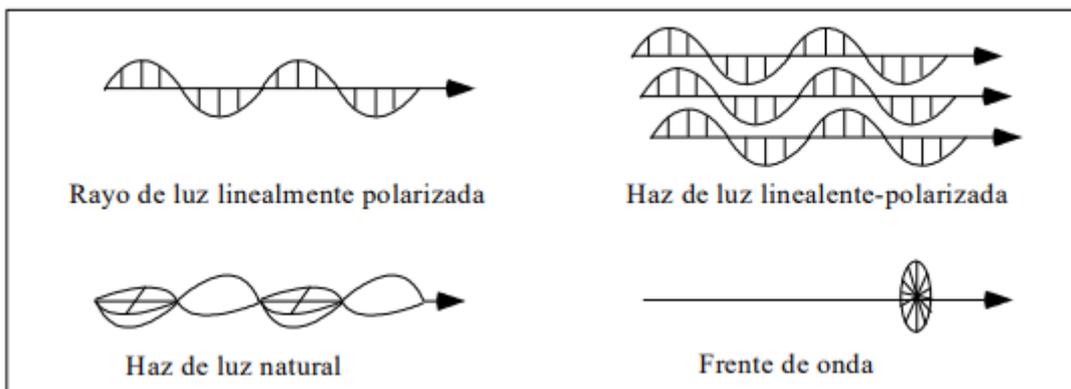
En la práctica, se preparan secciones delgadas o pulidas de muestras minerales, las cuales son montadas en portaobjetos y observadas bajo el microscopio óptico. Mediante el uso de técnicas como la luz transmitida y la luz reflejada, se pueden obtener imágenes con diferentes contrastes y resoluciones, permitiendo una caracterización detallada de los minerales presentes en la muestra [7, 8, 9, 19].

2.2.2. Naturaleza de la luz

2.2.2.1. Luz natural y luz polarizada luz blanca y luz monocromática

La luz natural se compone de una amplia gama de rayos que oscilan en múltiples planos en el espacio, en contraste con la luz polarizada, que se caracteriza por vibrar únicamente en planos específicos, ya sea de forma paralela o helicoidal. Tanto la luz blanca (ya sea natural o polarizada) como la monocromática (también natural o polarizada) consisten en una combinación u ondas con diversas longitudes de onda que el ojo humano no puede separar, por lo tanto, percibe una luminosidad sin una tonalidad definida. Por otro lado, la luz monocromática se compone de ondas con la misma longitud, lo que lleva al ojo humano a percibir una luminosidad con una tonalidad específica [9, 13, 14, 19].

Figura 1. Representación de la luz linealmente polarizada, monocromática y blanca.



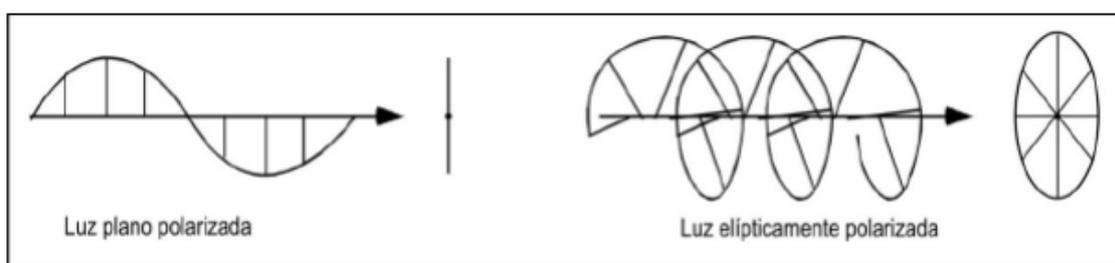
Fuente. Carretero León y Pozo Rodríguez (2007)

2.2.2.2. Polarización

La luz natural se caracteriza por tener radiación que vibra en todos los planos perpendiculares a su trayectoria, mientras que la luz polarizada se refiere a aquella cuyas vibraciones están limitadas a direcciones específicas en el espacio. La polarización puede ser lineal, circular o elíptica, cada una con sus características distintivas. En el caso de la polarización lineal, los fotones se desplazan vibrando perpendicularmente a la trayectoria y formando una onda en un plano determinado. Por otro lado, en la polarización elíptica, los fotones avanzan describiendo una hélice alrededor de la trayectoria. La polarización circular se considera un caso particular de la elíptica [7, 19].

Los materiales que transforman la luz blanca en luz linealmente polarizada reciben el nombre de polarizadores. La luz que atraviesa estos polarizadores vibra en paralelo a una dirección específica, conocida como la dirección privilegiada del polarizador [7, 19].

Figura 2. Representación de luz linealmente polarizada y elípticamente polarizada

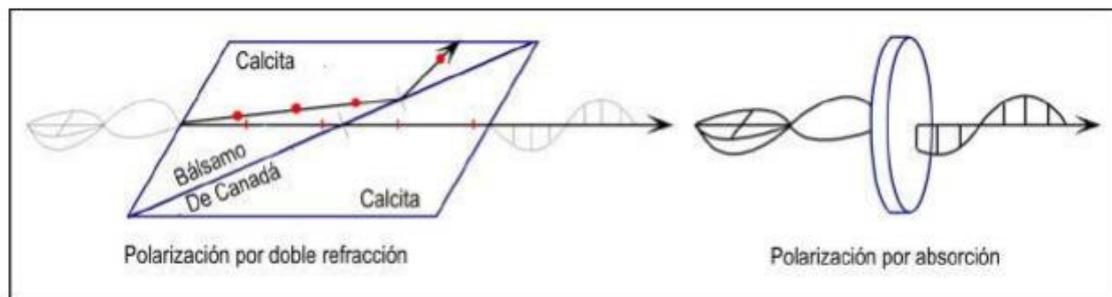


Fuente. Carretero León y Pozo Rodríguez (2007)

La luz linealmente polarizada se puede obtener principalmente a través de dos métodos: la doble refracción y la absorción. En el método de doble refracción, un haz de luz natural atraviesa un cristal de calcita, donde se descompone en dos rayos linealmente polarizados. Uno de estos rayos sigue su trayectoria original, mientras que el otro cambia de dirección y se pierde al reflejarse en una capa de bálsamo. El rayo que atraviesa el bálsamo emerge del cristal como luz linealmente polarizada. En el método de absorción, un haz de luz blanca incide en un "enrejado paralelo muy fino", permitiendo que solo pasen los rayos que vibran en la misma dirección que el enrejado. Este tipo de polarizadores incluye cristales de turmalina, láminas polaroid y cristales orgánicos en acetato [9].

Aunque los polarizadores de calcita son los de mejor calidad, los más comunes en microscopía son los de absorción de origen orgánico, a pesar de su tendencia a despolarizarse con el tiempo o en condiciones inadecuadas [9].

Figura 3. Métodos para obtener luz linealmente polarizada

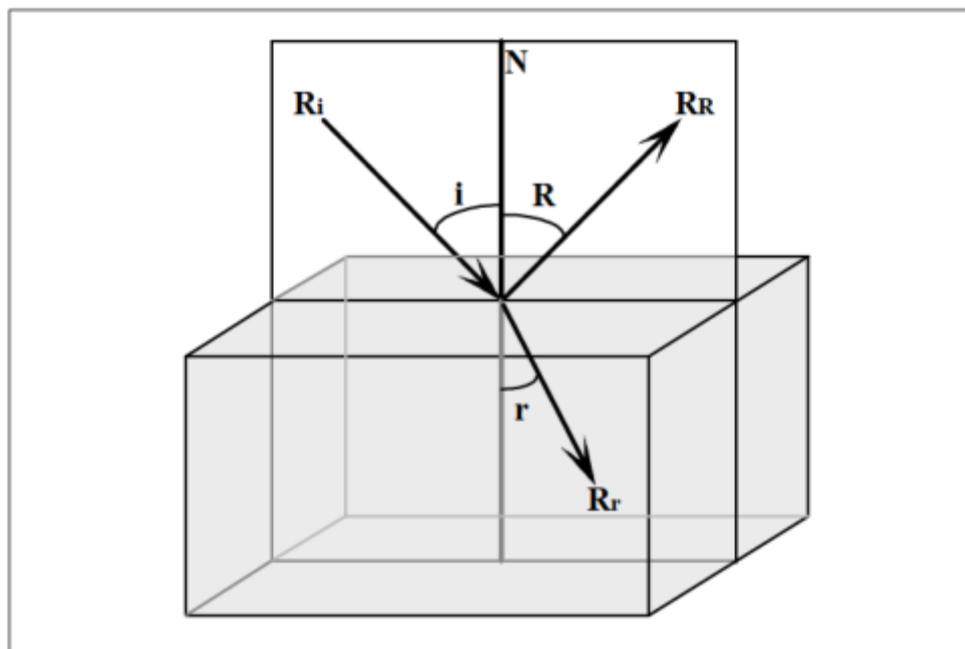


Fuente. Ingemmet (2010)

2.2.2.3. Refracción y reflexión

La refracción ocurre cuando un rayo de luz cambia de dirección al pasar de un medio a otro de manera oblicua, mientras que la reflexión sucede cuando un rayo de luz modifica su trayectoria al incidir en una superficie entre dos medios sin atravesarla. Los rayos incidente, reflejado y refractado se encuentran en el mismo plano, con los ángulos de incidencia (i), reflexión (R) y refracción (r) definidos respecto a la normal a la interfaz entre los medios. El ángulo de reflexión (R) es igual al de incidencia (i), mientras que el ángulo de refracción depende de la diferencia entre los índices de refracción de los medios implicados [8, 13, 9].

Figura 4. Angulo de incidencia(i), de reflexión(I) y de refracción



Fuente. Ingemmet (2010)

2.2.3 Cuerpos transparentes, translúcidos y opacos

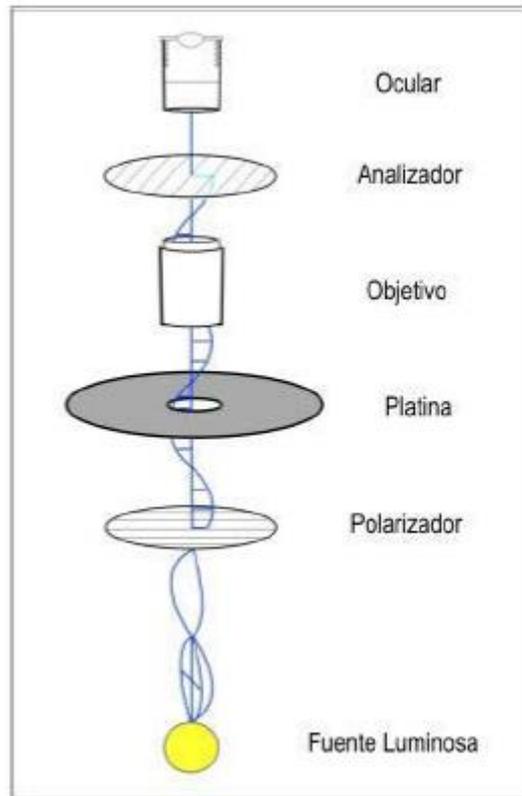
En mineralogía microscópica, se clasifican los cuerpos en transparentes, translúcidos y opacos según su capacidad para permitir el paso de la luz. Los transparentes y translúcidos dejan pasar la luz con un espesor de $30\ \mu\text{m}$, con un bajo coeficiente de absorción ($k < 10^4$ para transparentes y $k \approx 10^4$ para translúcidos), un índice de refracción bajo (n entre 1,4 y 2,4) y una baja reflectancia ($< 17\%$). En el estudio microscópico de estos minerales, el índice de refracción es crucial, mientras que la reflectancia no es relevante. Los minerales u objetos opacos, que no permiten el paso de la luz con un espesor de $30\ \mu\text{m}$, tienen una alta absorción (k entre 10^{-4} y 10^{-1}), un índice de refracción generalmente superior a 2,4 y una reflectancia alta. En el análisis microscópico de minerales opacos, la reflectancia es una propiedad crucial [13, 21, 22].

2.2.4 Microscopio de polarización

El microscopio de polarización es un tipo de microscopio compuesto que incluye dos polarizadores y una platina giratoria. El primer polarizador se coloca antes de la muestra para estudiar los objetos con luz linealmente polarizada. La platina giratoria permite cambiar la orientación de la muestra, lo que afecta la dirección de la luz polarizada que incide en ella. El segundo polarizador, ubicado entre la muestra y el ocular, permite analizar si el mineral puede

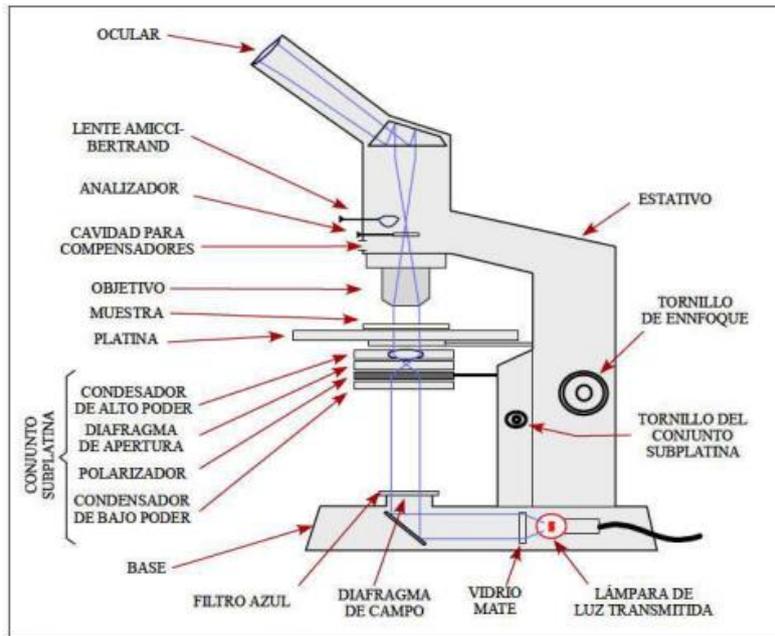
cambiar la dirección de la luz polarizada incidente. Estos microscopios pueden utilizar tanto luz transmitida para minerales transparentes como luz reflejada para minerales opacos. Los que solo tienen luz transmitida se llaman microscopios petrográficos [7, 9, 19].

Figura 5. Esquema del microscopio de polarización



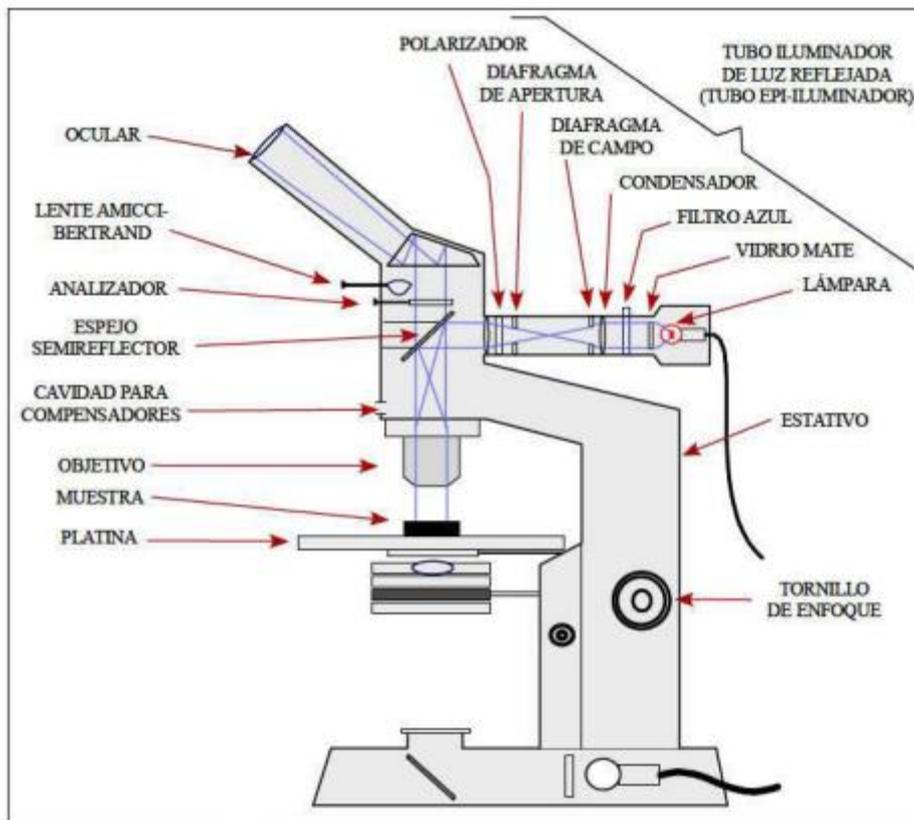
Fuente. Patzelt, (1974)

Figura 6. Microscopio de polarización de luz transmitida



Fuente. Patzelt (1974)

Figura 7. Microscopio de polarización de luz reflejada



Fuente. Patzelt (1974)

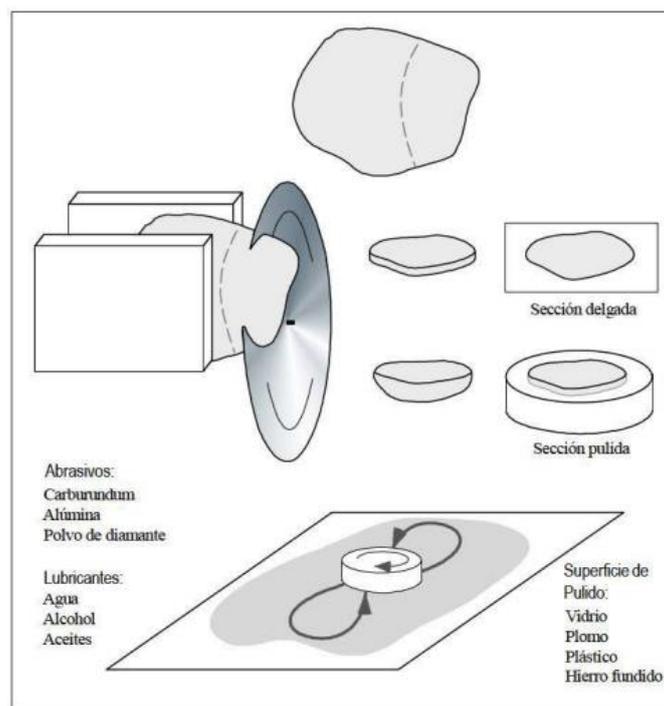
2.2.5 Preparación de la muestra (secciones delgadas y pulidas)

La preparación de una muestra para su observación en un microscopio de polarización comienza con la selección cuidadosa de la zona de estudio, que puede ser una venilla, una capa o la matriz principal de la roca. Para los minerales transparentes, se confecciona una sección delgada, mientras que para los minerales opacos se prepara una sección pulida.

Si la muestra presenta fragilidad, se recomienda su impregnación con resina o bálsamo de Canadá en condiciones de vacío, con el fin de mejorar su cohesión. Luego, se procede a cortar la porción seleccionada. En el caso de las secciones delgadas, se realizan dos cortes paralelos separados por aproximadamente 1 mm, se pule una de las superficies y se adhiere al portaobjetos. Para las secciones pulidas, el fragmento cortado se engasta en una briqueta de resina epoxi o material similar [9, 12, 17, 18].

A continuación, se lleva a cabo el desgaste de las muestras utilizando abrasivos progresivamente más finos, comenzando con carborundum y continuando con alúmina o polvo de diamante, de modo que se eliminen las imperfecciones generadas por los abrasivos previos. En las secciones delgadas, se busca alcanzar un espesor final de 30 μm , el cual se comprueba observando la coloración del cuarzo bajo luz polarizada entre nicoles cruzados. Finalmente, la sección delgada se cubre con una lámina cubreobjetos para su protección y observación adecuada [9, 12, 17, 18].

Figura 8. Microscopio de polarización de luz reflejada

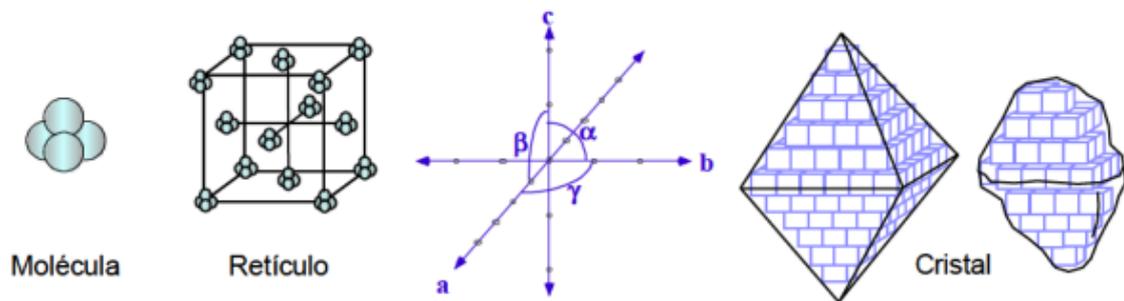


Fuente. Pozo Rodríguez, et al. (2004)

2.2.6 Generalidades de los minerales

Los minerales son sólidos naturales e inorgánicos con una composición química definida y propiedades físico-químicas consistentes, además de una estructura interna única; estos se forman mediante la disposición tridimensional repetida de elementos, siguiendo las clases de simetría de los sistemas cristalinos. Esto da lugar a una estructura interna específica que puede manifestarse en formas externas variables, dependiendo del entorno de formación [1, 2, 5, 9].

Figura 9. Desarrollo tridimensional de los minerales.

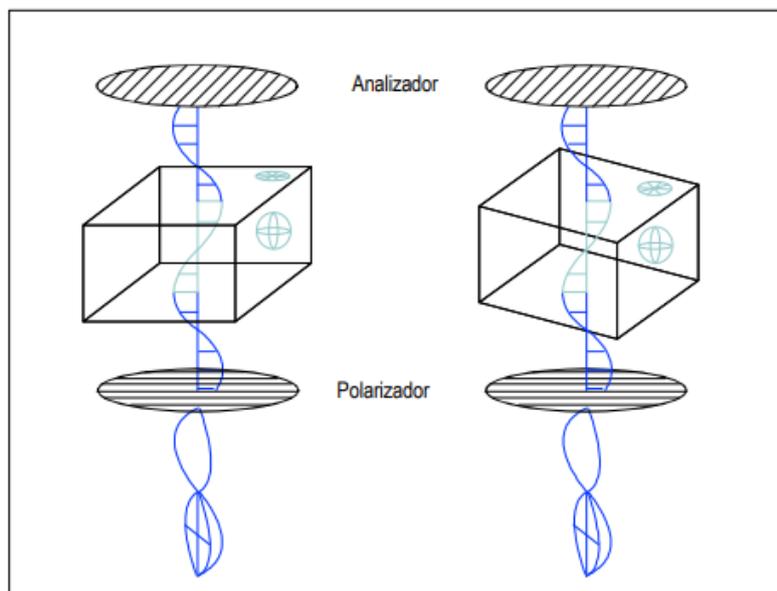


Fuente. Ingemet (2010)

2.2.6.1 Minerales isótropos

En los minerales isótropos, como los del sistema cúbico o las sustancias amorfas, cualquier corte producirá secciones con índices de refracción iguales en todas las direcciones. Por lo tanto, independientemente de la orientación del corte, se obtendrá una sección circular. La luz linealmente polarizada que atraviesa estos minerales no cambiará su dirección de vibración y, por lo tanto, no podrá pasar a través del analizador, que tiene una dirección privilegiada perpendicular a la dirección de vibración de la luz. Como resultado, los minerales isótropos siempre se verán en extinción entre nicoles cruzados [1, 2, 3, 5, 9].

Figura 10. Desarrollo de un mineral isótropo puesto en nicóles cruzados y luz transmitida.



Fuente. Ingemmet (2010)

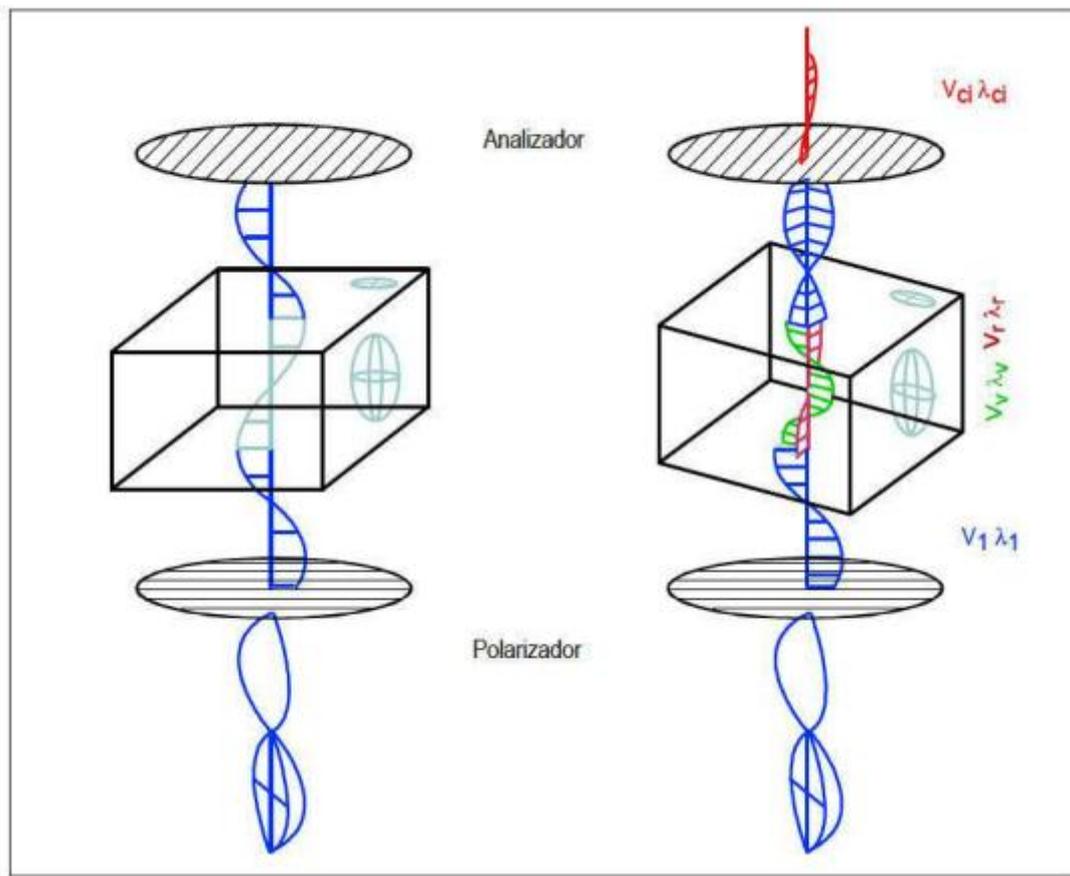
2.2.6.2 Minerales anisótropos

En minerales anisótropos, los cortes basales resultan en secciones circulares, donde el comportamiento de la luz polarizada es similar al de los minerales isótropos. Sin embargo, en otros cortes, las secciones muestran dos índices de refracción diferentes dispuestos en direcciones perpendiculares entre sí, conocidas como direcciones privilegiadas del mineral [1, 2, 9].

Cuando la dirección de vibración del rayo polarizado coincide con una de estas direcciones privilegiadas, el mineral se ve en extinción entre nicóles cruzados. Al girar la platina, el rayo polarizado se divide en dos, vibrando en las direcciones privilegiadas con diferentes velocidades y longitudes de onda. Al salir del mineral, estos rayos se desfazan, pero se vuelven a sincronizar al interferir, permitiendo que la luz pase a través del analizador y se vea al mineral entre nicóles cruzados (colores de interferencia) [1, 2, 9].

Así, de un mismo mineral se pueden obtener secciones con distintas características según el corte, similar a cómo una roca muestra diversos cristales en su sección: los cristales de corte circular se ven permanentemente en extinción, los de corte vertical muestran máxima anisotropía, y los de cortes intermedios exhiben anisotropías intermedias [1, 2, 9].

Figura 11. Desarrollo de un mineral anisótropo puesto en nicoles cruzados y luz transmitida



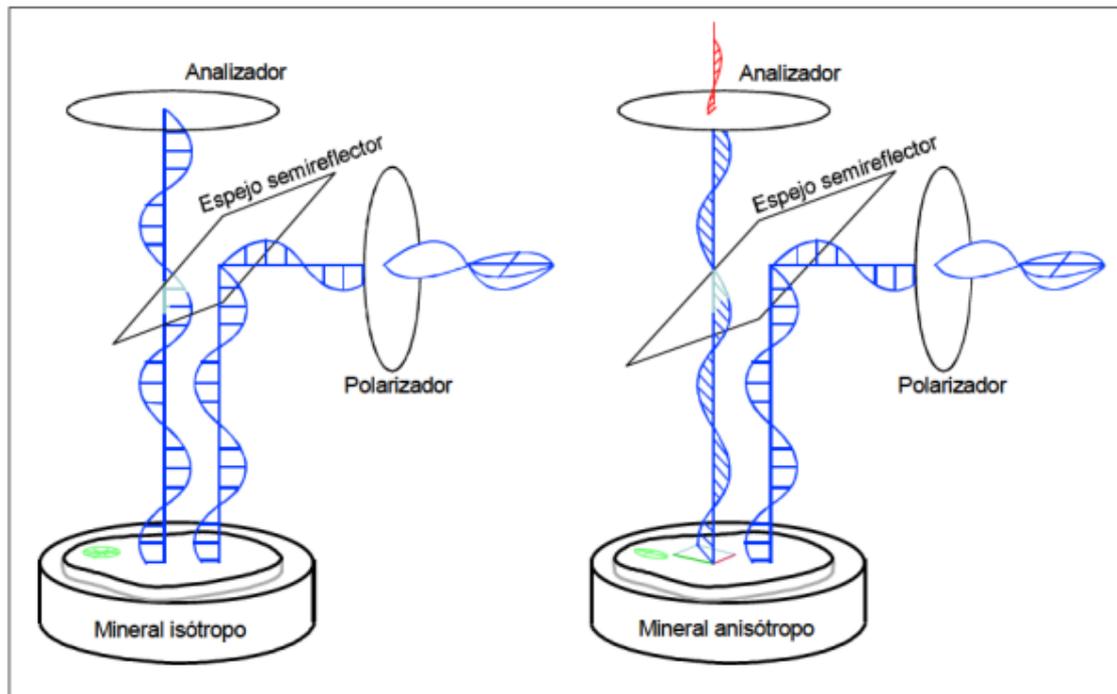
Fuente. Ingemmet (2010)

2.2.6.3 Luz linealmente polarizada reflejada en minerales opacos

En minerales opacos, los rayos de luz polarizada se reflejan en superficies pulidas de manera similar a los minerales transparentes. Para minerales opacos isótropos, la dirección de vibración de la luz no cambia, por lo que se ven permanentemente en extinción entre nicoles cruzados.

En cambio, en minerales opacos anisótropos, los rayos de luz polarizada se reflejan con cambios en la dirección de vibración, permitiendo verlos entre nicoles cruzados [7, 13, 19, 21].

Figura 12. Luz linealmente polarizada reflejada sobre una sección de un mineral opaco.



Fuente. Ingemmet (2010)

2.2.7 Propiedades que se estudian con el microscopio de polarización en minerales

El análisis de minerales utilizando el microscopio de polarización difiere significativamente del estudio macroscópico. Algunas propiedades, como el color, pueden variar cuando se observan bajo el microscopio de polarización, mientras que otras, como el relieve, solo pueden ser identificadas con este equipo [7, 9, 19, 22].

Tabla 1. Propiedades mineralógicas que se estudian en el microscopio de polarización.

Tipo de Iluminación	Tipo de Nicol	Tipo de Propiedades	Luz Transmitida	Luz Reflejada
Luz ortoscópica	Nicoles cruzados	Estructurales	Macías Zonamiento	Macías zonamiento
		Ópticas	Anisotropía Color de Interferencia Birrefringencia Extinción Flongación	Anisotropía Reflexiones Internas

	Nicoles paralelos	Estructurales	Clivaje Morfología Tamaño	Clivaje Morfología Tamaño Dureza relativa
		Ópticas	Color Pleocroísmo Relieve	Color Pleocroísmo Reflectancia
Luz Conoscópica	Nicoles cruzados	Ópticas	Carácter óptico Signo óptico Ángulo 2V	(Carácter óptico*) (Signo óptico*)

Fuente. Ingemmet (2020)

2.2.8 Estudio con iluminación ortoscópica transmitida

Con la luz ortoscópica transmitida y los nicoles paralelos se analizan el color, el pleocroísmo, el relieve, el tamaño, la forma y el clivaje [8, 9].

2.2.8.1 Estudio con nicoles paralelos

2.2.8.1.1 Color

En lámina delgada, el color de una mineral muestra menos variaciones que en observaciones macroscópicas debido al mínimo efecto de las impurezas con un espesor de 30 μm . La descripción del color considera el tono principal, la intensidad y la tonalidad. Algunos ejemplos de colores de minerales en sección delgada incluyen incoloro para minerales como cuarzo, feldespato y fluorita; rojizo para almandina y rutilo; y verdoso para minerales como clorita y olivino [9, 13, 14].

2.2.8.1.2 Pleocroísmo

El pleocroísmo se refiere a la capacidad de ciertos minerales para exhibir distintos colores, intensidades o tonalidades cuando la luz los atraviesa en diferentes direcciones. Es importante destacar que el grado de pleocroísmo varía según el grosor de la muestra, siendo significativamente diferente entre secciones delgadas de 30 μm y muestras gruesas. Dependiendo de la magnitud del cambio de color, podemos clasificar el pleocroísmo como fuerte [9, 13, 14].

2.2.8.1.3 Determinación del índice de refracción

Los principales métodos para determinar el índice de refracción de un mineral son: la observación del relieve, la línea brillante y la iluminación oblicua, junto con el uso del refractómetro. Estos métodos se basan en la comparación del índice de refracción del mineral con el del medio circundante, que puede ser otro mineral, bálsamo de Canadá o aceite [9, 14].

El relieve es una propiedad óptica que hace que los granos de minerales con un índice de refracción mayor parezcan más altos que los de índice menor. La línea brillante, o línea de Becke, se forma al desenfocar el mineral y se intensifica cuando hay una marcada diferencia de índices de refracción entre el mineral y el medio circundante. En contraste, el método de la sombra o iluminación oblicua consiste en observar cómo se oscurece el grano mineral al interrumpir parte de la luz incidente [9, 18].

Estos métodos se pueden aplicar en secciones delgadas convencionales o en preparados especiales de granos sueltos inmersos en aceite de índice de refracción conocido, que permiten una determinación más precisa del índice de refracción. Además, existen refractómetros, como el de Pulfrich, que son instrumentos utilizados para medir el índice de refracción de materiales sólidos y líquidos, y son especialmente útiles en el estudio de gemas [9, 14].

2.2.8.1.4. Tamaño

Para medir el tamaño de los cristales en un microscopio, es necesario calibrar previamente las unidades del ocular. Esto se logra comparando estas unidades con las de un objeto micrométrico para cada objetivo. Una vez que conocemos el valor de las unidades del ocular, podemos medir el tamaño de los minerales. Para determinar el espesor de los granos, primero debemos conocer la cantidad de micrómetros que se desplazan verticalmente en la platina al girar una unidad del tornillo de enfoque, que es aproximadamente 2 μm . Luego, al pasar de la posición de enfoque de la superficie superior a la de la superficie inferior del grano, observamos cuántas unidades del tornillo se han girado [9, 18].

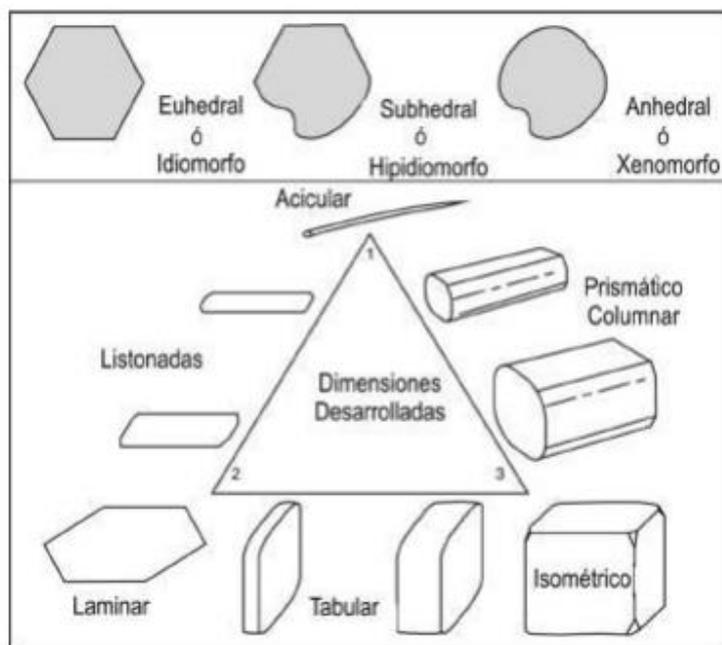
2.2.8.1.5 Forma

Los cristales pueden clasificarse según sus formas externas como euhedrales, subhedrales o anhedrales. Los euhedrales muestran formas geométricas definidas, los subhedrales solo parcialmente, y los anhedrales no muestran ninguna forma externa. La forma de los cristales está influenciada por las condiciones del entorno en el que se forman y no es una característica distintiva del mineral en sí. Los cristales pueden presentar diferentes hábitos, como aciculares,

listonados, laminares, tabulares, columnares o isométricos, dependiendo de su desarrollo preferencial en una, dos o tres dimensiones [9, 14].

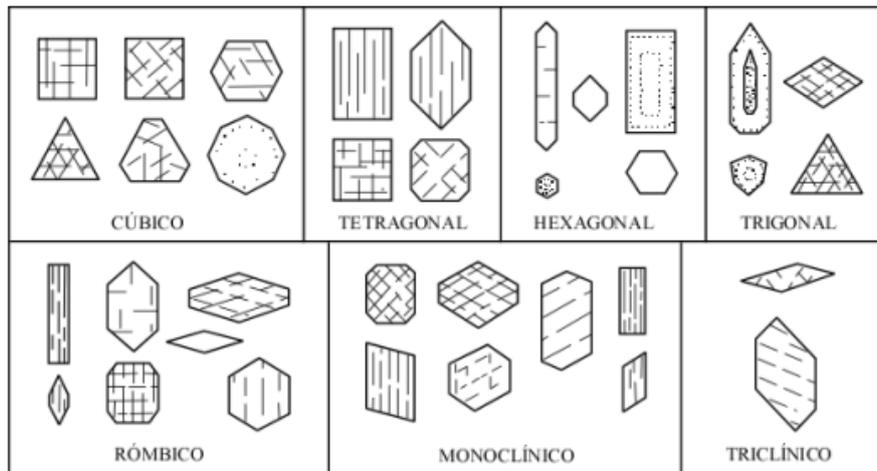
En las secciones delgadas, se visualizan proyecciones bidimensionales de las estructuras tridimensionales de los cristales. Al examinar distintos granos del mismo mineral, es posible inferir su configuración tridimensional. Las formas bidimensionales de los diferentes sistemas cristalinos se muestran en la segunda imagen [9, 18].

Figura 13. Forma de cristales según el desarrollo de las caras y forma según el número de dimensiones preferentemente desarrolladas



Fuente. Pozo Rodríguez et al. (2004)

Figura 14. Formas bidimensionales propias de los diferentes sistemas cristalinos.

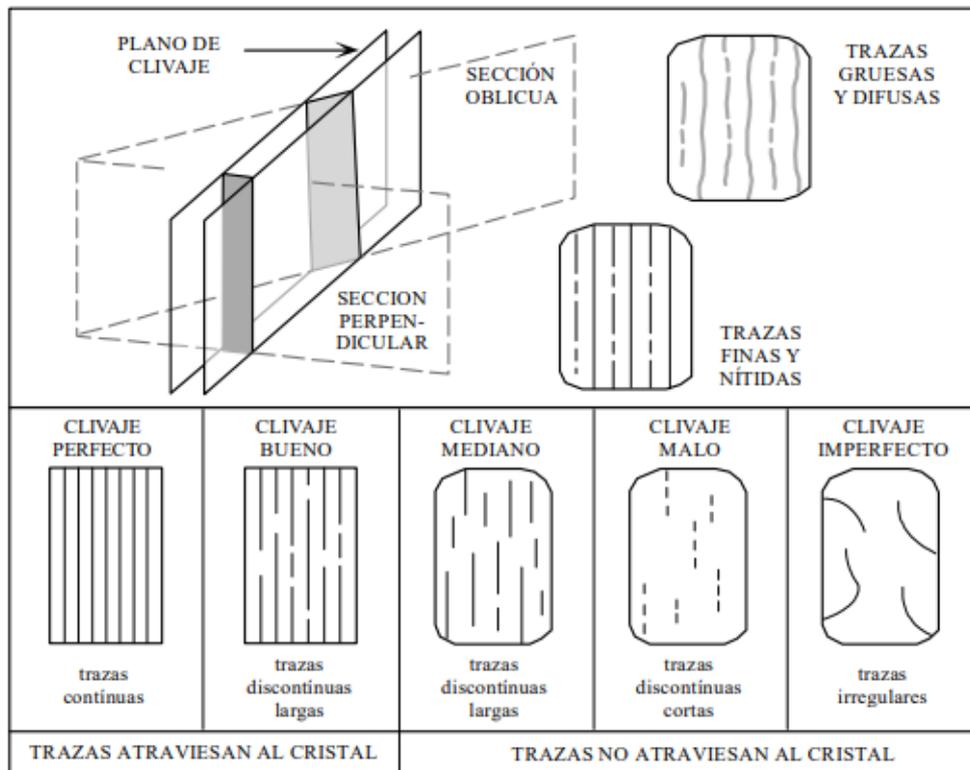


Fuente. Carretero León y Pozo Rodríguez (2007)

2.2.8.1.6 Clivaje

La calidad del clivaje puede ser evaluada en diferentes niveles: perfecto, bueno, mediano, malo, imperfecto o ausente. Para estudiar esta propiedad, es importante especificar tanto la calidad como las direcciones del clivaje. Es recomendable buscar cortes que sean perpendiculares al plano de clivaje, lo que significa que deben tener trazas de clivaje nítidas y finas [13, 14].

Figura 15. Nitidez de las trazas de clivaje y tipos de clivaje.



Fuente. Ingemmet (2010)

2.2.8.2 Estudio con nícoles cruzados.

Al utilizar el analizador en el microscopio con nícoles cruzados, se pueden identificar las orientaciones de los índices de refracción del mineral en la sección delgada. Esto también permite determinar el índice de refracción más alto y el más bajo, así como la diferencia entre ellos, conocida como birrefringencia. Esto lo logramos al estudiar propiedades como la extinción, los colores de interferencia, la birrefringencia y la elongación. Luego, toda esta información cristalográfica y óptica se presenta en un diagrama de orientación. A continuación, analizaremos cada una de estas propiedades en detalle [13, 14].

2.2.8.2.1 Anisotropía

La anisotropía se refiere a la capacidad de ciertos minerales de permitir el paso de luz entre nícoles cruzados. Estos minerales, conocidos como anisótropos, muestran esta propiedad en cortes que no son circulares. Sin embargo, en cortes circulares, los minerales anisótropos no permiten el paso de luz entre nícoles cruzados, y su anisotropía se verifica utilizando luz conosópica [7, 13, 19].

2.2.8.2.2 Extinción

Cuando las direcciones privilegiadas del mineral coinciden con las del microscopio, el rayo de luz polarizada no cambia su vibración al atravesar el mineral, lo que resulta en ausencia de luz a través del analizador, conocida como posición de extinción. Esta posición se repite cada 90 grados [13, 19].

Para cristales con formas externas bien definidas, se puede relacionar la dirección de los índices de refracción con las formas cristalinas. La extinción puede ser paralela u oblicua dependiendo del ángulo entre la dirección de un índice y un eje cristalográfico, o simétrica si coincide con planos de simetría. En casos de minerales anhedrales sin clivaje, la extinción no puede ser calificada [13, 19].

La extinción ondulante es un tipo especial donde la oscuridad en la superficie del grano cambia de manera ondulada al girar la platina, causada por deformaciones estructurales, común en cuarzos metamórficos [13].

La extinción es una propiedad diagnóstica importante para muchos minerales, y en algunos, como las plagioclasas, anfíboles y piroxenos, el ángulo de extinción puede ayudar a identificar la composición en series isomórficas [13, 19].

2.2.8.2.3 Color de interferencia

El color de interferencia es una propiedad clave que no solo ayuda en el diagnóstico mineral, sino que también revela la birrefringencia y facilita el cálculo del grosor de la muestra.

En minerales intensamente coloreados, como la biotita oscura, el color natural del mineral puede ocultar el color de interferencia, dificultando su identificación.

Si el grano mineral no tiene un grosor uniforme, lo que es común durante la preparación de secciones delgadas donde hay desgaste irregular, es posible observar una variación de colores de interferencia, indicando diferentes espesores, similar a "curvas de nivel" [14, 19].

2.2.8.2.4 Birrefringencia

La birrefringencia se define como la diferencia entre los índices de refracción más alto y más bajo de un mineral. En términos de una sección de corte, la birrefringencia se calcula como la variación entre los índices presentes en ese corte específico [13, 14].

2.2.8.2.5 Maclas

La macla se refiere a la disposición ordenada de dos o más cristales del mismo mineral, cada uno con una orientación distinta, siguiendo una ley de simetría específica, que puede implicar un plano, un eje o un centro de macla [14, 18].

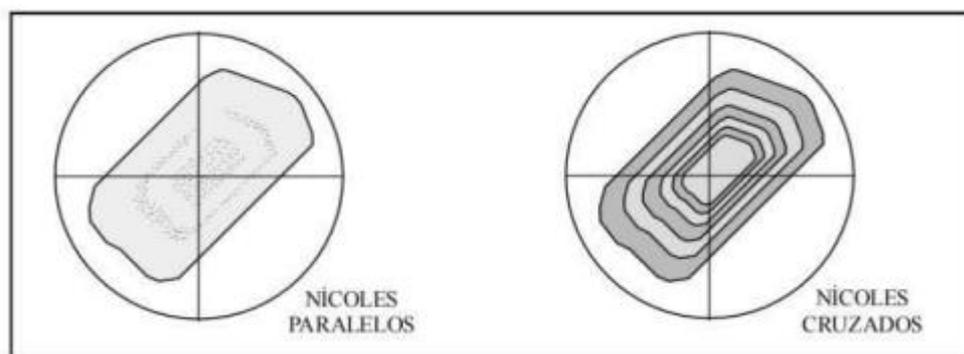
2.2.8.2.6 Desmaclas

Las desmezclas, también conocidas como exsoluciones, se refieren a la separación de un mineral de otro debido a que este último ya no es estable. Estas desmezclas pueden adoptar formas como discos, husos o láminas, variando en tamaño y frecuencia [14, 18].

2.2.8.2.7 Zonamiento

El análisis del zonamiento revela la progresión en el crecimiento del cristal. Se disponen dispositivos que identifican la composición elemental, tanto mayoritaria como de trazas, en cada segmento del cristal [14, 18].

Figura 16. Zonamiento de plagioclasa



Fuente. Vaughan (1990)

2.2.8.2.8 Inclusiones

Las inclusiones son elementos foráneos, como minerales, vidrio o fluidos, atrapados dentro de un cristal durante su formación. La naturaleza y disposición de estas inclusiones en el cristal pueden ofrecer pistas importantes para interpretaciones geológicas. Por ejemplo, en el caso de inclusiones fluidas, que contienen tanto gas como líquido, la medición de la temperatura a la que estos componentes se homogenizan proporciona información sobre la temperatura de formación de la roca [2, 14, 18].

2.2.8.2.9 Alteraciones

Los minerales de alteración, también llamados minerales secundarios, surgen a partir de la descomposición de minerales previos. Este proceso de alteración comienza típicamente en los bordes o en los planos de debilidad de los granos, como el clivaje o las fracturas, y en ocasiones afecta selectivamente áreas específicas [2, 8, 14].

2.2.9 Estudio con iluminación conoscópica

2.2.9.1 Luz conoscópica

La luz conoscópica se define como un conjunto de rayos de luz que convergen [14].

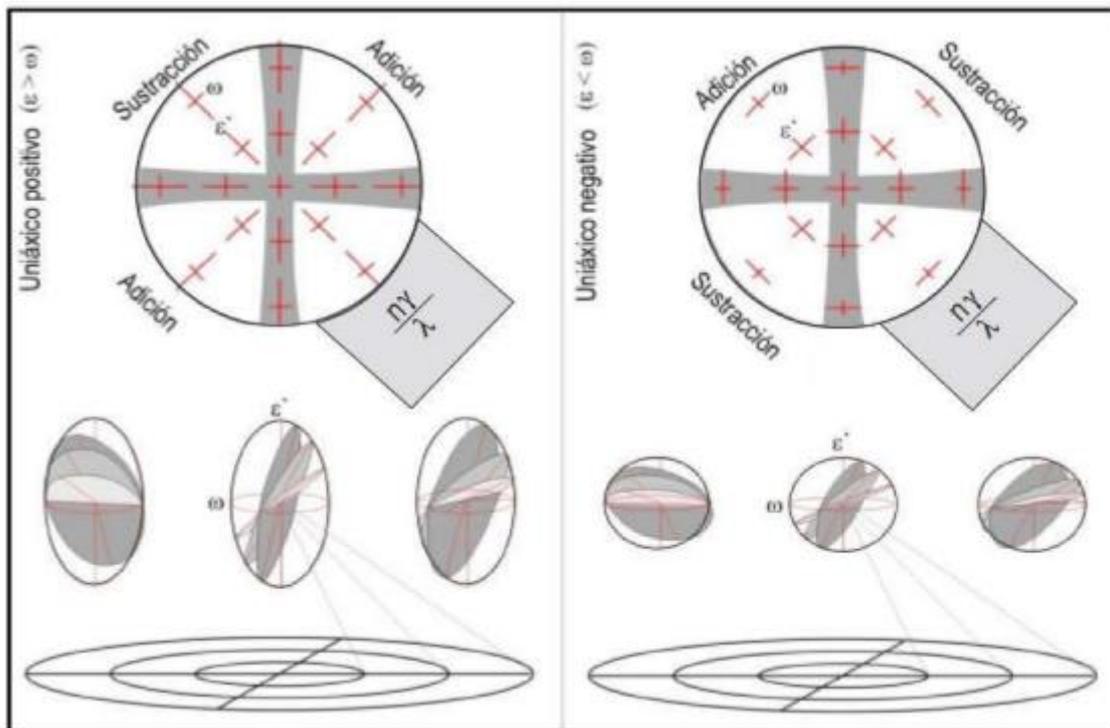
2.2.9.2 La figura de interferencia uniáxica

Para obtener una figura de interferencia uniáxica centrada, es necesario buscar cristales con cortes basales o cercanos a este tipo de corte, los cuales se identifican por permanecer en extinción entre nicoles cruzados. En la figura de interferencia de tales cristales, el índice ordinario se proyectará en verdadera magnitud y con una distribución tangencial a círculos concéntricos, mientras que un

índice intermedio entre el ordinario y el extraordinario será proyectado con distribución radial. Como la indicatriz uniáxica es un elipsoide de revolución, las características de la figura uniáxica centrada no cambian al girar la platina [8, 13, 14].

Al introducir un compensador, se produce interferencia constructiva en los cuadrantes donde el índice mayor del mineral tenga una disposición paralela o subparalela al índice mayor del compensador (NE-SO). En los minerales uniáxicos positivos, esto ocurre en el I y el III cuadrante, mientras que en los uniáxicos negativos, sucede en el II y IV cuadrante. Usando un compensador de yeso, los cuadrantes de adición se muestran azules y los de sustracción, rojo-anaranjado. Con el compensador de mica, las zonas de adición se ven de color blanco grisáceo, y las de sustracción, gris oscuro [8, 13, 14].

Figura 17. Signo de óptico de los minerales uniáxicos



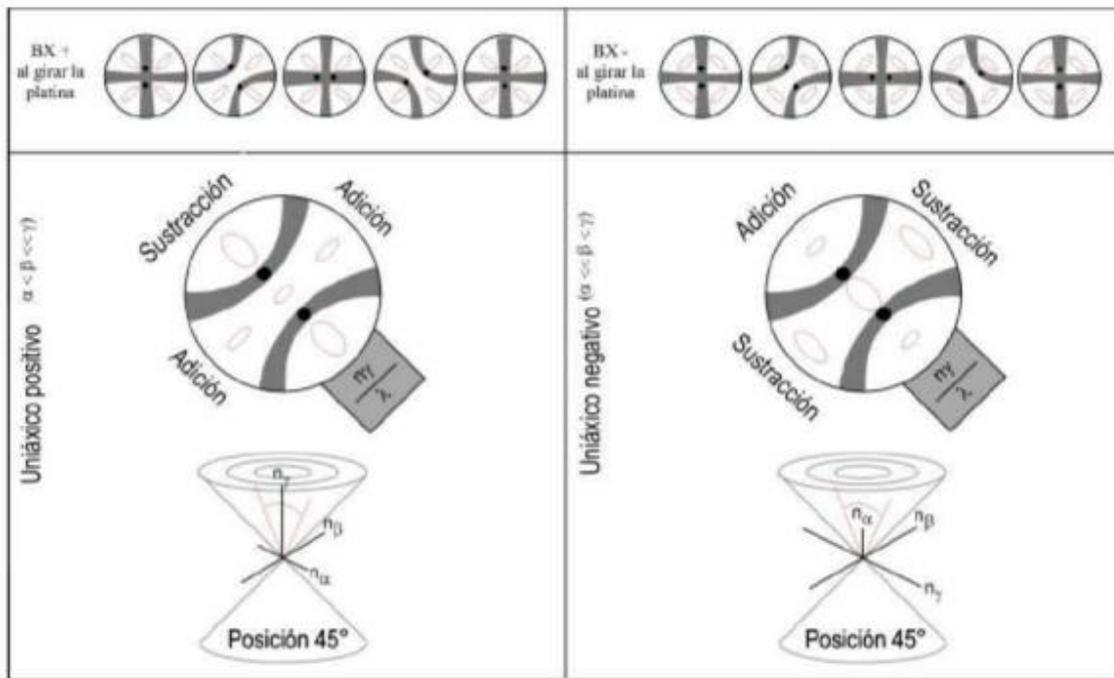
Fuente. Áneps (1971)

2.2.9.3 La figura de interferencia biáxica

La figura biáxica difiere de la uniáxica al girar la platina. En la posición inicial de 0° , se forma una figura similar a la uniáxica, con dos isogiras rectas y perpendiculares. Sin embargo, al girar ligeramente la platina, la cruz se divide en dos arcos, en el I y III cuadrante, o en el II y IV. La distancia entre los melatopos, ubicados en la parte más angosta y nítida de los arcos, y la curvatura

de los arcos alcanza su máximo valor a 45° . Al seguir girando, los melatopos se acercan y la forma de los arcos de las isogiras se vuelve más abierta y rectilínea hasta formar nuevamente una cruz en la posición de 90° (0°). Si se continúa girando la platina en la misma dirección, el ciclo se repite, pero esta vez las isogiras con formas de arco se separan en los otros dos cuadrantes [8, 14].

Figura 18. Determinación del signo óptico de minerales biáxicos

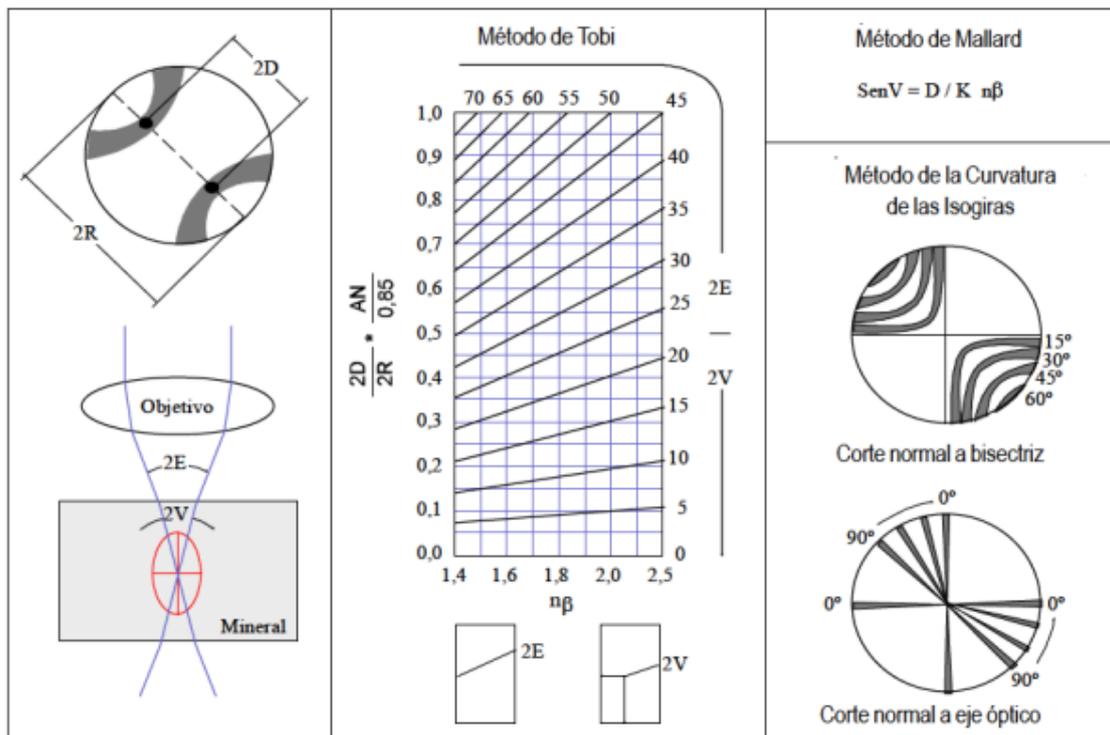


Fuente. Ánopa (1971)

2.2.9.4 Medicion de angulo 2v

Existen varios métodos para estimar el ángulo $2V$ agudo, como los de Mallard, Tobi y la curvatura de las isogiras. En el método de Mallard, se necesita un corte centrado normal a la bisectriz aguda, donde se mide la distancia entre los melatopos en la figura de interferencia a 45° . El método de Tobi implica una figura de interferencia centrada, midiendo la distancia entre los melatopos a 45° . El método de la curvatura de las isogiras se emplea en cortes centrados o perpendiculares al eje óptico [14, 18].

Figura 19. Determinación y métodos para el ángulo $2V$



Fuente. Patzelt (1974)

2.2.10 Estudio con luz reflejada

El uso de la microscopía de luz reflejada para el análisis de minerales opacos es fundamental en el estudio de depósitos de minerales metálicos. Esta técnica no solo permite la identificación de minerales con valor económico, sino que también proporciona información detallada sobre texturas, estructuras, secuencias de formación y procesos de alteración. Estos datos son fundamentales para desarrollar modelos explicativos sobre la formación de los yacimientos y para dirigir procesos metalúrgicos de manera efectiva [8, 13, 9, 14].

2.2.10.1 Sistemas de iluminación vertical

La iluminación de campo claro es la técnica estándar utilizada, donde la luz entra a través del objetivo hacia la muestra, se refleja verticalmente en ella y luego pasa por el objetivo hacia el ocular. Esto se logra mediante accesorios específicos [8, 14].

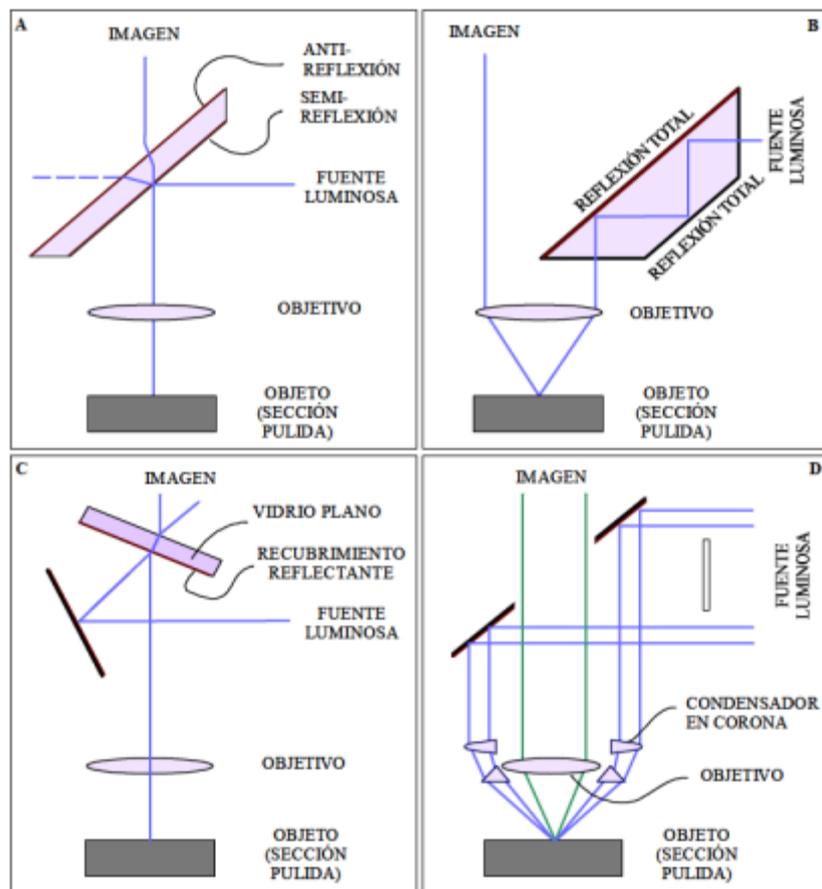
El espejo semirreflector es una lámina que cubre completamente la sección transversal del microscopio. La luz incide perpendicularmente sobre la muestra, lo que produce una imagen plana [8, 14].

El prisma de reflexión total es un prisma triangular de vidrio que abarca la mitad de la sección transversal del tubo.

El prisma triple reflector o prisma de Berek es un prisma de vidrio con forma trapezoidal y un índice de refracción de 1,737, que cubre la mitad del área transversal del tubo del microscopio [8, 14].

El reflector de Smith es un mecanismo algo complejo que desvía los rayos provenientes del iluminador hacia la muestra al reflejarse primero en un espejo y luego incidir en un espejo semirreflector inclinado adecuadamente [8, 14].

Figura 20. Sistemas de iluminación vertical en el microscopio de luz reflejada



Fuente. Ingemmet (2010)

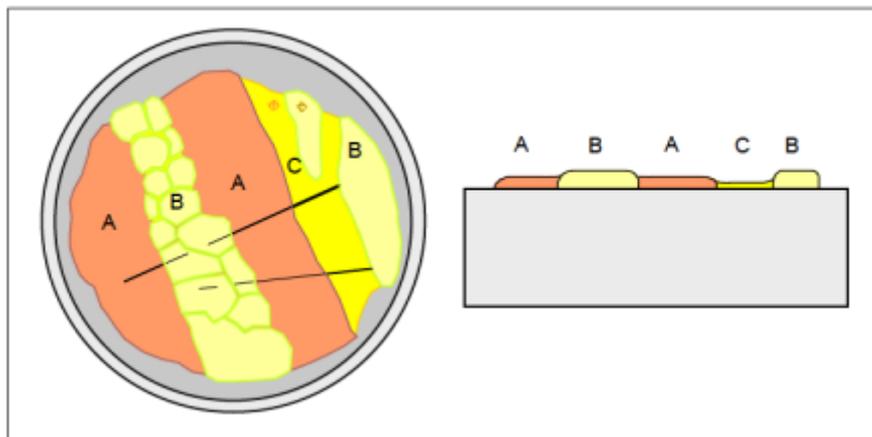
2.2.10.2 Cuidado e instalación de las secciones pulidas

Las secciones pulidas, al ser expuestas, son susceptibles a cambios químicos o físicos, como la oxidación o el rayado, por lo que requieren cuidado especial en su mantenimiento. Para limpiarlas, se recomienda usar papel kleenex seco o ligeramente humedecido con tolueno, xileno o alcohol [9, 12]. Si una muestra está oxidada o muy rayada, se debe pulir nuevamente con alúmina de un tamaño de partícula apropiado para el grado de rayado u oxidación [9, 12, 18].

2.2.10.3 Dureza relativa

La dureza relativa se evalúa de manera cualitativa comparando cómo reaccionan diferentes minerales al pulido, reflejando su resistencia a la abrasión. Los minerales más duros tendrán un relieve más pronunciado que los menos duros. Además, se puede comparar la dureza observando las rayas producidas por las imperfecciones del pulido: en minerales de baja dureza, estas rayas son más marcadas, mientras que en minerales más duros pueden ser tenues, discontinuas o incluso ausentes [8, 14, 18].

Figura 21. Sección pulida vista planta y sección transversal en escala vertical exagerada

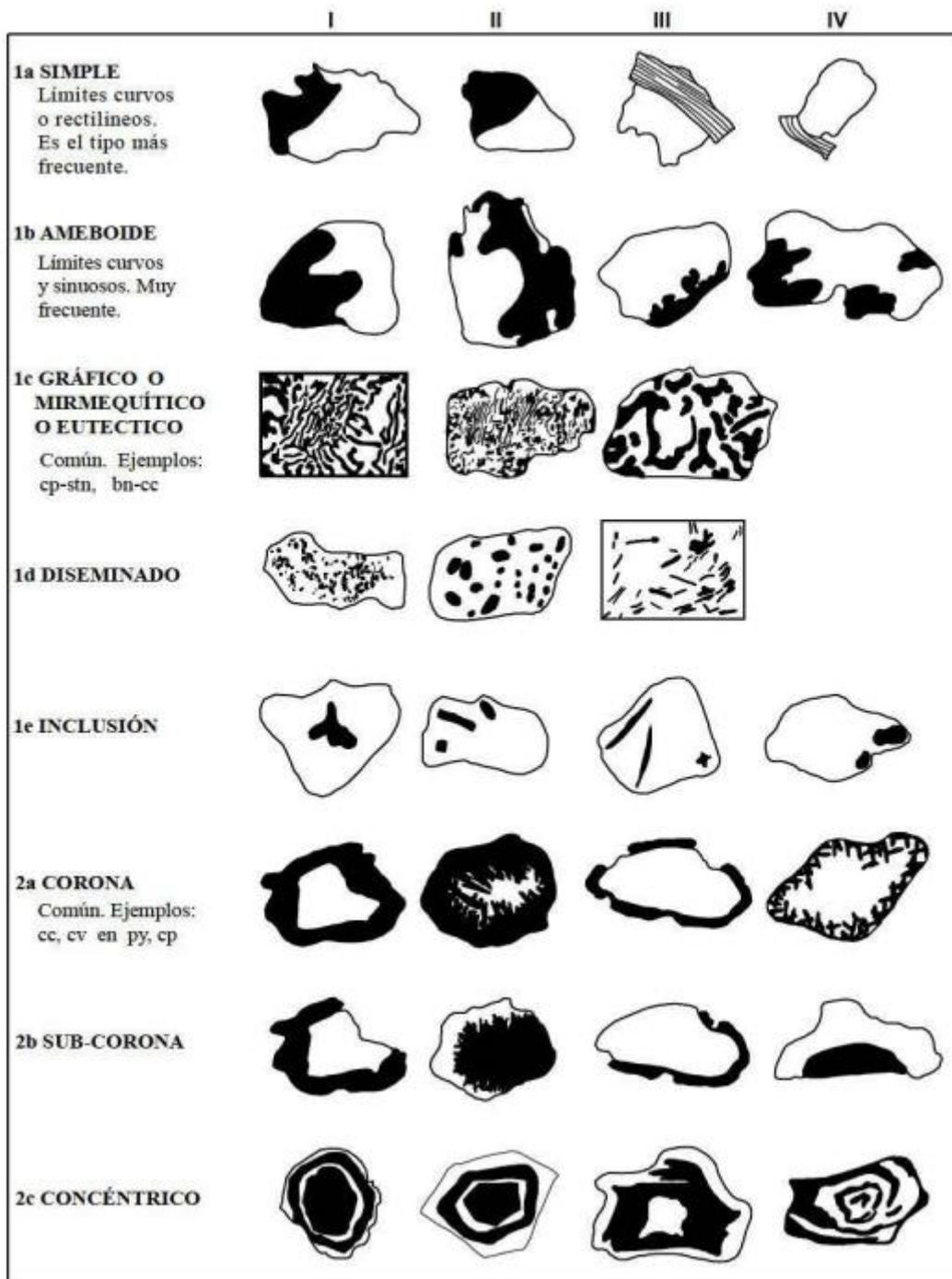


Fuente. Baumann & Leeder (1991)

2.2.10.4 Intercrecimiento

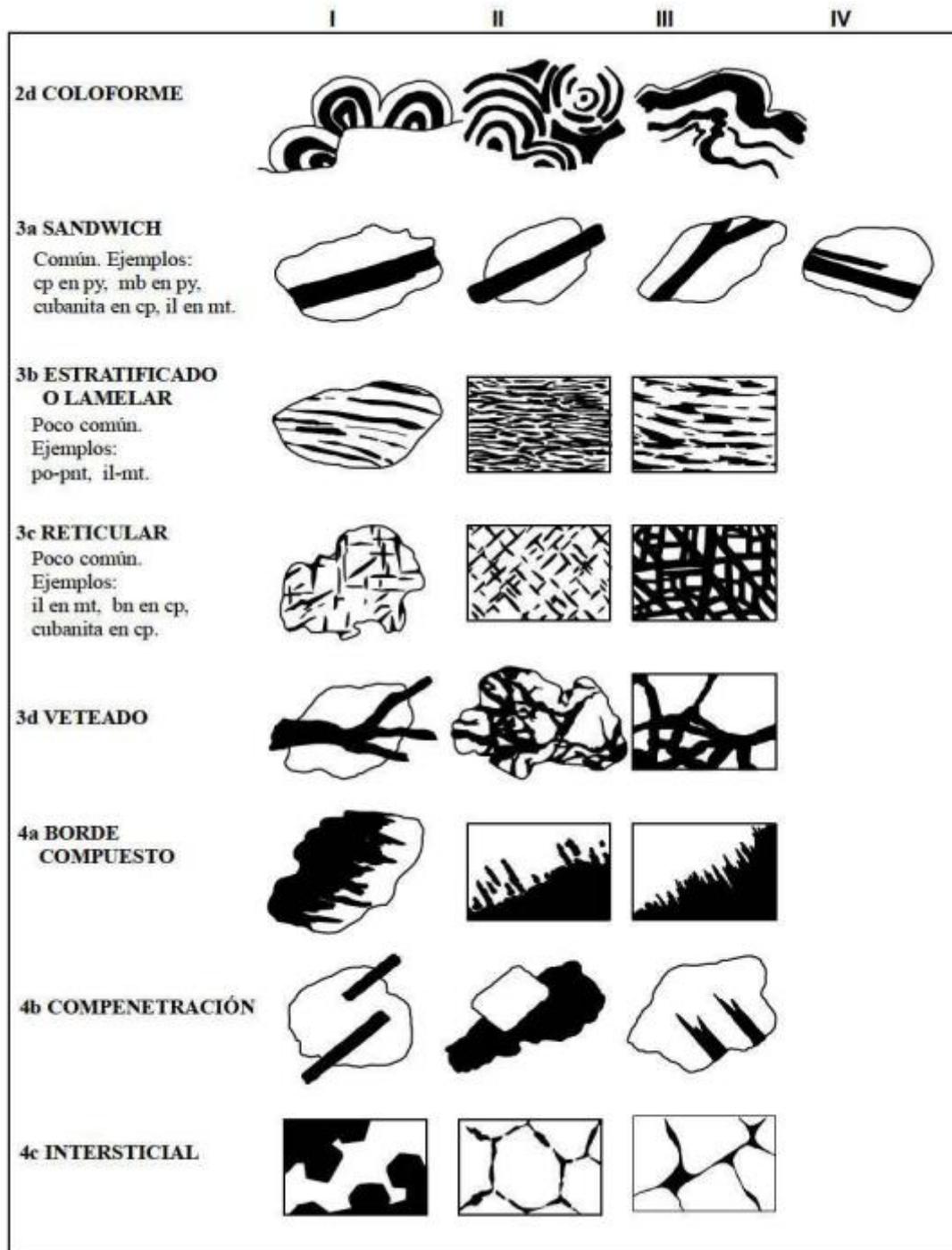
En el análisis de las características geométricas de una roca, se consideran aspectos como tamaño, forma y relaciones entre sus componentes. Para abordar esta complejidad, se emplean términos como estructura, textura, trama e intercrecimiento. La estructura se refiere a la disposición geométrica repetitiva de los componentes, como pliegues o alineaciones, en diferentes escalas. La textura engloba las características geométricas de toda la roca, determinadas por factores como la cristalinidad, granularidad y forma de los cristales, así como sus relaciones mutuas. La trama describe el conjunto de estructuras y texturas de la roca, mientras que el intercrecimiento se centra en la relación espacial entre los minerales de un agregado, siendo la característica más básica de la geometría de una roca [14, 22].

Figura 22. Tipos geométricos de Inter crecimiento entre minerales



Fuente. Canchaya y Cardoso (1977)

Figura 23. Tipos geométricos de Inter crecimiento entre minerales.



Fuente. Canchaya y Cardoso (1977)

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1 Métodos y alcance de la investigación

El método es cualitativo con un alcance exploratorio.

Nivel de investigación

El nivel de investigación es exploratorio.

3.2 Diseño de la investigación

No experimental longitudinal o evolutivo

Se observarán las muestras recolectadas; aplicando el método de microscopía óptica en secciones pulidas y delgadas, así como también la identificación a las rocas del depósito en capas rojas tomadas en el viaje de investigación.

3.3 Población y muestra

Población

La población objeto de estudio corresponde al afloramiento del depósito en capas rojas ubicado en el Cerro Jacrún, distrito San Pedro de Cajas, provincia Tarma, departamento Junín, Perú. Este afloramiento presenta características geológicas únicas asociadas a depósitos de cobre, lo que lo convierte en un área clave para el análisis petromineralógico.

Muestra

Para garantizar que las muestras seleccionadas sean representativas de la población estudiada, se adoptó un enfoque de muestreo aleatorio estratificado considerando la variabilidad geológica observada en el afloramiento. A continuación, se describen los criterios y procedimientos aplicados:

a. Criterios para la selección de muestras:

- **Muestreo aleatorio estratificado:** Se dividió el afloramiento en zonas geológicamente homogéneas (estratos) con base en características visuales, como litología, textura y alteraciones. Dentro de cada zona, las muestras fueron seleccionadas aleatoriamente para garantizar una representación equitativa de toda la variabilidad presente.

- **Distribución geográfica:** Se aseguraron puntos de muestreo distribuidos a lo largo del afloramiento, considerando diferentes niveles y orientaciones para capturar posibles gradientes geológicos.
 - **Características visibles:** Se incluyeron venillas, fracturas y áreas con alteraciones mineralógicas evidentes, para abarcar posibles diferencias en la mineralogía de mena y ganga.
- b. **Tamaño de las muestras:**
- El tamaño de las muestras recolectadas osciló entre 3 y 5 kg por punto de muestreo, lo que permitió obtener suficiente material para realizar cortes y pulidos representativos, así como reservas para posibles análisis adicionales.
 - Se recolectaron un total de **20 muestras**, distribuidas de manera proporcional entre los estratos identificados.
- c. **Representatividad:**
- El enfoque de muestreo aleatorio estratificado garantiza que las muestras incluyan la diversidad geológica del afloramiento, reduciendo el sesgo en la selección y asegurando que las conclusiones reflejen adecuadamente las características generales del depósito.
 - Cada estrato aportó un número equitativo de muestras en función de su extensión y variabilidad geológica.
- d. **Proceso de documentación y etiquetado:**
- Cada muestra fue etiquetada con información detallada, incluyendo coordenadas GPS, descripción visual, características del estrato, fecha de recolección y observaciones preliminares.

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Materiales

Para llevar a cabo esta investigación se requiere una serie de herramientas y equipos especializados. A continuación, se detallan los materiales que se utilizarán:

- **Muestras de rocas:** Estas serán recolectadas directamente del afloramiento del depósito de capas rojas, seleccionando puntos estratégicos que permitan obtener una representación diversa de la composición mineralógica de la zona.

- Microscopio óptico de luz reflejada: Este será el equipo central para el análisis. La microscopía óptica nos permitirá observar en detalle la estructura, textura y composición de los minerales opacos en las muestras recolectadas.
- Herramientas para la preparación de muestras: Para poder observar las muestras bajo el microscopio, será necesario utilizar equipos de corte y pulido. Entre ellos, una cortadora de precisión para seccionar las muestras, y un equipo para pulido que asegure superficies lisas y aptas para la observación.
- Portaobjetos y cubreobjetos: Se utilizarán para montar las muestras una vez preparadas, asegurando una correcta observación y protección de las secciones.
- Abrillantadores como alúmina y polvo de diamante: Estos productos se utilizarán durante el proceso de pulido de las muestras para obtener superficies perfectamente lisas.
- Equipo de protección personal (EPP): Para garantizar la seguridad durante la manipulación de muestras y equipos, será esencial contar con guantes, gafas protectoras, casco y mascarillas.
- Brújula geológica y GPS: Estos instrumentos serán clave para ubicar con precisión los puntos de muestreo en el campo y registrar las coordenadas exactas de las áreas de extracción de muestras.
- Cámara fotográfica: Se utilizará para documentar visualmente tanto el proceso de recolección de muestras como los detalles relevantes del trabajo de campo.
- Laptop y software de análisis: Herramientas necesarias para el registro, organización y análisis de los datos obtenidos en el laboratorio, además de la redacción del informe final.

3.4.2 Métodos

Recolección de muestras

El primer paso en el desarrollo de esta investigación será la recolección de las muestras del afloramiento de capas rojas. La selección de las rocas se hará de manera aleatoria, pero representativa, asegurando cubrir la mayor cantidad posible de variabilidad mineralógica en el área de estudio.

1. Ubicación de los puntos de muestreo: Con el uso del GPS y una brújula geológica, se seleccionarán las zonas del afloramiento más adecuadas para la extracción de las muestras, registrando las coordenadas exactas de cada punto.

2. Extracción de muestras: Para este proceso se utilizarán herramientas manuales como martillos geológicos y picotas. Las muestras recolectadas se almacenarán en bolsas etiquetadas con toda la información necesaria (coordenadas, descripción visual, fecha).

Preparación de las muestras

Una vez recolectadas, las muestras se trasladarán al laboratorio, donde pasarán por un proceso de preparación que permitirá su observación bajo el microscopio de luz reflejada.

1. Corte de las muestras: Utilizando una cortadora de precisión, se harán cortes finos en las rocas para obtener secciones adecuadas.
2. Pulido de las secciones: Las muestras se pulirán con abrasivos progresivos, empezando con abrasivos gruesos y terminando con alúmina o polvo de diamante, asegurando una superficie completamente pulida y apta para el análisis.
3. Montaje en portaobjetos: Las secciones ya pulidas se montarán en portaobjetos y se cubrirán con cubreobjetos para protegerlas y garantizar su integridad durante la observación.

Análisis mediante microscopía óptica de luz reflejada

El análisis de las muestras se realizará utilizando un microscopio óptico de luz reflejada, que permitirá la observación detallada de los minerales presentes en las rocas.

1. Identificación de minerales: Se realizará una clasificación de los minerales presentes en las muestras, distinguiendo entre los minerales de mena (con potencial económico) y los minerales de ganga (sin valor económico directo).
2. Estudio de la paragénesis: Se evaluarán las asociaciones de los minerales presentes para determinar la secuencia de formación de cada uno, así como los procesos de cristalización y reemplazamiento observados.
3. Análisis de texturas y alteraciones: Las texturas de las rocas (diseminación, venillas, fracturas) y las posibles alteraciones mineralógicas serán identificadas y analizadas a detalle.
4. Fotomicrografías: Durante el proceso de observación, se capturarán imágenes a través del microscopio para documentar los hallazgos y proporcionar evidencia visual de las conclusiones.

Procesamiento y análisis de datos

Todos los datos obtenidos durante la observación microscópica serán organizados en fichas descriptivas que permitirán realizar una interpretación integral de los resultados. Se registrará tanto la identificación de los minerales como las asociaciones y las alteraciones observadas.

1. Clasificación de minerales: Los minerales identificados serán clasificados en las categorías de mena, ganga y alteraciones, de acuerdo con sus características ópticas y texturales.

2. Interpretación de los datos: A partir de los resultados de la observación, se analizarán los procesos geológicos que han dado lugar a la formación del depósito en capas rojas, relacionando los resultados con la literatura previa.

Justificación de la técnica utilizada: Microscopía óptica de luz reflejada

La microscopía óptica de luz reflejada fue seleccionada como técnica principal para la caracterización petromineralógica debido a su eficacia en el análisis de minerales opacos y su capacidad para proporcionar información clave sobre la textura, estructura y paragénesis mineral. Esta técnica es especialmente adecuada para depósitos metálicos como el de capas rojas, ya que permite observar directamente las propiedades ópticas reflejadas, cruciales para identificar minerales de mena y ganga.

Entre las ventajas que justifican su elección destacan:

- **Observación directa:** Permite un análisis detallado de las texturas y relaciones espaciales entre los minerales dentro de las muestras, lo cual es esencial para comprender los procesos de formación y alteración del depósito.
- **Eficiencia en tiempo y costo:** Es una técnica accesible en términos de costos y logística en comparación con métodos como la difracción de rayos X o la microscopía electrónica.
- **Aplicación exploratoria:** En estudios preliminares, como el presente, la microscopía óptica constituye una herramienta adecuada para identificar y clasificar minerales en función de sus propiedades ópticas reflejadas.

Reconocimiento de las limitaciones y exclusión de técnicas complementarias

Aunque la microscopía óptica de luz reflejada es una herramienta poderosa, presenta ciertas limitaciones:

- **Resolución limitada:** No permite identificar fases mineralógicas con tamaños submicrométricos ni aquellas cuya composición es similar a nivel óptico.
- **Ausencia de datos químicos y estructurales:** A diferencia de la difracción de rayos X, esta técnica no proporciona información sobre la estructura cristalina ni la composición química precisa de los minerales.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1. Presentación de resultados

Se presentará el debido estudio de microscopía óptica de luz reflejada de cinco muestras seleccionadas aleatoriamente según ubicaciones diferentes en la zona.

5.1.1 Muestra N.º 1

5.1.1.1 Mineralogía

Los minerales opacos que integran esta muestra son los siguientes: Hematita y goethita.

5.1.1.2 Distribución volumétrica porcentual

Tabla 2. *Distribución volumétrica porcentual muestra N° 1*

MINERALES	% HIPOGENOS	% SUPÉRGENOS	ABREVIATURAS
Hematita		1.00	hm
Goethita		0.01	gt
Gangas	98.99		GGs
TOTAL	100.00		

Fuente. Elaboración propia

5.1.1.3 Textura

Diseminada

5.1.1.4 Paragénesis

A.- Depositación hipógena de los minerales:

B.- Depositación supérgena de los minerales:

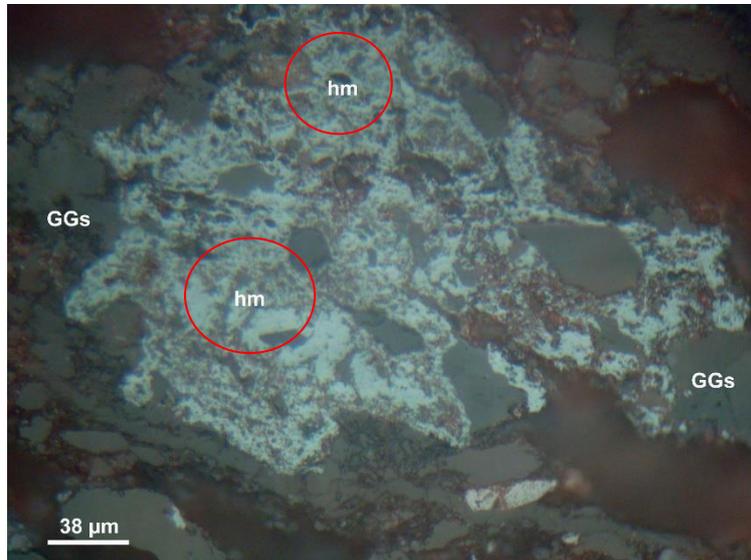
- ❖ Hematita
- ❖ Goethita

5.1.1.5 Observaciones

En muestra de mano, en la superficie pulida de la roca se observan diminutos cristales de goethita.

5.1.1.6 Fotomicrografías

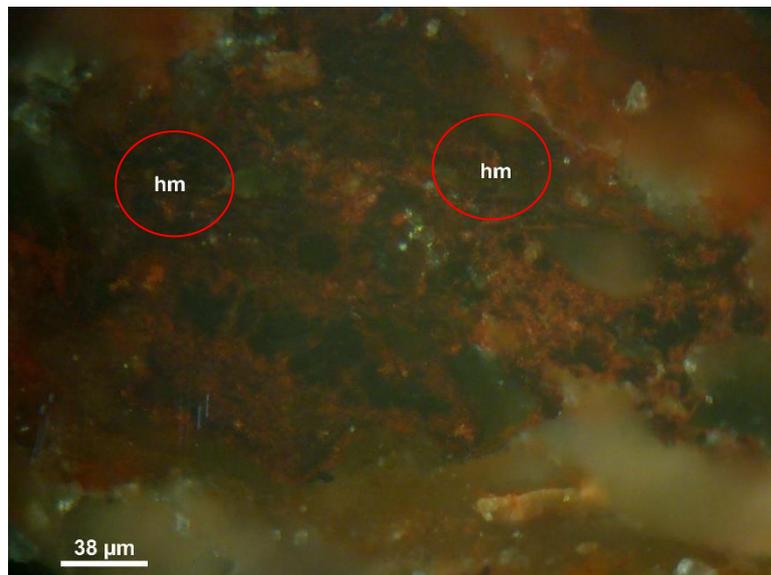
Figura 24. Muestra N° 1 – Foto 1



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 1. Cristal de hematita (hm) dentro de la roca con microfracturas, gangas (GGs). 500X

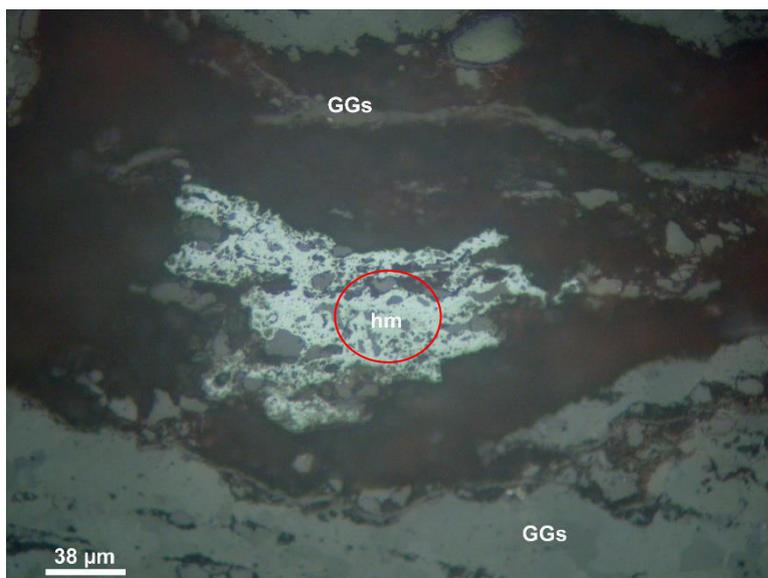
Figura 25. Muestra N° 1 – Foto 2



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 2. La misma vista de la anterior, observada en nicoles cruzados, donde se puede apreciarlos reflejos internos de tonalidad rojiza de la hematita (hm). 500X.

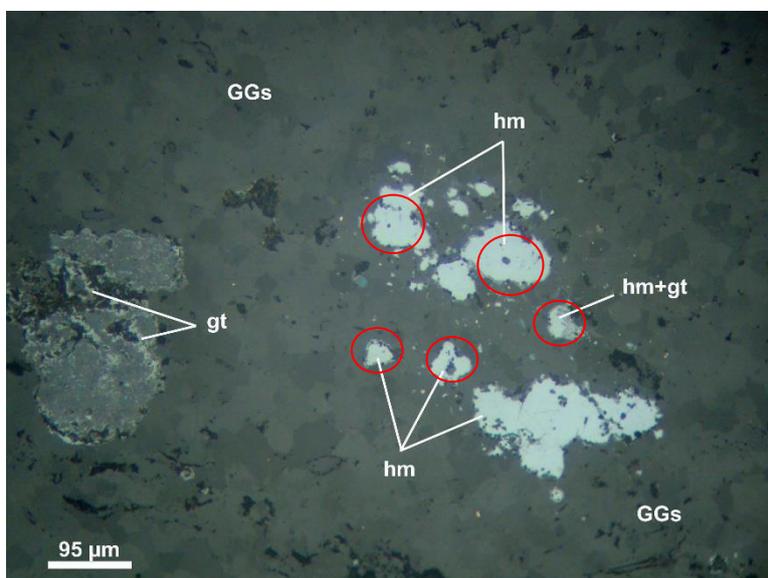
Figura 26. Muestra N° 1 – Foto 3



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 3. Cristal anhedral de hematita (hm) como relleno de la microfractura de la ganga (GGs), es decir de la roca hospedante. 500X.

Figura 27. Muestra N° 1 – Foto 4



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 4. Cristales de hematita (hm) como pseudomorfos de las piritas preexistentes (posiblemente framboides), están diseminados; adyacente se observa a la goethita (gt)

como relleno de los intersticios; dentro de los pseudomorfos hay un cristal de hematita alterada a goethita (hm+gt). 200X.

En la muestra N.º 1 se dedujo que la hematita (Fe_2O_3) con formas anhedrales se encuentran diseminadas y como relleno de algunas microfracturas y algo triturados; presentan tamaños menores de 0.500 mm de longitud; algunos cristales se muestran con cierta pseudomorfosis de las piritas, posiblemente se haya originado de la alteración de ésta. Hay sectores que están como microaglomeraciones de cristales y la goethita (FeO.OH) tiene escasos cristales anhedrales de este mineral se encuentran diseminados y como relleno de algunas microfracturas; sus formas son anhedrales y sus tamaños son hasta de 0.310 mm de longitud; se han originado de la alteración de las hematitas.

5.1.2 Muestra N.º 2

5.1.2.1 Mineralogía

Los minerales opacos que integran esta muestra son los siguientes: Pirita, tennantita, calcopirita, marcasita, esfalerita, bornita.

5.1.2.2 Distribución volumétrica porcentual

Tabla 3. *Distribución volumétrica porcentual muestra N° 2*

MINERALES	% HIPOGENOS	% SUPÉRGENOS	ABREVIATURAS
Pirita	1.50		py
Calcopirita	3.08		cp
Esfalerita	0.05		ef
Tennantita	6.60		tn
Bornita	0.08		bn
Gangas	88.69		GGs
TOTAL	100.00		

Fuente. Elaboración propia

5.1.2.3 Textura

Diseminada

5.1.2.4 Paragenesis

A.- Depositación hipógena de los minerales:

❖ Pirita

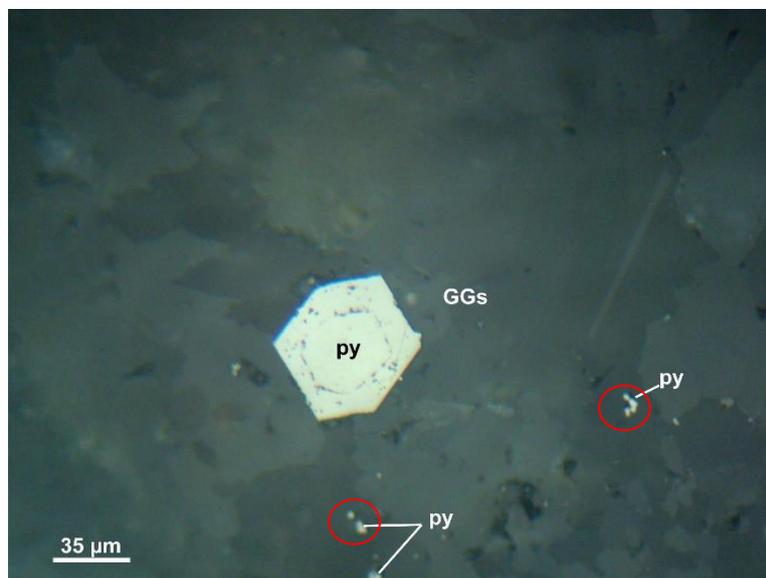
- ❖ Esfalerita
- ❖ Tennantita
- ❖ Bornita
- ❖ Calcopirita

5.1.2.5 Observaciones

En muestra de mano, en la superficie pulida de la roca se observan cristales disseminados y también cristales que están conformando las microvenillas.

5.1.1.6 Fotomicrografías

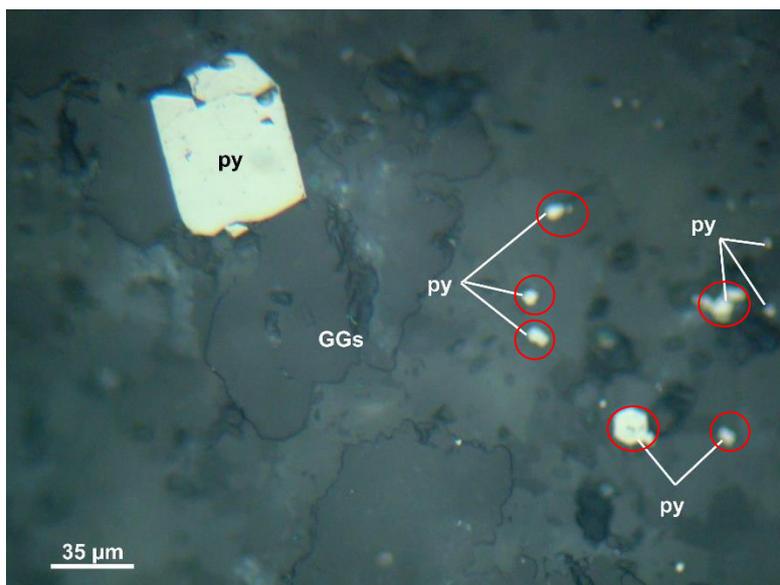
Figura 28. Muestra N° 2 – Foto 1



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 1 Cristal euhedral de pirita (py) donde se aprecia las dos etapas de cristalización, la pirita de la parte central corresponde a la de la primera generación, mientras que la que está rodeando es la de la segunda generación, cada una presenta una forma propia, y con crecimiento zonado.500X.

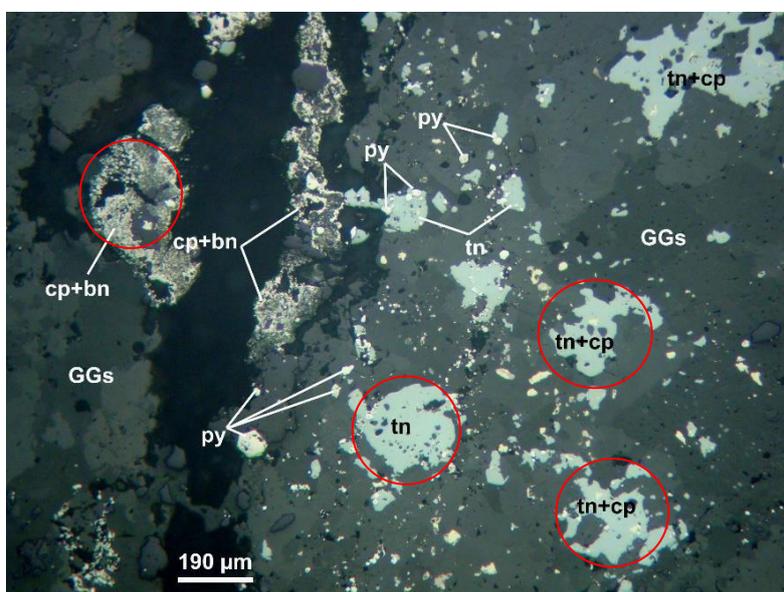
Figura 29. Muestra N° 2 – Foto 2



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 2. Cristales euhedrales y subhedrales de pirita (py), están diseminados en las gangas (GGs).200X.

Figura 30. Muestra N° 2 – Foto 3

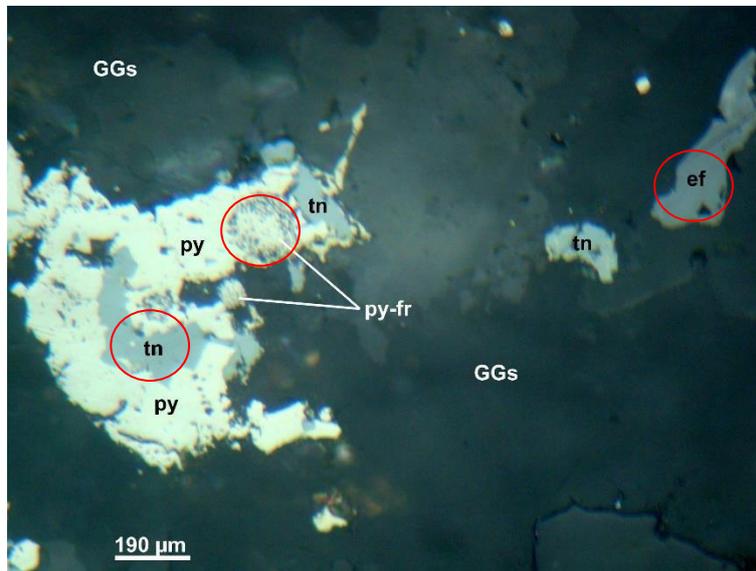


Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 3. Cristales anhedrales de tennantita (tn) rodeados y parcialmente reemplazados por la calcopirita (cp), de ese modo están diseminados; hacia el lado casi superior izquierdo

se observan a las calcopiritas reemplazando a las bornitas (cp+bn), están en los bordes de la microfractura. También se aprecian a las piratas (py) con formas euedrales a anhedrales, las que hallan diseminadas. 100X.

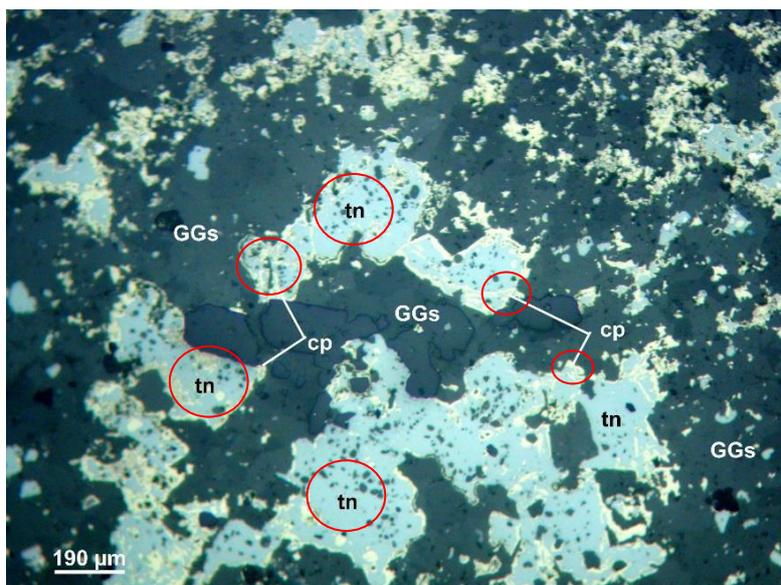
Figura 31. Muestra N° 2 – Foto 4



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 4. Sombras de las piratas framboidales (py-fr) adicionadas por la pirata (py) de generación posterior, de ese modo han sido reemplazados por la tennantita (tn); hacia la parte superior derecha se observa a la esfalerita (ef) como relleno del intersticio de la ganga (GGs). 100X.

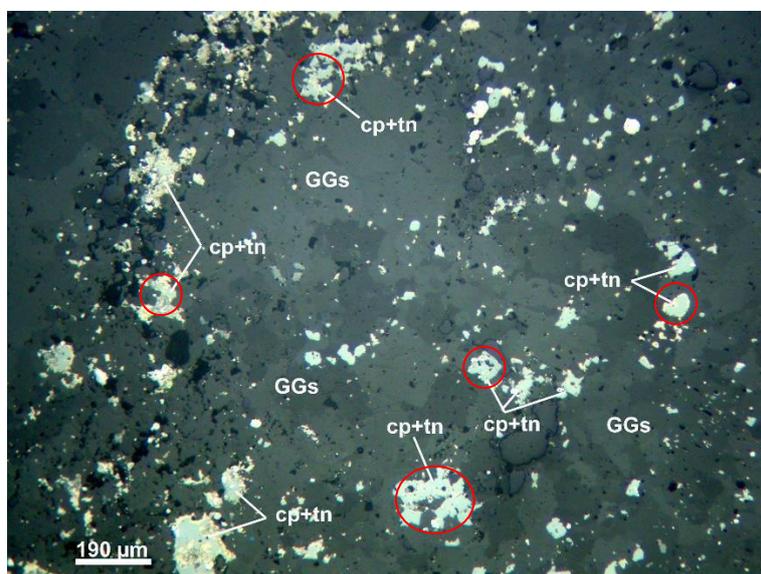
Figura 32. Muestra N° 2 – Foto 5



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 5. Cristales anhedrales de tennantita (tn) rodeados y reemplazados por las calcopiritas (cp), están dentro de los intersticios de las gangas (GGs). 100X.

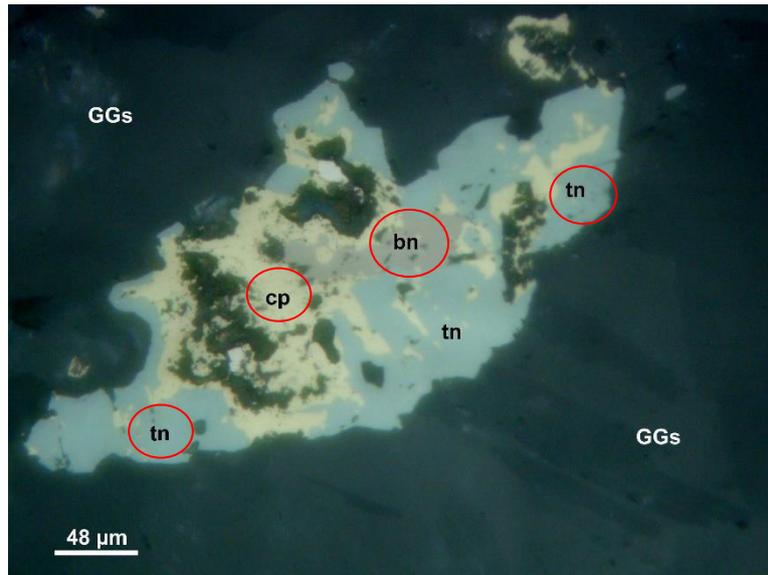
Figura 33. Muestra N° 2 – Foto 6



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 6. Cristales anhedrales de tennantita (tn) fuertemente reemplazados por las calcopiritas (cp), consecuencia de ello son observados como remanentes; están diseminados en las gangas(GGs). 100X.

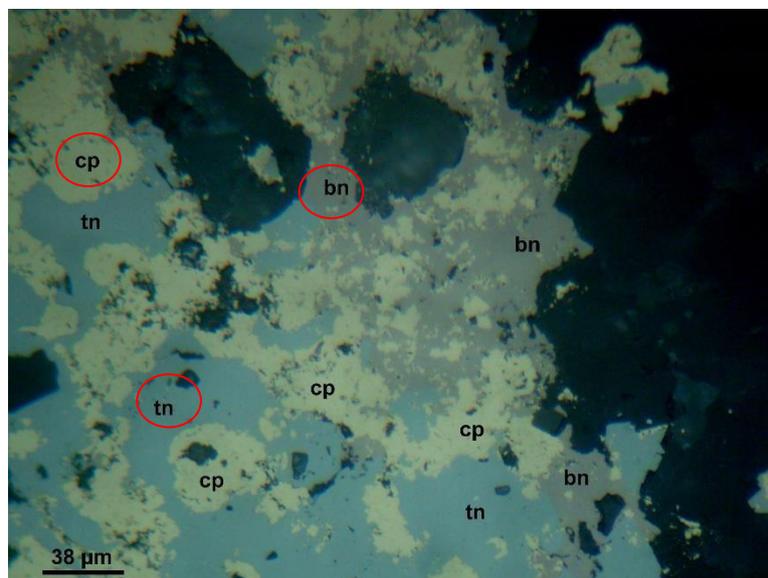
Figura 34. Muestra N° 2 – Foto 7



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 7. Calcopirita (cp) anhedral mostrando reemplazamiento hacia la bornita (bn) y a la tennantita (tn), esto ocurre dentro de la microfractura de la ganga (GGs). 400X.

Figura 35. Muestra N° 2 – Foto 8



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 8. Cristales anhedrales de tennantita (tn) y de bornita (bn) fuertemente reemplazados por la calcopirita (cp), dando la apariencia de textura de tipo cariado. 500X.

En la muestra N.º 2 se dedujo que la bornita (Cu_5FeS_4) se encuentra como remanente, después de haber sido reemplazados por la calcopirita, ya que se halla dentro de las playas de este mineral, por lo que sus formas son anhedrales y sus tamaños son menores de 0.084 mm de longitud; algunos cristales están dentro de los intersticios de las gangas, donde han sido reemplazados por la calcopirita en grado intenso, principalmente en las zonas musgosas de las calcopiritas, la pirita (FeS_2) además de hallarse diseminadas en las gangas, se exhiben como relleno de las microfracturas y de los intersticios de las gangas; presentan formas que varían de euédrales a anhedrales; en varias etapas de crecimiento, consecuencia de ello son observados con zonificación de crecimiento, y con diferentes hábitos, caso de haber sido inicialmente con hábito cúbico, para luego mostrarse sobrepuesto con hábito piritoédrales (ver fotomicrografía adjunta); en algunos sectores están en forma de pequeñas aglomeraciones. Algunos cristales de pirita están envueltos y parcialmente reemplazados por las calcopiritas y tennantitas. Los escasos framboides de pirita han sido reemplazados por las tennantitas y calcopiritas, las tennantitas ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$) Se encuentran ubicadas en los intersticios y microfracturas de las gangas, están reemplazados por las calcopiritas y por las bornitas, en otras áreas están como remanentes esqueléticos dentro de los agregados musgosos de las calcopiritas, pero en mayor porcentaje se encuentran en la zona microbrechada (cataclástica) de la muestra, con aspecto de haber sido triturados, la calcopirita (CuFeS_2) presenta varias etapas de cristalización, una de ellas es la que está dentro de la microplaya de la tennantita, notándose que la calcopirita está atravesada por venillas de bornita, pero este caso es muy escaso; otra ocurrencia es la que está en mayor porcentaje, habiéndose ubicado en los intersticios y microfracturas de las gangas y a partir de éstas han englobado y reemplazado a las piritas, bornita y tennantita, motivo por lo que muchos de estos minerales se hallan fuertemente reemplazados y en algunos casos como remanentes; lo más común es ver el reemplazamiento efectuado a las tennantitas y a las piritas, por lo que en ciertos sectores están como halos o coronas sobre estos minerales. En algunas playas irregulares de tennantita se observan calcopiritas que están como relleno de sus oquedades y de sus microfracturas y la esfalerita (ZnS) se encuentra en escasos cristales anhedrales que se hallan muy dispersos en las gangas, donde se han ubicado en los intersticios y fracturas de las gangas; sus tamaños son menores de 0.062 mm de longitud.

5.1.2 Muestra N.º 3

5.1.3.1 Mineralogía

La muestra está integrada por fragmentos líticos de diversa naturaleza, tales como: esquistos, cuarcitas, aparentemente calizas algo recristalizadas, areniscas, posiblemente rocas ígneas (intrusivos o hipoabisales), los cuales contienen a los siguientes minerales: pirita, tennantita, calcopirita, bornita, esfalerita.

5.1.3.2 Distribución volumétrica porcentual

Tabla 4. *Distribución volumétrica porcentual muestra N° 3*

MINERALES	% HIPOGENOS	% SUPÉRGENOS	ABREVIATURAS
Pirita	3.00		py
Calcopirita	2.00		cp
Esfalerita	Trz		ef
Tennantita	0.50		tn
Bornita	Trz		bn
Gangas	94.50		GGs
TOTAL	100.00		

Fuente. Elaboración propia

5.1.3.3 Textura

Diseminada

5.1.3.4 Paragénesis

A.- Depositación hipógena de los minerales:

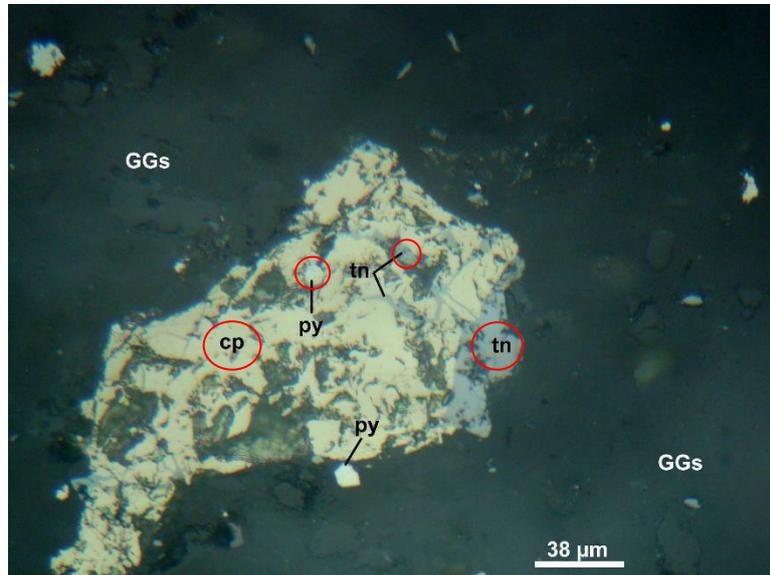
- ❖ Pirita I
- ❖ Pirita II
- ❖ Esfalerita
- ❖ Calcopirita I
- ❖ Tennantita
- ❖ Bornita
- ❖ Calcopirita II

5.1.3.5 Observaciones

En muestra de mano, en la superficie pulida, los minerales descritos son observados, aparentemente, en algunos clastos líticos y con cierta diseminación.

5.1.3.6 Fotomicrografías

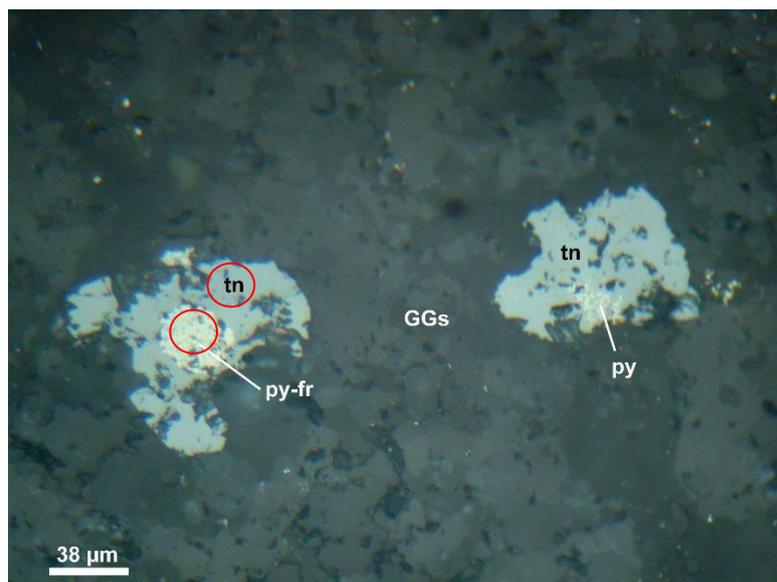
Figura 36. Muestra N° 3 – Foto 1



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 1. Diminutos cristales subhedrales de pirita (py), uno de ellos englobado por la calcopirita(cp), notándose que este mineral se halla parcialmente reemplazado y atravesado por las venillas de tennantita (tn). 500X.

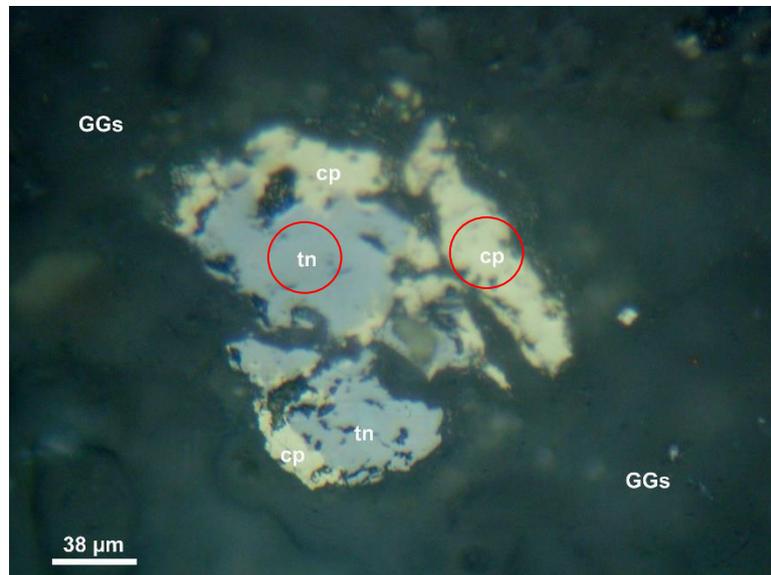
Figura 37. Muestra N° 3 – Foto 2



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 2. Sombras de las pirritas framboidales (py-fr) englobados y reemplazados por la tennantita(tn), de ese modo están diseminados en las gangas (GGs). 500X.

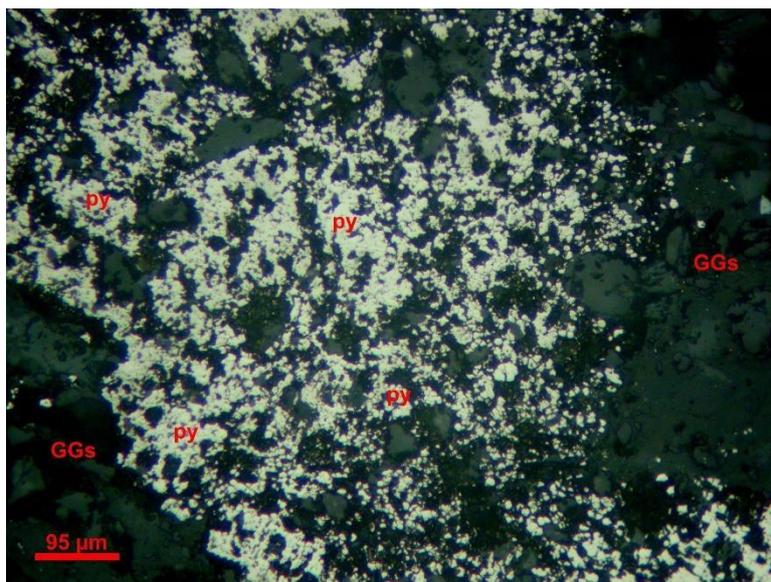
Figura 38. Muestra N° 3 – Foto 3



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 3. Cristal anedral de tennantita (tn) parcialmente envuelta y reemplazada por la calcopirita(cp). 500X.

Figura 39. Muestra N° 3 – Foto 4



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 4. Pirita (py) framboidal con sus gránulos fuertemente dispersos, está dentro de unamicrofractura. 200X.

En la muestra N.º 3 se dedujo que con respecto a la tennantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$) en algunos litoclastos se observan a este mineral como microvenillas que rellenas las microfracturas de las calcopiritas (ver fotomicrografía), implica formación posterior a la calcopirita; mayormente están como microplayas que rellenan algunas oquedades y microfracturas de las gangas, por lo que sus formas son anhedrales; ocurren en la mayoría de los litoclastos. La Pirita (FeS_2) se encuentra dentro de algunos litoclastos se muestran como agregados arracimados, los cuales corresponden a las piritas framboidales de origen singenético, cuyos hábitos son semejante a los huevillos de los peces y que están con proceso de recristalización muy fuerte, estas piritas se muestran como microbandas con algunas inflexiones; muchas de las aglomeraciones framboidales de piritas han sido reemplazadas por las tennantitas (ver fotomicrografía). Las piritas descritas de ese modo, son las de origen sedimentario; mientras que hay piritas que se muestran con formas que varían de euhedrales a anhedrales, los cuales están diseminados y también como relleno de algunas oquedades y microfracturas, donde están envueltos y reemplazados por las tennantitas y calcopiritas, estas piritas corresponden a un origen hidrotermal, las que en ciertos sectores se han adicionado a las piritas framboidales. La calcopirita (CuFeS_2) se encuentra diseminada, también ubicada en los intersticios, oquedades y microfracturas de las gangas; dentro de algunos litoclastos han englobado y reemplazado a las piritas; se manifiestan en dos etapas de cristalización, la primera es aquella que está como remanente dentro de algunas tennantitas, es decir reemplazadas por este mineral, mientras que la calcopirita de generación posterior es aquella que está como relleno de algunas microfracturas de la tennantita; en ambos casos presentan formas anhedrales. Sus tamaños son menores de 0.610 mm de longitud. Las bornitas (Cu_5FeS_4) se muestran como remanentes esqueléticos después de haber sido reemplazados por la calcopirita; sus formas son anhedrales; sus tamaños son menores de 0.060 mm de longitud. Las esfaleritas (ZnS) se muestran en forma de escasos cristales, se hallan muy dispersos en algunos litoclastos, mayormente como relleno de algunos intersticios y oquedades de las gangas. Sus formas son anhedrales y sus tamaños son menores de 0.030 mm de longitud.

5.1.2 Muestra N.º 4

5.1.4.1 Mineralogía

La muestra está integrada por fragmentos líticos de diversa naturaleza, tales como: esquistos, cuarcitas, aparentemente calizas algo recristalizadas, areniscas, posiblemente rocas ígneas (intrusivos o hipoabisales), los cuales contienen a los siguientes minerales: pirita, calcocita, covelita, calcopirita, tennantita, enargita, esfalerita.

5.1.4.2 Distribución volumétrica porcentual

Tabla 5. *Distribución volumétrica porcentual muestra N° 4*

MINERALES	% HIPOGENOS	% SUPÉRGENOS	ABREVIATURAS
Pirita	1.00		py
Calcopirita	Trz		cp
Esfalerita	Trz		ef
Tennantita	0.01		tn
Calcocita		0.03	cc
Covelita		0.01	cv
Gangas	98.95		GGs
TOTAL	100.00		

Fuente. Elaboración propia

5.1.4.3 Textura

Diseminada y de reemplazamiento.

5.1.4.4 Paragénesis

A.- Depositación hipógena de los minerales:

- ❖ Pirita I
- ❖ Pirita II
- ❖ Pirita III
- ❖ Enargita
- ❖ Esfalerita
- ❖ Tennantita
- ❖ Calcopirita
- ❖ Calcocita I

B.- Depositación supérgena de los minerales:

- ❖ Calcocita II
- ❖ Covelita

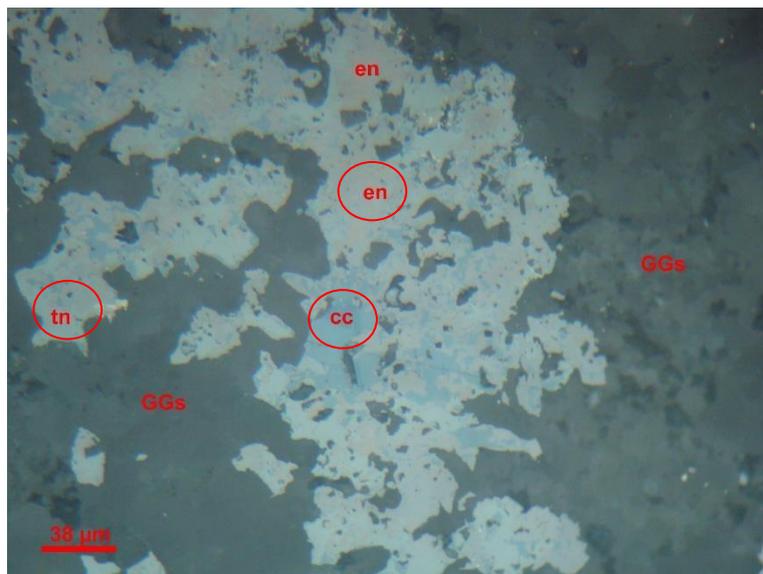
5.1.4.5 Observaciones

Con respecto a la generación de las piritas, corresponden a tres etapas: la framboidal que es singenética, luego está la pirita con hábito de corte cuadrado y posteriormente está la pirita con hábito de corte con ocho lados, es decir la pirita diploédrica.

La calcocita, una corresponde a la de origen hipógena, perteneciente al de color gris blanquecina, con temperatura de formación encima de 103°C, mientras que la calcocita con tonalidad celeste es de origen supérgena, con temperatura de formación debajo de 103°C.

5.1.4.6 Fotomicrografías

Figura 40. Muestra N° 4 – Foto 1



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 1. Remanentes de enargita (en) transformada o alterada a tennantita (tn) y con alteración a calcocita (cc), está dentro de la microfractura de la ganga (GGs). 500X.

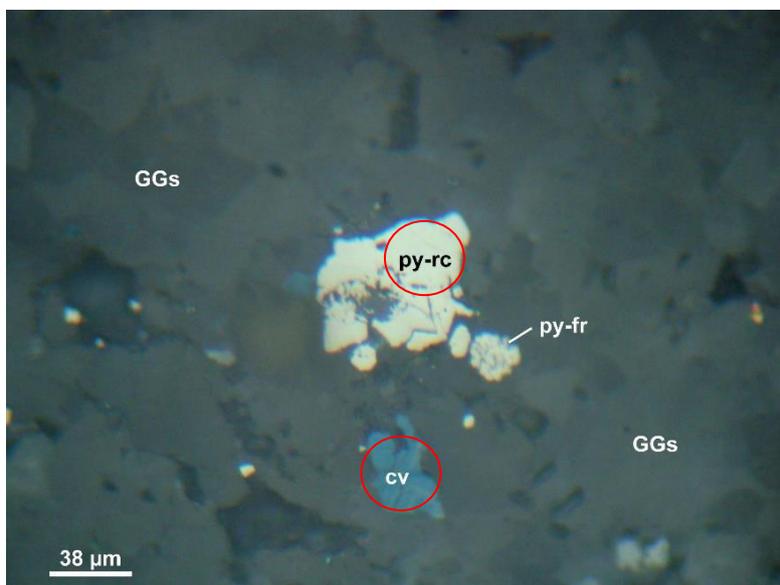
Figura 41. Muestra N° 4 – Foto 2



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 2. Pirita framboidal (py-fr) y piritas framboidales recristalizados están diseminados en las gangas (GGs); en la parte superior derecha está el cristal anedral de covelita (cv). 500X.

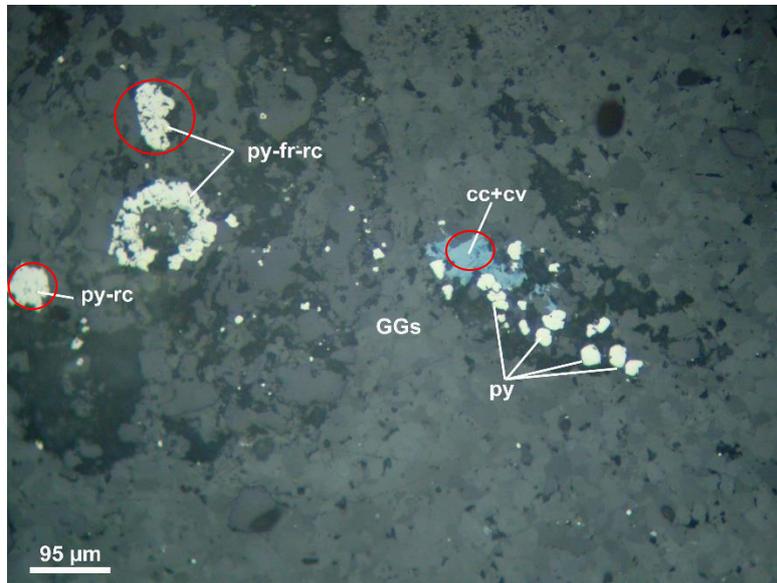
Figura 42. Muestra N° 4 – Foto 3



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 3. Pirita framboidal (py-fr) y pirita framboidal recristalizada (py-rc) con crecimiento zonificado; crista anhedral de covelita (cv) están diseminados en la ganga (GGs). 500X.

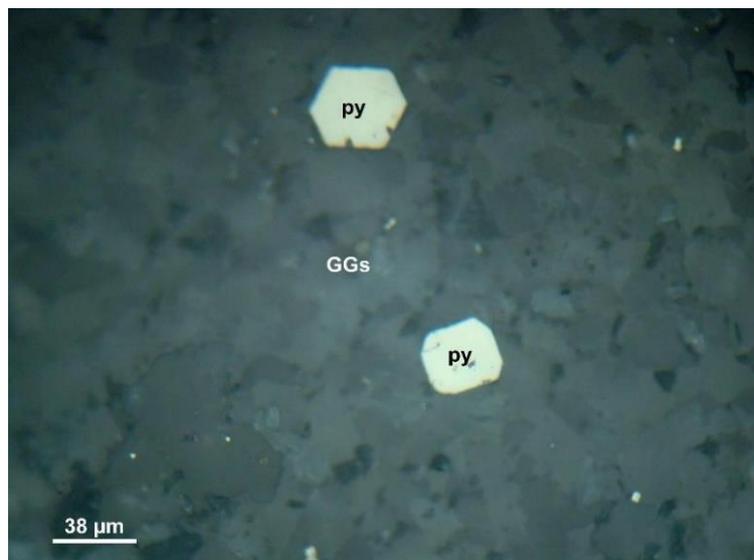
Figura 43. Muestra N° 4 – Foto 4



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 4. Pirita framboidal parcialmente recristalizada (py-fr-rc) y piritas subhedrales parcialmente englobados y reemplazados por la calcocita alterada a covelita (cc+cv), se hallan diseminados en las gangas (Gs). 200X.

Figura 44. Muestra N° 4 – Foto 5



Fuente. Elaboración propia

❖ Fot. 5. Piritas euhedrales diseminados en las gangas (GGs). 500X.

En la muestra N.º 4 se dedujo en primer lugar que las enargitas (Cu_3AsS_4) se observan como remanentes esqueléticos dentro de algunas microplayas de tennantita, posiblemente como producto de la transformación hacia este mineral o bien como producto de la alteración hacia la tennantita. Sus formas son anhedrales y sus tamaños son menores de 0.060 mm de longitud. Las piritas (FeS_2) con orígenes sedimentarios (singenéticos) e hidrotermales, son observados diseminados; en el primer caso se muestran con hábito framboidal con proceso de recristalización intensa, mientras que los que son hidrotermales mayormente se muestran con hábito diploédrica (caras con ocho lados), en cubos (caras cuadradas) y piritoedrales (caras de cinco lados), estas caras son cortes en las secciones pulidas; otra característica que presentan algunos cristales, son su crecimiento en forma zonada y en forma de adición sobreimpuestas a los cristales framboidales, con su posterior recristalización. Las tennantitas ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$) con formas anhedrales se hallan muy dispersos, pero en algunos sectores están como aglomeraciones de microcristales, los cuales dan lugar a microplayas, donde se notan la presencia de remanentes de enargita y también covelita y calcocita como productos de alteración. En el caso de la Calcopirita (CuFeS_2) se encuentran escasos cristales anhedrales de este mineral que se hallan muy diseminados, en algunos casos están asociados a las piritas framboidales a las cuales los han reemplazado; sus tamaños son menores de 0.020 mm de longitud. Las calcocitas (Cu_2S) están muy dispersas, habiéndose ubicado en las oquedades e intersticios de las gangas; en algunos sectores han englobado y reemplazado a las piritas, especialmente a las piritas framboidales; aparentemente están los dos tipos de calcocitas, es decir, la calcocita blanco grisáceo y la calcocita de color celeste. Algunas se han originado por la alteración de la enargita y de ese modo están dentro de algunas playas de la tennantita. La covelita (Cu_2S) Es un mineral, semejante a la calcocita, está ubicado en las oquedades e intersticios de las gangas; posiblemente como producto de la alteración de las calcocitas; en las microplayas de las tennantitas están asociadas a las calcocitas y por último los Escasos cristales de esfalerita (ZnS) se hallan muy dispersos, habiéndose ubicado en algunos intersticios de las gangas; sus formas son anhedrales y sus tamaños son menores de 0.030 mm de longitud.

5.1.5 Muestra N.º 5

5.1.5.1 Mineralogía

La muestra corresponde a un fragmento de roca de naturaleza sedimentaria metamorfozada (caliza metamorfozada = mármol), la cual contiene a los siguientes minerales: calcocita, covelita, bornita, calcopirita,

5.1.5.2 Distribución volumétrica porcentual

Tabla 6. *Distribución volumétrica porcentual muestra N.º 5*

MINERALES	% HIPOGENOS	% SUPÉRGENOS	ABREVIATURAS
Bornita	Trz		bn
Calcopirita	0.50		cp
Calcocita		3.00	cc
Covelita		0.01	cv
Gangas	96.49		GGs
TOTAL	100.00		

Fuente. Elaboración propia

5.1.5.3 Textura

Relleno de espacios vacíos y de reemplazamiento.

5.1.5.4 Paragénesis

A.- Depositación hipógena de los minerales:

- ❖ Calcopirita
- ❖ Calcocita I

B.- Depositación supérgena de los minerales:

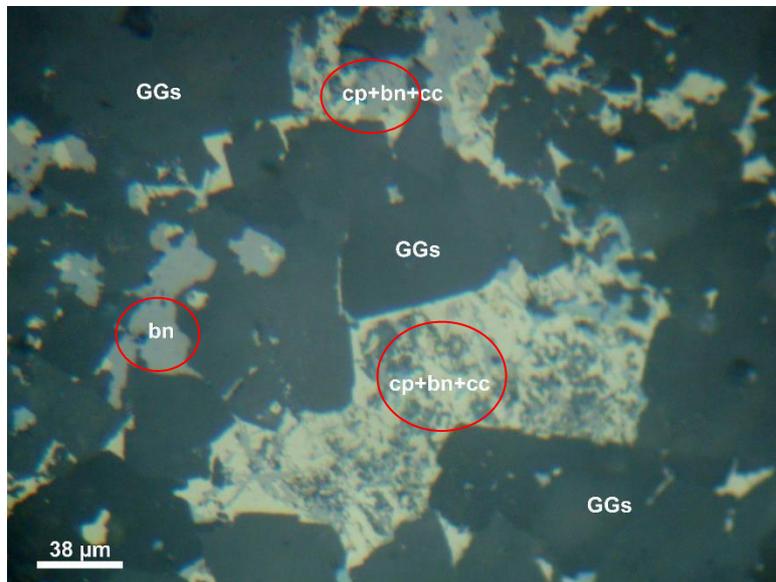
- ❖ Calcocita II
- ❖ Covelita

5.1.5.5 Observaciones

La calcocita de color gris blanquecina, una corresponde a la de origen hipógena, con temperatura de formación encima de 103°C, mientras que la calcocita con tonalidad celeste es de origen supérgena, con temperatura de formación debajo de 103°C.

5.1.5.6 Fotomicrografías

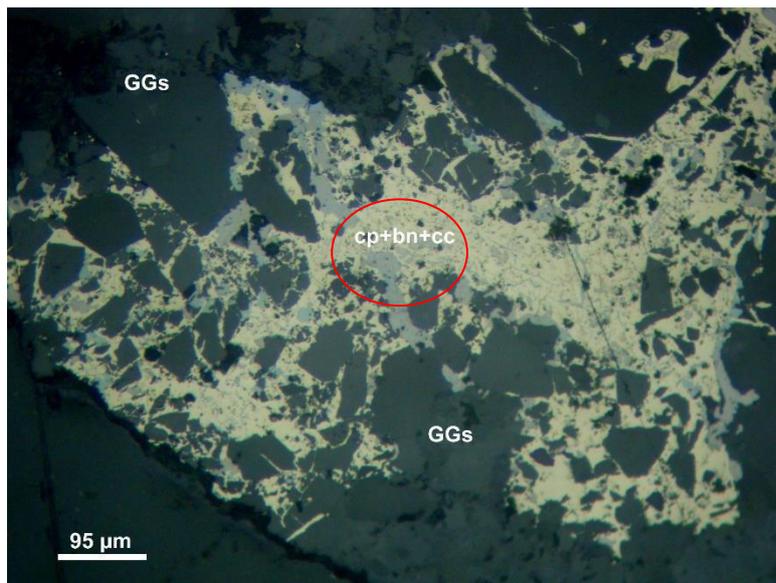
Figura 45. Muestra N° 5 – Foto 1



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 1. Cristales de calcopirita alteradas a bornita y a calcocita (cp+bn+cc) están dentro de las microfracturas de las gangas (GGs), ganga brechada. 500X.

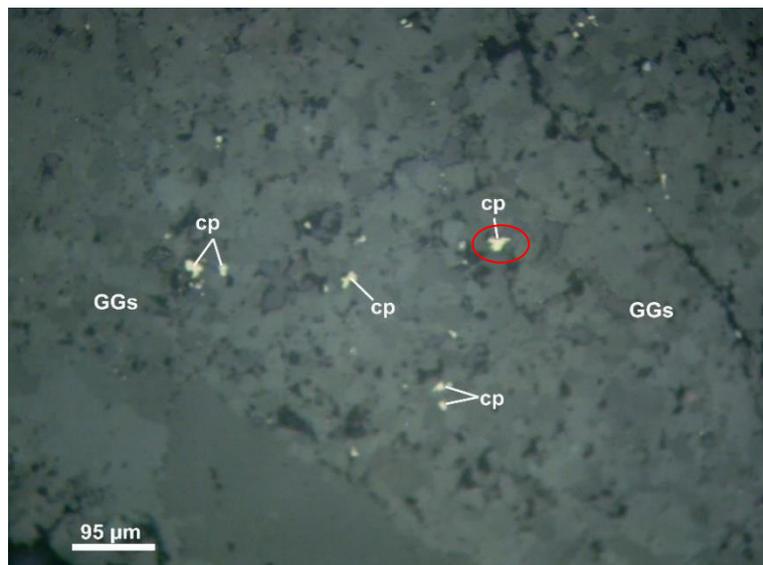
Figura 46. Muestra N° 5 – Foto 2



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 2. Agregados de calcopirita alterada a bornita y a acalcocita (cp+bn+cc), se encuentran dentro de las microfrazas de las gangas (GGs), ganga microbrechada. Nótese algunos microclastos de brecha que están flotando en la playa de la asociación de calcopirita, bornita y calcocita (cp+bn+cc). 200X.

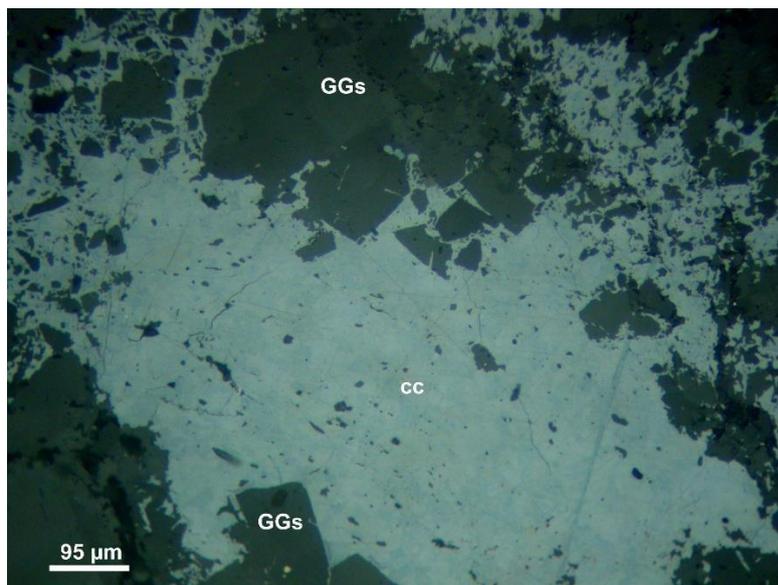
Figura 47. Muestra N° 5 – Foto 3



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 3. Diminutos cristales de calcopirita (cp) ubicados en los intersticios de las gangas (GGs), de ese modo su distribución espacial es muy dispersa. 200X.

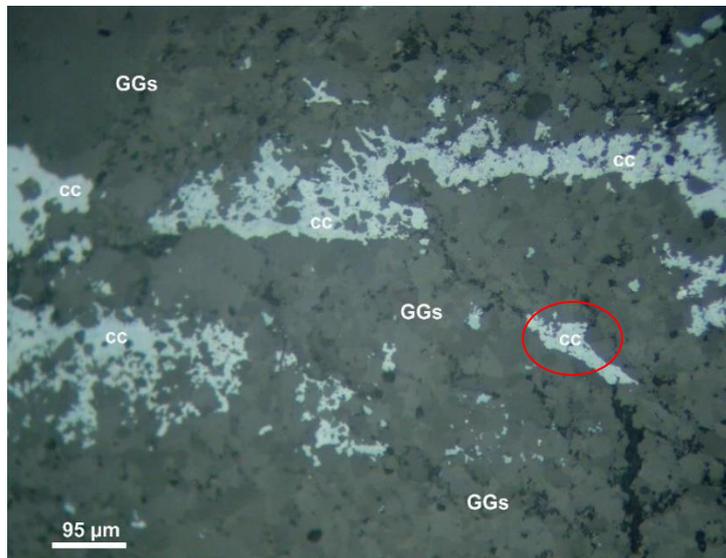
Figura 48. Muestra N° 5 – Foto 4



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 4. Playa ensanchada de la calcocita (cc), ubicada en la intersección de las microfracturas, área microbrechada, nótese los microclastos de brecha que están flotando en la playa de la calcocita (cc). 200X.

Figura 49. Muestra N° 5 – Foto 5



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 5. Agregados granulares de calcocita (cc) ubicados en las microfracturas de las gangas (GGs) y de ese modo da lugar a las microvenillas. 200X.

Figura 50. Muestra N° 5 – Foto 6



Fuente. Elaboración propia

- ❖ Fot. 6. Cristales anhedrales de bornita alterada a covelita (bn+cv) y de calcocita alterada acovelita (cc+cv). Se hallan ubicados en los intersticios de las gangas (GGs). 500X.

En la muestra N.º 5 se dedujo en primer lugar que las bornitas (Cu_5FeS_4) Con formas anhedrales se encuentran ubicadas en los intersticios, microfracturas de las gangas y de algunas calcopiritas, en este caso a éstas las ha reemplazado de grado incipiente a intenso; sus tamaños son menores de 0.042 mm de longitud. Las calcopiritas (CuFeS_2) están mayormente ubicados en las microfracturas de las gangas, donde en algunos casos toman el hábito musgoso, consecuencia de haber sido reemplazados por las bornitas; el reemplazamiento se ha efectuado a partir de los bordes y microfracturas de las calcopiritas; como granos individuales y de granulometría muy fina se hallan muy dispersos en las gangas, donde también están en los intersticios de éstas. Los tamaños de las calcopiritas son menores de 0.350 mm de longitud y sus formas son anhedrales. Las calcocitas (Cu_2S) Mayormente de la variedad blanco grisácea, están conformando microvenillas, diseminadas después de haber rellenado algunas oquedades e intersticios de las gangas; ha englobado y reemplazado a las bornitas; posiblemente se han originado de la alteración de la bornita y de las calcopiritas, se deduce esta afirmación porque hay calcocitas que presentan remanentes de estos minerales dentro de sus playas. En las intersecciones de las microvenillas se muestran como playas ensanchadas y las covelitas (CuS) están dentro de los cristales de calcocita y de bornita, de los cuales se han originado por alteración; su distribución es muy disperso y es casi del orden de trazas.

5.2. Análisis comparativo de muestras

Se llevó a cabo un análisis comparativo entre las diferentes muestras recolectadas del depósito en capas rojas, con el objetivo de identificar tendencias o patrones que fortalezcan la interpretación de los datos obtenidos mediante microscopía óptica de luz reflejada. Este análisis se enfoca en las propiedades mineralógicas, texturales y paragénesis observadas en las muestras.

Composición mineralógica

El análisis comparativo reveló patrones consistentes en la presencia y proporción de minerales de mena y ganga entre las muestras:

- Minerales predominantes:
 - Las muestras de las zonas más profundas presentan mayor concentración de calcopirita y bornita, asociadas con procesos de cristalización temprana.

- En las zonas superficiales, se observó un aumento en minerales de ganga, como cuarzo y minerales arcillosos, indicando un mayor grado de alteración secundaria.
- Variabilidad:
 - En algunas muestras (Muestra N.º 3 y Muestra N.º 5), se identificaron trazas de minerales accesorios como magnetita, ausentes en otras muestras, lo que podría indicar un gradiente mineralógico vertical dentro del afloramiento.

Texturas observadas

Se identificaron diferencias significativas en las texturas mineralógicas entre las muestras:

- Diseminación y venillas:
 - Las muestras provenientes de las zonas centrales del afloramiento (Muestras N.º 2 y N.º 4) presentan mayor diseminación de minerales metálicos en la matriz, indicando procesos de deposición más homogéneos.
 - Por otro lado, en las zonas marginales (Muestras N.º 1 y N.º 5), se observaron venillas bien definidas, lo que sugiere recristalización o transporte mineral posterior.
- Tamaño de grano:
 - Las muestras de las zonas inferiores exhiben granos más grandes y mejor definidos (euhedrales y subhedrales), mientras que las zonas superiores contienen granos más pequeños y anhedrales, posiblemente debido a procesos de alteración más intensos.

Alteraciones mineralógicas

Se detectaron patrones claros en los tipos de alteraciones mineralógicas:

- Alteraciones comunes:
 - Alteración potásica y clorítica fueron predominantes en todas las muestras, pero con mayor intensidad en las zonas centrales y superiores del depósito.
- Alteraciones zonales:
 - La zona superficial mostró evidencia de oxidación y carbonatación (hematita y carbonatos secundarios), mientras que las zonas más profundas se mantuvieron relativamente frescas con menor grado de alteración.

Tendencias de paragénesis

La paragénesis observada permitió identificar tendencias en la secuencia de formación de los minerales:

- En las muestras de zonas profundas, la calcopirita y la pirita se encuentran asociadas en una paragénesis temprana, indicando un ambiente de alta temperatura y baja oxidación.
- En las zonas superficiales, se observa una paragénesis tardía con mayor presencia de óxidos de hierro, como hematita, reflejando condiciones más oxidantes.

Interpretación general

El análisis comparativo permite identificar un patrón vertical dentro del afloramiento, en el que las zonas más profundas presentan minerales primarios asociados a un ambiente de formación menos alterado, mientras que las zonas superficiales reflejan mayor grado de alteración y oxidación. Estas tendencias respaldan la hipótesis de que el depósito en capas rojas experimentó gradientes geotermales y ambientales que influenciaron la formación y alteración de los minerales.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La discusión de nuestros resultados desentraña una fascinante revelación sobre la predominancia de texturas diseminadas en las muestras estudiadas, indicando su formación bajo condiciones de baja temperatura y presión, una característica patente en la microestructura de la goethita y hematita. Este patrón resuena con hallazgos previos, como los de López y Martínez en 2016, que también identificaron texturas similares en regiones volcánicas y señalaron su origen hidrotermal. Estas similitudes apuntan a procesos geológicos comparables que podrían tener implicaciones importantes en la forma en que abordamos la minería y la extracción de minerales.

Además, nuestro estudio ha destacado una influencia significativa de la alteración hidrotermal, sugiriendo una fase intensa de actividad de fluidos geotérmicos que ha marcado la historia geológica del depósito. Esto contrasta con investigaciones como las de Fernández y sus colegas en 2018, que observaron depósitos con una alteración hidrotermal mínima, sugiriendo un entorno geológico más estable y predecible. Esta diferencia es crucial para comprender la diversidad en la calidad y accesibilidad del mineral entre distintos yacimientos y puede orientar futuras estrategias de exploración y explotación minera.

La composición química de las muestras ha revelado altos niveles de impurezas como sílice y aluminio, deteriorando la calidad del mineral extraído. Este aspecto es coherente con los estudios de García en 2017, quien notó que las altas concentraciones de impurezas pueden inflar los costos operativos debido a la necesidad de procesos adicionales de beneficio. Este desafío subraya la necesidad de adaptar y mejorar las tecnologías de tratamiento, lo que a su vez podría impulsar innovaciones en las técnicas de purificación y separación mineral, marcando el camino hacia desarrollos tecnológicos más eficientes y sostenibles en la industria minera.

Estos hallazgos subrayan la importancia de diseñar estrategias de explotación minera que no solo sean eficaces sino también sostenibles. Sin embargo, es vital reconocer las limitaciones de este estudio, como el tamaño y selección de las muestras y las técnicas específicas utilizadas, que podrían influir en la interpretación de los resultados. Sería provechoso ampliar este estudio mediante investigaciones comparativas con otros depósitos en diversas regiones geológicas. Tal enfoque podría revelar detalles adicionales sobre las variaciones regionales en la paragénesis mineral y su impacto en la viabilidad de la explotación minera.

En conjunto, esta discusión no solo contextualiza y valida nuestros hallazgos dentro del ámbito más amplio de la investigación geológica y minera, sino que también destaca áreas clave para futuras investigaciones. Estos temas incluyen la necesidad de técnicas analíticas más avanzadas y estudios comparativos que, en conjunto, podrían profundizar enormemente nuestra comprensión de los procesos geológicos y optimizar la explotación de recursos minerales. Estos esfuerzos colectivos podrían transformar las prácticas en la industria minera, promoviendo un uso más eficiente y responsable de los recursos naturales.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Estos depósitos son únicos en su tipo en los Andes peruanos, aunque se han señalado a la atención del autor depósitos similares a 150-200 km al sureste de GOYLLAR en el área más amplia de Huancayo. La principal característica estructural del área es un anticlinal de inmersión en W poco profundo formado por la Formación Pérmico Mítu. Está rodeado en el W por piedra caliza mesozoica, mientras que su núcleo en el E está relleno por el esquisto Paleozoico Excelsior. La formación Mítu consiste en areniscas arcosas rojas, de grano fino a grueso, hasta "arcosas fragmentarias" y contiene capas y lentes de margas rojas. A través de investigaciones petrográficas y previas se encontró que los depósitos en sentido estricto se caracterizan por un ligero blanqueamiento azulado o gris verdoso de las rocas rojas. Las formaciones blanqueadas son lenticulares y tienen extensiones de hasta 200 m y espesores de más de 2 m. En su mayoría contienen residuos vegetales carbonosos. El mineral finamente dividido es en su mayor parte lustre de cobre con cobre y cobre de color que retrocede, sulfuros de plata accesorios y plata metálica. Los productos de intemperie son malaquita y azurita y rara vez sulfato de cobre. Una característica clave de estos depósitos es la sustitución parcial del carbón por sulfuros de cobre. Aunque este tipo de depósito es muy similar a las ocurrencias conocidas de U-V-Cu en la meseta de Colorado, el uranio está ausente en Negra Huanusha y el vanadio solo se ha detectado en pequeñas cantidades (pero aún no se ha asignado a un mineral específico). Dado que no se pudieron realizar estudios especiales (que requieren un equipo extenso) y los depósitos no se investigaron de manera tan sistemática (debido a la información insuficiente en algunos casos), no se pudieron observar estructuras detalladas y solo se pudieron extraer conclusiones genéticas en comparación con una extensa literatura. La secuencia genética de los procesos que llevaron a la formación de estos depósitos se piensa de la siguiente manera: El lecho rocoso se sedimentó en una llanura fluvial amplia y plana con la inclusión de abundante material vegetal en ciertos lugares. Posteriormente, Cu, Ag, etc., fueron transportados por aguas subterráneas (extraídos de depósitos más antiguos o traídos de soluciones hidrotermales) y depositados donde había un ambiente reductor (en las cercanías de madera carbonizada, donde probablemente el H₂S fue producido por bacterias anaeróbicas). La influencia volcánica también puede haber jugado un cierto papel, lo que está indicado por los fragmentos andesíticos en el arkose. Mediante el uso del método de isótopos de azufre (posiblemente en combinación con otros), se podrían obtener datos más precisos sobre la edad y el origen de la mineralización.

6.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar los siguientes estudios para mayor profundida en el yacimiento

1. Estudios Isotópicos:
2. Análisis Petrográfico avanzado
3. Cartografía Geológica detallada
4. Estudio Geoquímico
5. Caracterización detallada de las formaciones
6. Realizar mapeos geológicos precisos
7. análisis petrográficos de las arcosas, margas y esquistos asociados.
8. Determinar con exactitud la distribución, geometría y continuidad de las formaciones blanqueadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MARMANILLO, Greys Lilibiana Valenzuela Tello y César Augusto Buendía. Caracterización Minerográfica de la Veta 722 [en línea]. Disponible en: <<http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/1052>> [Consulta: 17 de junio de 2019].
2. ESPINOZA BRUNO, Miguel Ángel. Análisis Estructural de los Minerales [en línea]. Disponible en: <<http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/431>> [Consulta: 19 de septiembre de 2018].
3. SÁEZ, Jaime y Quispe, W. Estudio de Depósitos Minerales en Yauli-La Oroya [en línea]. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Disponible en: <<http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/1865>> [Consulta: 8 de enero de 2020].
4. FAUSTO, Santiago. Investigación Mineralógica en la Zona Andina [en línea]. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Disponible en: <<http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/1713>> [Consulta: 13 de noviembre de 2019].
5. D'ANNUNZIO, María Celeste. Caracterización de Minerales Metálicos [en línea]. Universidad Nacional del Sur. Disponible en: <<http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2673>> [Consulta: 2016].
6. MONTREUIL, Joe Louis Espinoza. Análisis de Texturas Minerales [en línea]. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Disponible en: <<http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/430>> [Consulta: 5 de diciembre de 2018].
7. TCARMONA. Práctica 1 de Microscopía de Polarización [en línea]. Disponible en: <<https://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2016/08/practica-1.pdf>> [Consulta: agosto de 2016].
8. LÓPEZ, N. Microscopía Óptica de Minerales [en línea]. Disponible en: <<https://www.ipb.csic.es/servicios/Microscopia/tipos-de-microscopiacutea-que-se-realizan-en-el-centro.html>> [Consulta: 2019].
9. INGEMMET. Servicios de Secciones Delgadas y Pulidas para Minerales [en línea]. Disponible en: <https://portal.ingemmet.gob.pe/web/lab/servicios_productos_pm> [Consulta: 2020].
10. MELGAREJO, Joan, PROENZA Joaquín y LLOVET, Xavier. Técnicas de Caracterización Mineral en la Exploración Minera. Bol. Soc. Geol. Mex, vol. 62, núm. 1. Barcelona: Serveis Científic Tècnics, 2008.
11. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA EN LA INDUSTRIA MINERA. Convención Minera del Bicentenario, vol. 1. Ixtapa, México, 2010.

12. Preparación de Muestras Delgadas y Pulidas [en línea]. Disponible en:
<<https://es.scribd.com/document/435308417/INFORME-N-02>> [Consulta: 16 de noviembre de 2019].
13. CARVALHO, Cassio Santos de. Uso de la Microscopía de Luz Transmitida en la Caracterización de Fluxantes [en línea]. Disponible en:
<https://www.researchgate.net/publication/320122254_USO_DA_MICROSCOPIA_DE_LUZ_TRANSMITIDA_NA_CHARACTERIZACAO_DE_FLUXANTES> [Consulta: septiembre de 2017].
14. CHIRIF, Humberto. Microscopía óptica de minerales [en línea]. Boletín N° 1, Serie J - INGEMMET Dirección de Recursos Minerales y Energéticos. Disponible en:
https://portal.ingemmet.gob.pe/web/lab/microscopia_optica_minerales, 2010 [Consulta: octubre 2024].
15. INGEMMET. Informe de Caracterización Mineral [en línea]. Disponible en:
<http://www.ingemmet.gob.pe/igm-sidemcat-portlet/verresumen?pCodigo_DM=010554907> [Consulta: 2020].
16. UNAL-MEDELLÍN. Procesos Supergénicos [en línea]. Disponible en:
<<https://www.medellin.unal.edu.co/~rrodriguez/exogenos/PROCESOS-SUPERGENICOS.pdf>> [Consulta: 2019].
17. BAUMANN, L. & LEEDER, O. Einführung in die Auflichtmikroskopie. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 408 p. 1991
18. HIERRO, Ferran. Microscopía Óptica y Electrónica: Equipos y Técnicas [en línea]. Disponible en: <<https://sct.uib.es/Instruments-i-equipos-dels-Serveis-Cientificotecnics/Area-de-microscopia-optica-i-electronica/Microscopia-optica.cid108042>> [Consulta: 2020].
19. PATZELT, W.J. (1974) - Microscopía de polarización: fundamentos, instrumental y aplicaciones. Leitz: Wetzlar, 115 p.
20. VAUGHAN, D.J. Microhardness properties in characterization. En: Jambor, J.L. & Vaughan, D. J., eds. Advanced microscopic studies of ore minerals. Ottawa: Mineralogical Association of Canada, Short Course 17, p. 171-187. 1990.
21. CÁNEPA, C. - Estudio microscópico de minerales opacos. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 82 p. 1971
22. CANCHAYA, S. & CARDOZO, M. Tabla de intercrecimientos de minerales opacos. No publicado. 1977.

ANEXOS

ANEXO 1
MATRIZ DE CONSISTENCIA

MATRIZ DE CONSISTENCIA			
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVO	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES
¿Cuál es el procedimiento para la identificación de minerales y rocas utilizando el método de microscopía óptica de luz reflejada en depósitos de capas rojas?	Análisis e identificación de minerales y rocas utilizando el método de microscopía óptica de luz reflejada en depósitos de capas rojas.	La determinación de rocas y minerales mediante el uso de microscopía óptica de luz reflejada en depósitos de capas rojas.	DEPENDIENTE: <ul style="list-style-type: none"> ● Evaluación e identificación de minerales y rocas
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICOS	
¿Qué minerales de ganga han sido identificados a través de la microscopía óptica de luz reflejada en depósitos de capas rojas?	Determinación de los minerales de ganga a través del método de microscopía óptica de luz reflejada en depósitos de capas rojas.	Los minerales de ganga serán identificados mediante el método de microscopía óptica de luz reflejada en depósitos de capas rojas.	
¿Qué minerales de mena han sido identificados mediante el método de microscopía óptica de luz reflejada en depósitos de capas rojas?	Determinación de minerales de mena a través del método de microscopía óptica de luz reflejada en depósitos de capas rojas.	Los minerales de mena serán identificados mediante el método de microscopía óptica de luz reflejada en depósitos de capas rojas.	INDEPENDIENTE: <ul style="list-style-type: none"> ● Microscopia óptica de luz reflejada.
¿Qué alteraciones se detectan en los depósitos de capas rojas mediante el uso de la microscopía óptica de luz reflejada?	Determinar las diferentes alteraciones en los depósitos de capas rojas utilizando el método de microscopia óptica de luz reflejada	Se procederá a la identificación de las alteraciones en los depósitos de capas rojas a través del método de microscopía óptica de luz reflejada.	

ANEXO 2

MUESTRAS

- Muestra N° 1
- Muestra N° 2
- Muestra N° 3
- Muestra N° 4
- Muestra N° 5

Muestra N° 1



Muestra N° 2



Muestra N° 3



Muestra N° 4



Muestra 5



ANEXO 3

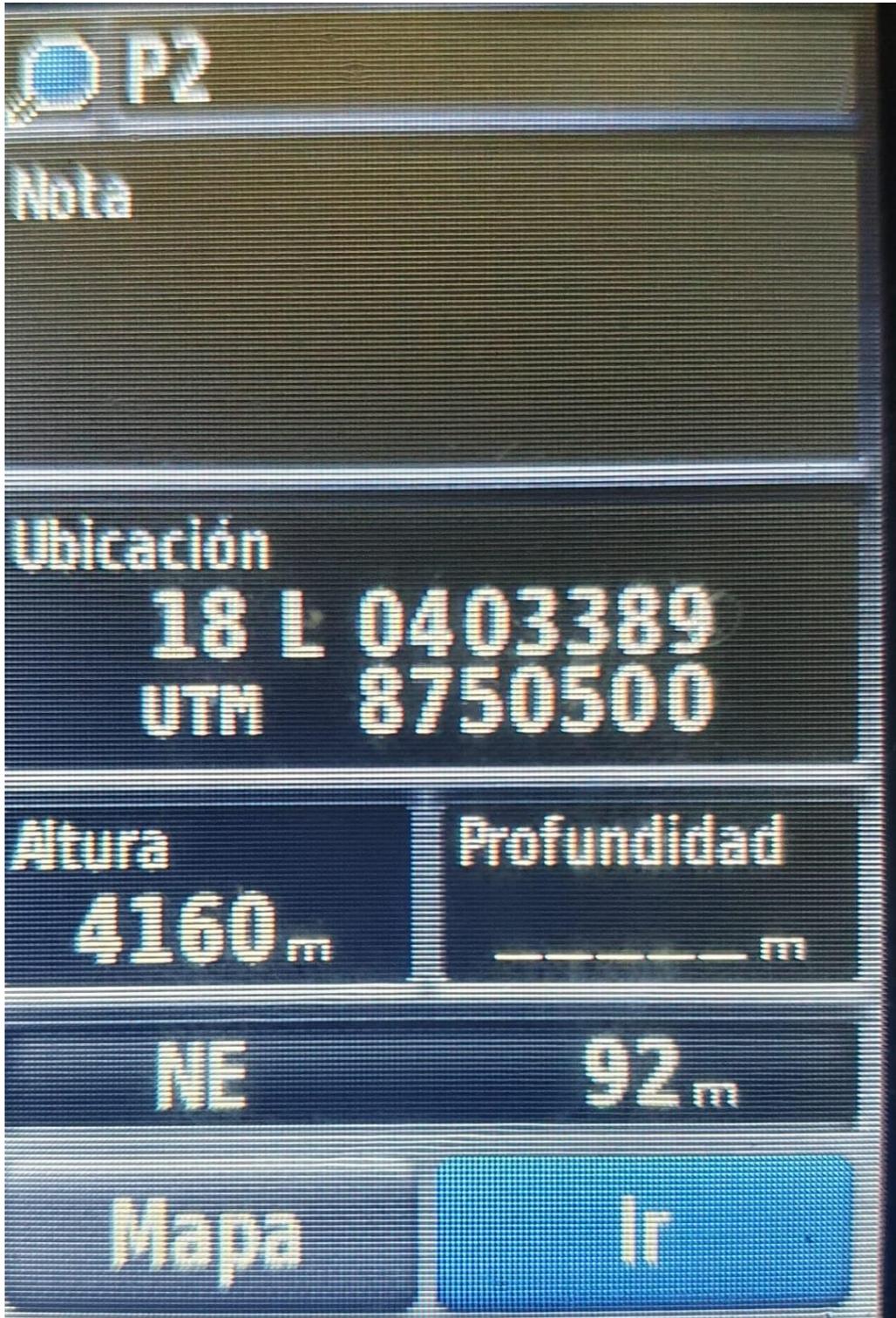
PUNTOS GPS

- Punto 1 - Muestra N° 1
- Punto 2 - Muestra N° 2
- Punto 3 - Muestra N° 3
- Punto 4 - Muestra N° 4
- Punto 5 - Muestra N° 5

Punto 1 - Muestra N° 1



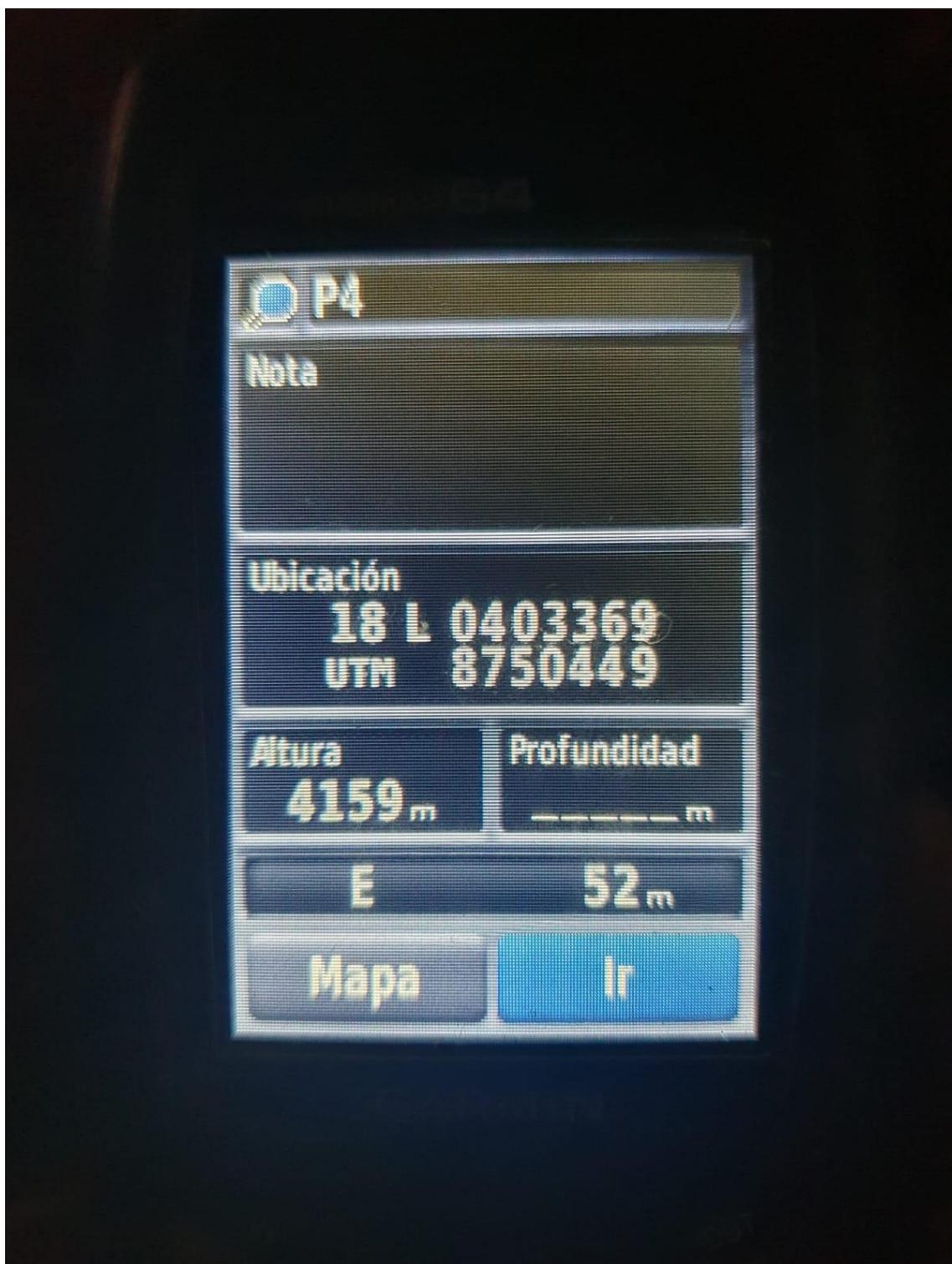
Punto 2 - Muestra N° 2



Punto 3 - Muestra N° 3



Punto 4 - Muestra N° 4



Punto 5 - Muestra N° 5

