

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Ocurrencias epitermales de sulfuración intermedia que
incrementan los recursos minerales de la zona alta del depósito
de Atacocha**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo

Elaborado por

Carlos Joel Rodríguez Vizcarra

 [0009-0007-2091-3797](https://orcid.org/0009-0007-2091-3797)

Asesora

MSc. María Luz Marquina Robles

 [0009-0003-9145-2298](https://orcid.org/0009-0003-9145-2298)

LIMA – PERÚ

2023

Citar/How to cite	Rodríguez Vizcarra [1]
Referencia/Reference	[1] C. Rodríguez Vizcarra, “ <i>Ocurrencias epitermales de sulfuración intermedia que incrementan los recursos minerales de la zona alta del depósito Atacocha</i> ” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2023.
Estilo/Style IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Rodríguez, 2023)
Referencia/Reference	Rodríguez, C. (2023). <i>Ocurrencias epitermales de sulfuración intermedia que incrementan los recursos minerales de la zona alta del depósito Atacocha</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*A mis padres y esposa por su apoyo incondicional y por motivarme constantemente en
alcanzar mis anhelos.*

Así como también a las futuras generaciones de geólogos

Agradecimientos

Agradezco a la empresa Minera Nexa Resources Atacocha que me dio la oportunidad de desempeñar mi labor como Geólogo y que los resultados obtenidos en los años en función son los que presento en esta tesis.

De igual manera a mi alma Mater, Universidad Nacional de Ingeniería por los años invertidos en mi formación profesional y que en esta oportunidad lo retribuyo.

A las Ing. María Marquina y Nora Revollé por las observaciones y recomendaciones realizadas durante el desarrollo y finalización del presente trabajo.

Resumen

La mina Atacocha es un yacimiento polimetálico de Zn, Pb, Ag con contenidos de Au, ubicado en la provincia y región de Pasco, en la Cordillera Occidental, entre las cotas 3900 a 4330 m.s.n.m., a 331 km al noreste de Lima.

En la zona afloran las calizas del Grupo Pucará y areniscas del Grupo Goyllarizquisga, que fueron cortados por el intrusivo San Gerardo de composición diorítica, esta roca fue datado por el método potasio-argón dando una edad de entre 25-30 Ma.

Se han realizado Estudios petrominerográficos, análisis mineralógico por difracción de rayos X, estudios de inclusiones fluidas y microscopía electrónico de barrido. Los estudios de secciones delgadas del intrusivo San Gerardo indican la presencia de illita-esmectita, adularia, cuarzo y carbonatos. La mineralización ocurre en vetas y cuerpos rellenados con esfalerita, galena, bournonita y freirbergita. Las gangas son pirita, rodocrosita, alabandita, cuarzo y calcita. La mineralización está controlada por un sistema estructural NO-SE paralelo al sistema de Fallas 13, además de estar presente dentro de un sistema Riedel de fallas conjugadas sinestral y fallas transcurrente-normal.

El estudio de inclusiones fluidas refleja temperaturas de homogeneización entre 200 – 320°C, con una salinidad de 3 a 5 % NaCl eq. El posible ambiente de mineralización del Tajo San Gerardo, en la mina Atacocha, es un epitermal de baja a intermedia sulfuración con contenidos importantes de Au y Ag.

Palabras claves: Tajo San Gerardo, recursos minerales, yacimiento epitermal, inclusiones fluidas.

Abstract

The Atacocha mine is a polymetallic deposit of Zn, Pb, Ag with Au content, located in the province and department of Pasco, in the Western Cordillera, between levels 3900 to 4330 meters above sea level, 331 km northeast of Lima.

In the area, the sedimentary sequence made up of limestone from the Pucará Group and sandstone from the Goyllarizquisga Group emerges. These sediments were cut by the San Gerardo intrusive of dioritic composition. This rock was dated by the potassium-argon method between 25-30 Ma.

Petromineragraphic studies, mineralogical analysis by X-ray Diffraction, fluid inclusion studies and Scanning Electron Microscopy have been carried out. Studies of thin sections of the San Gerardo intrusive indicate the presence of illite-smectite, adularia, quartz and carbonates. Mineralization in the area occurs in veins and bodies filled with sphalerite, galena, bournonite, freirbergite, in addition to values with Au, the gangues consist of pyrite, rhodochrosite, associated with alabandite, quartz and calcite structures, which are controlled by a NW-SE structural system parallel to the Fault 13 system, in addition to being present within a Riedel system of sinistral conjugate faults and transcurrent-normal faults. The study of fluid inclusions reflects homogenization temperatures between 200 - 320°C, with a salinity of 3 to 5 % Eq. By weight of NaCl. The possible mineralization environment of the San Gerardo Tajo area, in the Atacocha mine, is that of a low to intermediate sulfidation epithermal with significant Au and Ag.

Keywords: Tajo San Gerardo, mineral resources, epithermal deposits, fluid inclusions.

Tabla de Contenido

Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.1.1 Ubicación y acceso.....	1
1.1.2 Clima	2
1.2 Planteamiento del problema	3
1.2.1 Situación problemática	3
1.2.2 Formulación del problema general	3
1.2.3 Formulación de los problemas específicos	3
1.2.4 Justificación de la investigación.....	3
1.3 Objetivos del estudio	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Hipótesis del estudio	4
1.4.1 Hipótesis general.....	4
1.4.2 Hipótesis específicas.....	4
1.5 Antecedentes investigativos	5
1.5.1 Antecedentes internacionales.....	5
1.5.2 Antecedentes nacionales	5
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	7
2.1 Marco teórico.....	7
2.1.1 Yacimiento epidermal	7
2.1.2 Recursos minerales.....	9
2.2 Marco conceptual	10

2.2.1	Petrografía de rocas ígneas	10
2.2.2	Estudios minerográficos	12
2.2.3	Estudio petrominerográfico.....	12
2.2.4	Inclusiones fluidas (IF).....	13
2.2.5	Diagrama de temperatura de homogeneización vs salinidad.....	14
2.2.6	Difracción de rayos X (DRX).....	15
2.2.7	Microscopía electrónica de barrido SEM	16
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		18
3.1	Marco geológico regional.....	18
3.1.1	Geomorfología.....	20
3.1.2	Estratigrafía.....	21
3.2	Marco geológico local.....	26
3.2.1	Geomorfología.....	27
3.2.2	Estratigrafía.....	28
3.2.3	Geología estructural	34
3.2.4	Alteraciones.....	39
3.2.5	Mineralización	39
3.3	Metodología.....	43
3.3.1	Trabajo de gabinete I - precampo.....	43
3.3.2	Trabajo de campo	43
3.3.3	Trabajo de gabinete II – postcampo	45
3.4	Estudios petrominerográficos y análisis de DRX	46
3.4.1	Muestra AT-MI-001.....	47
3.4.2	Muestra AT-MI-002.....	49
3.4.3	Muestra AT-MI-004.....	51
3.4.4	Muestra AT-MI-007.....	53
3.4.5	Muestra AT-MI-010.....	55
3.5	Inclusiones fluidas (IF).....	57

3.5.1	Muestra AT-MI-001.....	58
3.5.2	Muestra AT-MI-003.....	62
3.6	Microscopía electrónica de barrido SEM	66
3.6.1	Muestras de sulfuros y sulfosales.....	66
3.6.2	Muestras de concentrados de plomo	70
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados		75
4.1	Análisis de resultados.....	75
4.1.1	Ensamblés mineralógicos.....	75
4.1.2	Alteraciones.....	77
4.1.3	Microscopía electrónica de barrido	80
4.1.4	Inclusiones fluidas	81
4.1.5	Yacimiento del Complejo Pasco	82
4.2	Propuesta de ingeniería	83
4.2.1	Perforación diamantina para la estimación de recursos mineros	83
4.2.2	Radios de categorización por variografía.....	84
4.2.3	Mejoras en el modelamiento geológico.....	85
Conclusiones		89
Recomendaciones		91
Referencias bibliográficas.....		92
Anexos		1

Lista de Tablas

Tabla 1: Principales vías de acceso a la Unidad Minera	2
Tabla 2: Lista de muestras para estudios pretromineragráficos y análisis DRX	46
Tabla 3: Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-001	48
Tabla 4: Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-002.....	51
Tabla 5: Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-004.....	53
Tabla 6: Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-007	55
Tabla 7: Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-010.....	57
Tabla 8: Lista de muestras para estudios de IF.....	57
Tabla 9: Datos microtermométricos de la muestra AT-MI-001	60
Tabla 10: Datos microtermométricos de la muestra AT-MI-003	64
Tabla 11: Espaciamiento en sondajes para la recategorización de recursos	85
Tabla 12: Presupuesto de recategorización de recursos.....	88

Lista de Figuras

Figura 1: Ubicación del Complejo Pasco.....	1
Figura 2: Clima en el Tajo San Gerardo.....	2
Figura 3: Distribución geográfica de algunos depósitos epitermales en el mundo.....	8
Figura 4: Relación general entre resultados de exploración, recursos y reservas	10
Figura 5: Clasificación modal - QAPF	11
Figura 6: Estudios mineragráficos.....	12
Figura 7: Fotomicrografía en luz transmitida y luz reflejada	13
Figura 8: Microscopio tipo Linkam.....	14
Figura 9: Diagrama de temperatura de homogeneización vs salinidad	15
Figura 10: Difractómetro de rayos X modelo D8 Advance.....	16
Figura 11: Diagrama de un microscopio electrónico de barrido.....	17
Figura 12: Plano de geología regional	19
Figura 13: Nevado Quilcocha.....	20
Figura 14: Planicie del Lago Junín.....	20
Figura 15: Contacto discordante entre los Grupo Ambo y Mitu	21
Figura 16: División estratigráfica en Cerro de Pasco.....	25
Figura 17: Plano geológico local	27
Figura 18: Superficie puna de la zona de Santa Bárbara	28
Figura 19: Imagen satelital mostrando secuencia de calizas del Grupo Pucara	29
Figura 20: Calizas del Grupo Pucará Tajo San Gerardo	30
Figura 21: Secuencia sedimentaria de areniscas del Grupo Goyllarisquizga	31
Figura 22: Andesita basáltica.....	32
Figura 23: Columna estratigráfica	33
Figura 24: Vista NO-SE de la Falla Milpo Atacocha	35
Figura 25: Sigmoides en las intersecciones de la Falla 13 y 1	36
Figura 26: Plano de dominios estructurales	37

Figura 27: Secciones N°1, N°2 y N°3.....	38
Figura 28: Sección O-E.....	40
Figura 29: Estilos de mineralización en Atacocha	41
Figura 30: Resumen de metros de canales y sondajes Atacocha	43
Figura 31: Plano de ubicación de muestras	44
Figura 32: Equipo de Geología redefiniendo los objetivos de perforación.....	45
Figura 33: Muestra macroscópica AT-MI-001	47
Figura 34: Fotomicrografías LT-LR AT-MI-001.....	48
Figura 35: Muestra macroscópica AT-MI-002	49
Figura 36: Fotomicrografías LT-LR AT-MI-002.....	50
Figura 37: Muestra macroscópica AT-MI-004	52
Figura 38: Fotomicrografías LT-LR AT-MI-004.....	52
Figura 39: Muestra macroscópica AT-MI-007	54
Figura 40: Fotomicrografías LT-LR AT-MI-007.....	54
Figura 41: Muestra macroscópica AT-MI-010	56
Figura 42: Fotomicrografías LT-LR AT-MI-010.....	56
Figura 43: Muestra sección delgada pulida AT-MI-001	58
Figura 44: Fotomicrografías LR- AT-MI-001.....	59
Figura 45: Fotomicrografías LT- AT-MI-001	59
Figura 46: Histograma de temperatura de homogeneización y salinidad	60
Figura 47: Familias identificadas en homogeneización vs salinidad.....	61
Figura 48: Diagrama temperatura de homogeneización vs salinidad	62
Figura 49: Muestra sección delgada pulida AT-MI-003	62
Figura 50: Fotomicrografías LR- AT-MI-003.....	63
Figura 51: Fotomicrografías LT- AT-MI-003	64
Figura 52: Histograma de temperatura de homogeneización y salinidad	65
Figura 53: Familias identificadas en homogeneización vs salinidad.....	65
Figura 54: Diagrama temperatura de homogeneización vs salinidad	66

Figura 55: Muestra macroscópica M1	67
Figura 56: Imagen SEM y fotomicrografía en luz reflejada M1_A.....	68
Figura 57: Espectro EDS M1_A	68
Figura 58: Imagen SEM M1_B.....	69
Figura 59: Espectro EDS M1_B	70
Figura 60: Fotomicrografía en luz reflejada M2.....	71
Figura 61: Imagen SEM M2_1	72
Figura 62: Espectro EDS M2_1	72
Figura 63: Imagen SEM M2_2	73
Figura 64: Espectro EDS M2_2	74
Figura 65: Ensamblajes mineralógicos Atacocha.....	75
Figura 66: Secuencia paragenética de Atacocha	76
Figura 67: Muestra AT-MI-008	77
Figura 68: Imagen de un microscopio de luz polarizada	78
Figura 69: Asociación mineralógica en el Tajo San Gerardo.....	79
Figura 70: Promedios de valores de Au estructural de las 11 muestras estudiadas	80
Figura 71: Caracterización del Tajo San Gerardo	81
Figura 72: Ubicación espacial de inclusiones fluidas	82
Figura 73: Ore bodies del Complejo Pasco.....	83
Figura 74: Variograma de la agrupación anisotrópica del dominio de Zn	85
Figura 75: Comparativo de los sólidos del Largo Plazo 2020 vs 2023	86
Figura 76: Volumen y cantidad de estructuras desde el año 2018 al 2023.....	87

Introducción

El yacimiento de la Unidad Minera Atacocha desde sus inicios ha sido descrito como un yacimiento del tipo Skarn, debido a que su producción ha estado ligado a la zona baja del depósito, donde la mineralización fue producto del metasomatismo de contacto entre los intrusivos San Gerardo - Santa Bárbara y las calizas del Grupo Pucará. A partir del año 2020 la producción se ha enfocado en el Open Pit Tajo San Gerardo que corresponde a la zona alta del depósito de Atacocha y los ensambles mineralógicos presentan otras características que no corresponden al modelo de yacimiento tipo Skarn.

En el Perú existen compañías mineras que han tenido una transición del método de minado de subterráneo a cielo abierto, por ejemplo, el Tajo Raul Rojas de la compañía Volcan, la Unidad Minera Colquijirca de El Brocal y la Unidad Minera Toromocho de Chinalco. La Unidad Minera Atacocha cambió el método de explotación con el que venía operando desde hace décadas, de explotación subterránea a cielo abierto basándose en una operación de bajo costo y alta productividad.

En el presente trabajo se definen las condiciones de formación, ensambles mineralógicos y alteraciones de la mineralización de la zona alta del depósito de Atacocha. Además de tener una mejor comprensión geológica del yacimiento desde sus niveles más profundos hasta la superficie, todo esto con el fin de incrementar la vida útil de la mina mediante la recategorización de recursos minerales.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

1.1.1 Ubicación y acceso

La Unidad Minera Nexa Resources Atacocha del grupo Nexa Resources Perú, políticamente pertenece al Distrito de San Francisco de Yarusyacán y Yanacancha, provincia y región de Pasco (Ver Figura 1). Está enmarcado dentro de las coordenadas referenciales:

Este: 367,019

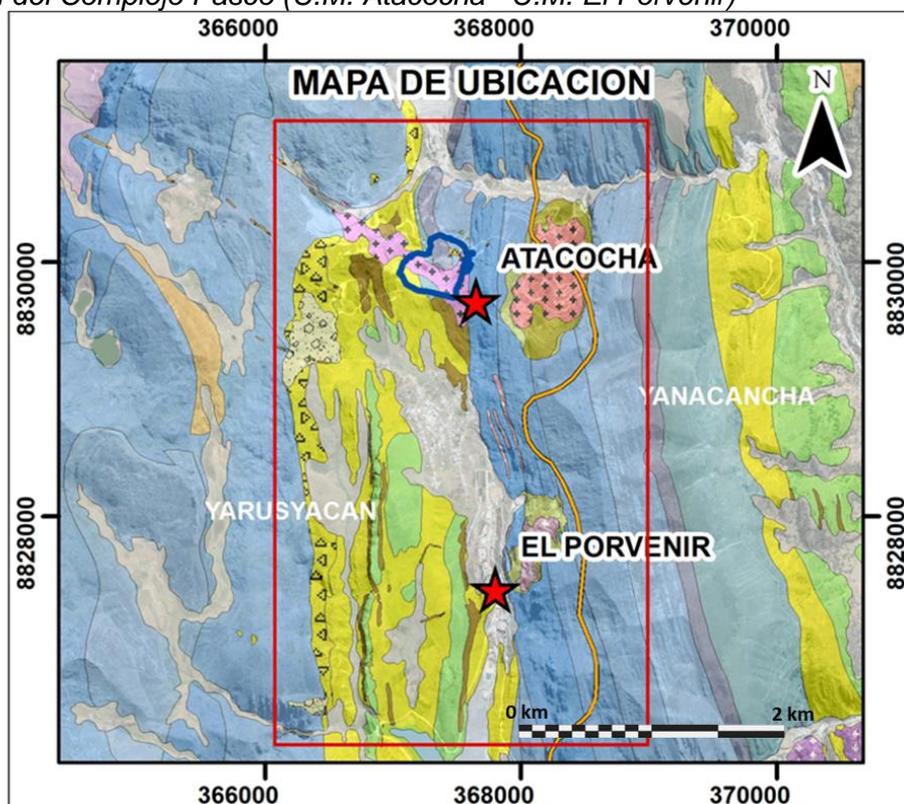
Norte: 8'830,278

Datum: WGS84, Zona 18

La Unidad Minera se encuentra ubicada a unos 15 km al Noreste de la ciudad de Cerro de Pasco, las altitudes oscilan entre 3,900 a 4,330 m.s.n.m. Los accesos principales se pueden realizar a través de las siguientes vías (Ver Tabla 1).

Figura 1

Ubicación del Complejo Pasco (U.M. Atacocha - U.M. El Porvenir)



Nota: Fuente Nexa Resources Atacocha.

Tabla 1

Principales vías de acceso a la Unidad Minera

Recorrido	Tipo de vía	Estado	Distancia (Km)	Tiempo (Hrs)
Lima - Chicrín	Terrestre	Asfaltado	289	7
Jauja - Chicrín	Terrestre	Asfaltado	230	4
Huánuco - Chicrín	Terrestre	Asfaltado	86	2
Lima - Huánuco	Aérea	-	-	1

Nota: Fuente propia.

1.1.2 Clima

La Unidad Minera Atacocha tiene un clima de puna, que se caracteriza por ser frío y seco durante todo el año, con una estación lluviosa que ocurre entre diciembre y abril. Los valores de las temperaturas tienen pequeñas variaciones estacionales con pronunciados cambios durante el día y la noche; sin embargo, en invierno (junio a noviembre) las variaciones diarias son bastante extremas. La temperatura varía entre 5 °C y 25 °C, mientras que la temperatura promedio anual es aproximadamente 11,5 °C. La precipitación en Atacocha ocurre principalmente durante 4 a 5 meses del año en forma de lluvias, granizo o nevadas y se acentúa entre febrero y marzo, de junio a agosto es el período en el que generalmente ocurren las precipitaciones mínimas (Ver Figura 2).

Figura 2

Clima en el Tajo San Gerardo



Nota: Fuente propia.

1.2 Planteamiento del problema

En este apartado se plantea la situación problemática, formulación del problema y la justificación de la investigación.

1.2.1 Situación problemática

El depósito de Atacocha ha sido descrito como un yacimiento del tipo Skarn, debido a que su producción ha estado ligado a la zona baja del depósito, donde la mineralización fue producto del metasomatismo de contacto entre los intrusivos San Gerardo - Santa Bárbara y las calizas del Grupo Pucará. Actualmente la producción está enfocada en la zona alta del depósito y los ensambles mineralógicos tienen otras características que no corresponden al modelo del tipo de Skarn. Además, los objetivos de la malla de perforación diamantina son muy sesgados a la mineralización ya que el modelo geológico 3D tiene características de cuerpos y no de un sistema de vetas.

1.2.2 Formulación del problema general

¿Cuáles son los tipos de mineralización y condiciones de formación, de la parte alta del yacimiento de Atacocha – Tajo San Gerardo?

1.2.3 Formulación de los problemas específicos

- ¿Cuáles son los resultados de los estudios pretromineralográficos y cuál es su relación con la mineralización económica?
- ¿Cuáles son las alteraciones presentes en la zona alta del yacimiento de Atacocha y cuál es su relación con la mineralización?
- ¿Cuáles son las condiciones de formación del mineral mediante los resultados de inclusiones fluidas?

1.2.4 Justificación de la investigación

El presente trabajo se ve justificado por la necesidad de actualizar el modelo de mineralización del Tajo San Gerardo, redefiniendo los objetivos de la malla de perforación diamantina para incrementar los recursos minerales, asociado al corredor de vetas de

rumbo Noroeste - Sureste. Además de definir nuevas áreas con potencial geológico con controles de mineralización similares al Noroeste y Sureste del open pit.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Definir las condiciones de formación, ensambles mineralógicos y alteraciones de la mineralización de la zona alta de Atacocha.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar estudio petromineralográfico del corredor de vetas y analizar su relación con la mineralización económica.
- Determinar las alteraciones presentes de la zona alta del yacimiento de Atacocha y su relación con la mineralización.
- Interpretar las condiciones de formación del mineral mediante los resultados de inclusiones fluidas.

1.4 Hipótesis del estudio

1.4.1 Hipótesis general

Al interpretar las ocurrencias epitermales de sulfuración intermedia se incrementarán los recursos minerales en la zona alta del depósito de Atacocha.

1.4.2 Hipótesis específicas

- Al realizar el estudio petromineralográfico del corredor de vetas se encontrará que la mineralización es típica de un yacimiento epitermal de intermedia sulfuración.
- Al determinar las alteraciones presentes de la zona alta del yacimiento de Atacocha y su relación con la mineralización se encontrará que es típica de un yacimiento epitermal de intermedia sulfuración.
- Al interpretar las condiciones de formación del mineral mediante los resultados de inclusiones fluidas se encontrará que es típica de un epitermal de intermedia sulfuración.

1.5 Antecedentes investigativos

El yacimiento minero de Atacocha fue estudiado en diferentes oportunidades por varios autores quienes describen en forma detallada su ubicación, geografía, clima, historia, geología regional, así como otros aspectos geológicos del yacimiento. Seguidamente se muestran las conclusiones de los trabajos más importantes.

1.5.1 Antecedentes internacionales

Camprubí y Albinson (2006) realizan una revisión completa del conocimiento acerca de los depósitos epitermales, en primer lugar, a nivel general, y, en segundo lugar, restringiéndolos al ámbito de los depósitos mexicanos, concluyen con una clasificación empírica para depósitos de Sulfuración Intermedia y Baja Sulfuración según tres tipos de mineralización que denominó A, B y C. El tipo A comprende los depósitos formados a mayores profundidades a partir de salmueras altamente salinas, en ausencia de evidencias de ebullición y mineralización de carácter polimetálico. El tipo B comprende los depósitos que solo exhiben características de baja sulfuración, pero contiene raíces polimetálicas de intermedia sulfuración. El tipo C comprende los depósitos que solo exhiben mineralizaciones de baja sulfuración y se formaron a partir de ebullición en la parte superior de los depósitos a partir de salmueras de relativa baja salinidad, y son los que presentan contenidos más altos de metales preciosos y más bajos en metales básicos.

Gunnesch (1984) distingue cuatro tipos de mineralización sobre criterios geométricos, lentes de minerales ligados a estratos, cuerpos discordantes, cuerpos irregulares en la zona de contacto de intrusiones terciarias y rocas sedimentarias y disseminaciones de esfalerita, galena y pirita en las areniscas del Grupo Goyllarisquiza, estos tipos de mineralización los considerada de origen epigenético relacionados con las intrusiones del Terciario.

1.5.2 Antecedentes nacionales

Ángeles y Bendezú (2005) reporta los resultados de la campaña de levantamiento geológico de superficie del conjunto de propiedades y sectores de interés alrededor de la Mina Atacocha, en la margen occidental del río Huallaga, elaborando una columna

estratigráfica a escala 1:500, registrando al Grupo Pucará de Atacocha con un espesor total de 1600 m, de los cuales 1100 a 1200 m corresponden a la Fm. Chambará, describiendo a esta formación con un intervalo de brecha intraformacional, facies predominantes de sedimentación de aguas someras y una dolomitización esparítica.

Lavado (2016) realiza un consolidado de columna estratigráfica de la zona presentando caracteres adicionales como la brecha silícea, los intrusivos, la zona de contacto y características litológicas. La columna estratigráfica muestra las potencias aproximadas de las Formaciones y Miembros, y describe la principal mineralización asociada al open pit emplazadas en las Formaciones Aramachay y Condorsinga en vetas, parches y brechas.

Oldham, Dávila, Chamorro, Vargas, Esparza y Marín (2017) realizan el cartografiado litológico-estructural de superficie del área Falla 13 a escala 1:1,000, abarcando un área total de 530 has. Se definió los principales controles estructurales de alineamientos N-S y NW en la mineralización y se realizó la correlación con la información geológica de los niveles 4154-4149, 4050 y 3300. Teniendo como base la información cartográfica realizada se propuso un programa de exploración en otras áreas con características similares en la Unidad Minera Complejo Pasco.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Yacimiento epitermal*

Lindgren (1922, 1933) definió el término “epitermal”, caracterizando este tipo de depósito mineral en función de la mineralogía y de sus características texturales. En la definición que estableció para este depósito, incluyó numerosos yacimientos minerales de metales preciosos, metales básicos, mercurio y antimonio (con estibina como mineral principal). Lindgren sugirió que se trataba de un tipo de depósitos metalíferos formados a partir de fluidos acuosos influenciados por emanaciones ígneas a temperaturas relativamente bajas (<200 °C) y en condiciones de presiones moderadas.

Berger y Eimon (1983); Heald, Foley y Hayba (1987); Sillitoe (1988); Reyes (1990, 1991) consideran que las condiciones de formación de la mayoría de los yacimientos epitermales comprenden temperaturas entre <150 y 300 °C y a profundidades desde la superficie hasta 1 o 2 km, con presiones de hasta varios centenares de bares.

Silberman, Stewart y McKee (1976); Sillitoe (1977) mencionan que en su totalidad los depósitos epitermales están asociados directamente a márgenes de subducción activos en diferentes épocas geológicas. White, Leake, McCaughey y Parris (1995) mencionan que la mayoría de los depósitos epitermales conocidos hoy en día están situados alrededor del margen Circum-Pacífico (Ver figura 3), asociados al termalismo tardío de los sistemas volcánicos operantes en dicho margen desde el Terciario.

Sillitoe (1977) distinguió dos tipos principales de depósitos epitermales: ácidos y alcalinos. El primer tipo de depósito es el llamado de enargita-oro, alunita-caolinita, ácido-sulfato, o de alta sulfuración. El segundo tipo recibe el nombre de depósito epitermal de adularia-sericita o de baja sulfuración. Hedenquist (1987) propuso la denominación de los términos alta sulfuración y baja sulfuración en base del estado de oxidación-reducción del azufre en los fluidos de sistemas geotérmicos actuales. El primer tipo “alta sulfuración” se originaría a partir de fluidos de carácter oxidado y ácido, es decir azufre en estado de

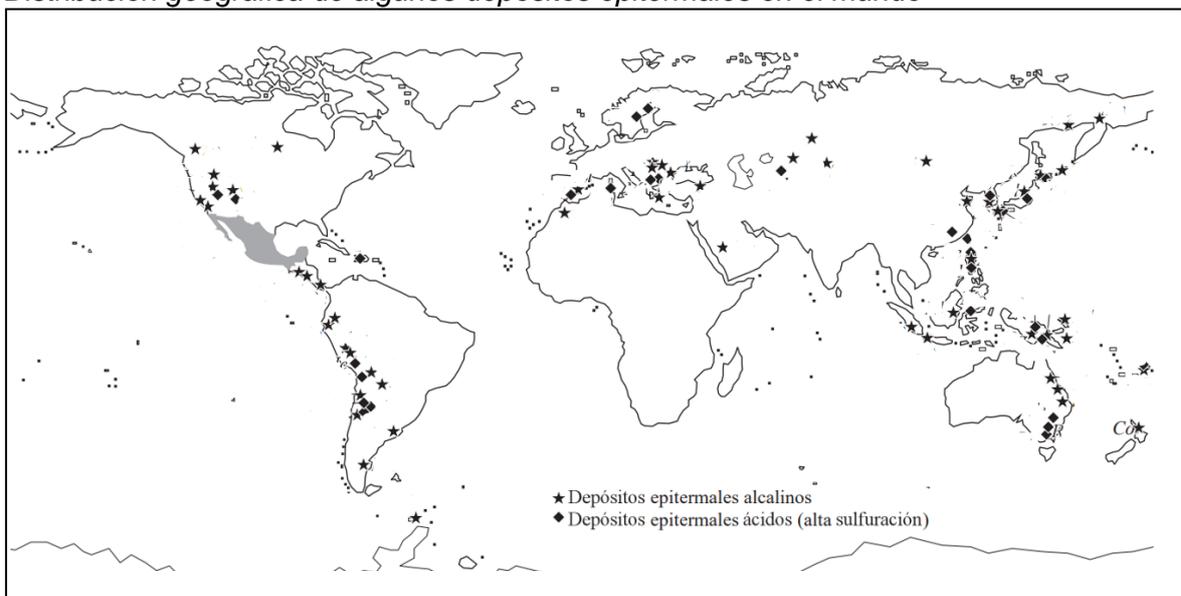
oxidación +6 o +4, en forma de SO_4^{2-} o SO_2 , típicos de fuentes termales ácidas próximas a volcanes; el otro tipo “baja sulfuración”, se originaría a partir de fluidos reducidos y de pH aproximadamente neutro, en los que el azufre se presenta con su estado de oxidación de -2.

Hedenquist, Arribas y Gonzalez-Urien (2000) definen un ambiente epitermal como de poca profundidad, típicamente albergando depósitos de Au, Ag y metales base, más Hg, Sb, S, caolinita, alunita y sílice. Los términos que utilizaron son de baja y alta sulfuración para referirse a los depósitos formados en estos respectivos ambientes, los términos se basan en el estado de sulfuración de la asociación de sulfuros.

Hedenquist et al. (2000); Einaudi, Hedenquist e Inan. (2003); Sillitoe y Hedenquist, (2003) han redefinido los tipos de depósitos epitermales, introduciendo el término de sulfuración intermedia. Los depósitos del subtipo de sulfuración intermedia son estructuralmente muy similares a los de baja sulfuración, aunque las características geoquímicas de los fluidos mineralizantes en sulfuración intermedia suelen guardar una mayor afinidad con los depósitos de alta sulfuración.

Figura 3

Distribución geográfica de algunos depósitos epitermales en el mundo



Nota: Imagen tomada de Camprubi y Albinson (2006).

2.1.2 Recursos minerales

Code, J. O. R. C. (1999) define como una concentración u ocurrencia de material de interés económico intrínseco en o sobre la corteza de la Tierra en forma y cantidad en que haya probabilidades razonables de una eventual extracción económica. La ubicación, cantidad, ley, características geológicas y continuidad de un Recurso Mineral son conocidas, estimadas o interpretadas a partir de evidencias y conocimientos geológicos específicos. Además, establece un marco de referencia para la clasificación de estimaciones de tonelaje y contenido metálico para reflejar distintos niveles de confianza geológica y diferentes grados de evaluación técnica y económica (Ver Figura 4).

Los Recursos Minerales se subdividen, en orden ascendente de la confianza geológica, en categorías de Inferidos, Indicados y Medidos.

2.1.2.1 Recurso mineral inferido. Es aquella parte de un Recurso Mineral por la cual se puede estimar el tonelaje, ley y contenido de mineral con un bajo nivel de confianza. Se infiere a partir de evidencia geológica y se asume pero no se certifica la continuidad geológica ni de la ley. Se basa en información inferida mediante técnicas apropiadas de localizaciones como pueden ser afloramientos, zanjas, rajos, laboreos y sondajes que pueden ser limitados o de calidad y confiabilidad incierta.

2.1.2.2 Recurso mineral indicado. Es aquella parte de un Recurso Mineral para el cual puede estimarse con un nivel razonable de confianza el tonelaje, densidad, forma, características físicas, ley y contenido mineral. Se basa en información sobre exploración, muestreo y pruebas reunidas mediante técnicas apropiadas en ubicaciones como pueden ser: afloramientos, zanjas, rajos, túneles, laboreos y sondajes. Las ubicaciones están demasiado espaciadas o su espaciamiento es inapropiado para confirmar la continuidad geológica y/o de ley, pero está espaciada con suficiente cercanía para que se pueda suponer continuidad.

2.1.2.3 Recurso mineral medido. Es aquella parte de un Recurso Mineral para el cual puede estimarse con un alto nivel de confianza el tonelaje, su densidad, forma, características físicas, ley y contenido de mineral. Se basa en la exploración detallada e información confiable sobre muestreo y pruebas obtenidas mediante técnicas apropiadas de lugares como pueden ser afloramientos, zanjas, rajos, túneles, laboreos y sondajes. Las ubicaciones están espaciadas con suficiente cercanía para confirmar continuidad geológica y/o de la ley.

Figura 4

Relación general entre resultados de exploración, recursos y reservas



Nota: Imagen tomada del Code J.O.R.C. (1999).

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Petrografía de rocas ígneas

Para la clasificación de las rocas ígneas se usará la nomenclatura modal, utilizando diagramas ternarios en los que se representan los contenidos de minerales primarios, siguiendo los campos y nombres de Streckeisen (1976) para rocas con $M < 90$ y los nombres de Le Maitre (2002) para rocas volcánicas (Ver Figura 5).

Para esta clasificación:

Q: cuarzo

A: feldespatos alcalinos. Incluyendo ortosa, microclina, sanidina, anortoclasa y albita con <5 % molar de anortita (An5-An0).

P: plagioclasas, con >5 % molar de anortita (An100-An5).

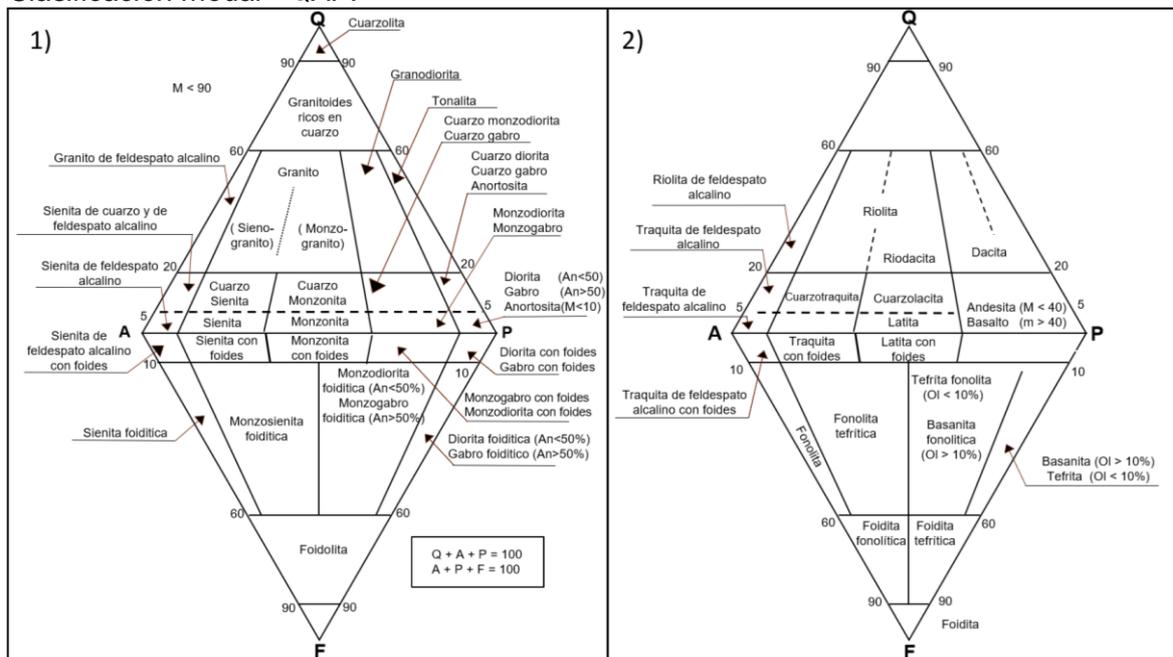
F: feldespatoides. Su presencia es incompatible con Qz.

M: Minerales máficos, incluyendo además de los silicatos de Fe y Mg a los óxidos y minerales accesorios; es decir, todo lo que no sea Q-A-P-F, que forma el grupo de minerales félsicos [$M = 100 - \sum Q(F)AP$] siendo Q y F incompatibles y por tanto excluyentes entre sí.

El valor de M es equivalente al índice de color de la roca salvo en el caso de minerales con abundantes minerales transparentes, como muscovita, apatito y carbonatos primarios. Estos deben ser descontados de M para determinar un valor más apropiado del índice de color $M' = M - (\text{Muscovita, carbonatos, apatito})$.

Figura 5

Clasificación modal - QAPF



Nota: 1) Clasificación y nomenclatura de rocas plutónicas y de 2) rocas volcánicas de acuerdo con su contenido modal de minerales, usando el diagrama QAPF (basado en Streckeisen 1976): Q= cuarzo; A= Feldespato alcalino; P= Plagioclasas; F= feldespatoides según recomendación de la IUGS (Le Maitre, 1989). Imagen tomada de Yparraguirre (2021).

2.2.2 Estudios minerográficos

INGEMMET (s.f.) menciona que los estudios minerográficos son la caracterización de las especies minerales macroscópicas y microscópicas; en las descripciones macroscópicas de muestra de mano se realizan la identificación de los minerales presentes a través de sus propiedades físicas como dureza, forma, brillo, raya, fractura y exfoliación. Las descripciones microscópicas se realizan con ayuda de un microscopio de luz polarizada y consisten en la identificación de minerales presentes, rasgos morfológicos, tamaños, anisotropía, reflectancia, asociaciones entre ellos, reemplazamientos y texturas (Ver Figura 6).

Figura 6

Estudios minerográficos



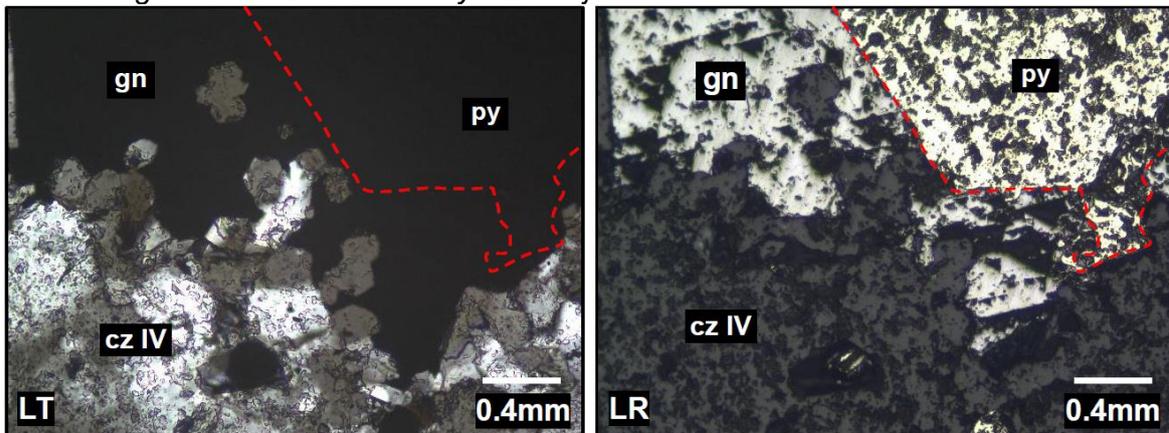
Nota: Fuente propia.

2.2.3 Estudio petrominerográfico

INGEMMET (s.f.) menciona que el estudio petrominerográfico integra el estudio petrográfico y estudio minerográfico, para ello se realiza a través de una sección delgada pulida (Ver Figura 7), que permitirá observar los minerales tanto de mena y gangas. Consiste en determinar la relación que existe entre minerales no metálicos y metálicos económicos, tamaño de los minerales identificados, tipo de texturas, asociaciones mineralógicas, secuencia paragenética, alteraciones y reemplazamientos.

Figura 7

Fotomicrografía en luz transmitida y luz reflejada



Nota: Fuente propia.

2.2.4 Inclusiones fluidas (IF)

Las IF son porciones pequeñas de líquido o de gas o de una mezcla de estas dos fases, que fueron capturadas en imperfecciones de minerales durante su crecimiento. Sus tamaños varían de 1 a 100 μm , usualmente entre 3 a 20 μm . Las IF están relacionados a procesos hidrotermales que han ocurrido en los yacimientos.

Debido a varias evidencias (Yparraguirre, 2015), las IF han conservado las propiedades químicas y físicas de las soluciones originales, y se les considera como muestras directas de las fases volátiles.

El estudio de Inclusiones Fluidas (IF) se realiza con el microscopio de polarización y platina de calentamiento-enfriamiento tipo Linkam (Ver Figura 8), esta técnica es importante porque brinda la siguiente información:

- Temperatura de homogeneización (T_h °C)
- Presión del yacimiento
- Cálculo de la salinidad del fluido mineralizante (% wt NaCl)
- Secuencias paragenéticas
- Direcciones de fluidos mineralizantes

Figura 8

Microscopio tipo Linkam



Nota: Imagen tomada de Yparraguirre (2022).

2.2.5 Diagrama de temperatura de homogeneización vs salinidad

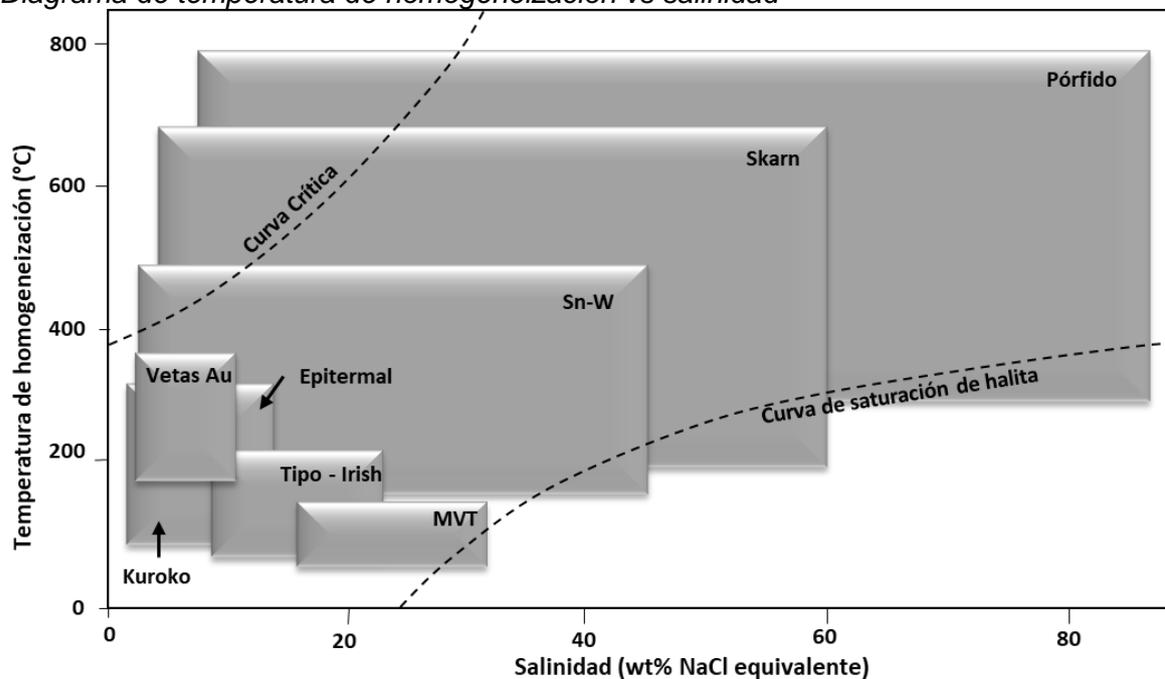
Wilkinson (2001) representa en un diagrama una compilación de información de temperatura de homogeneización y salinidad de diferentes tipos de depósitos, basándose significativamente en los resúmenes de Roedder (1984), junto con una amplia gama de datos publicados (Ver Figura 9).

Los principales tipos de depósitos de mineral ocupan amplios campos en el espacio de Th - salinidad que reflejan las propiedades básicas de los fluidos involucrados en su

formación y están muy restringidos entre la curva de saturación de halita y la curva crítica para soluciones puras de NaCl.

Figura 9

Diagrama de temperatura de homogeneización vs salinidad



Nota: Diagrama tomado de Wilkinson (2001).

2.2.6 Difracción de rayos X (DRX)

Lazo (2019) menciona que la Difracción de Rayos X (DRX), es un método de análisis estructural, que permite la rápida identificación de materiales particulados, arcillas y otros minerales por su estructura cristalina. Proporciona información detallada acerca de la estructura cristalográfica de sus muestras, que puede utilizarse para identificar las fases presentes. DRX es especialmente útil para la identificación de fases de grano fino que son difíciles de identificar por otros métodos como la microscopía óptica, el microscopio electrónico de barrido/espectrómetro por dispersión de energía (SEM/EDS) o la evaluación cuantitativa de materiales por microscopía electrónica de barrido (QEMSCAN™).

Para el análisis la muestra se pulveriza a malla -150 y se coloca en la portamuestra a temperatura ambiente. El equipo utilizado es el Difractómetro de Rayos X modelo D8 Advance (Ver Figura 10) y la energía de excitación es de 40 kv y 30 mA con un ángulo de barrido en el rango de 2° a 70°.

Figura 10

Difractómetro de rayos X modelo D8 Advance



Nota: Imagen tomada de Yparraguirre (2022).

2.2.7 Microscopía electrónica de barrido SEM

Fernández (2018) en su artículo define que la microscopia electrónica de barrido o SEM se basa en el principio de la microscopia óptica en la que se sustituye el haz de luz por un haz de electrones. Su funcionamiento consiste en hacer incidir un barrido de haz de electrones sobre la muestra (Ver Figura 11).

La muestra está generalmente recubierta con una capa muy fina de oro o carbón, lo que le otorga propiedades conductoras. La técnica de preparación de las muestras se denomina "sputtering" o pulverización catódica.

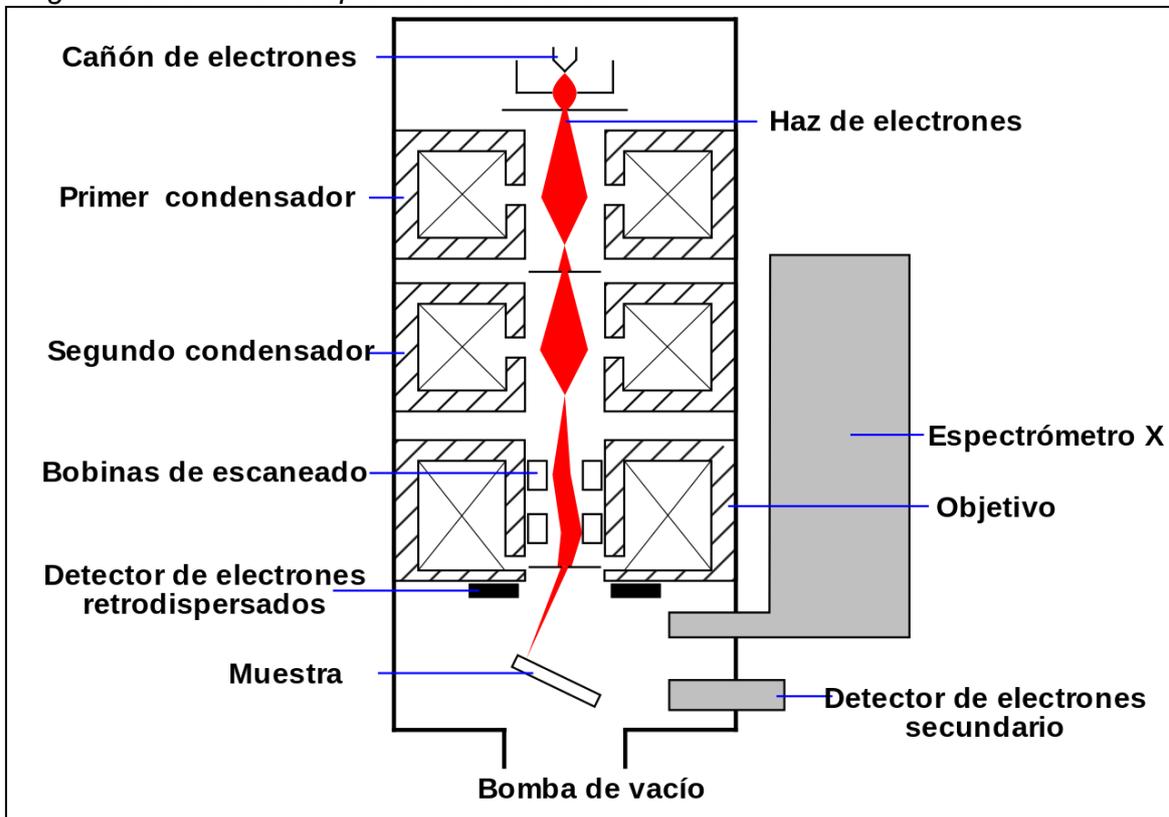
Al alcanzar el haz la superficie de la muestra se generan principalmente las siguientes partículas: electrones retrodispersados (e1) y electrones secundarios (e2), además de radiación electromagnética (rayos X) y otras partículas menos significativas.

El microscopio se encuentra internamente equipado con unos detectores que recogen la energía y la transforman en las siguientes imágenes y datos:

- Detector de electrones secundarios: (**SEI** – *Secondary Electron Image*) con lo que se obtiene las imágenes de alta resolución.
- Detector de electrones retrodispersados: (**BEI** – *Backscattered Electron Image*) con menor resolución de imagen, pero mayor contraste para obtener la topografía de la superficie.
- Detector de energía dispersiva: (**EDS** – *Energy Dispersive Spectrometer*) detecta los rayos X generados y permite realizar un análisis espectrográfico de la composición de la muestra.

Figura 11

Diagrama de un microscopio electrónico de barrido



Nota: Diagrama de un MEB equipado con un detector de rayos X.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

En este capítulo se detallan los trabajos realizados en lo siguiente: marco geológico regional, marco geológico local, metodología, estudios petromineraográficos, análisis de difracción de rayos X, estudios de inclusiones fluidas, estudios de microscopía electrónica de barrido.

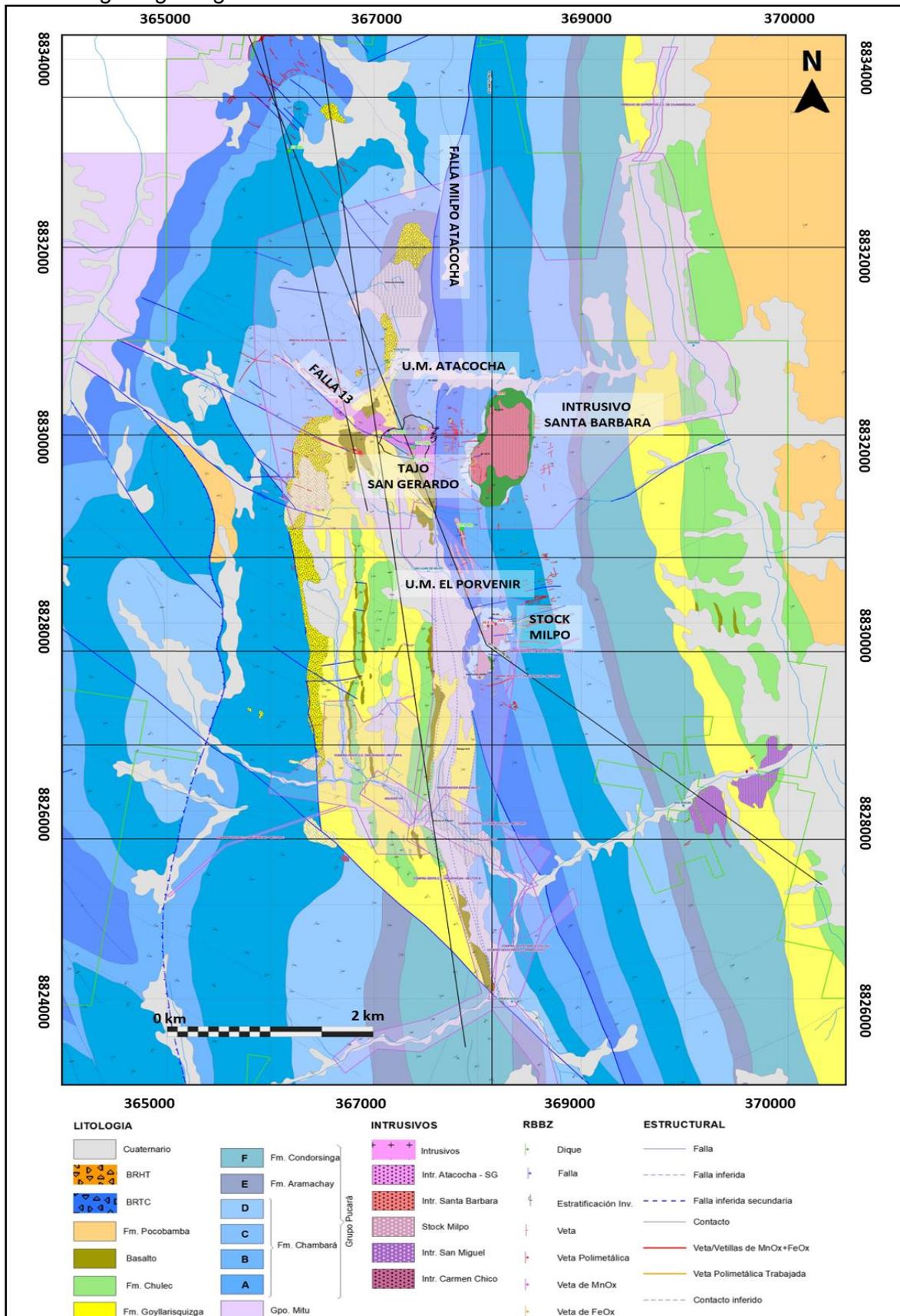
3.1 Marco geológico regional

La Unidad Minera Atacocha se ubica en los Andes Centrales del Perú está caracterizada por mineralización polimetálica Zn-Pb-Cu-Ag-Au. Litológicamente la zona de trabajo está constituida principalmente por secuencias estratigráficas del Grupo Mitu, las calizas del Grupo Pucará (Triásico Superior-Jurásico inferior), las areniscas de la Fm Goyllarisquizga (Cretácico inferior) y la Fm Pocobamba, que han sido cortadas por intrusivos de ~25-30 Ma (Oligoceno), generando mineralización de vetas, asociado al intrusivo San Gerardo.

Estructuralmente la región tiene un sistema principal de fallas NS y NW-SE y el sistema secundario E-W. El corredor estructural al Oeste (Cerro de Pasco – Colquijirca) en la meseta de Junín y el corredor estructural Este (Milpo-Atacocha) ubicado en la faja subandina hacia la naciente de los valles amazónicos (Ver Figura 12).

Figura 12

Plano de geología regional



Nota: Fuente Nexa Resources Atacocha.

3.1.1 Geomorfología

Morfoestructuralmente, la mayor parte de la zona se encuentra dentro de las Altiplanicies Interandinas que separan la Cordillera Occidental de la Cordillera Oriental (Ver Figura 13). Regionalmente se ha identificado dos grupos de zonas morfológicas con características similares: Altiplanicies que comprende la Planicie del lago Junín (Ver Figura 14), Bosque de Rocas y Cordillera Oriental que comprenden el Borde Oeste de la Cordillera Oriental, Valles Interandinos y Cordillera Oriental. Las pendientes de las altiplanicies de cerros y lomas son suaves y redondeadas; los valles tienen forma de “U”.

Figura 13

Nevado Quilococho



Nota: Ubicado en el extremo noreste del Cuadrángulo de Cerro de Pasco. También se observa un valle glaciar en «U» con morrenas (vista tomada al noreste) del Grupo Pucará, secuencias volcanosedimentarias del Grupo Mitu. Imagen tomada de Rodríguez, Cueva y Carlotto (2011).

Figura 14

Planicie del Lago Junín



Nota: Se observa parte de la pampa Bombón; la textura rugosa corresponde a la morfología del Bosque de Rocas (vista tomada al noreste). Imagen tomada de Rodríguez, Cueva y Carlotto (2011).

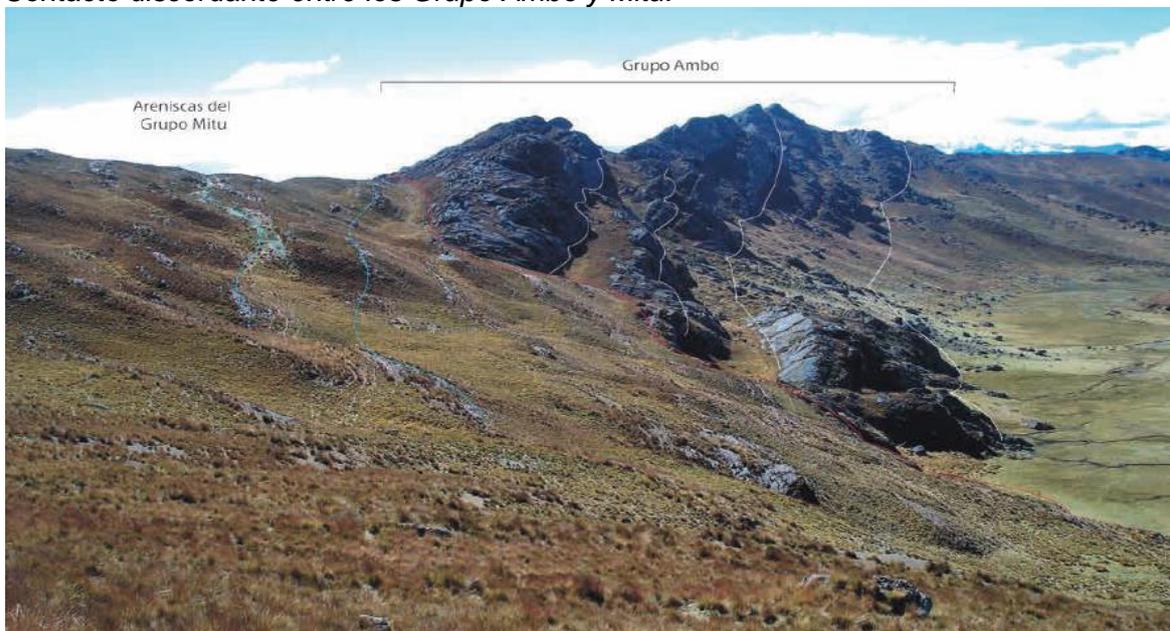
3.1.2 Estratigrafía

Se describe la estratigrafía regional de la zona de trabajo.

3.1.2.1 Grupo Mitu. Mc Laughlin (1924) definió como Grupo Mitu a unas secuencias detríticas de color rojo que aflora en la localidad de Mitu. En el cuadrángulo de Cerro de Pasco, la base del Grupo Mitu sobreyace en discordancia angular a los Grupos Tarma -Copacabana y/o al Grupo Ambo (Ver Figura 15), los espesores varían bruscamente de un lado a otro de las fallas principales, encontrándose el mayor espesor entre las fallas Milpo-Atacocha -Ninacaca y Cerro de Pasco. El Grupo Mitu está compuesto por areniscas rojas y conglomerados con clastos subredondeados a angulosos de naturaleza volcánica, sedimentaria y metamórfica, estos están envueltos en una matriz de arenisca roja. Dentro de la secuencia sedimentaria se encuentran intercalaciones de lavas grises con menos de 50 m de espesor.

Figura 15

Contacto discordante entre los Grupo Ambo y Mitu.



Nota: Vista tomada al oeste de la mina Shalipayco. Imagen tomada de Rodríguez, Cueva y Carlotto (2011).

3.1.2.2 Grupo Pucará. Mc Laughlin (1924) definió el Grupo Pucará en las cercanías del Goyllarisquiza y pertenecen a la edad del Triásico Superior a Jurásico Inferior. Harrison (1943) lo divide en tres unidades entre Junín y Huachón sin darles nombres. Jenks (1951) lo eleva a Grupo en la región de los Andes centrales y Mégard (1968) en la zona de Huancayo subdividió al Grupo Pucará en tres Formaciones: Chambará, Aramachay y Condorsinga. El Grupo Pucará es una de las unidades estratigráficas más importantes en el centro del Perú, ya que es un metalotecto litológico para emplazamiento de mineralización polimetálica en yacimientos metasomáticos de contacto o de tipo Mississippi Valley.

3.1.2.2.1 Formación Chambará. Mégard (1968) nombró a las calizas inferiores del Grupo Pucará como Formación Chambará, de edad Noriano - Reatiano. Está compuesta por dolomitas y calizas wackestone a mudstone, con niveles fosilíferos de crinoideos, bivalvos, gasterópodos, ostrácodos y braquiópodos. En algunos niveles, las calizas tienen laminación cruzada. Al techo presentan algas, oolitos y chert, corresponden a un medio tidal a intertidal, con zonas de barrera. El espesor de la secuencia varía de un lado a otro, al este de Carhuamayo en el Dominio Oriental, puede alcanzar hasta 750 m; en cambio, en el Dominio Nororiental, entre las fallas Cerro de Pasco y Milpo Atacocha, puede sobrepasar 1 200 m. (Rodríguez, Cueva y Carlotto, 2011).

3.1.2.2.2 Formación Aramachay. Mégard (1968) indicó que la Formación Aramachay sobreyace en forma concordante a la Formación Chambará e infrayace de igual forma a la Formación Condorsinga. Está constituida por calizas mudstone con estratificación ondulada y lutitas negras en estratos pequeños, es la unidad más fosilífera del Grupo Pucará por lo que la fauna encontrada está en el rango del Rehatiano superior a Sinemuriano. Las facies indican que la Formación Aramachay se ha depositado en una zona profunda en donde se han podido conservar los restos de ammonites. En el Dominio Nororiental entre las fallas Cerro de Pasco y Milpo – Atacocha, se ha considerado como Formación Aramachay a una secuencia que sobrepasa los 400 m de espesor (Rodríguez et al., 2011).

3.1.2.2.3 Formación Condorsinga. Rodríguez et al., (2011) mencionan que la Formación Condorsinga aflora en la parte oriental del Cuadrángulo de Cerro de Pasco, es decir, al este de la falla Cerro de Pasco y sobreyace a la Formación Aramachay e infrayace al Grupo Goyllarisquizga. En el Dominio Nororiental, al este de Cerro de Pasco, la Formación Condorsinga está compuesta por calizas oscuras con chert y algunas calizas nodulosas. La Formación Condorsinga no se han encontrado fósiles que diagnostiquen su edad; sin embargo, al encontrarse sobre la Formación Aramachay se asume que empieza en la edad Pliensbachiano y la parte superior es asumida hasta el Bajociano como lo sugiere Mégard (1978).

3.1.2.3 Grupo Goyllarisquizga. Jenks (1951) definió como Formación “Areniscas Goyllarisquizga Jatunhuasi”, Wilson (1963) lo elevó a la categoría de Grupo, incluyendo a toda la serie clástica y calcárea que aflora en la cuenca Cretácica Occidental del centro y norte andino del Perú. Rodríguez et al., (2011) determinaron que en la Cordillera Occidental el Grupo Goyllarisquizga está conformado por las Formaciones Chimú, Santa - Carhuaz y Farrat. En el Dominio Central, afloran las tres Formaciones y en el Dominio Nororiental solo las dos primeras. Este Grupo corresponde a la edad del Jurásico superior al Cretácico inferior.

3.1.2.3.1 Formación Chimú. Benavides (1956) definió la Formación Chimú en la región de La Libertad. En el Dominio Occidental aflora en contacto fallado sobre la Formación Chúlec. Está constituida en la parte inferior por areniscas gruesas a conglomerádicas con intercalaciones de conglomerados con clastos subredondeados de cuarcitas y niveles de carbón, el espesor de la Formación Chimú puede sobrepasar los 150 m. La presencia de conglomerados indica que el medio de depósito corresponde a un sistema fluvial proximal pasando a un fluvial distal y deltas. Dentro de la Formación Chimú no se han encontrado fósiles; sin embargo, de acuerdo con la posición estratigráfica se le asigna al Cretácico inferior, pero puede llegar hasta el Tithoniano (Rodríguez et al., 2011).

3.1.2.3.2 Formación Santa-Carhuaz. Benavides (1956) define como Formación Santa; de edad Valanginiano – Berraminano; a una secuencia calcárea que se encuentran en el río Santa y como Formación Carhuaz a una secuencia de areniscas rojas que se encuentran en los alrededores del pueblo de Carhuaz, regionalmente ambas formaciones se han agrupado debido a que el contacto con la formación Santa no es notorio y solo aparecen niveles calcáreos en algunos afloramientos. Está constituida por areniscas rojas con laminación cruzada intercalada con lutitas y limos masivos. Calizas y calcarenitas se encuentran intercaladas como lentes y en diferentes ubicaciones dentro de la columna estratigráfica (Rodríguez et al., 2011).

3.1.2.3.3 Formación Farrat. Fue descrita por Stappenbeck (1929), la Formación Farrat sobreyace progresivamente con las Formaciones Santa-Carhuaz e infrayace a las calizas de la Formación Chúlec, de edad Berraminano – Albiano Inferior.

Es una secuencia de areniscas cuarzosas blanco amarillentas con intercalaciones de limos y areniscas calcáreas con restos de plantas al techo las cuales marcan el paso progresivo del Grupo Goyllarisquizga a la Formación Chúlec. La Formación Farrat se ha depositado en un ambiente de ríos distales cercanos a la playa, la cual fue invadida progresivamente por el mar de la Formación Chúlec (Rodríguez et al., 2011).

3.1.2.1 Formación Chúlec. Mc Laughlin (1924) la denominó como miembro inferior de las calizas Machay, Benavides (1956), después la elevó a la categoría de Formación Chúlec, sobreyace al Grupo Goyllarisquizga e infrayace concordantemente a la Formación Pariatambo. Está constituida principalmente de calizas y ha sido dividida en dos miembros: el miembro inferior está compuesto de calizas margosas con laminación horizontal seguida de calizas dolomíticas y el miembro superior está compuesto por calizas grises con algunas margas laminadas. El medio sedimentario de la Formación Chúlec corresponde a una plataforma carbonatada. Según la fauna encontrada la edad corresponde al Albiano (Rodríguez et al., 2011).

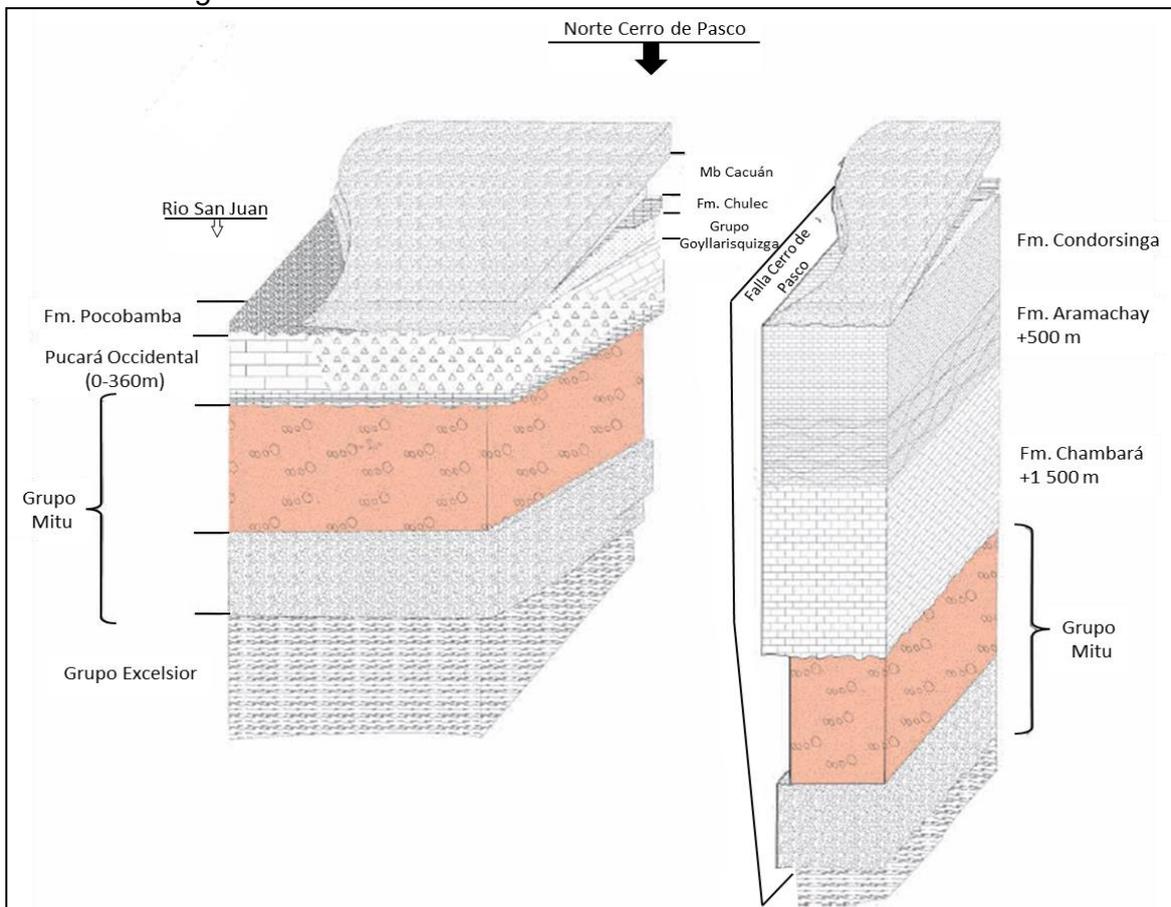
3.1.2.2 Formación Pocobamba. Fue mencionada por Mc Laughlin (1924)

como unidad sedimentaria, Jenks (1951) lo asume como Formación Casapalca, dividiéndola en tres miembros: miembro inferior, conglomerado Shuco y miembro Calera. Ángeles (1999) redefine la estratigrafía cenozoica de Cerro de Pasco considerándola como Formación Pocobamba, dividida en dos miembros (Cacuan y Shuco).

Entre La Quinua y Ticalcayán en la margen derecha del río Huallaga, se encuentran afloramientos de la Formación Pocobamba con más de 1000 m de espesor, sobreyaciendo en discordancia angular a la Formación Chulé. El miembro Cacuan está compuesto por areniscas y lutitas rojas, presentando niveles ocasionales de conglomerados rojizos. El miembro Shuco está compuesto por horizontes de conglomerados y brechas sedimentarias, la mayor parte de los clastos son caliza y sílex de la Formación Chambará con diámetros de 20 cm envueltos en una matriz arenosa y lentes de caliza.

Figura 16

División estratigráfica en Cerro de Pasco



Nota: Imagen tomada de Rodríguez et al. (2011).

3.1.2.3 Rocas Intrusivas. Las intrusiones en la región del cuadrángulo de Cerro de Pasco se manifiestan a través de batolitos, stocks subvolcánicos, domos y diatremas. Todos los cuerpos intrusivos se emplazaron en diferentes edades, agrupados en 6 eventos: Carbonífero, Pérmico superior-Triásico inferior, Eoceno, Oligoceno, Mioceno inferior y Mioceno superior.

La actividad magmática del Oligoceno se encuentra al Noreste de Cerro de Pasco, aflorando como stocks a lo largo del sistema de falla Milpo-Atacocha-Ninacaca. Los stocks de Milpo-Atacocha han sido datados por varios autores mediante el análisis de Ar-K en biotita, hornblenda, plagioclasa. Estas dataciones corresponden al Oligoceno; sin embargo, este magmatismo se ha realizado en diferentes episodios o pulsos originando diferentes tipos de litología (Gunnesch et al., 1988).

Los stocks de Milpo-Atacocha, intruyen principalmente a las calizas del Grupo Pucará y a las areniscas del Grupo Goyllarisquizga. A pesar de que la litología de los stocks de Milpo-Atacocha fue agrupada como dacita porfirica (Johnson, Lewis y Abele, 1955; Hirdes, 1976; Rubo, 1979; Delgado, 1980), su composición es mucho más compleja. Petrográficamente (Gunnesch et al., 1988) determinaron hasta 6 variaciones litológicas dentro del área de Milpo-Atacocha: pórfidos dioríticos con hornblenda, pórfidos dioríticos con hornblenda y biotita, pórfidos granodioríticos con hornblenda, pórfidos granodioríticos o tonalitas con biotita ± hornblenda, microgranodioritas y lamprófidios, presentando una tendencia calcoalcalina.

La textura general de las rocas son porfiríticas con fenocristales y matriz que varían en porcentaje. Esto sugiere que el nivel de intrusión de los stocks fue relativamente cercano a la superficie, es decir, en condiciones subvolcánicas (Gunnesch, 1984).

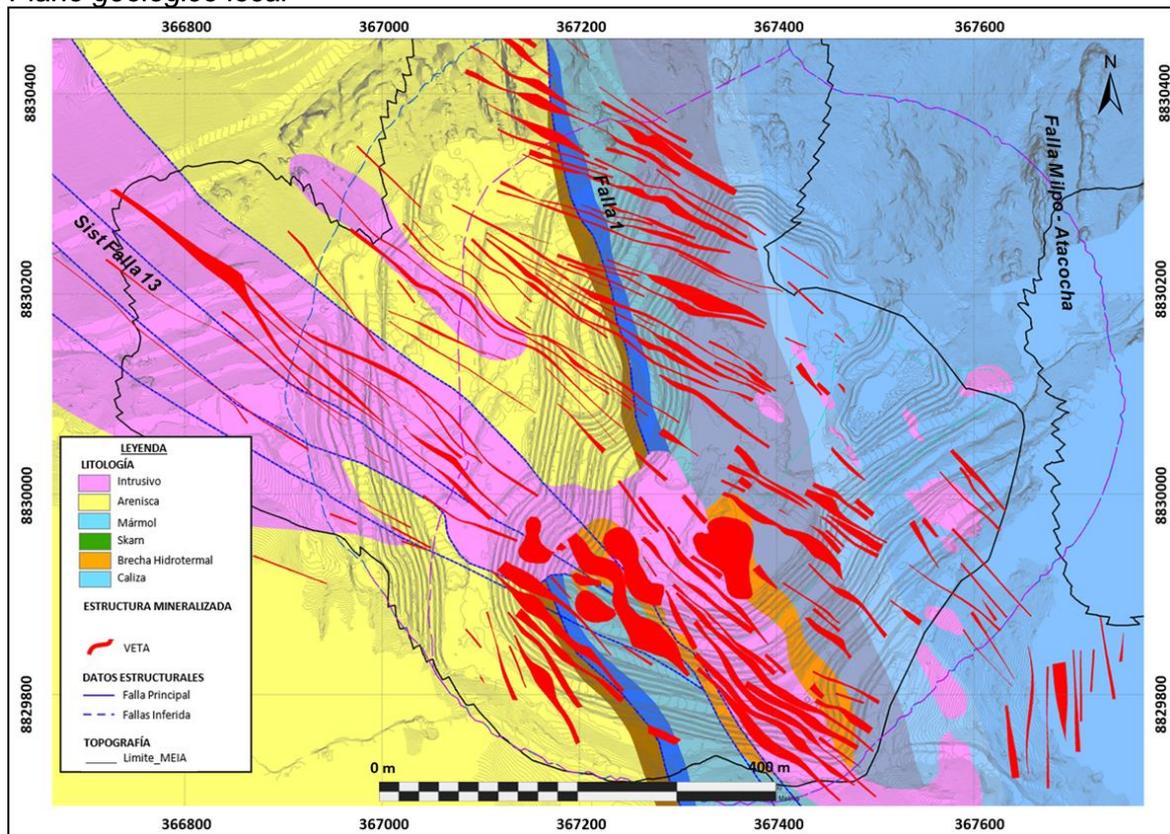
3.2 Marco geológico local

En el Tajo San Gerardo aflora el Grupo Pucará diferenciándose la Formación Chambará, Formación Aramachay y Formación Condorsinga. Las areniscas del Grupo Goyllarisquizga que afloran están compuestas por areniscas cuarzosas de grano grueso a fino, presentan laminaciones paralelas, el color varía entre blanco grisáceo a tonalidades

rojizas, en algunos tramos se encuentran intercalaciones de limos de color beige a verdosas. El intrusivo San Gerardo de composición diorítica, tiene un rumbo Noroeste paralelo al sistema de fallas 13, este intrusivo corta a toda la secuencia sedimentaria, por el Este a las calizas del Grupo Pucará y por el Oeste a las areniscas del Grupo Goyllarisquiza. (Ver Figura 17).

Figura 17

Plano geológico local



Nota: Fuente propia.

3.2.1 Geomorfología

La Unidad Minera Atacocha se encuentra en la sierra central del Perú en la Cordillera Occidental, muy cerca al Nudo de Pasco. Dentro del área de influencia de la unidad minera existen tres zonas morfológicas muy distintas entre sí, la superficie Puna (Ver Figura 18), la zona cordillerana y la zona de valles periglaciales. El área presenta una morfología con relieves suaves y también zonas con pendientes fuertes. Las cotas varían entre 4050 a 4500 msnm correspondiendo las zonas más elevadas los cerros Santa Bárbara y el cerro Cherchere, mientras las zonas más bajas corresponden a la quebrada

de La Laquia y la quebrada Chicrín, esta última forma parte de la red hidrográfica del río Huallaga. La topografía se caracteriza por pendientes moderadas a fuertes, que en algunas zonas alcanzan los 80°, especialmente cuando se alcanza las cotas 4500 msnm de altitud.

Figura 18

Superficie puna de la zona de Santa Bárbara



Nota: Nivel 4200 m.s.n.m.

3.2.2 Estratigrafía

A continuación, se describe la columna estratigráfica de la zona de trabajo

3.2.2.1 Grupo Pucará. En el yacimiento de Atacocha en la zona de estudio Tajo San Gerardo predominan los afloramientos de rocas del Grupo Pucará con sus tres Formaciones: Formación Chambará, dividido en 4 unidades A, B, C y D; de las cuales las unidades C y D afloran en la zona operativa del tajo; Formación Aramachay (Unidad E) y Formación Condorsinga (Unidad F). La secuencia de calizas del Grupo Pucará infrayace al Grupo Goyllarisquizga (Ver Figura 19).

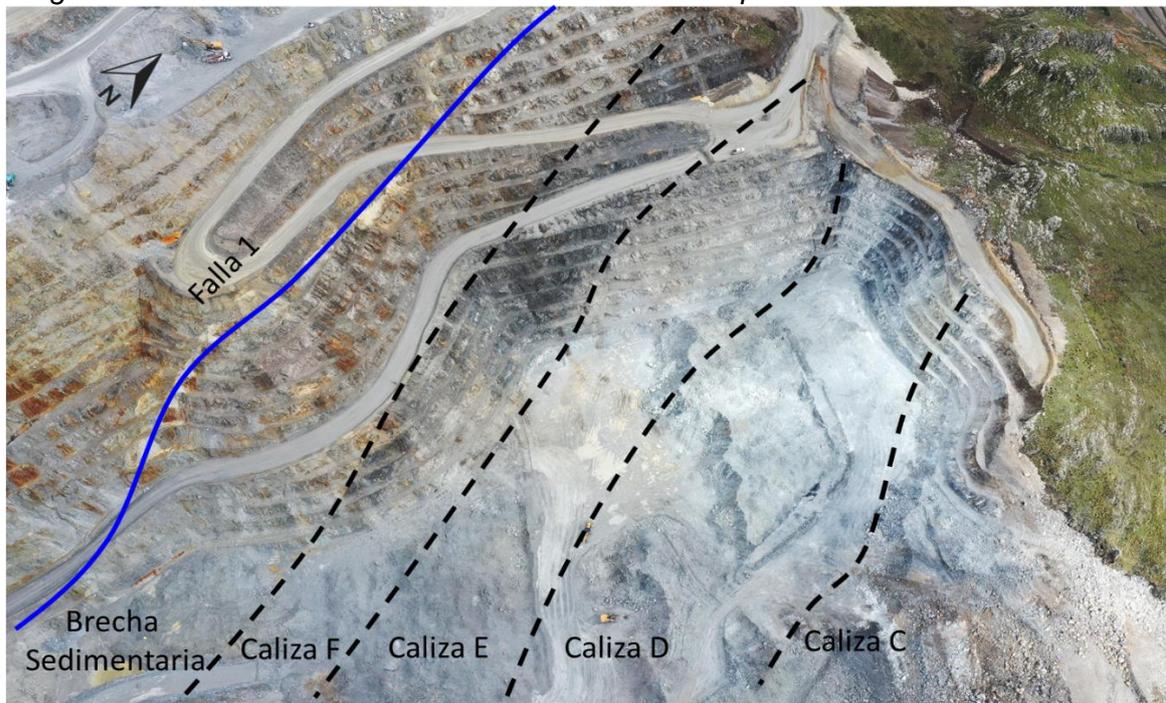
3.2.2.1.1 Formación Chambará. Caracterizada localmente en las siguientes unidades:

Unidad A, esta unidad es la base de la Formación Chambará, se ubica al Este del Falla Milpo-Atacocha, constituida por calizas grises a gris oscuras, micríticas a esparíticas con niveles de dolomías finas, soportados por una matriz gris oscura calcárea con venillas de calcita. Al techo de esta unidad se presenta un horizonte fosilífero (Ver Figura 20-A).

Unidad B, esta unidad corresponde a la parte intermedia de la Formación Chambará, constituida por calizas gris oscuras a negras y de granulometría fina a media, con horizontes fosilíferos. Las calizas de la unidad B se puede subdividir en B-I y B-II, una de las características principales en la unidad B-I es la estratificación delgada de las calizas con láminas delgadas lutáceas entre los estratos y las calizas de la unidad B-II con estratos más anchos y de estructura masiva (Ver Figura 20-B).

Figura 19

Imagen satelital mostrando secuencia de calizas del Grupo Pucará



Nota: Fuente propia.

Unidad C, esta unidad corresponde a la parte intermedia de la Formación Chambará, constituida por calizas y dolomías chérticas grises y de granulometría de media a fina (wackstone), con contenidos de chert en la estratificación llegando hasta el 60 % del volumen de la roca. En el Tajo San Gerardo al Oeste de la Falla 1 se observan calizas oscuras a grises micríticas con tramos de serpentina (Ver Figura 20-C).

Unidad D, esta unidad corresponde a la parte superior de la Formación Chambará, constituida por calizas grises de granulometría media a gruesa, intercalado con niveles dolomíticos beige claros, también se observan horizontes chérticos y bituminosos (Ver Figura 20-D).

3.2.2.1.2 Formación Aramachay. Caracterizada localmente como la unidad

E:

Unidad E, esta unidad corresponde a la Formación Aramachay, constituida por intercalaciones de calizas micríticas de tonalidades gris oscuras y margas con niveles lutáceos menores a 5 cm. Se expone al Este del Tajo San Gerardo poco alterada y fracturada. (Ver Figura 20-E).

3.2.2.1.3 Formación Condorsinga. Caracterizada localmente como la unidad

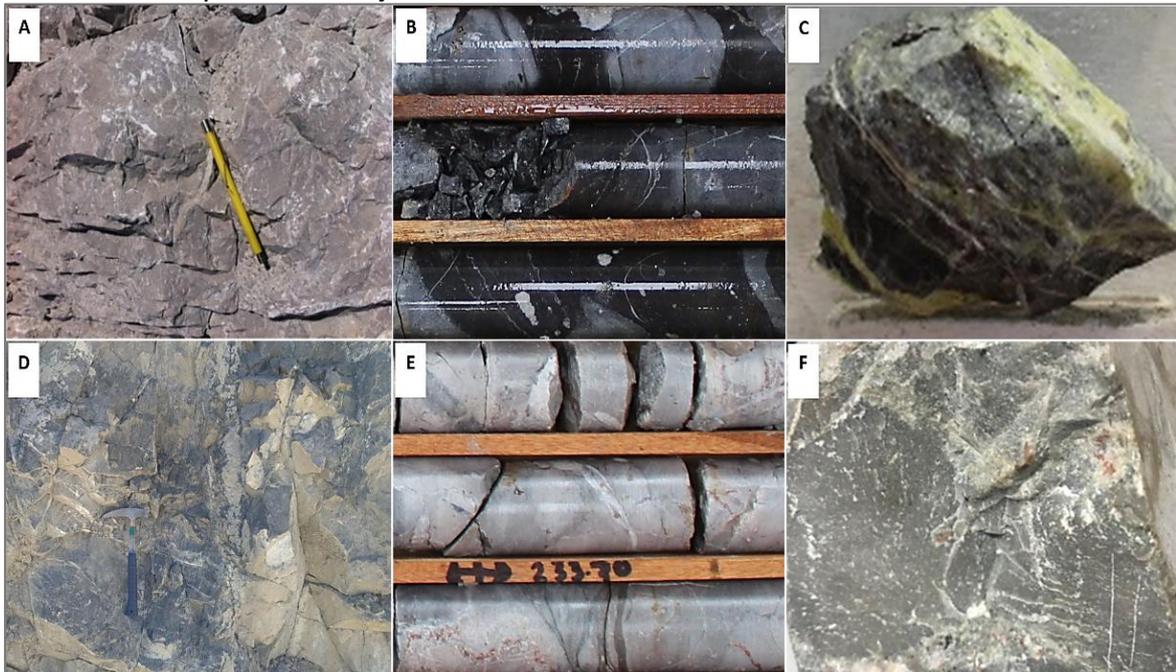
F:

Unidad F, esta unidad corresponde a los niveles superiores del Grupo Pucará denominado Formación Condorsinga, constituida por calizas micríticas con nódulos de chert de grano fino a medio y de color gris claro a tonalidades rojizas (Ver Figura 20-F).

En el techo de la Formación Condorsinga en contacto con el Grupo Goyllarisquizga se tiene un horizonte de Brecha Intraformacional polimíctica compuesta de fragmentos subredondeados a subangulares de caliza, chert y jaspe en un soporte de matriz arenosa y calcárea.

Figura 20

Calizas del Grupo Pucará Tajo San Gerardo



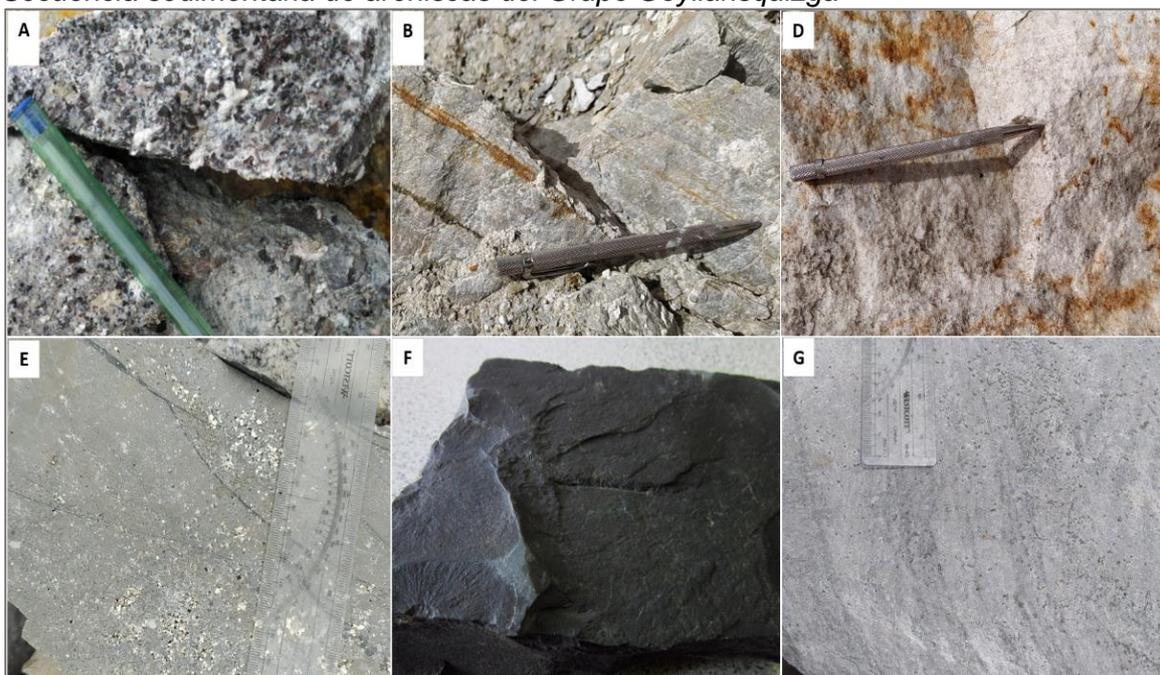
Nota: Nexa Resources Atacocha. Ver detalle descriptivo en el capítulo 3.2.2.1

3.2.2.2 Grupo Goyllarisquizga. En el flanco Este del sinclinal Milpo aflora esta unidad con buzamientos de 10° hasta 60° al Oeste, caracterizada por una secuencia de areniscas con niveles lutáceos en contacto con el techo del Grupo Pucará. La secuencia sedimentaria de areniscas reinterpretada en el Tajo San Gerardo consiste en las siguientes facies, del piso al techo:

- Arenisca (nomenclatura interna se la reconoce como arenisca conglomerádica) de arena y clastos subredondeados de sílice, opalina y chert (Ver Figura 21-A)
- Arenisca de grano grueso de color beige (Ver Figura 21-B)
- Limolita
- Arenisca cuarzosa de grano medio a grueso (Ver Figura 21-D)
- Arenisca con intercalación de limos (Ver Figura 21-E)
- Arenisca con horizontes de lutitas bituminosas oscuras (Ver Figura 21-F)
- Arenisca de grano fino a medio (Ver Figura 21-G)

Figura 21

Secuencia sedimentaria de areniscas del Grupo Goyllarisquizga



Nota: Fuente propia. Ver detalle descriptivo en el capítulo 3.2.2.2

3.2.2.3 **Andesita.** (Nomenclatura interna de Atacocha andesita basáltica).

Aflora principalmente en el núcleo del sinclinal Milpo en forma de cuerpos y sills, cortando a la secuencia de areniscas del Grupo Goyllarisquizga en el flanco Oeste del Tajo San Gerardo. Está constituida por plagioclasa en porcentajes variables (10 % – 40 %) y hornblenda-biotita entre 5 % a 20 % en una matriz afanítica verdosa. Se observa también algunos diques compuestos de hornblendas de hasta 1 cm y escasas plagioclasas en una matriz afanítica (Ver Figura 22).

Figura 22

Andesita basáltica



Nota: Fuente propia.

3.2.2.4 Intrusivo San Gerardo. Principalmente de composición diorítica, presenta una morfología elongada e irregular de rumbo Noroeste, emplazándose en la apertura producida por el sistema de fallas 13, que inicia al Sureste del Tajo San Gerardo en contacto con la falla Milpo-Atacocha y corta a toda la secuencia sedimentaria, al Este a las calizas del Grupo Pucará y al Oeste a las areniscas del Grupo Goyllarisquizga. Se identifica pulsaciones tardías de composición dacítica, caracterizada por la abundancia de fenocristales de cuarzo.

El Intrusivo San Gerardo ha generado halos de alteración, en profundidad del yacimiento asociado a las calizas producto del metasomatismo de contacto se ha generado el skarn; en la zona alta al borde del intrusivo San Gerardo se observan halos de silicificación, en la parte central del intrusivo se observa alteración argílica débil a moderada y en los halos de las estructuras vetiformes se observa un ensamble de sílice-sericita.

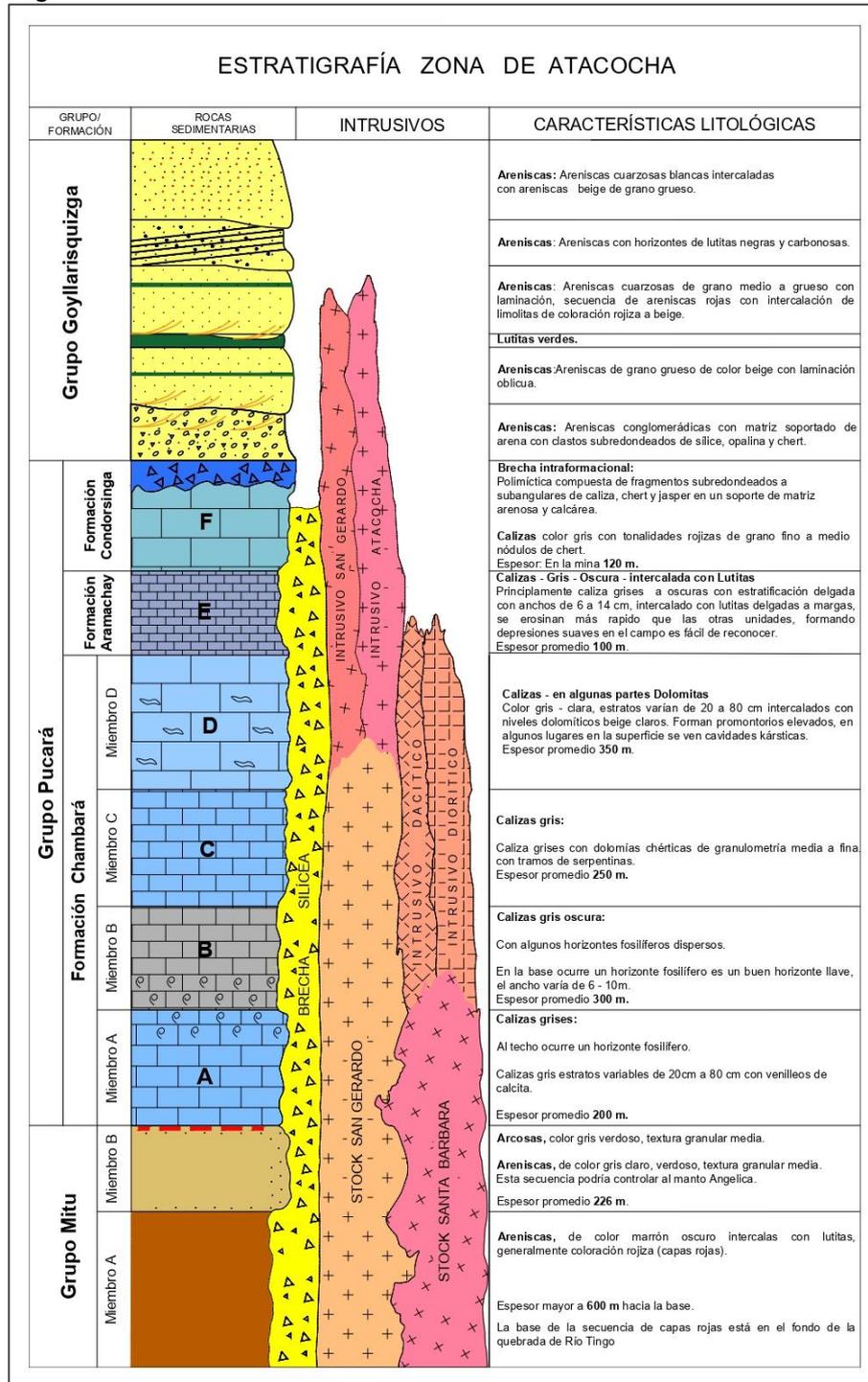
El estudio radiométrico por el método potasio-argón ha datado la edad entre 25 - 30 Ma (Oligoceno).

3.2.2.5 Columna estratigráfica. Seguidamente en la Figura 23 se presenta

la columna estratigráfica.

Figura 23

Columna estratigráfica



Nota: Fuente propia.

3.2.3 Geología estructural

El sistema de fallas en el Complejo Pasco se encuentra dentro de una gran zona de cizalla dextral representada por la falla Milpo - Atacocha, que corresponde a un restraining bend (flexión compresional) asociado a franjas dilatadas NO-SE de tercer orden.

Noble, McKee y Mégard (1979), Mégard (1987) y Pfiffner y Gonzalez (2013) mencionan que, en el Complejo Pasco comenzó como un conjunto de estructuras tectónicas correspondientes a un sistema de fallas normales, que luego se reactivó en el Cretácico tardío y Eoceno, produciéndose cinemáticas inversas y de desgarre en concordancia con los estudios regionales.

Rodríguez et al. (2011), en el frente occidental de la falla Tíclacayán mencionan dos sistemas en el área de estudio; sistema de fallas principales con dirección andina NO-SE/N-S, compuesto por Carmen Chico, Milpo-Atacocha y Chicrín, que exponen cinemáticas inversas con otros movimientos no menos importantes de desgarre. El otro sistema en el área de estudio son las estructuras secundarias como las fallas Longreras, La Laquia, Pumaratanga, Trece, Uno, San Miguel, forman un cierre estructural de geometría sigmoide cerca de Machcan.

Localmente, el Tajo San Gerardo se encuentra limitado al Este por la falla Milpo-Atacocha y al Oeste por la falla Longreras, ambas con orientación N-S sub-verticales, Los desplazamientos de las secuencias sedimentarias están asociadas a las repeticiones estratigráficas presentes, cerca de sobreescurremientos y pliegues de vergencia Oeste, producto de los esfuerzos de compresión con rumbo NE-SW (Ver Figura 24).

Figura 24

Vista NO-SE de la Falla Milpo Atacocha



Nota: La evidencia de la falla Milpo-Atacocha se manifiesta por la repetición de la Formación Chamará (Grupo Pucará), ya que forma un accidente topográfico bastante marcado en el Complejo Pasco. Además, la Falla Milpo-Atacocha tiene cinemática dextral debido a que en los alrededores de Machcan y San Miguel desplaza lateralmente a las unidades del Grupo Pucará. Imagen tomada de Ayala (2022).

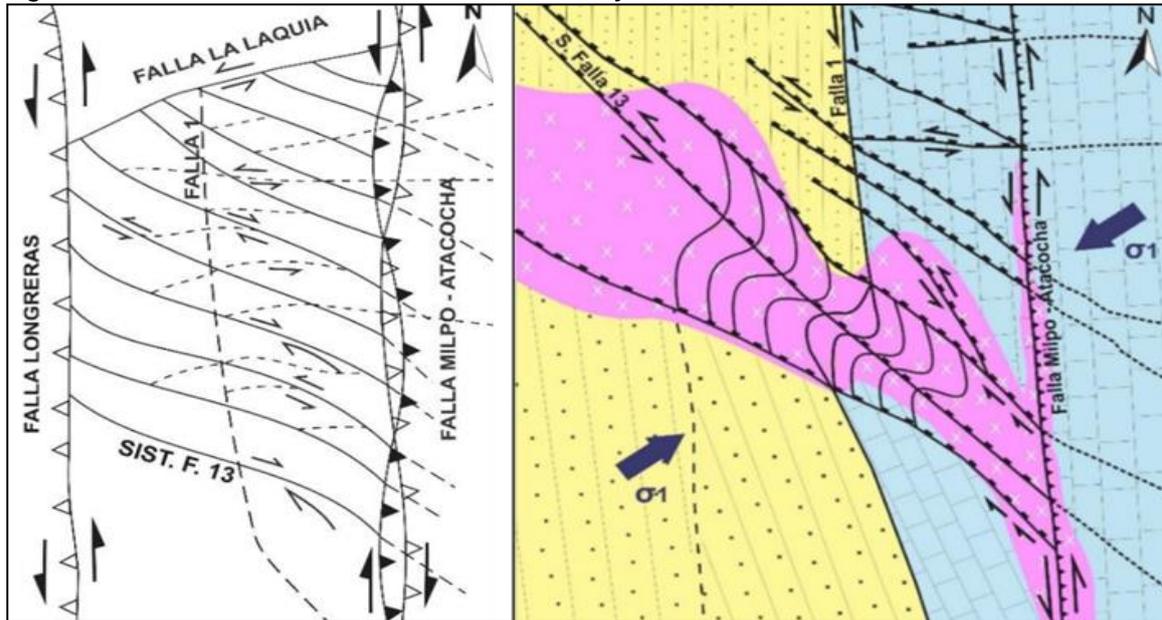
La falla Milpo-Atacocha presenta cinemática dextral, ya que se evidenció que las fibras de recristalización de cinemática sinistral se encuentran erosionadas y alteradas por nuevas fibras de recristalización rellenadas de calcita. Esta última fase origina la deformación de las demás zonas, generando una fuerza de transferencia dextral a las estructuras NW-SE y E-W, esto es explicado en el modelo estructural de Mc Clay (2001) donde la transferencia de energía dextral se da a través de fallas antiguas, lo que genera una deformidad e irregularidad en las estructuras, observándose fibras de recristalización con una cinemática dextral superponiéndose a fibras de recristalización sinistral pero sin modificar la mineralización ya definida, dando como resultado el modelo adecuado para el Tajo San Gerardo (Ver Figura 25) de acuerdo con los datos de campo tomados y explicados por Ayala (2022).

Ayala (2022) a partir de las fallas principales y secundarias cartografiadas en la zona de trabajo, determinó los dominios estructurales I, II, III y IV (Ver Figura 26), lo que le permitió reconstruir la cinemática del sistema de fallas del Complejo Pasco (Ver Figura 27).

A partir de los esfuerzos compresionales de las fallas Milpo-Atacocha y la falla Longreras, se observa la presencia 4 familias estructurales.

Figura 25

Sigmoides en las intersecciones de la Falla 13 y 1



Nota: Vista en planta. Imagen tomada del modelo estructural del Tajo San Gerardo, modificado de Mc Clay (2001).

Sistema de fallas NW-SE. Este sistema presenta fallas normales con azimuts que varían entre N45-70°W y un buzamiento promedio de 80°NE, dichas fallas presentan inicialmente fibras de recristalización de cinemática sinestral que han sido erosionadas y superpuestas por otras fibras de recristalización de cinemática dextral, evidenciando una transferencia de movimiento sobre las fallas sinestrales. Las fallas del sistema NW-SE contienen mayor mineralización tanto de manera horizontal como vertical.

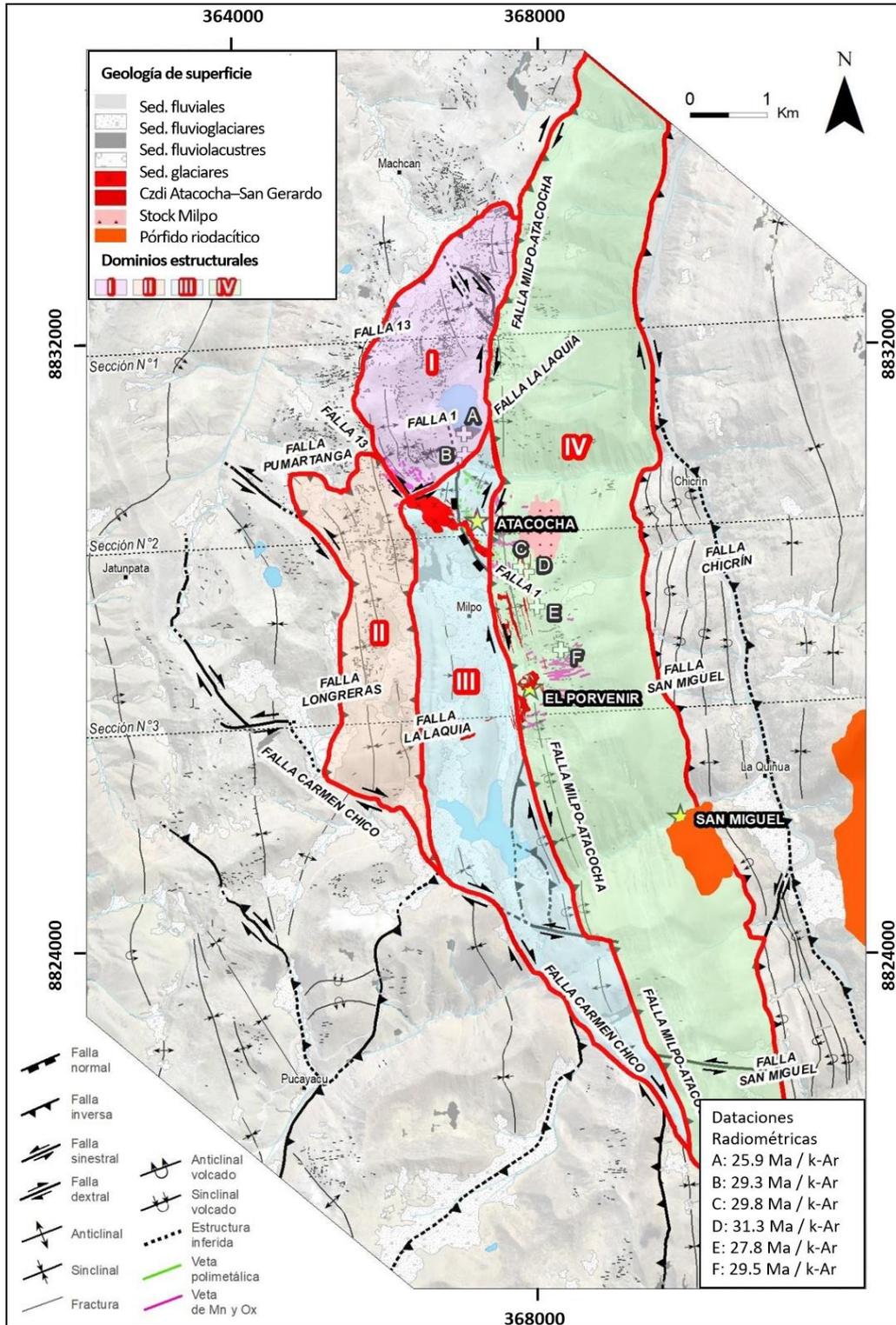
Sistema de fallas E-W. Descrito por Tapia et al. (2019) como un sistema fallas con contenido de óxido de manganeso siendo indicadores de mineralización. Este sistema de fallas predomina al Este de la falla Milpo-Atacocha, con azimuts de N75-90°W y un buzamiento promedio de 80°NE. Las estructuras de este sistema contienen menor mineralización, además son estructuras irregulares tanto en la vertical como en la horizontal.

Sistema de fallas N-S. Las principales fallas reconocidas para este sistema son las Fallas Milpo-Atacocha, Falla 1 y Falla Longreras. La Falla 1 incluye estructuras con azimut promedio de N10°E y buzamiento 45°NW, ocurre con mayor notoriedad en la zona Norte, ya que delimita litológicamente las calizas del Grupo Pucará con las areniscas del

Grupo Goyllarisquiza. A su vez, debido a los distintos eventos tectónicos esta falla ha tenido reactivación, por lo que se puede observar en los planos de fallas distintos tipos de estrías en diferentes orientaciones producto de la tectónica.

Figura 26

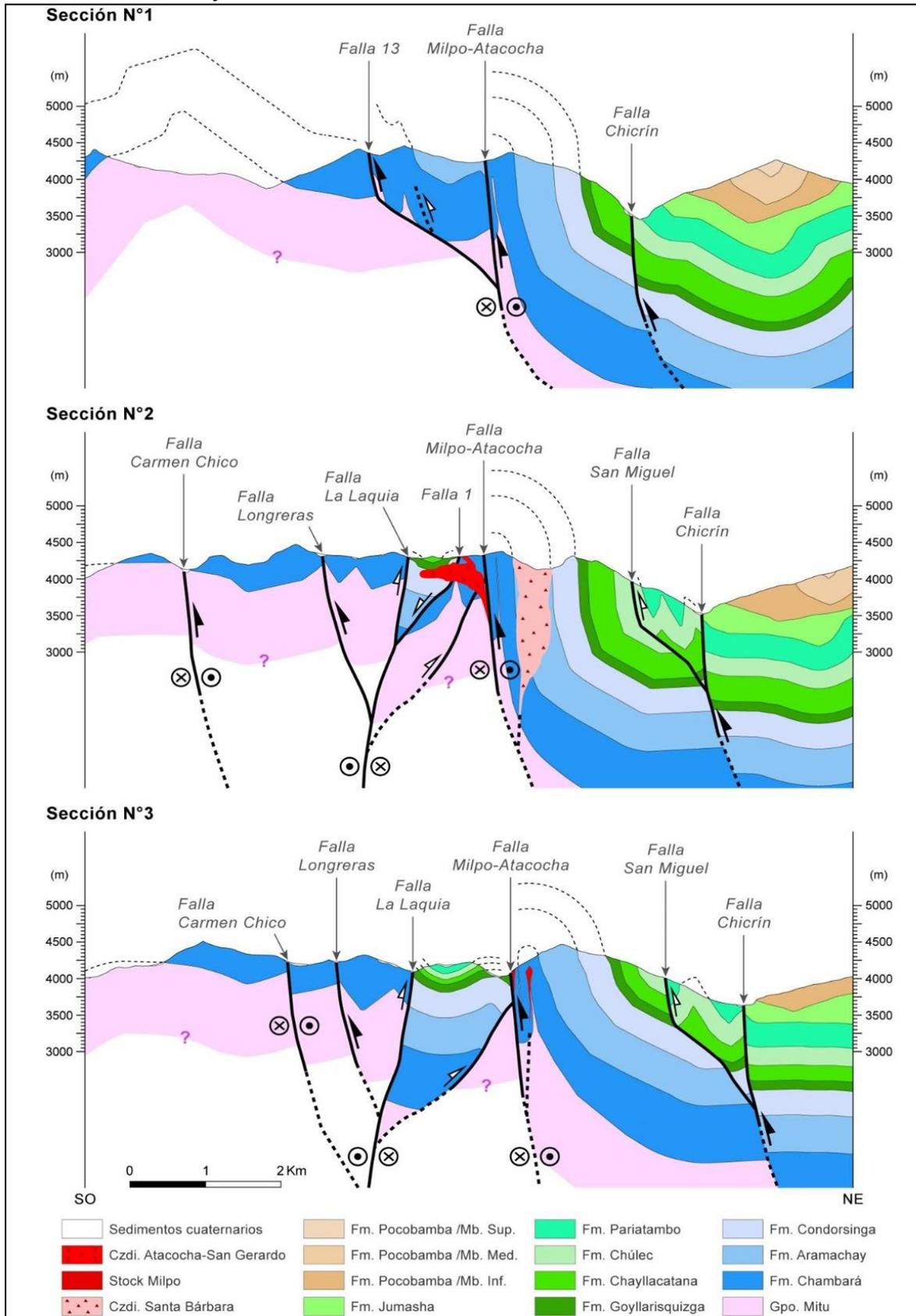
Plano de dominios estructurales



Nota: Dominios (I-II-III-IV) en el Complejo Pasco. Imagen de Ayala (2022).

Figura 27

Secciones N°1, N°2 y N°3



Nota: Secciones estructurales en el Complejo Pasco de 87° de azimut y 10.19 km de longitud. Imagen tomada de Ayala (2022).

3.2.4 Alteraciones

Rodríguez (2020) realiza el modelo de alteraciones para el Tajo San Gerardo que se resumen a continuación:

Alteración silícea. Caracterizada por la destrucción total de la mineralogía original, quedando la roca en su masa silícea. Se correlaciona en tres zonas, la primera en los bordes del intrusivo San Gerardo; segunda, en las areniscas del Grupo Goyllarisquizga con un alto grado de cuarzo (sílice) y por último un horizonte de dolomías chérticas de la Formación Aramachay (roca sedimentaria rica en sílice de grano fino).

Alteración propilítica. Caracterizada por un bajo grado de hidrolisis de los minerales en las rocas, presencia de clorita y/o epidota. Se correlaciona con el intrusivo San Gerardo (flanco Oeste), con tonalidades de color verde y está compuesta principalmente por clorita, pirita y calcita.

Alteración filica. Caracterizada por la presencia de feldespatos alterados a sericita y con cantidades menores de caolinita. Se correlaciona con la parte central del intrusivo San Gerardo.

Alteración argílica. Caracterizada por la destrucción total de los feldespatos en condiciones de una hidrolisis muy fuerte. Se correlaciona con el intrusivo San Gerardo, generalmente en la parte central, con presencia de caolinita - alunita.

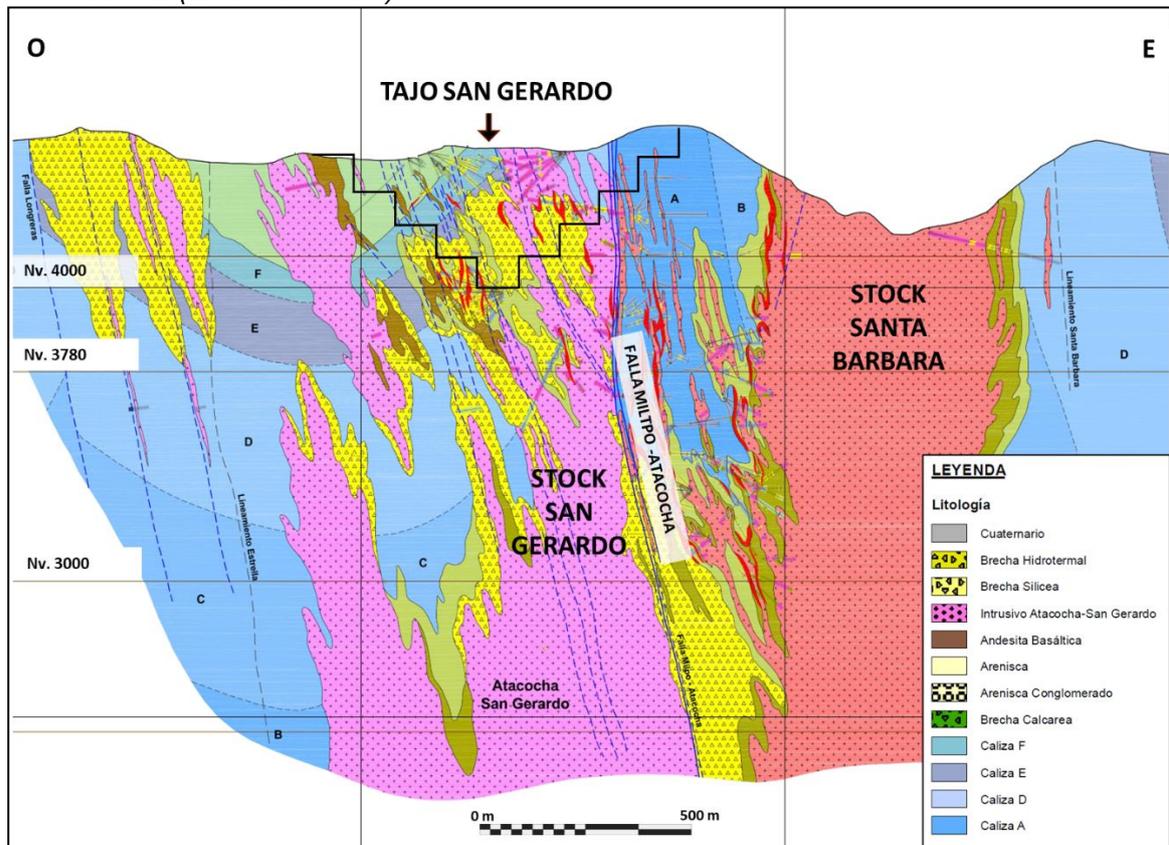
Además, Rodríguez (2021) realiza estudios petrominerográficos complementarios, en donde menciona que la alteración hidrotermal reconocida en el Tajo San Gerardo es del tipo illita-esmectita-adularia, con presencia de carbonatos y cuarzo hidrotermal, siendo estos claves para la caracterización de un yacimiento epitermal de baja a intermedia sulfuración.

3.2.5 Mineralización

Tapia et al., (2019), mencionan que en el Complejo Pasco se evidencia distintos estilos de mineralización (Ver Figura 28).

Figura 28

Sección O-E (Zona Atacocha)



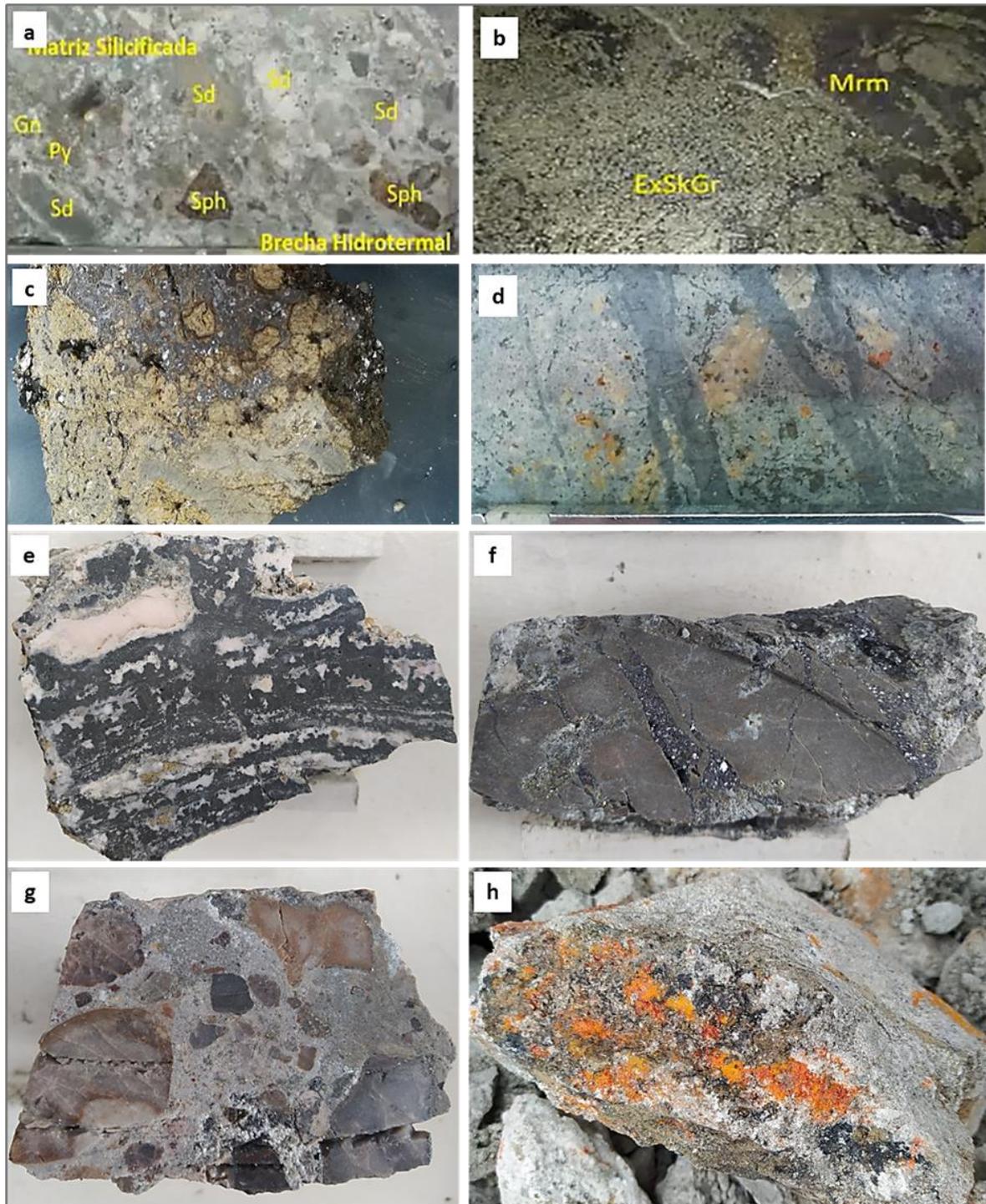
Nota: Vista al norte, mostrando el Stock San Gerardo y Santa Bárbara, los cuales cortan a las secuencias del Grupo Pucará y del Grupo Goyllarisquiza.

3.2.5.1 Mineralización tipo skarn. La mineralización en el Complejo Pasco

ha sido generada por los stocks Santa Bárbara – San Gerardo en la Unidad Minera Atacocha y el stock Milpo en la Unidad Minera El Porvenir, en contacto con las rocas carbonatadas del Grupo Pucará. Este tipo de mineralización está asociado al desarrollo de granates verdes en el exoskarn y granates rojos en el endoskarn. La mineralización económica se encuentra en el contacto del exoskarn distal y el mármol, presenta esfalerita, marmatita, y calcopirita; dentro del exoskarn proximal, se ha encontrado cuerpos masivos de pirrotita, calcopirita, magnetita y pirita. El exoskarn presenta contenidos de Cu y en menor presencia Au, también se puede mencionar la presencia de Mo, como superposición de la mineralización del pórfido Santa Bárbara en el exoskarn (Ver Figura 29).

Figura 29

Estilos de mineralización en Atacocha



Nota: **a)** Brecha hidrotermal en matriz silicificada, con clastos de galena, esfalerita y pirita; **b)** Skarn proximal cuerpo masivo de pirita, con parches de pirrotita y calcopirita; **c)** El skarn distal, muestra mineralización con presencia de esfalerita, galena y pirita, con contenidos de oro y plata. Dentro de este tipo se tienen los cuerpos 18, 23, V27; **d)** Pórfido Santa Bárbara, con alteración fílica y desarrollo stockwork con venillas de cuarzo tipo A y mineralización económica de Mo, Cu y Au; **e)** Bandas de alabandita y carbonatos, entre sus intersticios de carbonatos se encuentra la esfalerita y galena. Muestra tomada del Grupo Pucará en Tajo San Gerardo; **f)** Vetillos de galena con contenidos de sulfosales asociado a diseminaciones de pirita; **g)** Brecha polimíctica, compuesta por clastos subredondeados, la matriz presenta diseminaciones de pirita, esfalerita, galenas y trazas de sulfosales de plomo; **h)** Presencia de rejalgar y oropimente en fracturas, reflejando un evento tardío de alteración ácida superimponiéndose al desarrollo de la mineralización polimetálica en vetas en la zona alta de Atacocha.

3.2.5.2 Mineralización asociada a brechas. Se han reconocido brechas tectónicas, asociadas a las fallas Milpo-Atacocha y la Falla 13, presentan clastos de galena, esfalerita y pirita en una matriz silicificada, dicha mineralización se interpreta como una reactivación hidrotermal tardía. Esta mineralización se ha identificado en los cuerpos mineralizados OB23, OB17 en la Unidad Minera Atacocha y Veta 1204 en la Unidad Minera El Porvenir (Ver Figura 29).

3.2.5.3 Mineralización tipo epitermal de sulfuración intermedia. Se evidencia mineralización de intermedia sulfuración en el sector del Tajo San Gerardo y se caracteriza por el ensamble de sericita - esmectita en el intrusivo San Gerardo y areniscas del Grupo Goyllarisquizga. Las estructuras contienen cuarzo, calcita y pirita como ganga y la mena está constituida por galena, esfalerita, con presencia de oro y plata. También se ha evidenciado en las secciones delgadas pulidas la presencia de adularia dentro de las zonas de alteración y minerales de mena como cobres grises, calcopirita, galena y esfalerita.

Pedemonte (2017) menciona que en el Tajo San Gerardo la mineralización consiste en vetas angostas de galena, esfalerita rubia, freirbergita y pirita, emplazadas en las rocas carbonatadas brechadas del Grupo Pucará e intrusivos de composición diorítico (Ver Figura 29).

3.2.5.4 Mineralización asociada a un sistema tipo pórfido. De los tres intrusivos que afloran en el Complejo Pasco (Santa Bárbara, San Gerardo y stock Milpo), el stock Santa Bárbara en la Unidad Minera Atacocha, tiene evidencias de un sistema tipo pórfido. Se ha reconocido venillas de cuarzo tipo A y B, así como el desarrollo de alteración fílica con mineralización económica de Mo, Cu y Au, hasta el momento no se ha podido identificar la alteración potásica (Ver Figura 29).

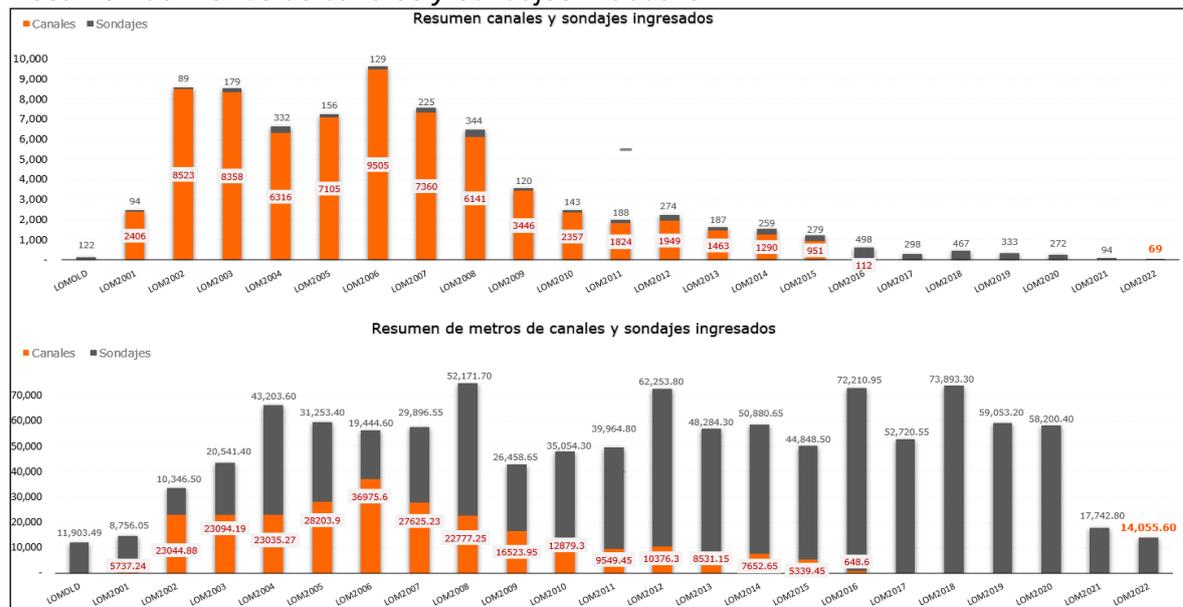
3.3 Metodología

3.3.1 Trabajo de gabinete I - precampo

En esta etapa se desarrolló un trabajo de recopilación bibliográfica del Complejo Pasco, que comprende las Unidades Mineras de Atacocha y El Porvenir, así mismo se realizó una síntesis de la estratigrafía, magmatismo y control estructural de la zona a partir de trabajos previos, tanto de interior mina como de superficie. Además, se recopiló la información de los últimos avances en las interpretaciones metalogenéticas, producto del programa de exploración y de recategorización de recursos minerales en los últimos años (Ver Figura 30).

Figura 30

Resumen de metros de canales y sondajes Atacocha



Nota: Fuente propia.

3.3.2 Trabajo de campo

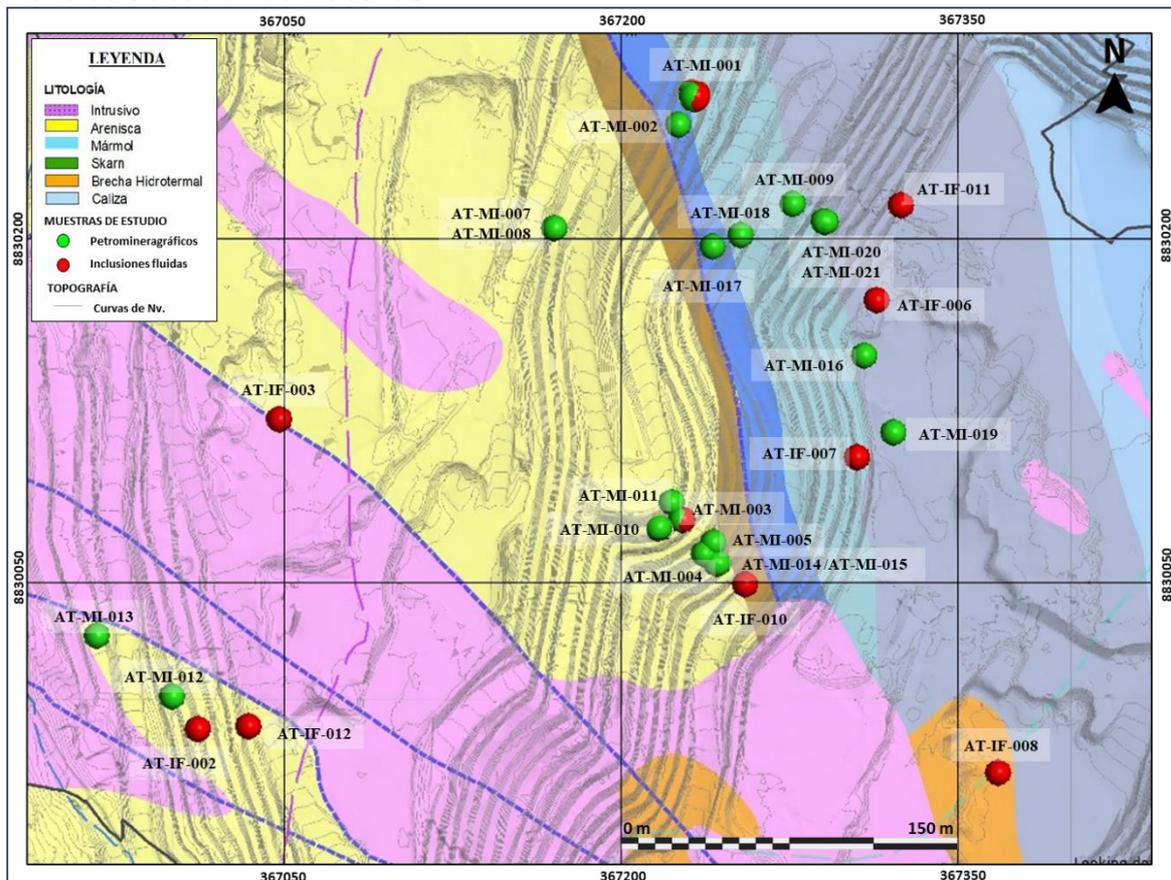
Se realizaron campañas de mapeo en el Tajo San Gerardo, con el objetivo de reinterpretar a detalle la secuencia sedimentaria, magmatismo y alteraciones. Durante esta campaña se tomaron 20 muestras para estudios petromineralógicos, análisis mineralógicos por difracción de rayos X y 10 muestras para los estudios de inclusiones fluidas.

Las muestras seleccionadas pertenecen a sondajes de perforación diamantina como de rocas aflorantes en la zona de estudio, teniendo en consideración la representatividad de los diferentes ensambles mineralógicos, control litológico y control estructural. Así mismo, se consideró el contenido de minerales transparentes, incoloros o débilmente coloreados asociados a la esfalerita y galena, para el estudio de inclusiones fluidas.

Además, se seleccionaron muestras de mano con ensambles de sulfuros, sulfosales y concentrados de plomo, para los estudios de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. Las muestras fueron codificadas en campo con su respectiva ubicación geográfica, haciendo un reconocimiento y descripción breve de las rocas aflorantes (Ver Figura 31).

Figura 31

Plano de ubicación de muestras



Nota: Fuente propia.

3.3.3 Trabajo de gabinete II – postcampo

Las muestras tomadas y codificadas en la etapa de campo fueron embaladas y enviadas al laboratorio de MineMetallurgy SAC para su respectivo análisis, una vez obtenidos los resultados de los estudios petrominerográficos, análisis mineralógico por difracción de rayos X e inclusiones fluidas se realizó la reinterpretación del yacimiento de la zona alta del depósito de Atacocha con la información preliminar de la síntesis elaborada en la etapa de Precampo, cuyos objetivos fueron mejorar el modelamiento geológico de las litologías y estructuras mineralizadas, además de tener mayor conocimiento geológico del depósito para proponer nuevas áreas de perforación diamantina para incrementar y recategorizar los recursos minerales del Tajo San Gerardo (Ver Figura 32).

Figura 32

Equipo de Geología redefiniendo los objetivos de perforación



Nota: Fuente propia.

3.4 Estudios petrominerográficos y análisis de DRX

A continuación, en la tabla 2 se presentan los resultados de los estudios petrominerográficos y análisis mineralógicos por difracción de rayos X (DRX) realizados por Yparraguirre (2021).

Tabla 2

Lista de muestras para estudios petrominerográficos y análisis DRX

Código	X	Y	Z
AT-MI-001	367231	8830264	4300
AT-MI-002	367225	8830250	4300
AT-MI-003	367227	8830078	4294
AT-MI-004	367237	8830063	4294
AT-MI-005	367241	8830068	4294
AT-MI-007	367170	8830205	4300
AT-MI-008	367170	8830205	4300
AT-MI-009	367276	8830216	4294
AT-MI-010	367227	8830078	4288
AT-MI-011	367222	8830086	4288
AT-MI-012	367000	8830001	4333
AT-MI-013	366967	8830028	4333
AT-MI-014	367242	8830059	4286
AT-MI-015	367242	8830059	4286
AT-MI-016	367308	8830150	4200
AT-MI-017	367241	8830197	4267
AT-MI-018	367253	8830202	4263
AT-MI-019	367321	8830116	4263
AT-MI-020	367290	8830208	4246
AT-MI-021	367291	8830208	4244

Nota: Fuente propia.

En el anexo 2 se encuentra el informe completo de las 20 muestras, en este ítem solo se presentan 5 de las 20 muestras analizadas.

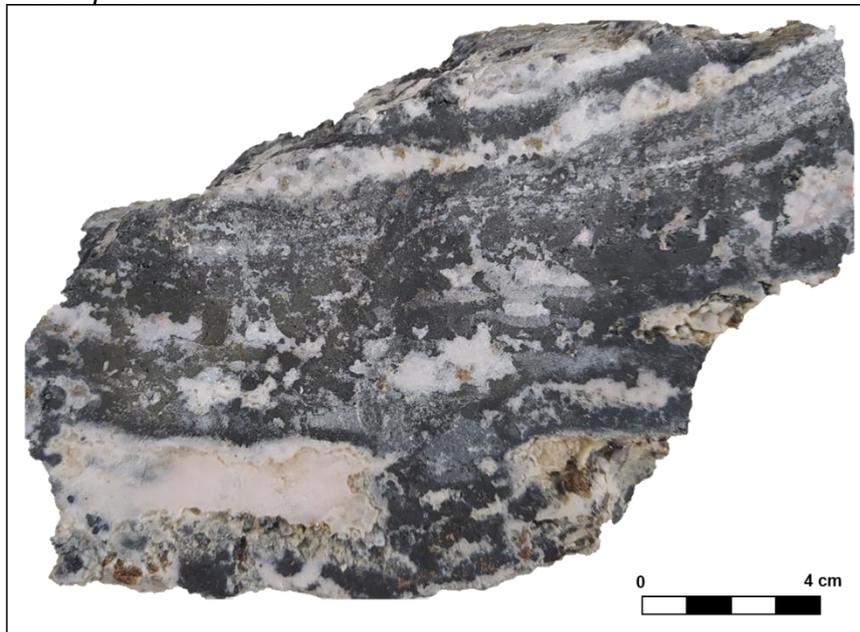
3.4.1 Muestra AT-MI-001

Estudios petrominerográficos

Descripción macroscópica: La Figura 33 está mostrando una estructura de relleno, compuesta principalmente por carbonatos, entre sus intersticios se encuentra el cuarzo III. Los carbonatos están asociados a alabandita. La esfalerita II se encuentra asociada a la galena, la galena tiene inclusiones de cobres grises, que forman bandas alrededor de la alabandita.

Figura 33

Muestra macroscópica AT-MI-001



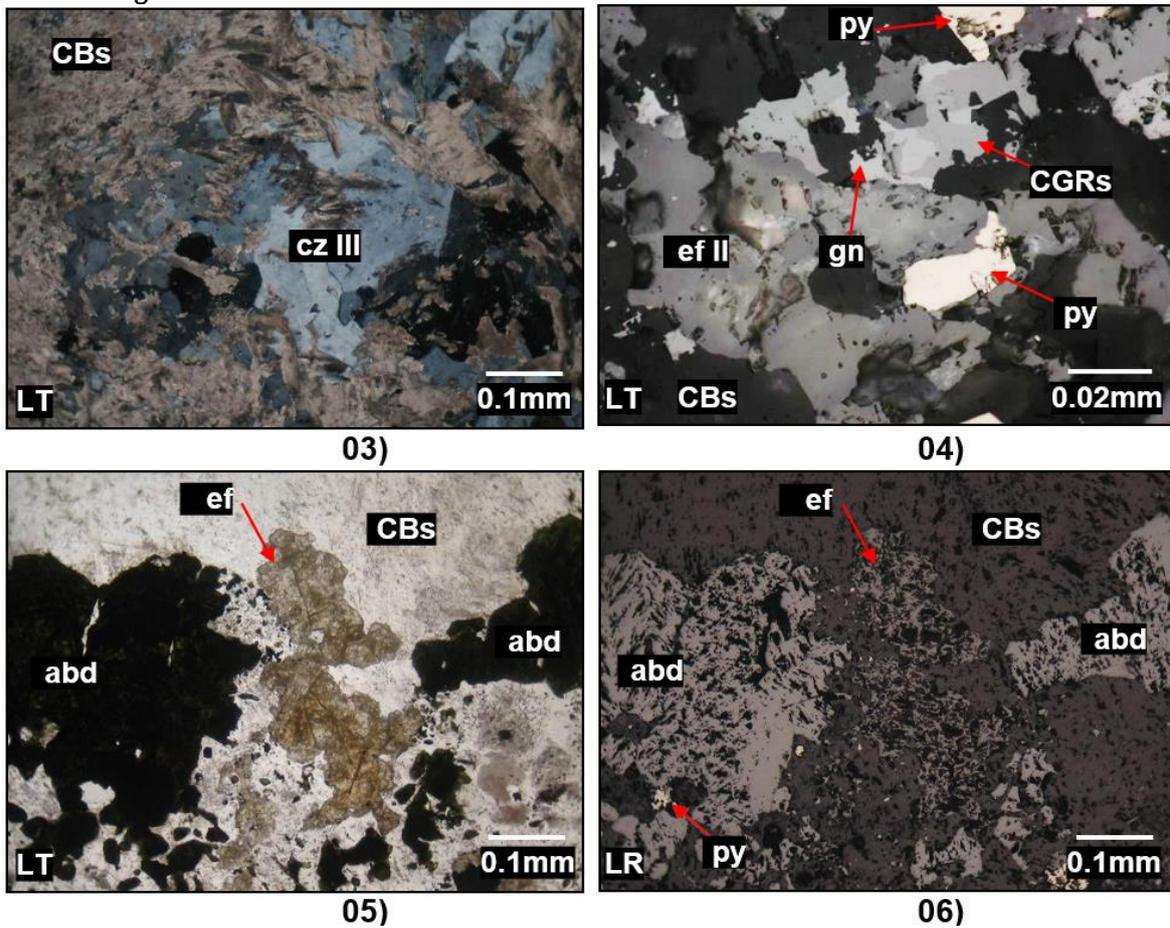
Nota: Fuente propia.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 34, las fotomicrografías **03)** Cristales de cuarzo (cz III) creciendo entre los carbonatos (CBs); **04)** Asociación de esfalerita (ef II), pirita (py), galena (gn), en la galena se encuentran cristales de cobres grises (CGRs); **05)** y **06)** Alabandita (abd) y esfalerita (ef) blanda rubia, implantados en agregados de carbonatos (CBs).

Tipo de textura: Textura de relleno

Figura 34

Fotomicrográficas LT-LR AT-MI-001



Nota: Fotomicrográficas en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR).

Análisis DRX. En la tabla 3 se observan los resultados obtenidos de difracción de rayos X.

Tabla 3

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-001

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Carbonato (Ankerita)	$\text{Ca}(\text{Fe}^{+2}, \text{Mg}, \text{Mn})(\text{CO}_3)_2$	58.7
Cuarzo	SiO_2	14.0
Esfalerita	$(\text{Zn}, \text{Fe}) \text{S}$	11.4
Alabandita	MnS	9.0
Galena	PbS	4.5
Enstatita	$\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	< L.D.
Eclarita	$\text{Pb}_9\text{Cu}_{0.5}\text{Fe}^{2+}_{0.5}\text{Bi}_{12}\text{S}_{28}$	< L.D.

Nota: Limite de detección (L.D.).

3.4.2 Muestra AT-MI-002

Estudios petrominerográficos

Descripción macroscópica: La Figura 35 está mostrando una estructura de relleno en bandas concéntricas, tienen agregados e intercrecimientos irregulares de cuarzo III y carbonatos I, asociado a pirita y alabandita, en la zona externa carbonatos II y cuarzo IV, están asociados a la esfalerita y galena, la galena también tiene inclusiones de cobres grises.

Figura 35

Muestra macroscópica AT-MI-002



Nota: Fuente propia.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 36, las fotomicrografías **07)** Cristales prismáticos de cuarzo (cz III) alternando con bandas de carbonatos (CBs); **08)** Esfalerita (ef) y galena (gn) en sus intersticios, están inmersos en agregados de carbonatos (CBs); **09)** Esfalerita (ef) reemplazando a la galena (gn); **10)** y **11)** Cristales de pirita (py) asociadas a galena (gn), la galena tiene inclusiones de cobres grises (CGRs) y magnetita (mt).

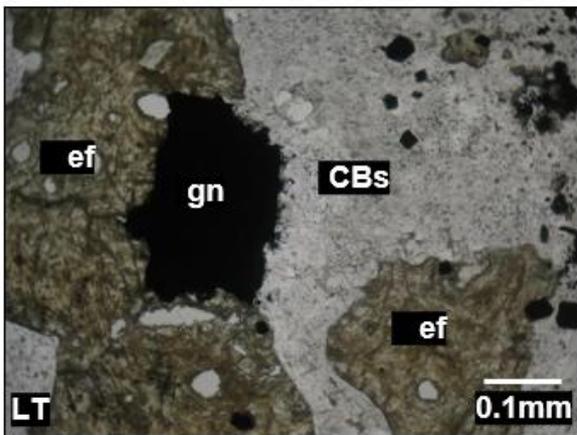
Tipo de textura: Textura de relleno

Figura 36

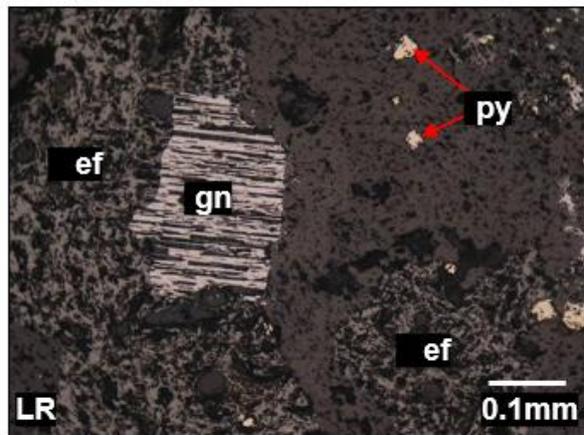
Fotomicrografías LT-LR AT-MI-002



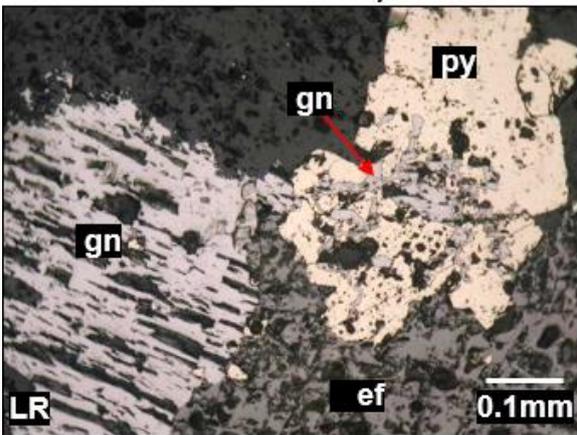
07)



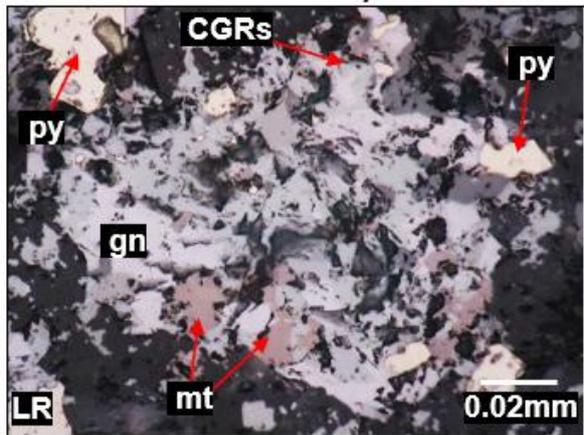
08)



09)



10)



11)

Nota: Fotomicrografías en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR).

Análisis DRX. En la tabla 4 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X.

Tabla 4

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-002

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Carbonato (Calcita)	CaCO ₃	25.5
Alabandita	MnS	16.9
Esfalerita	(Zn, Fe) S	16.2
Carbonato (Ankerita)	Ca (Fe ²⁺ , Mg, Mn) (CO ₃) ₂	11.4
Carbonato (Kutnahorita)	Ca (Mn, Mg, Fe ²⁺) (CO ₃) ₂	9.2
Cuarzo	SiO ₂	8.0
Pirita	FeS ₂	4.8
Galena	PbS	4.0
Cobres grises (Tetraedrita)	(Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	2.3
Magnetita	Fe ²⁺ Fe ³⁺ ₂ O ₄	< L.D.
Fluorita	CaF ₂	< L.D.
Haluro (Halita)	NaCl	< L.D.

Nota: Limite de detección (L.D.).

3.4.3 Muestra AT-MI-004

Estudios petrominerográficos

Descripción macroscópica: La Figura 37 está mostrando una brecha polimíctica matriz-soportada fuertemente silicificada compuesta por fragmentos líticos silicificados con formas redondeadas a subredondeados, contenidos por una matriz criptocristalino de cuarzo con impregnaciones de sericita y disseminaciones de pirita, esfalerita y galena. Los fragmentos de roca I y III contienen inclusiones de pirita, mientras que los fragmentos de roca II no presentan mineralización.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 38, las fotomicrografías **17)** Fragmento I (FR I) y fragmento III (FR III) silicificados y con bordes corroídos por la matriz de cuarzo criptocristalino y sericita (cz IV+ser); **18)** Fragmentos de cristales de cuarzo (cz), fragmentos de roca I (FR I) y fragmentos de roca II (FR II) contenidos en la matriz

cementante; **19** y **20**) Cavidades rellenas de esfalerita (ef) y galena (gn) en la matriz de cuarzo y sericita (cz IV+ser).

Tipo de textura: Textura brechada

Figura 37

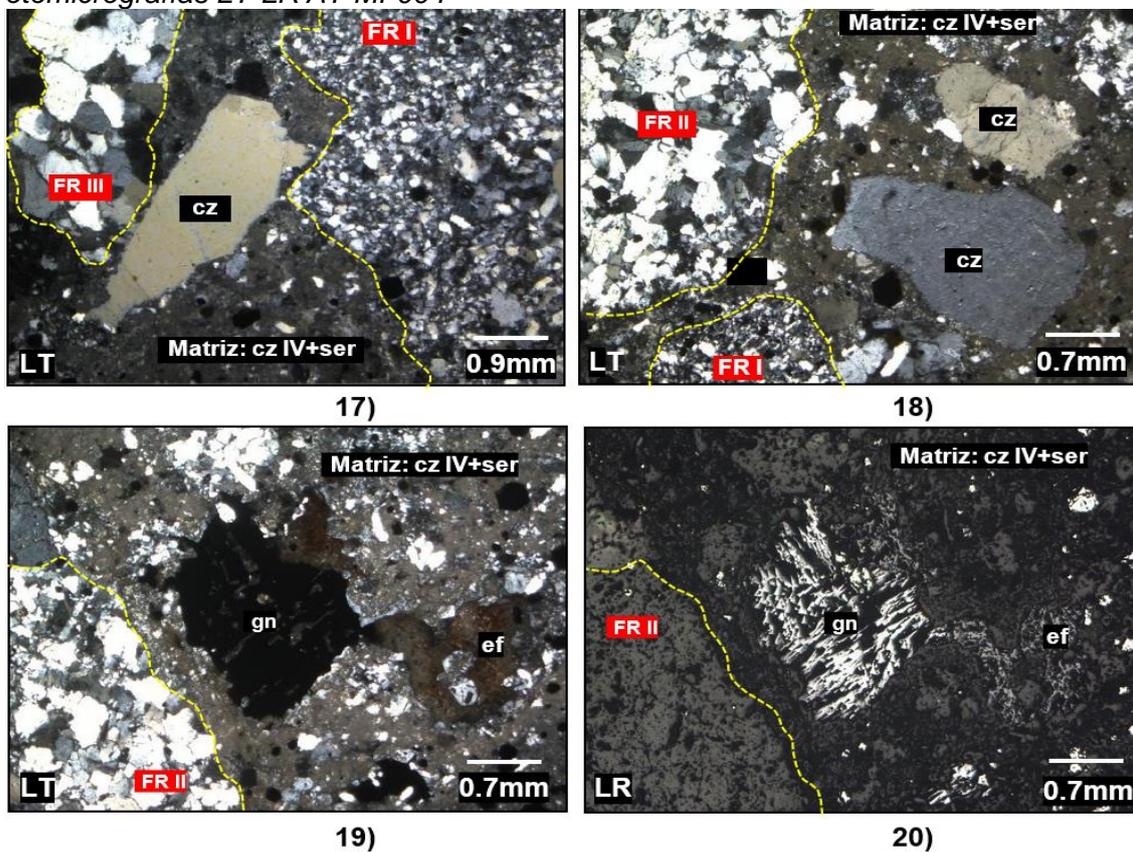
Muestra macroscópica AT-MI-004



Nota: Fuente propia.

Figura 38

Fotomicrográficas LT-LR AT-MI-004



Nota: Fotomicrográficas en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR).

Análisis DRX. En la tabla 5 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X.

Tabla 5

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-004

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	72.6
Pirita	FeS ₂	12.7
Muscovita (Sericita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	10.2
Galena	PbS	2.6
Esfalerita	(Zn,Fe)S	1.5
Calcopirita	CuFeS ₂	< L.D.
Bornita	Cu ₅ FeS ₄	< L.D.

Nota: Limite de detección (L.D.).

3.4.4 Muestra AT-MI-007

Estudios petrominerográficos

Descripción macroscópica: La Figura 39 está mostrando una estructura de relleno silicificada compuesta por agregados granulares de cuarzo III con bordes subredondeados y corroídos, están ligeramente deformados e intercrecidos con sericita. Presenta intersticios y fracturas rellenas por otro evento de cuarzo (cuarzo IV) asociado a la mineralización metálica, constituida por pirita, esfalerita, galena y cobres grises.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 40, las fotomicrografías **29 y 30**) Intercrecimiento de pirita (py) con galena (gn) asociado al cuarzo IV (cz IV); **31**) Cristal de cuarzo I (cz I) con bordes corroídos por cuarzo (cz III) intercrecidos con sericita (ser); **32**) Cristales anhedrales de pirita (py) intercrecidos con galena (gn), cobres grises (CGRs) y sulfosales de plomo (SFsPb).

Tipo de textura: Textura de reemplazamiento y de relleno

Figura 39

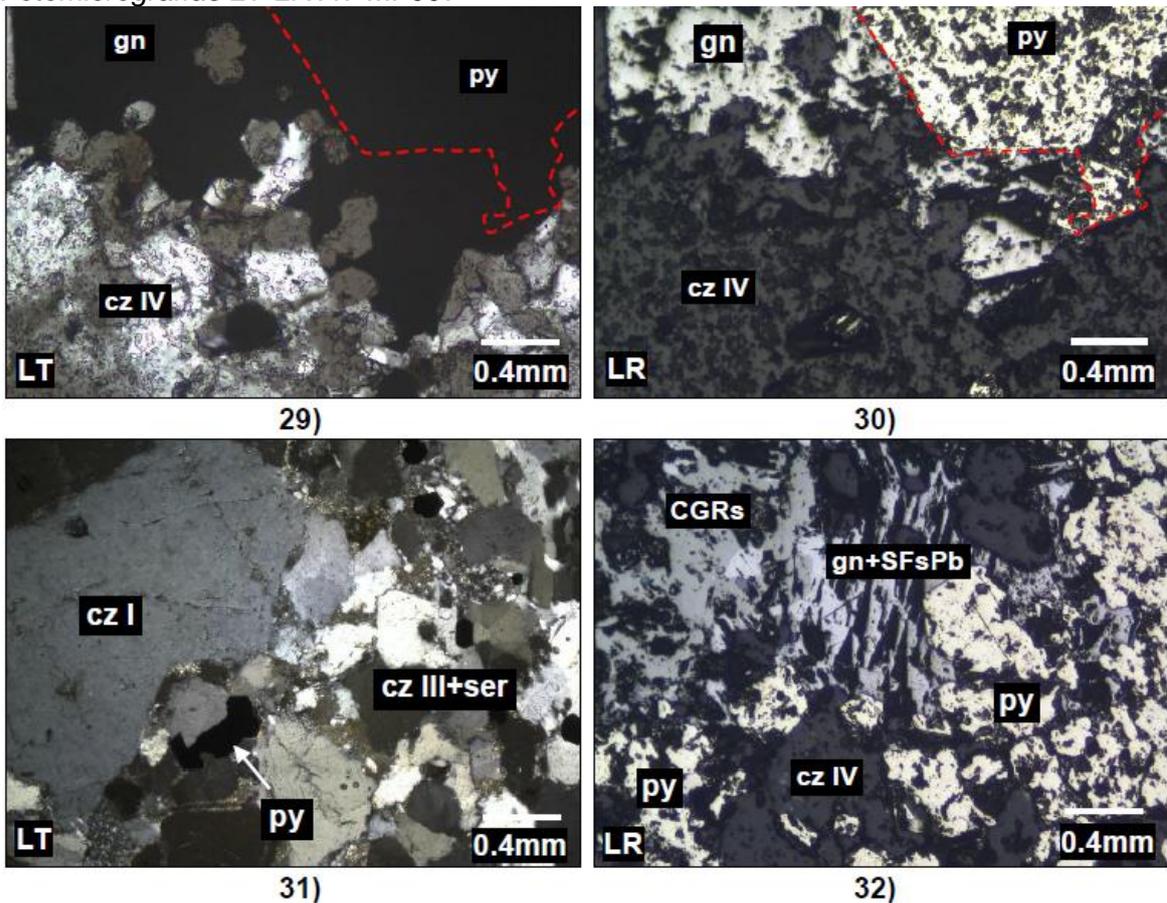
Muestra macroscópica AT-MI-007



Nota: Fuente propia.

Figura 40

Fotomicrográficas LT-LR AT-MI-007



Nota: Fotomicrográficas en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR).

Análisis DRX. En la tabla 6 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X.

Tabla 6

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-007

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	71.3
Esfalerita	(Zn, Fe) S	15.0
Galena	PbS	5.1
Sulfosales de plomo (Geocronita)	Pb ₁₄ (Sb, As) ₆ S ₂₃	3.4
Pirita	FeS ₂	2.1
Sulfosales de plomo (Seligmannita)	PbCuAsS ₃	1.9
Moscovita (Sericita)	KAl ₂ (Si ₃ Al) O ₁₀ (OH,F) ₂	< L.D.

Nota: Limite de detección (L.D.).

3.4.5 Muestra AT-MI-010

Estudios petrominerográficos

Descripción macroscópica: La Figura 41 está mostrando un conglomerado compuesto por Fragmentos de Roca I, que es una cuarzoarenita de grano fino con matriz de sericita y arcillas, la matriz del conglomerado ha sido rellenada y/o reemplazada casi en su totalidad, quedando pocos relictos de ella. El relleno consiste en cuarzo III, en su interior se encuentran cristales de galena y por hematita de habito capilar, la pirita se encuentra dispersa en toda la roca, y también asociado a la galena.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 42, las fotomicrografías **49)** Fragmentos de Roca (FR I), identificado como cuarzo arenita formado por cuarzo (cz I) y sericita (ser) de matriz; **50)** y **51)** Cavidad tapizada por cuarzo (cz III) y sericita (ser), en su interior se encuentra galena (gn) y sulfosales de plomo (SFsPb) con agregador capilares de hematita.

Tipo de textura: Textura de relleno

Figura 41

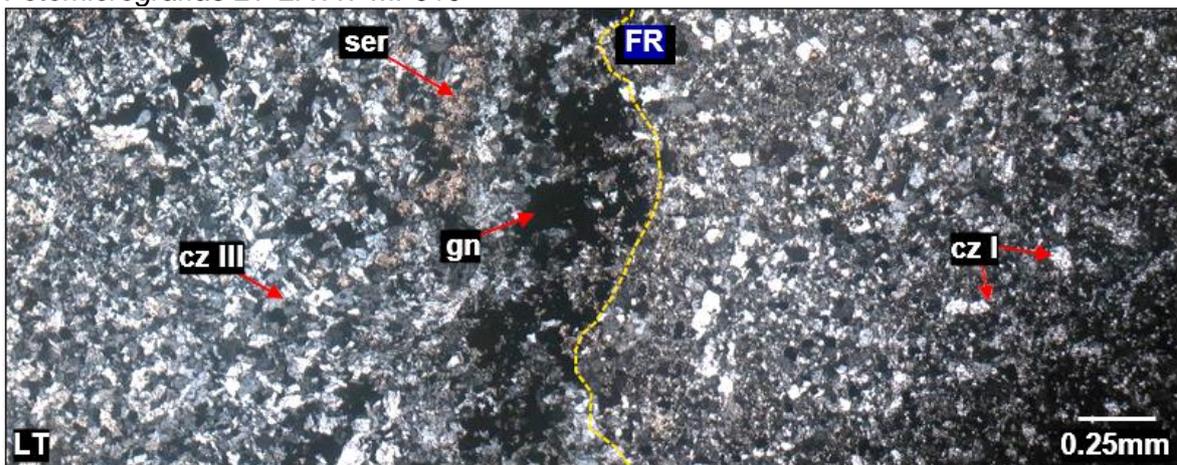
Muestra macroscópica AT-MI-010



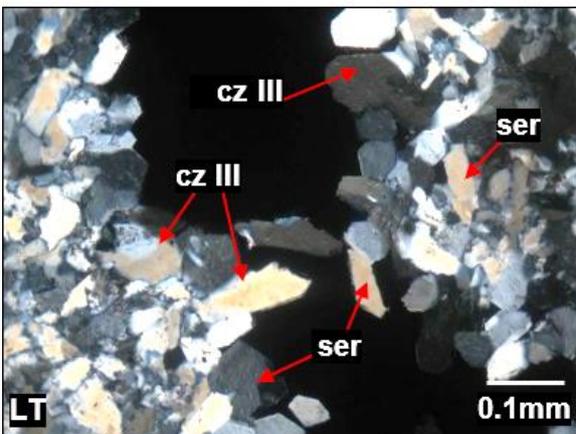
Nota: Fuente propia.

Figura 42

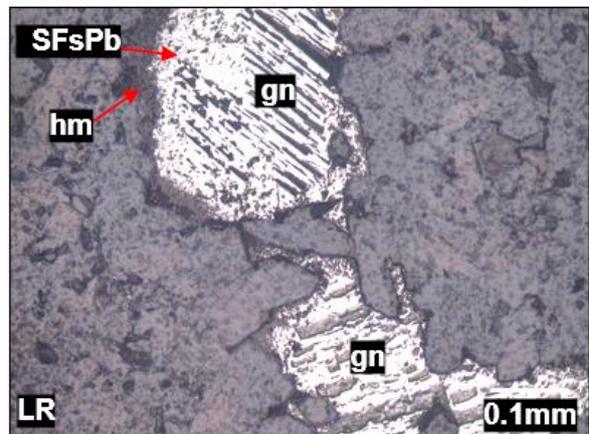
Fotomicrografías LT-LR AT-MI-010



49)



50)



51)

Nota: Fotomicrografías en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR).

Análisis DRX. En la tabla 7 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X.

Tabla 7

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-010

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	79.6
Moscovita (Sericita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	10.4
Pirita	FeS ₂	6.6
Sulfosales de plomo (Seligmannita)	PbCuAsS ₃	1.0
Galena	PbS	1.0
Wustita	FeO	< L.D.
Hematita	Fe ₂ O ₃	< L.D.
Esfalerita	(Zn, Fe) S	< L.D.

Nota: Limite de detección (L.D.).

3.5 Inclusiones fluidas (IF)

A continuación, se presentan los resultados de los estudios de inclusiones fluidas realizados por Yparraguirre (2021). En la Tabla 8 se presenta la lista de muestras trabajadas.

Tabla 8

Lista de muestras para estudios de IF.

Código	X	Y	Z	Roca
AT-MI-001	367231	8830264	4300	Caliza
AT-MI-003	367227	8830078	4294	Arenisca
AT-IF-002	367012	8829987	4330	Arenisca
AT-IF-003	367048	8830122	4330	Intrusivo
AT-IF-006	367314	8830174	4282	Caliza
AT-IF-007	367305	8830105	4282	Caliza
AT-IF-008	367368	8829968	4219	Sílice
AT-IF-010	367255	8830050	4282	Arenisca
AT-IF-011	367324	8830215	4288	Caliza
AT-IF-012	367034	8829988	4312	Intrusivo

Nota: Fuente propia.

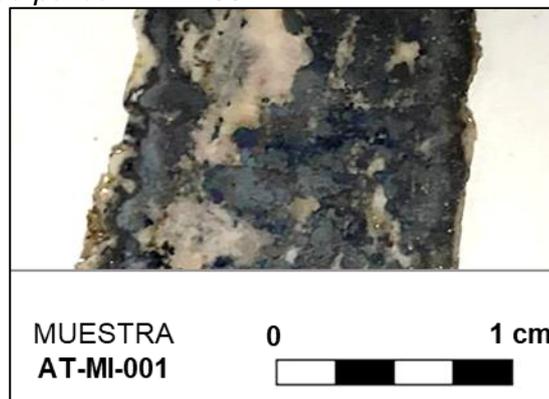
En el anexo 3 se encuentra el informe completo de las 10 muestras, en este ítem solo se presentan 2 de las 10 muestras analizadas.

3.5.1 Muestra AT-MI-001

A continuación, se detalla la descripción microscópica en luz transmitida (LT) y luz reflejada (LR) de la muestra AT-MI-001.

Figura 43

Muestra sección delgada pulida AT-MI-001



Nota: Nexa Resources Atacocha.

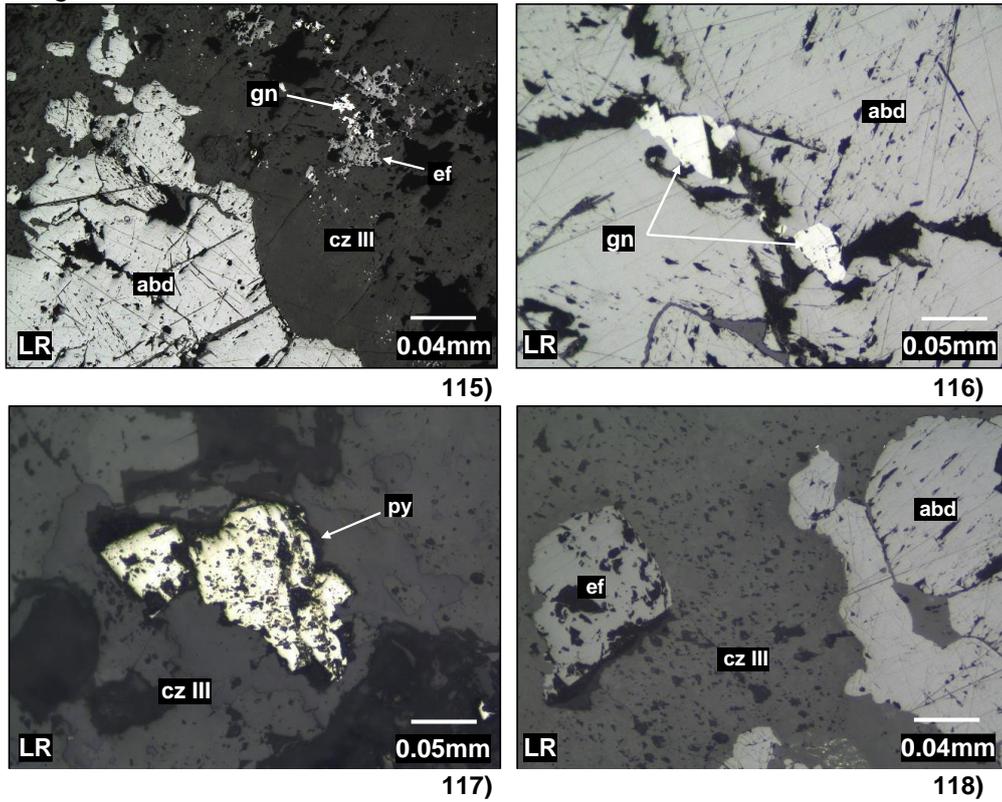
Descripción microscópica

Fotomicrografías LR: 115) Extensiones de masas de alabandita (abd); además de esfalerita (ef) y galena (gn) que rellena cavidades en cuarzo III (cz III); **116)** Inclusión de galena (gn) en alabandita (abd); **117)** Cristal subhedral de pirita (py) contenido en cuarzo de relleno (cz III); **118)** Alabandita (abd) y esfalerita (ef) ocupando cavidades en cuarzo de relleno (cz III) (Ver Figura 44).

Fotomicrografías LT: 123 a 126 familia de inclusiones fluidas primarias bifásicas ricas en líquido con formas ovaladas, subredondeadas e irregulares con tamaños entre 8 a 12 μm capturadas en cuarzo de relleno (cz III) (Ver Figura 45).

Figura 44

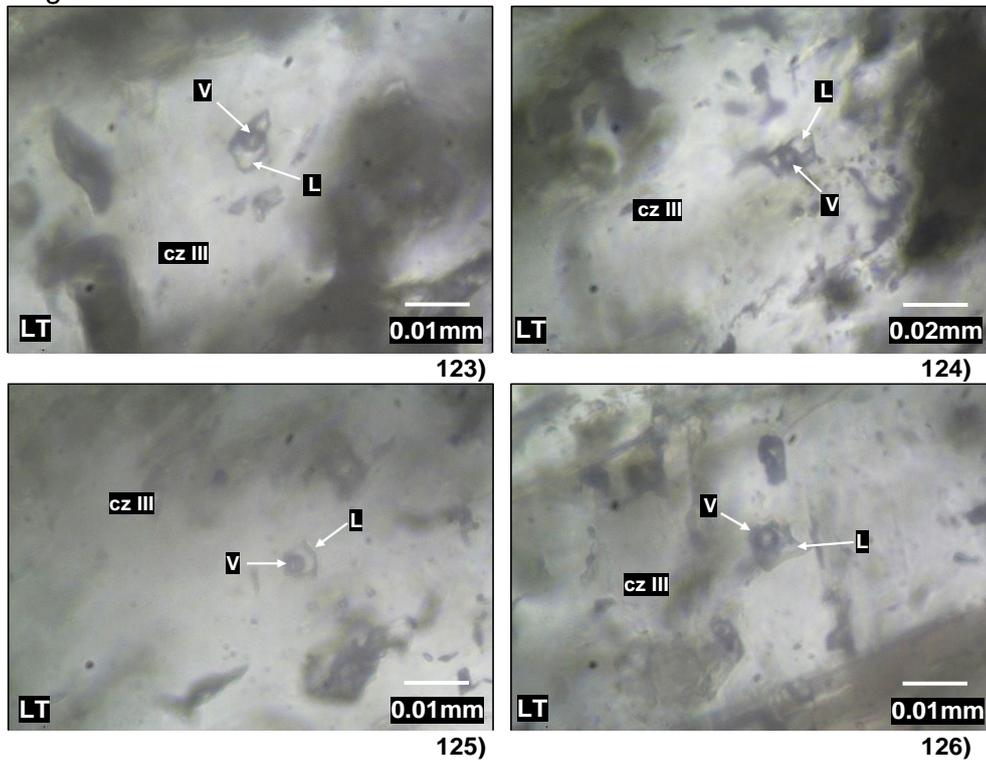
Fotomicrografías LR- AT-MI-001



Nota: Fotomicrografías en Luz Reflejada (LR).

Figura 45

Fotomicrografías LT- AT-MI-001



Nota: Fotomicrografías en Luz Transmitida (LT).

En la tabla 9 se muestran los datos del análisis microtermométrico de temperatura de homogeneización y salinidad realizados.

Tabla 9

Datos microtermométricos de la muestra AT-MI-001

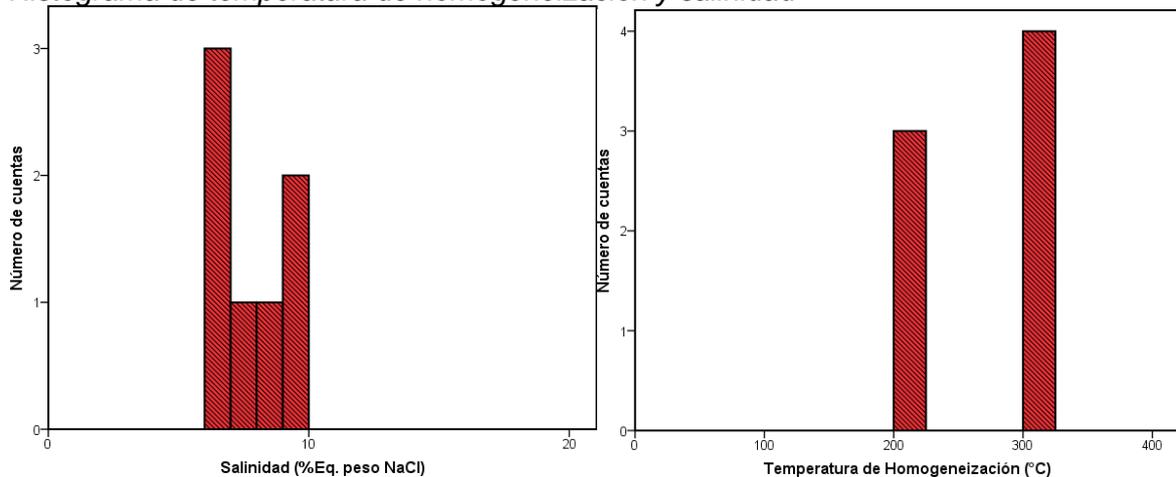
FAMILIA	CLAF.	MIN	TIPO	Øμ	FILL (L/V)	-Tf (°C)	Th (°C)	NaCl (wt%)	ρ(g/cm ³)	P (bar)
1	BIF	cz	P-Lw	8	0.80	6.10	215.40	9.34	1.11	15.23
1	BIF	cz	P-Lw	8	0.70	5.50	219.10	8.55	1.11	16.29
1	BIF	cz	P-Lw	12	0.60	5.90	210.40	9.08	1.11	13.90
2	BIF	cz	P-Lw	9	0.60	4.50	310.40	7.17	1.07	66.50
3	BIF	cz	P-Lw	10	0.70	4.25	308.70	6.81	1.07	65.05
3	BIF	cz	P-Lw	8	0.80	4.10	305.50	6.59	1.07	62.38
4	BIF	cz	P-Lw	8	0.80	4.00	323.20	6.45	1.07	78.11

Nota: Las diferencias en numeración entre las diferentes filas es la agrupación según el grado de asociación de las IF (familias FIF) y de IF aisladas.

En los histogramas que se muestran (Ver Figura 46), se puede observar que las temperaturas de homogeneización (Th °C) para esta muestra específica está entre 200 y 350 °C y salinidad entre 6 y 10 % eq. peso NaCl. Se podría asumir que la mineralización está asociado a estas temperaturas y salinidades.

Figura 46

Histograma de temperatura de homogeneización y salinidad

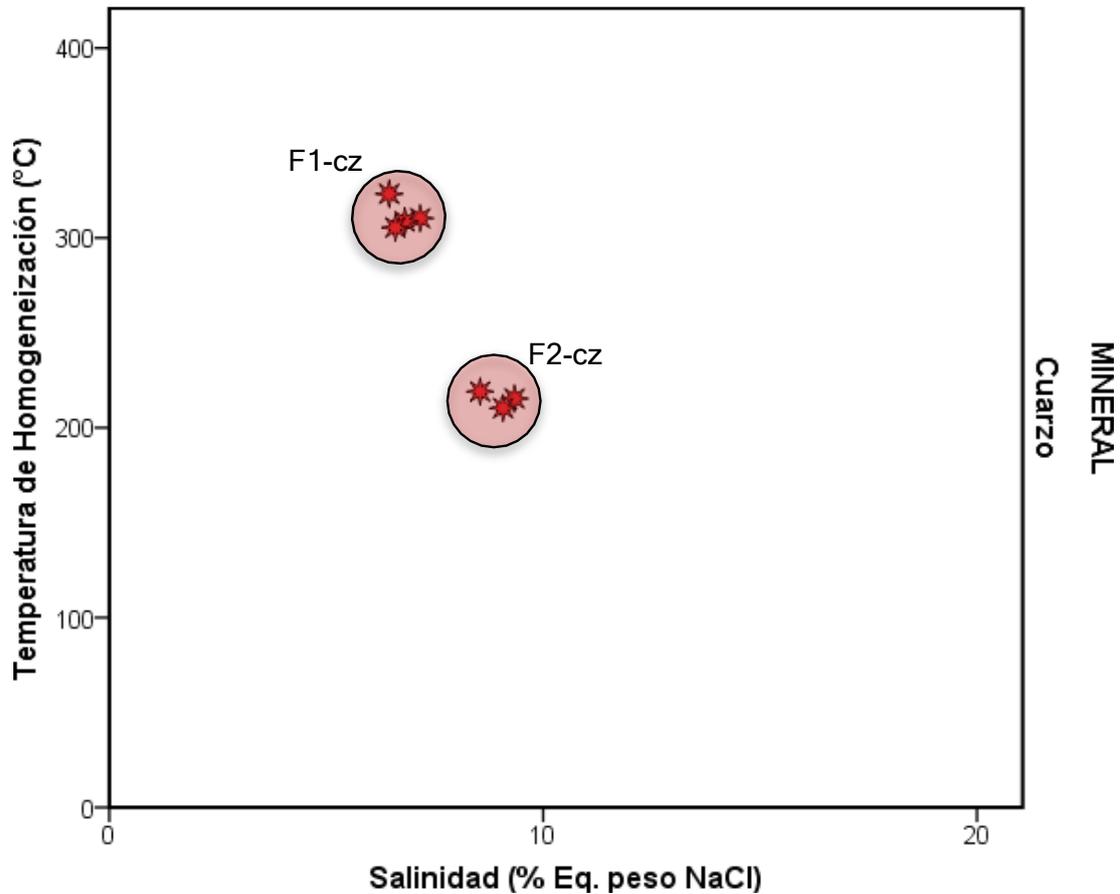


Nota: Histogramas vs números de cuentas.

Se puede observar en la Figura 47, dos posibles poblaciones; la primera población (F1-cz), se encuentra entre 300 a 330 °C con salinidad entre 6 a 8 % eq. peso NaCl; seguida de una segunda población (F2-cz), que presenta temperaturas de homogeneización (Th °C) entre los 200 a 220 °C con salinidades entre 8 a 10 % eq. peso NaCl.

Figura 47

Familias identificadas en homogeneización vs salinidad

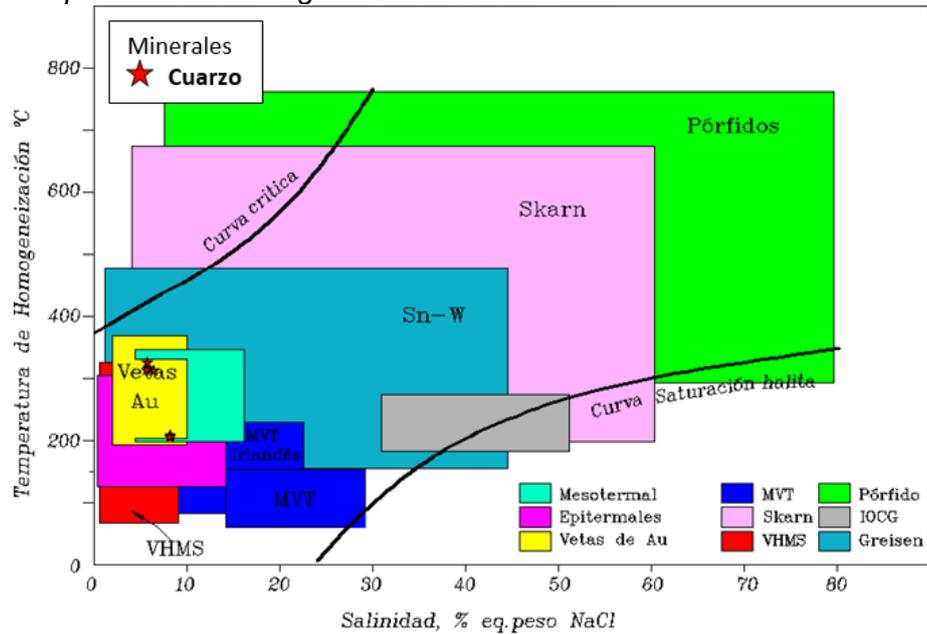


Nota: Familias identificadas en minerales de cuarzo.

Según el diagrama modificado de Wilkinson (2001), se trata de fluidos que corresponden a depósitos de vetas de oro en contacto con depósitos mesotermales (Ver Figura 48).

Figura 48

Diagrama temperatura de homogeneización vs salinidad



Nota: Modificado de Wilkinson (2001).

3.5.2 Muestra AT-MI-003

A continuación, se detalla la descripción microscópica en luz transmitida (LT) y luz reflejada (LR) de la muestra AT-MI-003.

Figura 49

Muestra sección delgada pulida AT-MI-003



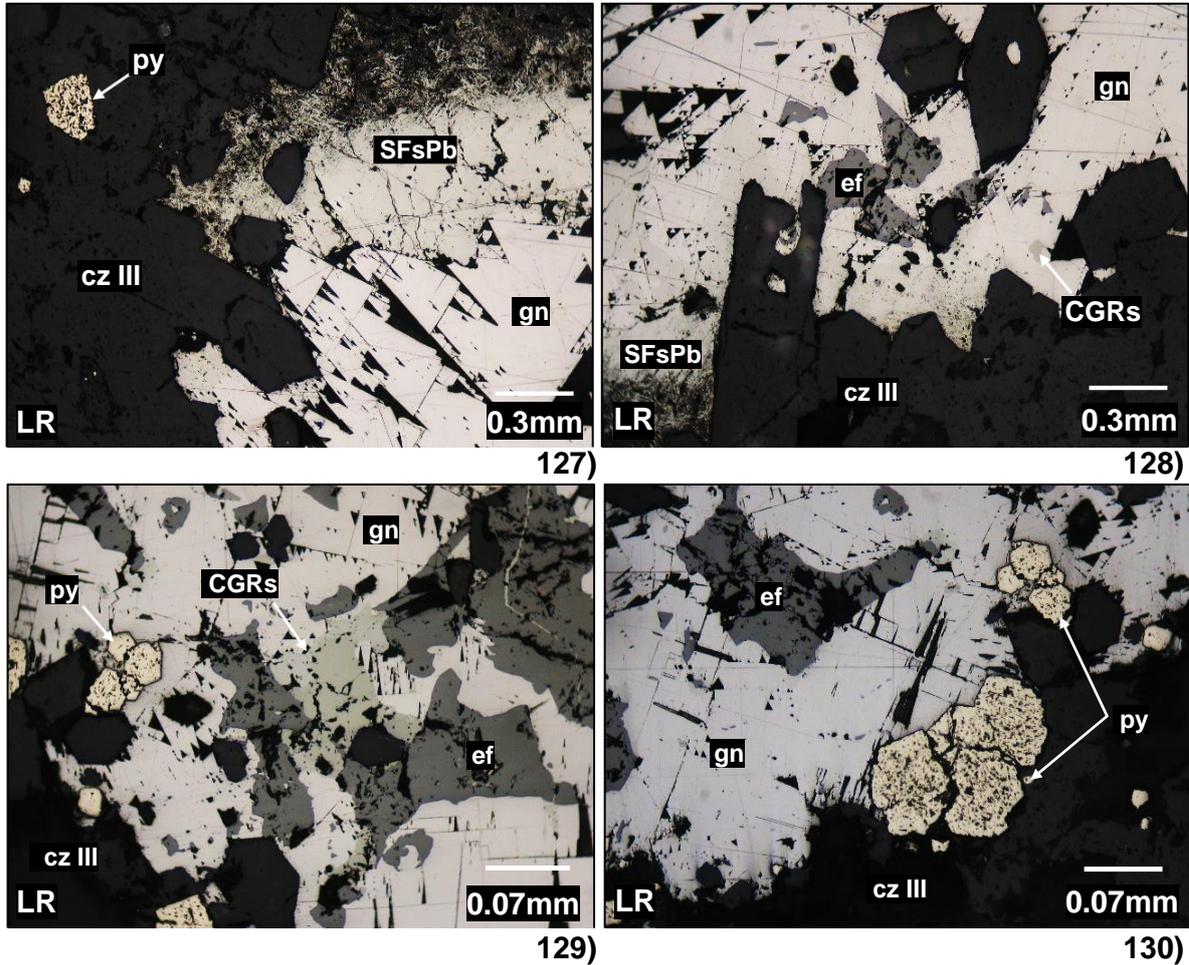
Nota: Nexa Resources Atacocha.

Fotomicrografías LR: 127 Intercrecimiento de galena (gn) y sulfosales de plomo (SFsPB); inclusión de pirita (py); **128** Esfalerita (ef) reemplazada por galena (gn) e intercrecida con sulfosales de plomo (SFsPb); **129** Inclusión de pirita (py) y formas anhedrales de esfalerita (ef) y cobres grises (CGRs) en galena (gn); **130** Galena (gn)

reemplazando a la esfalerita (ef) y cristal subhedral de pirita (py) contenido en cuarzo de relleno (cz III) (Ver Figura 50).

Figura 50

Fotomicrografías LR- AT-MI-003

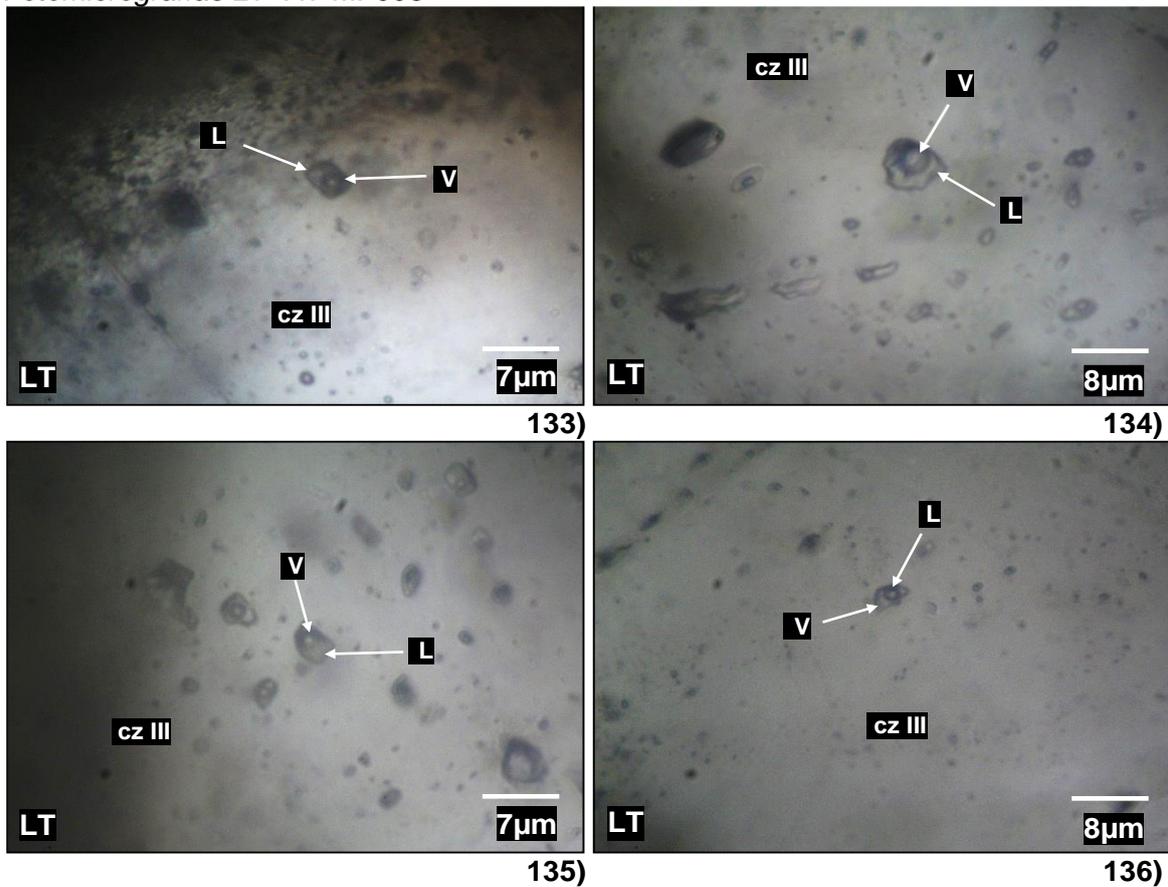


Nota: Fotomicrografías en Luz Reflejada (LR).

Fotomicrografías LT: 133 a 136 inclusiones fluidas primarias bifásicas ricas en líquido (Tipo L) con formas alargadas, subredondeadas e irregulares con tamaños entre 5 a 10 µm capturadas en cuarzo de relleno (cz III) (Ver Figura 51).

Figura 51

Fotomicrográficas LT- AT-MI-003



Nota: Fotomicrográficas en Luz Transmitida (LT).

En la tabla 10 se muestran los datos del análisis microtermométrico de temperatura de homogeneización y salinidad realizados.

Tabla 10

Datos microtermométricos de la muestra AT-MI-003

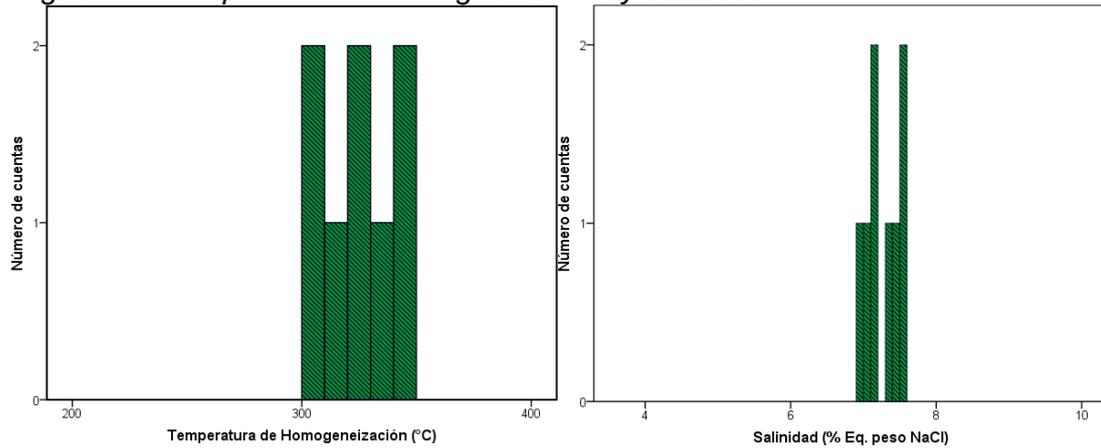
FAMILIA	CLAF.	MIN	TIPO	Øµ	FILL (L/V)	-Tf (°C)	Th (°C)	NaCl (wt%)	ρ(g/cm ³)	P (bar)
1	BIF	cz	P-Lw	8	0.60	4.80	341.00	7.59	1.07	96.30
1	BIF	cz	P-Lw	10	0.70	4.50	343.20	7.17	1.07	98.72
1	BIF	cz	P-Lw	5	0.40	4.35	339.50	6.95	1.07	94.68
2	BIF	cz	P-Lw	7	0.60	4.70	321.00	7.45	1.07	76.03
2	BIF	cz	P-Lw	7	0.60	4.75	322.50	7.52	1.07	77.44
2	BIF	cz	P-Lw	6	0.50	4.65	318.70	7.38	1.07	73.89
3	BIF	cz	P-Lw	8	0.80	4.40	303.40	7.02	1.07	60.67
3	BIF	cz	P-Lw	7	0.60	4.48	305.70	7.14	1.07	62.54

Nota: Las diferencias en numeración entre las diferentes filas es la agrupación según el grado de asociación de las IF (familias FIF) y de IF aisladas.

En los histogramas que se muestran en la Figura 52, se puede observar que las temperaturas de homogeneización (T_h °C) para esta muestra en específica está entre 300 y 350 °C y salinidad entre 6 a 8 % eq. peso NaCl. Se podría asumir que la mineralización está asociado a estas temperaturas y salinidades.

Figura 52

Histograma de temperatura de homogeneización y salinidad

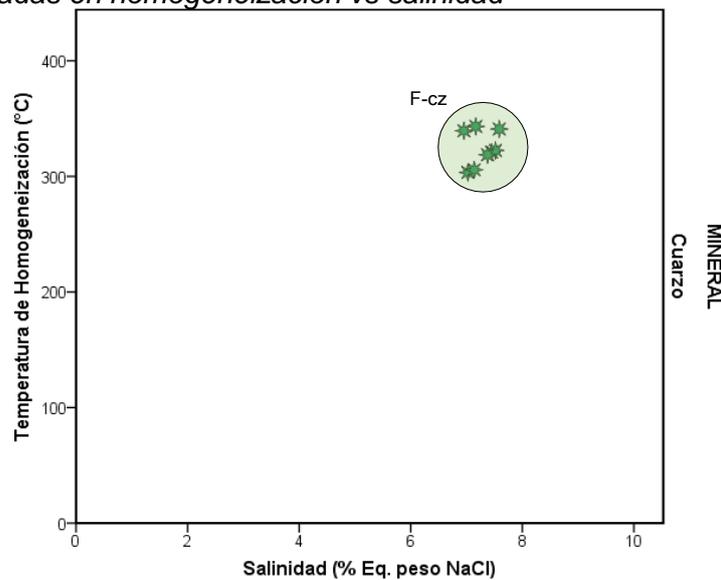


Nota: Histogramas vs números de cuentas.

Se puede observar (Ver Figura 53), una posible población (F-cz), cuya menor temperatura de homogeneización medida es de 303 °C y la máxima de 341 °C; con una salinidad entre 7 a 7.5 % eq. peso NaCl.

Figura 53

Familias identificadas en homogeneización vs salinidad



Nota: Familia identificada en minerales de cuarzo.

Figura 55

Muestra macroscópica M1



Nota: Nexa Resources Atacocha.

Imagen SEM y fotomicrografía muestra M1_A

Imagen A: Imagen SEM mostrando intercrecimiento de sulfosales de As y Cu (SFSSAs-Cu), cobres grises (CGRs), galena (gn) y bournonita (bnn), este último mineral ocurre entre el contacto de la galena y cobres grises (Ver Figura 56-A).

Imagen B: Fotomicrografía en luz reflejada y nícoles paralelos mostrando la misma zona de la foto A. Se observa, el zonamiento de los cobres grises, desde su parte central más parda, hacia los bordes más verdosos. (Ver Figura 56-B).

Imagen C: Espectro EDS del análisis puntual (cruz roja) cuyo resultado porcentual corresponde a cobres grises (CGRs) con contenidos importantes de Ag (5.47 %), Zn (6.56%) y en menor proporción Fe (1.56 %) (Ver Figura 57-C).

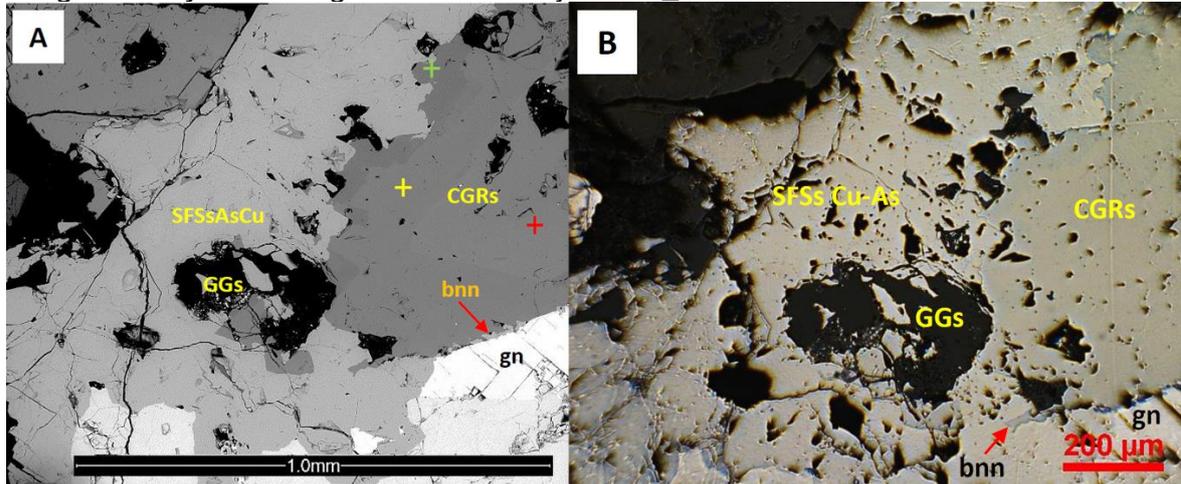
Imagen D: Espectro EDS del análisis puntual en la cruz amarilla, mostrando picos de S, Cu, As y Sb, correspondientes a cobres grises (CGRs), con cierto contenido de Zn (7.13 %), Ag (3.17 %) y en menor proporción Fe (Ver Figura 57-D).

Imagen E: Espectro EDS de análisis puntual en la cruz verde. Se observan picos que corresponden a la fórmula química de los cobres grises (CGRs), con cierto contenido de Zn (7.39 %), Fe (0.62 %) y Ag (0.60 %) (Ver Figura 57-E).

Los tres análisis realizados siguiendo el zonamiento de los cobres grises, demuestra una variación creciente de As, desde el núcleo hacia los bordes, mientras que con la Ag ocurre lo contrario.

Figura 56

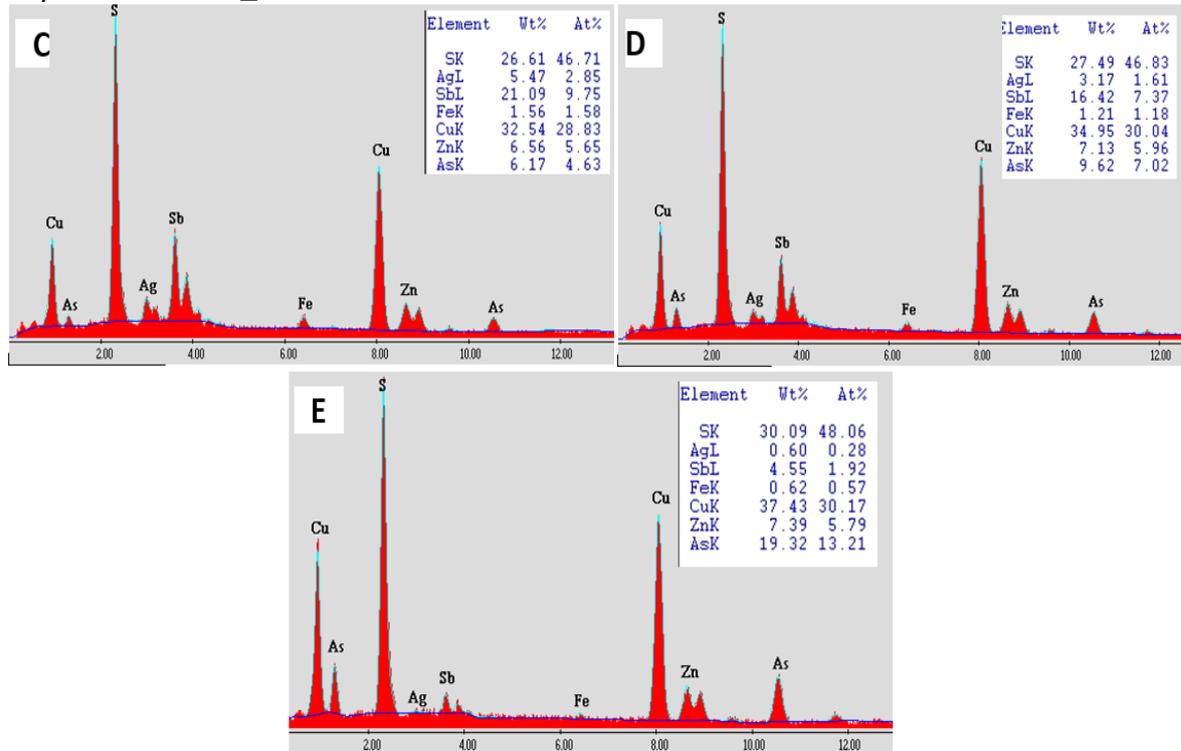
Imagen SEM y fotomicrografía en luz reflejada M1_A



Nota: Nexa Resources Atacocha.

Figura 57

Espectro EDS M1_A



Nota: Nexa Resources Atacocha.

Imagen SEM muestra M1_B

Imagen A: Con el análisis SEM/EDS se muestra un sulfosal con alto contenido de antimonio que se encuentra intercreciendo con galena (gn), bournonita (bnn) y gangas (GGs) (Ver Figura 58).

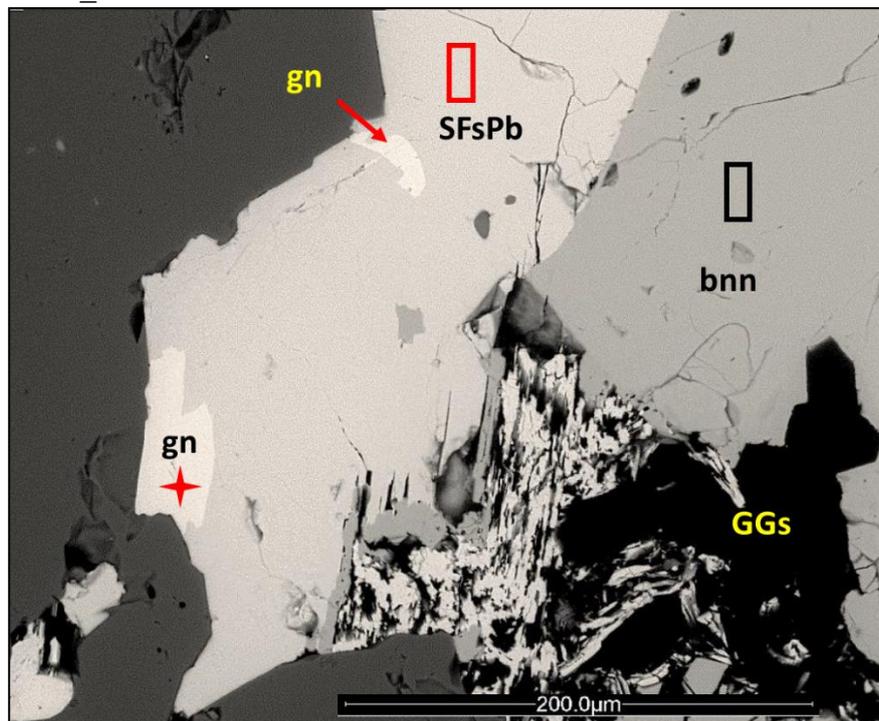
Imagen B: Espectro EDS de análisis puntual en la cruz roja, mostrando el típico contenido porcentual de una galena (gn). No se tiene contenido de Ag (Ver Figura 59-B).

Imagen C: Espectro EDS del análisis micro-areal (rectángulo rojo), donde se observa picos característicos de una galena, pero con contenido de Sb (5.34 %). También se detecta contenidos subordinados de Cu (0.40 %) y Ag (0.24 %) (Ver Figura 59-C).

Imagen D: Espectro EDS de análisis micro-areal del rectángulo negro. Se observa picos de S (17.66 %), Sb (8.05 %), Cu (11 %) y Pb (63.29 %) que corresponderían a una bournonita (bnn). No se tiene contenido de Ag (Ver Figura 59-D).

Figura 58

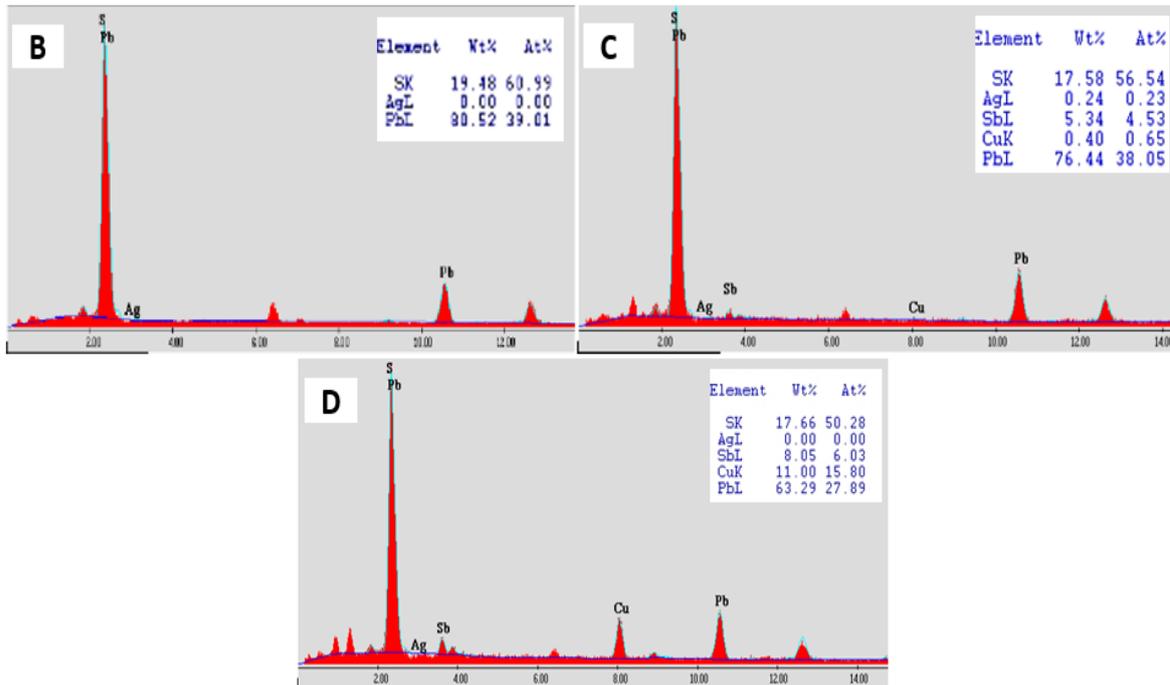
Imagen SEM M1_B



Nota: Nexa Resources Atacocha.

Figura 59

Espectro EDS M1_B



Nota: Nexa Resources Atacocha.

3.6.2 Muestras de concentrados de plomo

Muestra M2

La muestra no tiene ubicación, se tomó del concentrado de plomo, siendo el mineral más abundante la galena. Las partículas de galena varían desde 5 hasta 200 micrómetros. Se observa partículas inequigranulares de galena, predominando las inferiores a 100 micrómetros, la galena por lo general ocurre intercrecida con las sulfosales. La calcopirita se presenta puntualmente en el concentrado de plomo de forma liberada y en menor proporción como inclusiones en esfalerita.

Fotomicrografía muestra M2

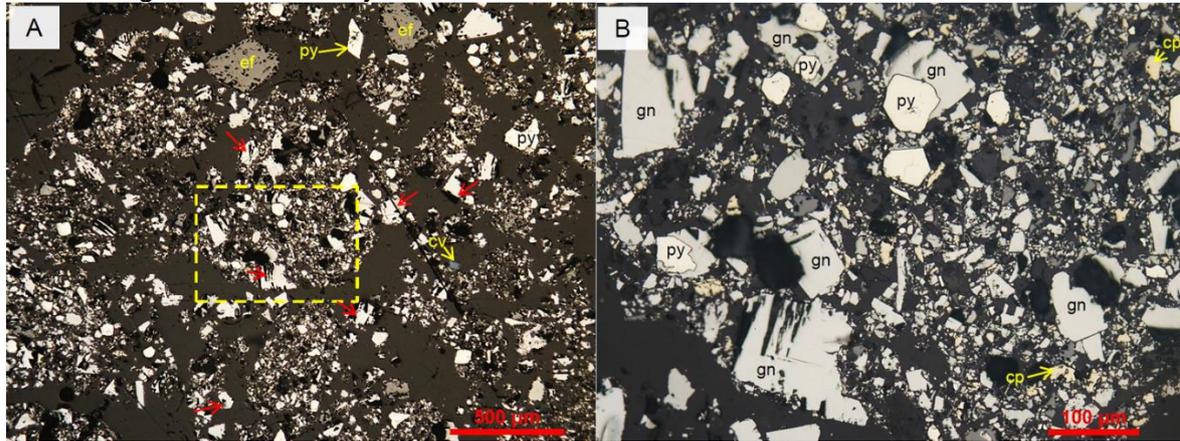
Imagen A: Fotomicrografía en luz reflejada y nícoles paralelos. Concentrado de Pb. galena (flechas rojas) es el mineral más abundante. Ocurrencia de covelita (cv) de forma puntual en el concentrado (Ver Figura 60-A).

Imagen B: Vista ampliada del recuadro amarillo de A, mostrando la presencia de otros sulfuros como esfalerita (ef), pirita (py) y de forma puntual calcopirita (cp). La galena

(gn) liberada inequigranular es la más abundante, se distinguen intercrecimientos simples con la pirita (Ver Figura 60-B).

Figura 60

Fotomicrografía en luz reflejada M2



Nota: Nexa Resources Atacocha

Imagen SEM muestra M2_1

Imagen A: Imagen SEM mostrando granos liberados y mixtos de galena (gn), y en menor proporción pirita (py), cobres grises (CGRs), esfalerita (ef) y bournonita (bnn) (Ver Figura 61).

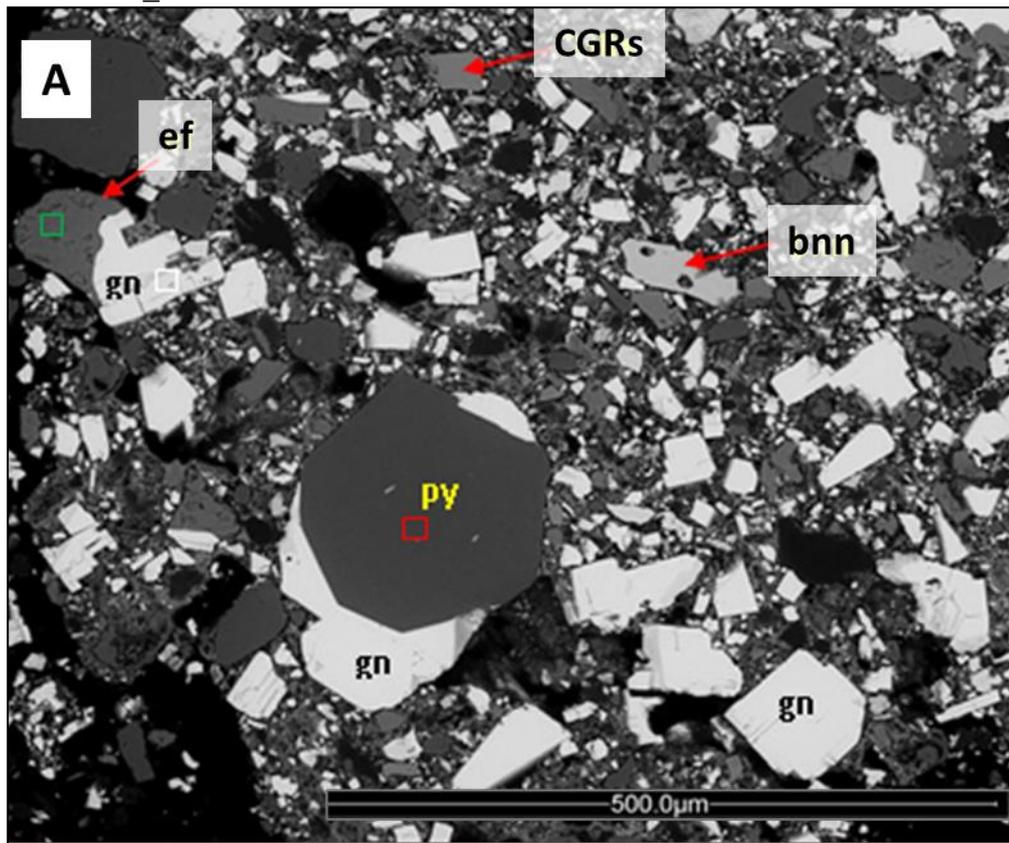
Imagen B: Espectro EDS del análisis del recuadro rojo en A, mostrando picos característicos de Fe y S de una pirita con contenido de Au (0.63 %) y Ag (0.61 %) (Ver Figura 62-B).

Imagen C: Espectro EDS del recuadro verde en A, mostrando picos de Zn y S, propios de una esfalerita con contaminación de Pb (cercanía de galena), Cd, Mn, Fe y Co; además de Cu (3.72 %) y Au (1.05 %); aunque exenta de Ag (Ver Figura 62-C).

Imagen D: Espectro EDS del recuadro blanco. Se observa picos característicos de una galena con contenido de Au (1.39 %), pero exenta de Ag (Ver Figura 62-D).

Figura 61

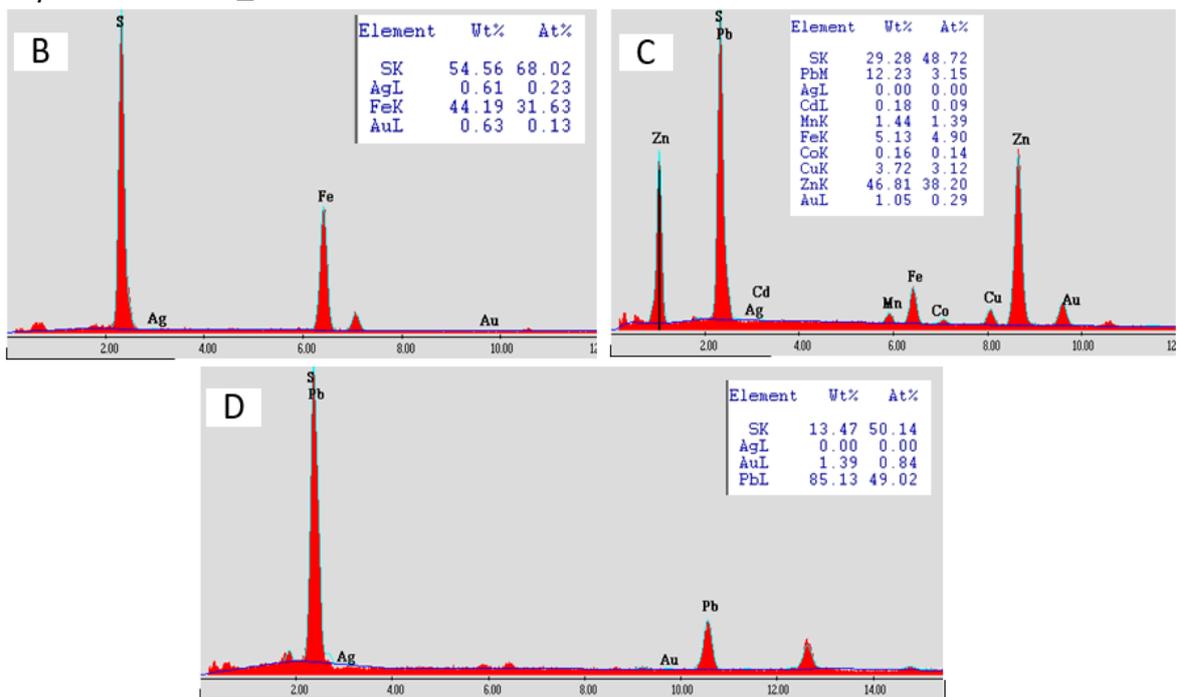
Imagen SEM M2_1



Nota: Nexa Resources Atacocha.

Figura 62

Espectro EDS M2_1



Nota: Nexa Resources Atacocha.

Imagen SEM muestra M2_2

Imagen A: Imagen SEM mostrando galena (gn), pirita (py) y cobres grises (CGRs), también se observa, en menor proporción, varios granos mixtos de pirita con galena, así como de arsenopirita (apy) con galena y arsenopirita con pirita (Ver Figura 63).

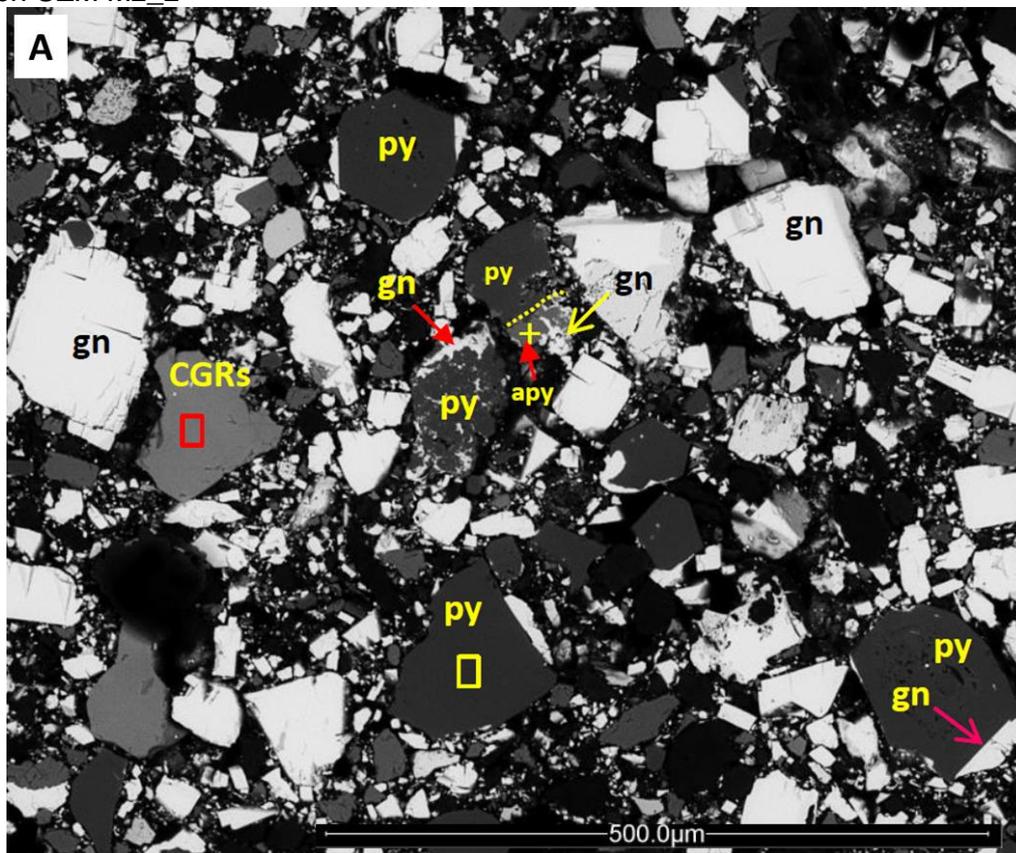
Imagen B: Espectro EDS del análisis puntual en la cruz amarilla, mostrando picos característicos de F, As y As de una arsenopirita, se reporta un contenido de Au de 0.43% (Ver Figura 64-B).

Imagen C: Espectro EDS del análisis del recuadro rojo, mostrando picos característicos de cobres grises con contenido de Zn y Fe, se reporta Au (0.48%) (Ver Figura 64-C).

Imagen D: Espectro EDS de análisis del recuadro amarillo, mostrando picos característicos Fe y S de una pirita, se reporta Au (0.94%) (Ver Figura 64-D).

Figura 63

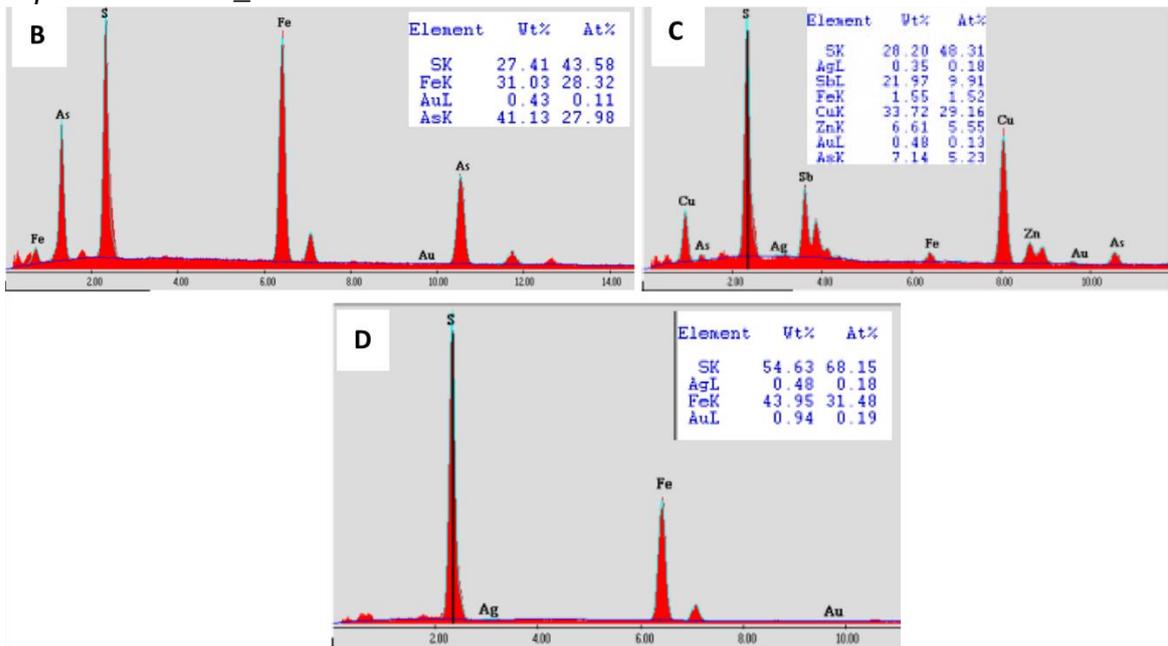
Imagen SEM M2_2



Nota: Nexa Resources Atacocha.

Figura 64

Espectro EDS M2_2



Nota: Nexa Resources Atacocha.

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se detallan el análisis y discusión de resultados como la propuesta de ingeniería aplicado al Tajo San Gerardo.

4.1 Análisis de resultados

4.1.1 Ensamblajes mineralógicos

De los resultados de la caracterización petromineralográfica de las 20 muestras representativas en el presente estudio, se logró definir tres tipos de ensamblajes mineralógicos típicos:

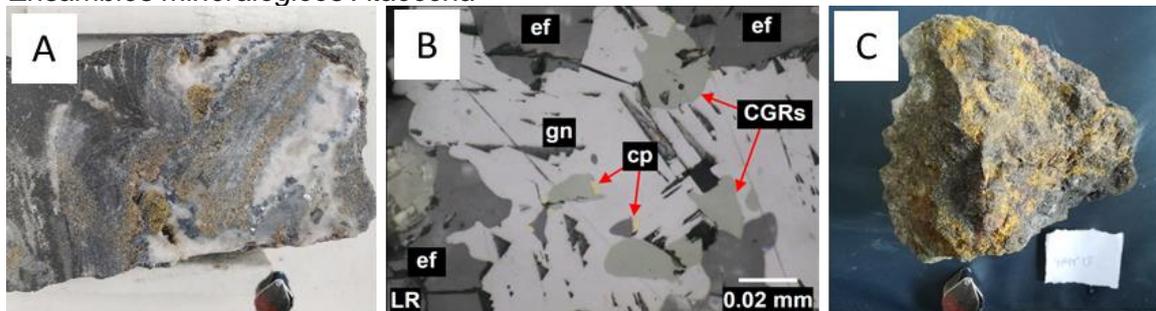
Ensamble Pb-Zn-(Ag), conformado por menas ricas en esfalerita-galena, con contenido de Ag, generalmente acompañadas de carbonatos y/o cuarzo, este ensamble puede contener eventualmente valores significativos de Au y con frecuencia algo de Mn (Ver Figura 65-A).

Ensamble Arsenical, caracterizado por la presencia de valores significativos de As con presencia de Au, pero bajo Mn. Mineralógicamente está definido por la presencia de cobres grises arsenicales (tennantita) que pueden gradar a freibergita (cobres grises argentíferos) (Ver Figura 65-B).

Ensamble “multimetálico”, presencia de alabandita (alb), esfalerita (ef) y galena (gn), pueden estar intercrecidos con carbonatos (CBs). El As en este ensamble está presente principalmente como oropimente y/o rejalgar (Ver Figura 65-C).

Figura 65

Ensamblajes mineralógicos Atacocha



Nota: **A)** Ensamble típico Pb-Zn-(Ag). Galena (gn) intercrecida con esfalerita (ef); flanqueados por cuarzo lechoso y carbonatos bien cristalizado, **B)** Galena (gn) con inclusiones de cobres grises (CGRs) asociada a calcopirita (cp) y **C)** Muestra de mano predominancia de oropimente y rejalgar con presencia de alabandita (alb), esfalerita (ef) y galena (gn).

Se determinó la secuencia paragenética del Tajo San Gerardo interpretando las texturas y las relaciones entre los minerales identificados de los estudios petrominerográficos realizados, que corrobora lo observado en el mapeo geológico, esta información se utilizó para definir el orden cronológico de la depositación del mineral. Se reconocieron tres estadios de precipitación hipogénica y una supergénica: Evento temprano, relacionado a una etapa pre-mineralización de sulfuros (Ver Figura 34); Evento principal, relacionado al mayor volumen de mineralización de sulfuros en el depósito (Ver Figura 36); Evento tardío, relacionado a una mineralización secundario de sulfuros (Ver Figura 40); y Evento Supergénico correspondiente a una etapa de oxidación superficial que removiliza parte de los elementos previamente depositados (Ver Figura 42). Seguidamente en la Figura 66 se presenta la secuencia paragenética de Atacocha.

Figura 66

Secuencia paragenética de Atacocha

MINERALOGÍA		HIPOGENICA			SUPERGENICA
		Evento Temprano	Evento Principal	Evento Tardío	
ALTERACIÓN	Cuarzo	—	—		
	Carbonatos	—	—		
	Adularia		—		
	Sericita		----		
MINERALIZACIÓN	Alabandita		—		
	Pirolusita			----	
	Galena		—		
	Cobres Grises		—		
	Sulfosales de Plomo			—	
	Esfalerita		—		
	Calcopirita		—		
	Calcocita				—
	Covelita				—
	Pirita	—	---	---	
	Hematita				—
	Goethita				---
	Marcasita			---	
MAYOR TEMPERATURA INICIAL		→			MENOR TEMPERATURA FINAL
Escaso ----		Moderado —		Abundante —	

Nota: Fuente propia.

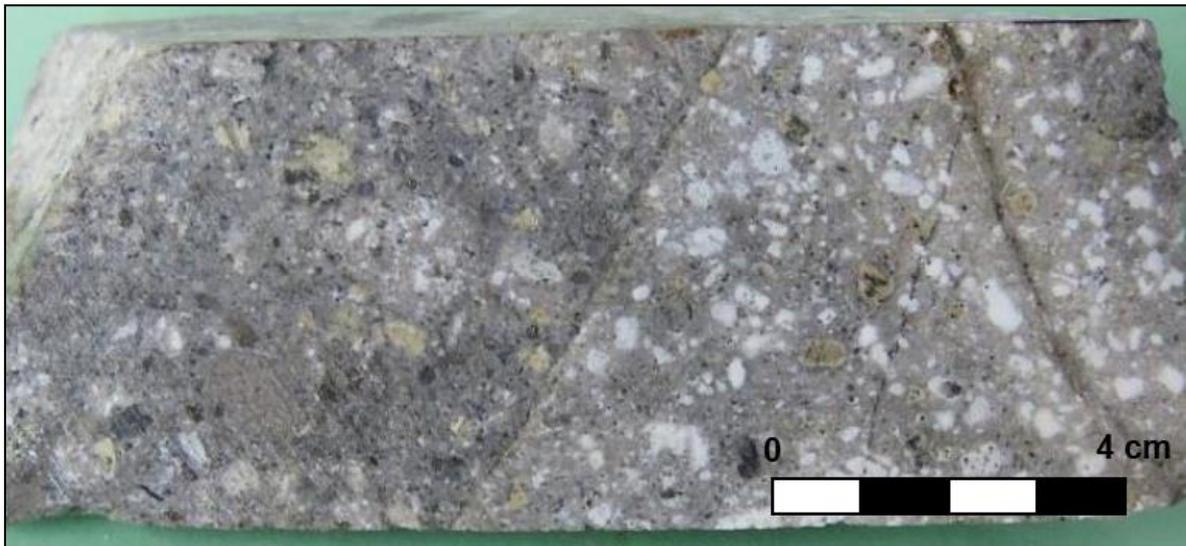
4.1.2 Alteraciones

Las alteraciones del Tajo San Gerardo se valida con lo observado en la muestra AT-MI-008 (Ver Figura 67).

Descripción Macroscópica. Superficie de corte de testigo diamantino, se observa una textura porfirítica, donde destacan los fenocristales tabulares de plagioclasas de color blanco, ocurrencia de venillas de cuarzo-sulfuros y diseminación fina de pirita.

Figura 67

Muestra AT-MI-008



Nota: Fuente propia.

Descripción Microscópica

Imagen A: Se observa detalles de la fuerte alteración del fenocristal de plagioclasa a sericita; presencia de carbonatos y muscovita (mus) dejando muchos huecos (H); presencia de arcillas (ARCs) e illita (ill) parcialmente alteradas (Ver Figura 68-A).

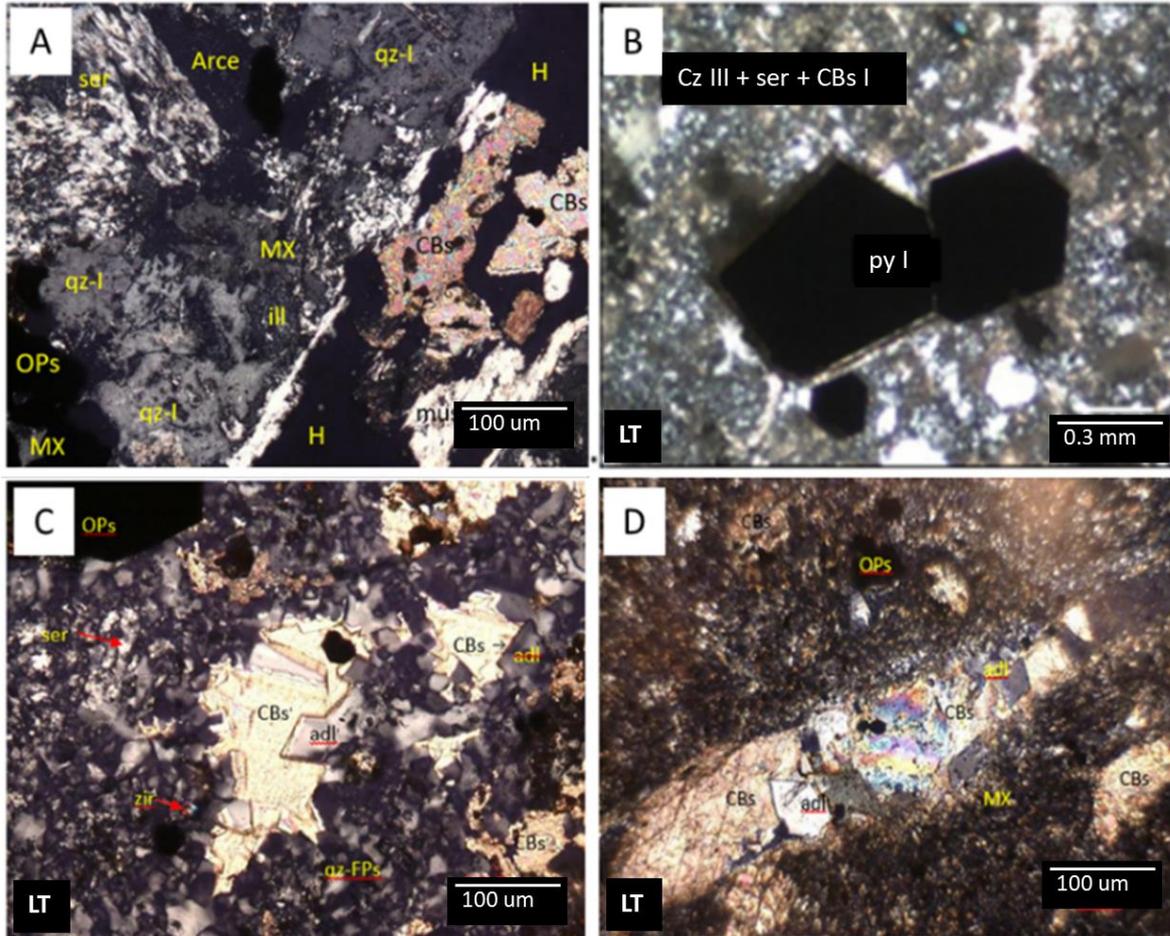
Imagen B: Diseminaciones de cristales y formas relícticas de pirita I (py I) en la matriz de cuarzo III con sericita y carbonatos I (cz III+ser+CBs I) (Ver Figura 68-B).

Imagen C: Se observa intercrecimiento de carbonatos (CBs) y cristales pseudorómbicos de adularia (adl), que ocurren como relleno de microcavidades en la matriz cuarzo – feldespática (qz-FPs) algo sericitizada, con carbonatos (CBs) intersticiales e inclusiones de minerales opacos (OPs) (Ver Figura 68-C).

Imagen D: Se observa venilla de adularia (adl) y carbonatos (CBs) granulares cortando la matriz (MX). Presencia de carbonatos y fina diseminación de minerales opacos (OPs) (Ver Figura 68-D).

Figura 68

Imagen de un microscopio de luz polarizada



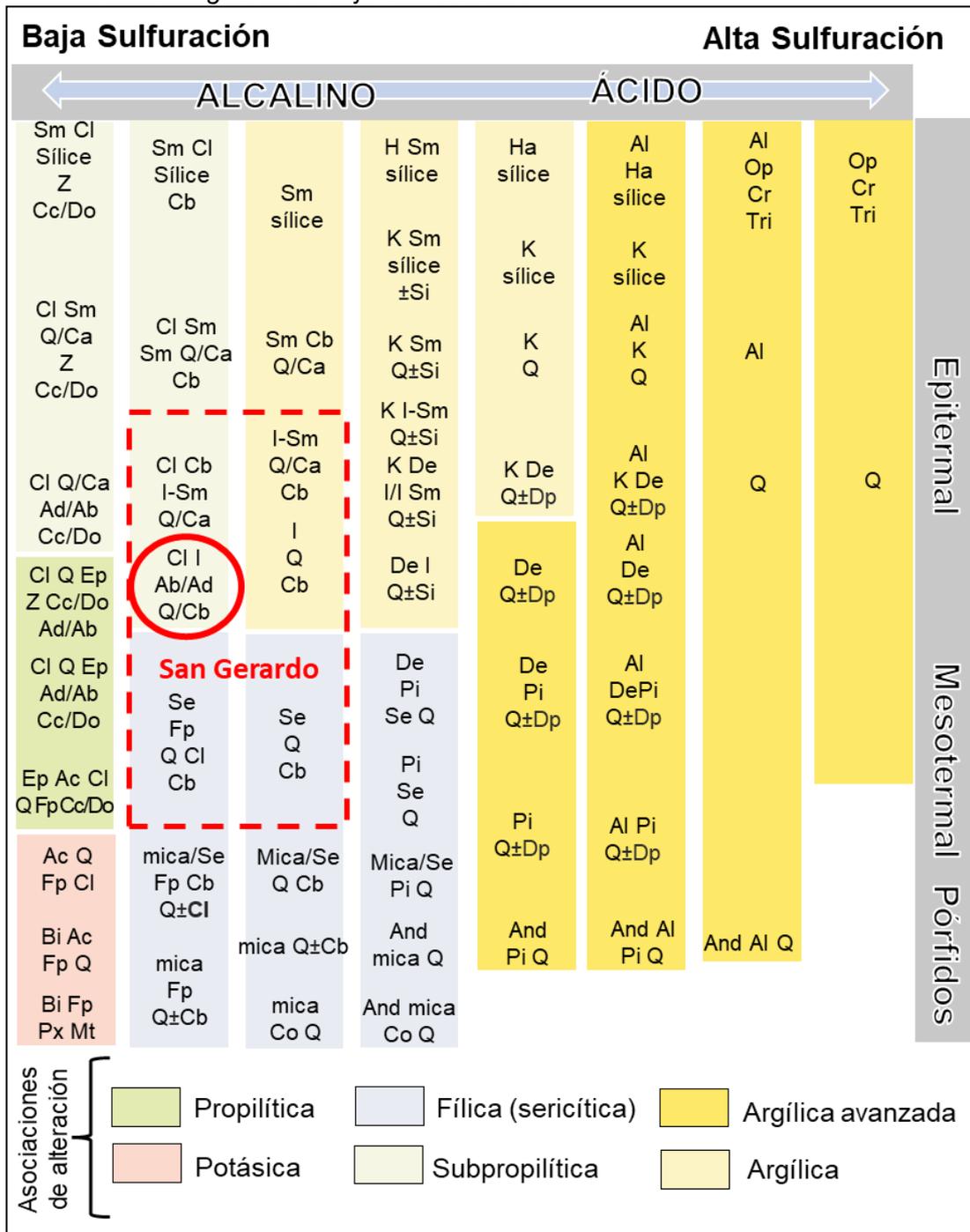
Nota: Fuente propia.

De los resultados obtenidos se desprende que las vetas mineralizadas tienen illita-smectita, adularia, cuarzo y carbonatos hidrotermales, producto de la alteración del intrusivo San Gerardo de naturaleza diorítica.

De acuerdo con el diagrama de Corbett y Leach (1998) se interpretó que el yacimiento corresponde a un ambiente alcalino de Baja Sulfuración (Ver Figura 69).

Figura 69

Asociación mineralógica en el Tajo San Gerardo



Nota: El polígono en rojo encierra las asociaciones mineralógicas identificadas a la formación del epitermal del Tajo San Gerardo (Modificado Corbett y Leach, 1998).

4.1.3 Microscopía electrónica de barrido

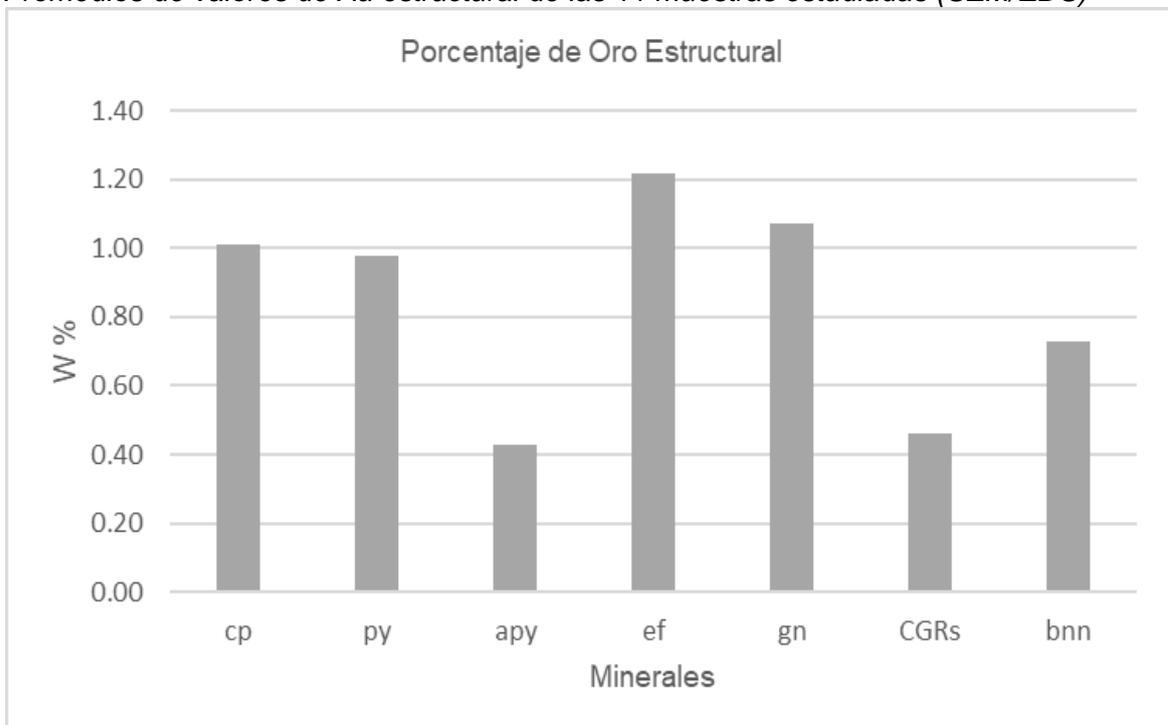
Con el microscopio electrónico de barrido no se ha visualizado oro grueso, tampoco se ha visualizado en los pre-concentrados gravimétricos, no se ha visualizado oro libre, intercrecido, fino, ni micrométrico, tampoco se ha visualizado algún mineral o compuesto de oro.

Se interpreta que la presencia de oro se encuentra como impureza estructural (Oro invisible) principalmente en los siguientes minerales: esfalerita (Ver Figura 62), pirita (Ver Figura 62), galena (Ver Figura 62) y cobres grises. Otros minerales portadores menos frecuentes son: bournonita (Ver Figura 64) y arsenopirita (Ver Figura 64)

A continuación, se presenta los promedios de oro estructural (Ver Figura 70) en base a los resultados obtenidos de las 11 muestras estudiadas por microscopía electrónica de barrido (SEM/EDS) en los minerales indicados,

Figura 70

Promedios de valores de Au estructural de las 11 muestras estudiadas (SEM/EDS)



Nota: Fuente propia.

4.1.4 Inclusiones fluidas

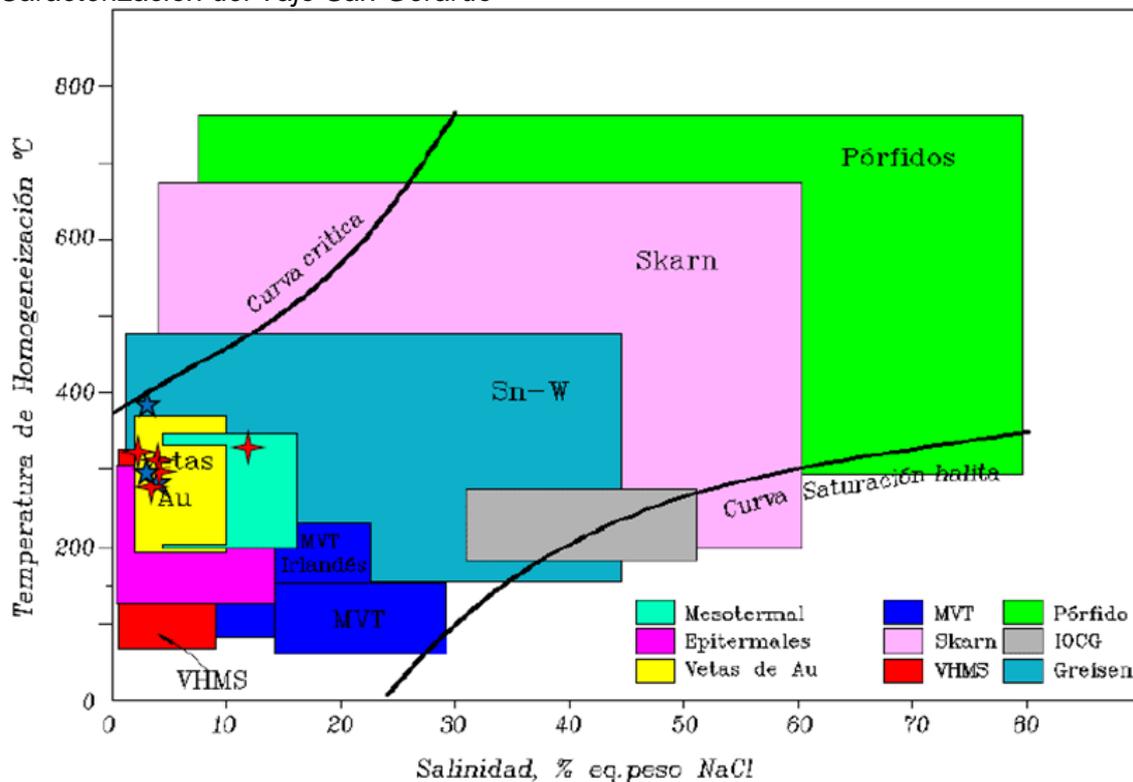
Se han reconocido inclusiones fluidas en el cuarzo y esfalerita en 10 muestras seleccionadas de la zona de explotación del Tajo San Gerardo (Fase 02 y 03).

Los resultados de las inclusiones primarias bifásicas ricas en líquido tipo L (clasificación de Nash, 1976), reportan temperaturas de homogeneización entre los rangos de 200 a 350 °C y la salinidad de los fluidos entre 0.15 a 10 % eq peso NaCl.

La temperatura de homogeneización y salinidad muestran familias de fluidos que representan depósitos del tipo Epitermal en contacto con vetas de Au (Ver Figura 71).

Figura 71

Caracterización del Tajo San Gerardo

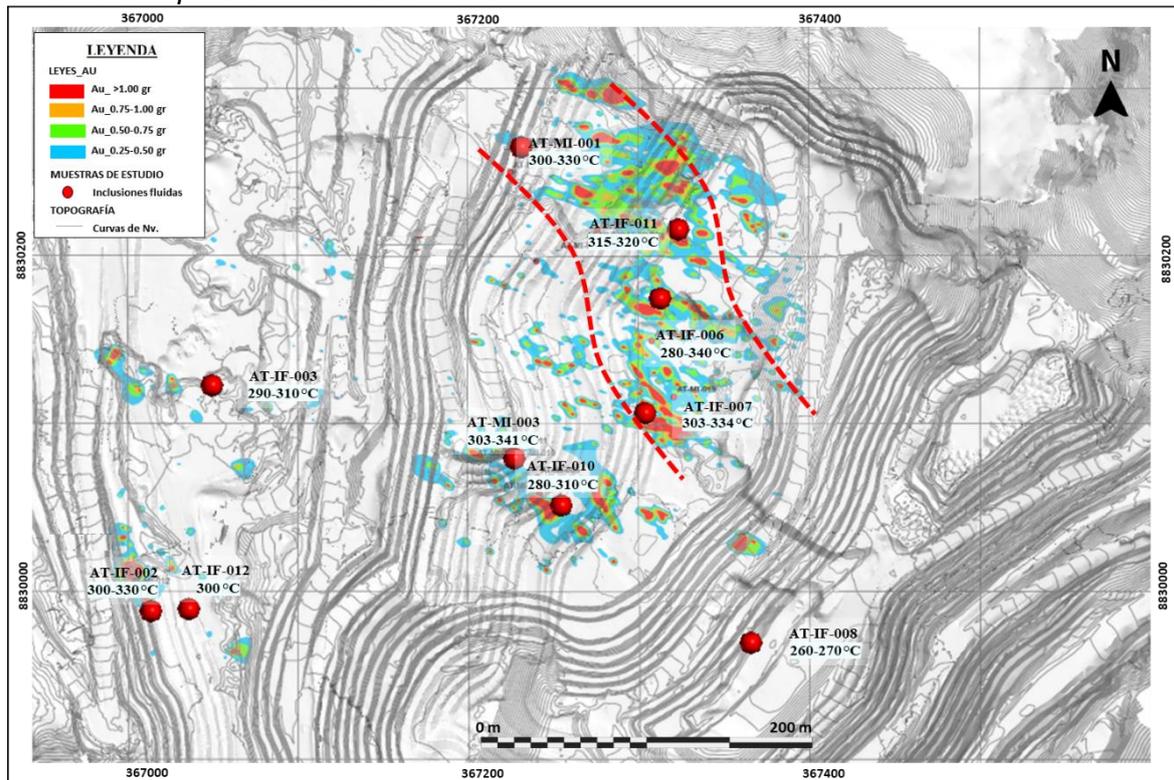


Nota: Las estrellas rojas son los datos obtenidos de las IF estudiadas, en función de la salinidad y temperatura de homogeneización.

Las muestras de inclusiones fluidas (AT-MI-001, AT IF-006, AT-IF-007 y AT-IF-011) dan validez a las observaciones de campo, interpretando que la dirección de los fluidos mineralizantes anomalías de oro son de dirección Noroeste (líneas rojas punteadas en la Figura 72) y se confirma los rangos de temperaturas son de 280 a 340 °C.

Figura 72

Ubicación espacial de inclusiones fluidas



Nota: Fuente propia.

4.1.5 Yacimiento del Complejo Pasco

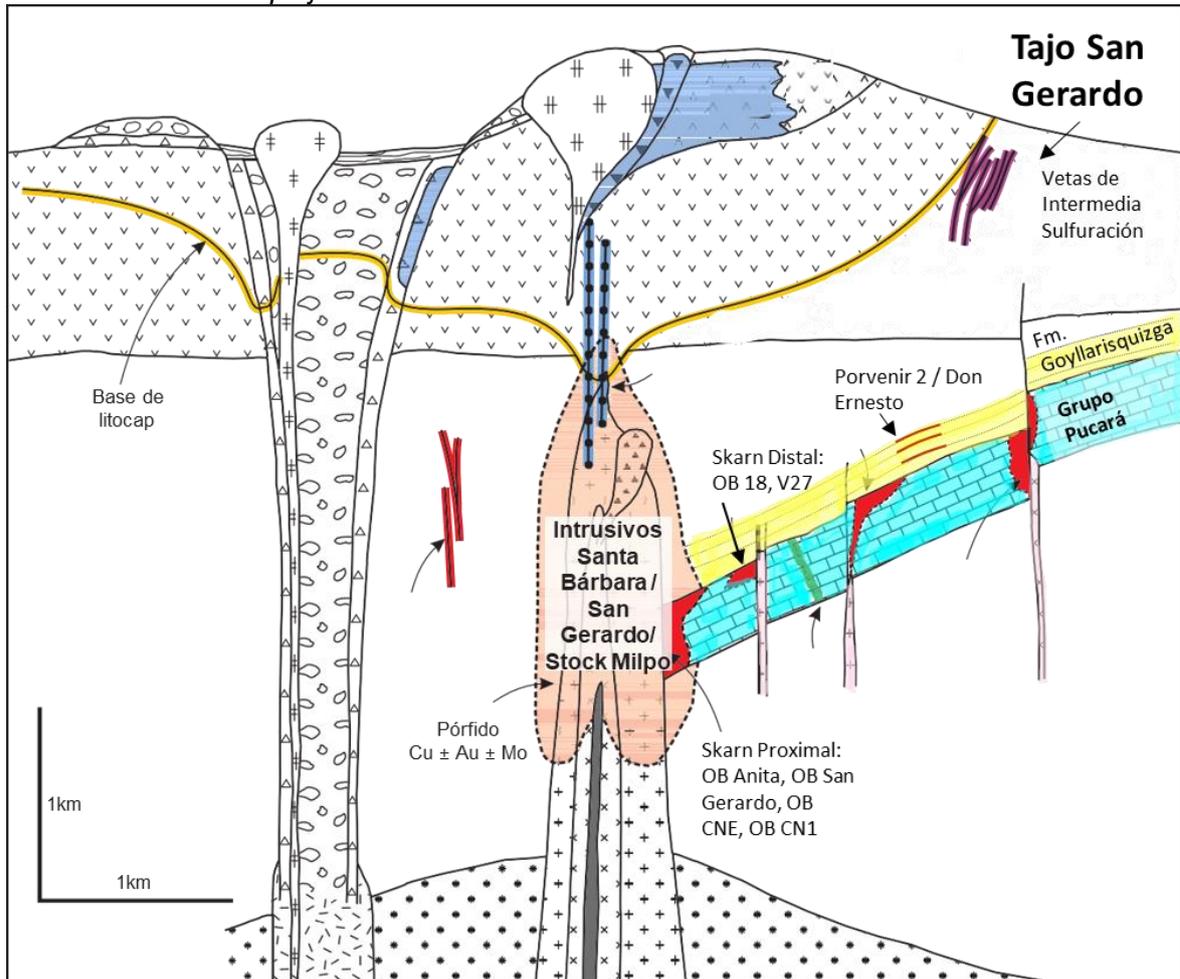
Con los resultados obtenidos se considera al Tajo San Gerardo un yacimiento Epitermal de Baja a Intermedia Sulfuración, con contenido de oro invisible en vetas; sin embargo, la mineralización económica en el Complejo Pasco es variada, identificándose los siguientes estilos de mineralización (Ver Figura 29):

- Skarn proximal: Zn – Cu
- Skarn distal: Pb-Ag-Zn-Cu-Au
- Brecha: Pb-Ag-Zn-Cu-Au
- Estratoligado en areniscas: Pb-Ag-Zn -Au
- Pórfido: Cu-Au (Mo)
- Intermedia Sulfuración: Pb-Ag-Zn-Au

En la Figura 73 se presenta el modelo del yacimiento Atacocha mostrando los diferentes estilos de mineralización.

Figura 73

Ore bodies del Complejo Pasco



Nota: Modificado de Sillitoe (2010).

4.2 Propuesta de ingeniería

4.2.1 Perforación diamantina para la estimación de recursos mineros

La perforación diamantina es necesaria para definir y dimensionar la naturaleza del recurso mineral del yacimiento, y de esta manera determinar si el yacimiento reúne condiciones razonables para una extracción económica. Según el código J.O.R.C. (1999), se puede decir que un recurso mineral es una concentración de un material sólido o líquido de interés económico, que se encuentra dentro o sobre la corteza terrestre en tal forma, ley (o calidad) y cantidad que dan razones considerables para considerar una eventual extracción y explotación generando un beneficio económico.

El área de Geología Mina cuenta con un presupuesto anual para realizar campañas de perforación con el objetivo de la recategorización de recursos minerales en el Tajo San

Gerardo. Durante los últimos años se fue ajustando la malla de perforación, incrementando el nivel de certeza de los nuevos impactos realizados, además se replanteó los objetivos de perforación gracias a las nuevas interpretaciones y hallazgos, recomendando realizar el siguiente programa de perforación en la zona Noroeste del Tajo San Gerardo.

4.2.2 Radios de categorización por variografía

Los variogramas son la principal herramienta para definir los criterios de estimación, y de esta forma definir que método de estimación es el más apropiado para caracterizar el yacimiento, además que permiten definir los alcances de los radios de búsqueda para cada elemento en estudio. La variabilidad espacial de las leyes se puede analizar y cuantificar con herramientas y métodos geoestadísticos: variogramas, varianza de krigging y simulaciones.

En la estimación de recursos minerales del Tajo San Gerardo, el análisis variográfico determinó los alcances mínimos de perforación para obtener recursos medidos, indicados e inferidos, se consideró como criterio de categorización la continuidad geológica y ley (Ver Figura 74 y Tabla 11):

Medido : 3 sondajes mínimo a distancia, en el variograma de 0.75 de variabilidad.

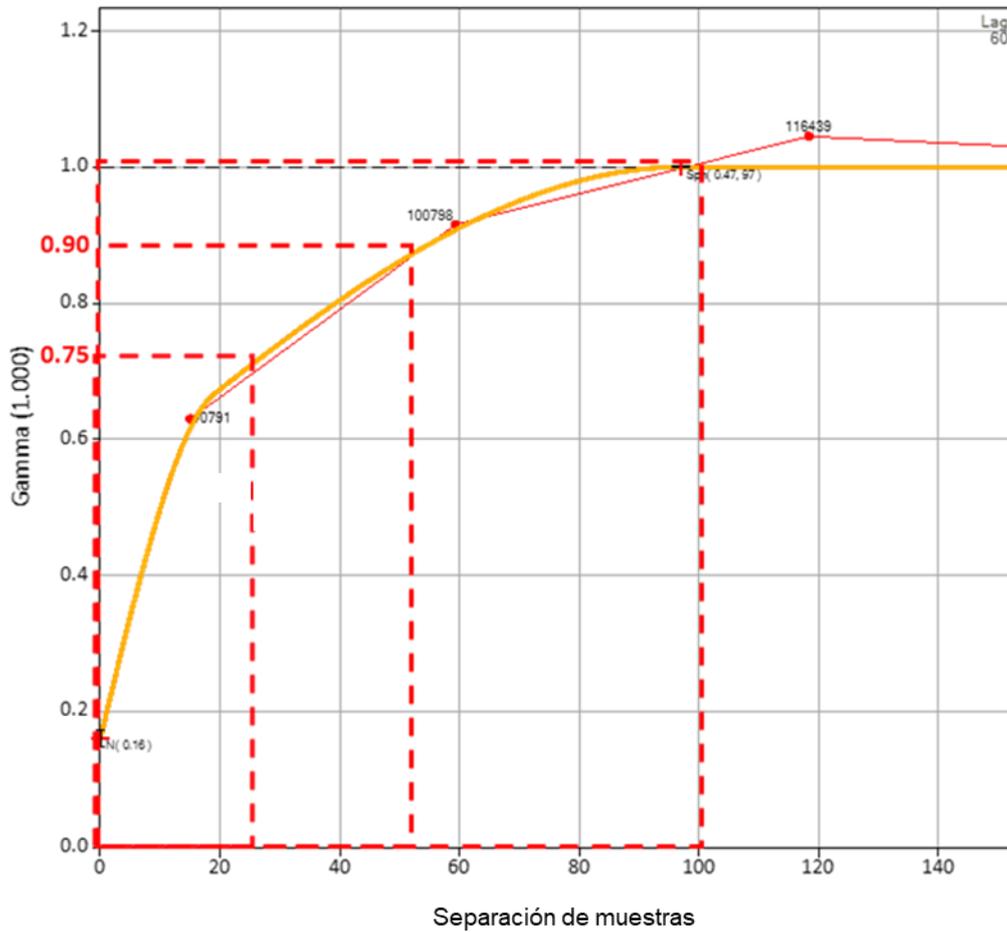
Indicado : 3 sondajes mínimo a distancia, de 0.9 de variabilidad (alcance de variografía).

Inferido : 2 sondajes mínimo a distancia, de 2 veces el alcance de indicado. (estructuras que presenten más de 3 sondajes).

Figura 74

Variograma de la agrupación anisotrópica del dominio de Zn

Variograma para el Zn_Cap



Nota: Fuente propia.

Tabla 11

Espaciamiento en sondajes para la recategorización de recursos

Categoría	N° Sondajes	X	Y	Z
Medido	3	25	25	12
Indicado	3	50	50	25
Inferido	2	100	100	50

Nota: Fuente propia.

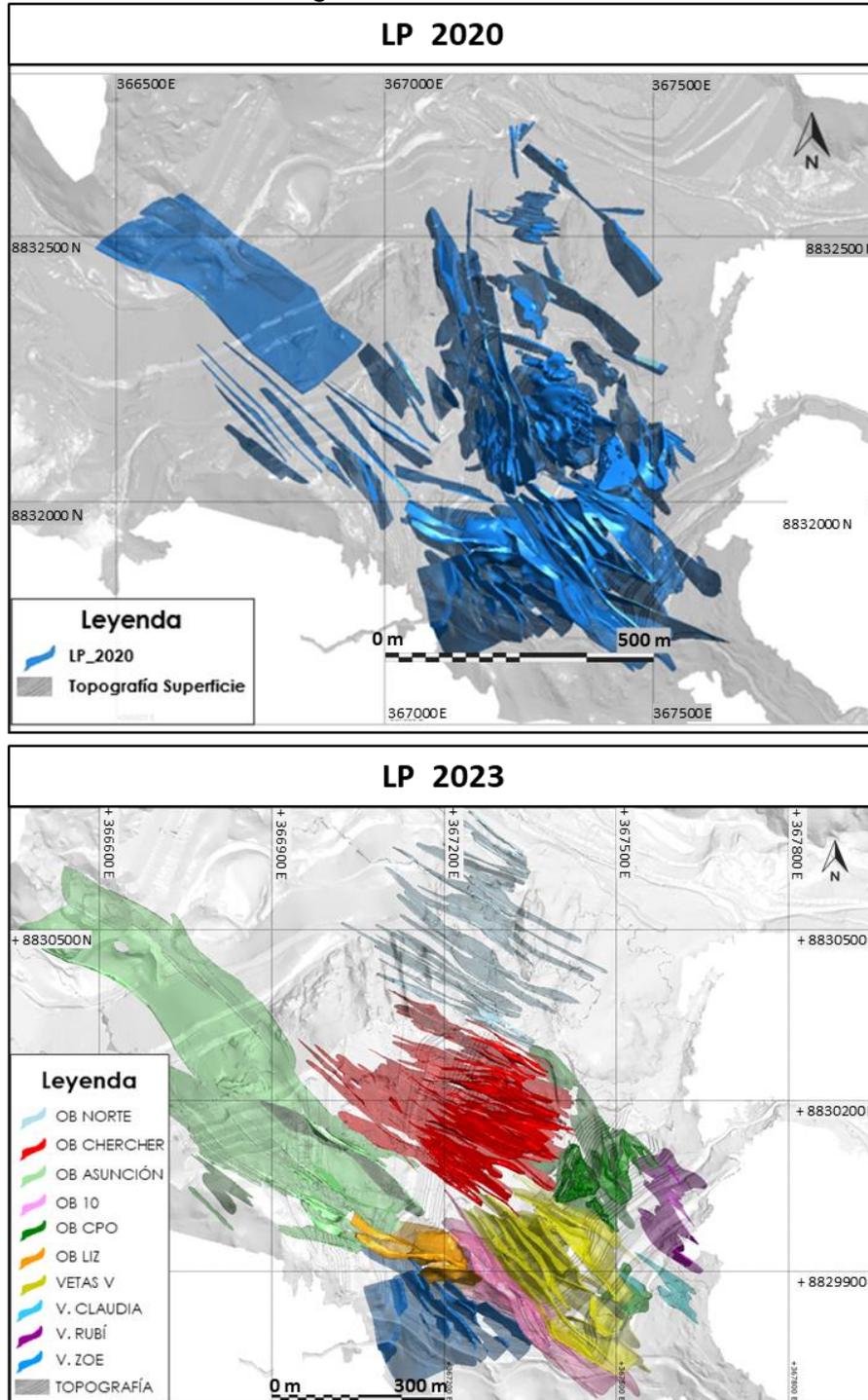
4.2.3 Mejoras en el modelamiento geológico

Para el modelamiento geológico del Tajo San Gerardo se utilizó el software Leapfrog y se tuvo como inputs los sondajes diamantinos, planos en planta, secciones sistemáticas, mapeos de bancos y logueo de blastholes.

Desde el año 2021 se inició la reinterpretación de los sólidos mineralizados, modificando el modelamiento de cuerpos asociados a una interpretación del tipo Skarn, a sólidos en sistema de vetas con orientación Noroeste-Sureste asociados a la interpretación de un yacimiento Epitermal (Ver Figura 75).

Figura 75

Comparativo de los sólidos del Largo Plazo 2020 vs 2023

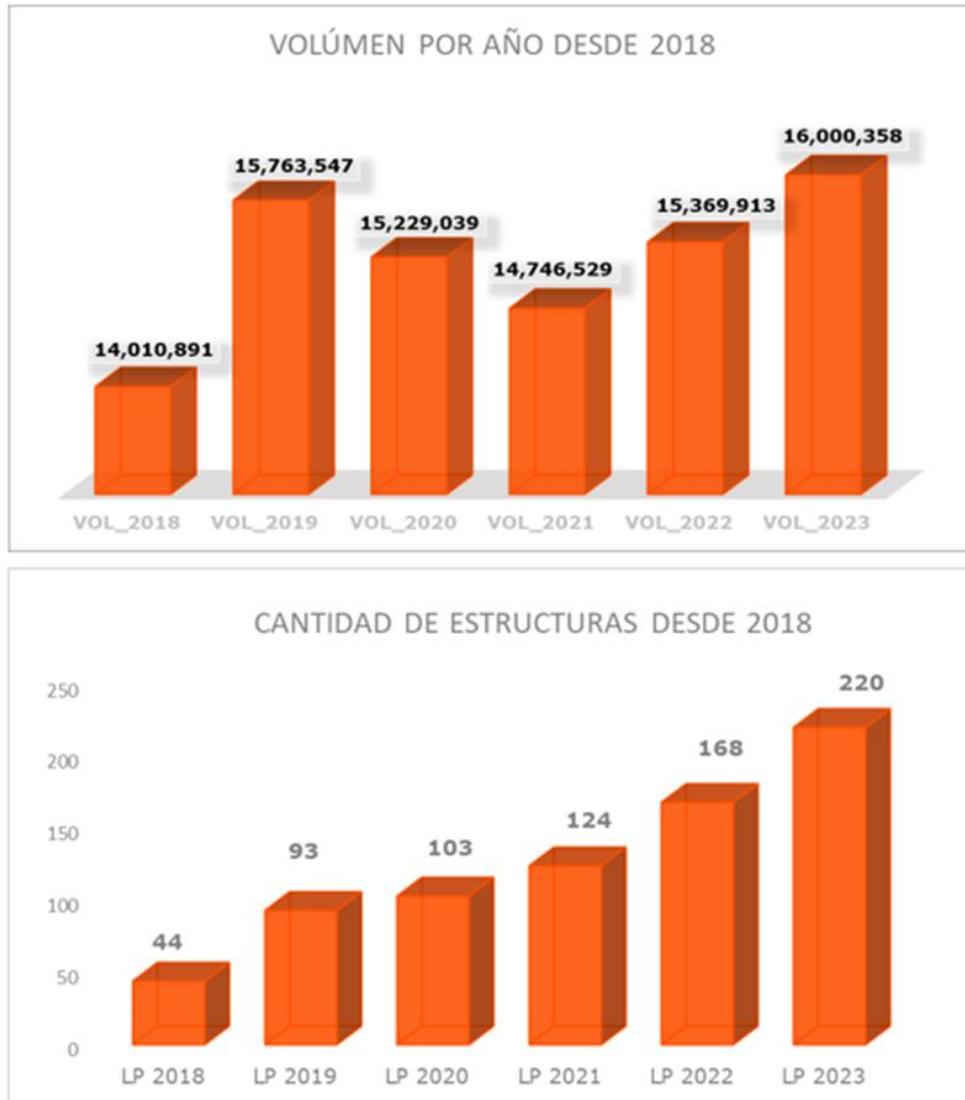


Nota: Fuente propia.

Los resultados presentados en el modelamiento del Largo Plazo 2023 respecto al Largo Plazo 2020, pone en evidencia que se incrementó el volumen de 14.75 Mt a 16Mt y la cantidad de las estructuras de 124 a 220 en el Tajo San Gerardo (Ver Figura 76).

Figura 76

Volumen y cantidad de estructuras desde el año 2018 al 2023



Nota: Fuente propia.

En el área de Geología se tiene un programa de perforación de 6'000 m por año, del año 2021 al 2023 se ha incrementado el tonelaje en 1'253'829 tn de recursos medidos, indicados e inferidos, esto representa un costo de perforación de 600'000 \$ y un retorno de 68.9 M\$ (Ver Tabla 12).

Tabla 12*Presupuesto de recategorización de recursos*

Programa Anual perforación (m)	Costo por metro (\$)	Total Costo Anual
6,000	100	\$600,000.00

Recategorizar Anual (Tn)	NSR por Tn (\$/Tn)	Valor Anual (\$)
1,253,829	55	\$68,960,595.00

Nota: Fuente propia.

Conclusiones

La Unidad Minera Atacocha se encuentra en el distrito de San Francisco de Yarusyacán y Yanacancha, provincia y región de Pasco, su actual producción está enfocada en la zona alta del depósito. El yacimiento ha sido considerado como un yacimiento skarn por sus asociaciones mineralógicas y alteraciones en profundidad. Actualmente los estudios geológicos están enfocados en la zona alta del depósito y se considera que tiene carácter de un yacimiento del tipo epitermal.

La Unidad Minera Atacocha en la parte alta tiene indicios de un yacimiento epitermal, su mena se caracteriza por un sistema de vetas constituidos por galena, esfalerita, cobres grises y sulfosales con presencia de oro; sus gangas son pirita, cuarzo, calcita y alabandita.

Los estudios petrominerográficos, difracción de rayos X, inclusiones fluidas y microscopía electrónica de barrido permitieron fundamentar y justificar las preguntas con respecto al objeto de estudio.

En el Tajo San Gerardo aflora las areniscas del Grupo Goyllarisquizga y las calizas del Grupo Pucará diferenciándose la Formación Chambará, Formación Aramachay y Formación Condorsinga. El intrusivo San Gerardo de composición diorítica, tiene un rumbo Noroeste paralelo al sistema de fallas 13, este intrusivo corta a toda la secuencia sedimentaria.

Se identificó tres ensambles típicos en el Tajo San Gerardo; Ensamble de Sulfuros (Pb-Zn) con valores de Ag y Au; Ensamble Arsenical, caracterizado por la presencia de cobres grises y sulfosales con presencia Au; y Ensamble Multimetalico caracterizado por sulfuros de Pb y Zn con presencia de alabandita, oropimente y rejalgar.

La alteración hidrotermal principalmente reconocida en la zona es del tipo illita-esmectita-adularia, con presencia de carbonatos y cuarzo hidrotermal.

La presencia de oro se encuentra como impureza estructural (Oro invisible) principalmente en los siguientes minerales: esfalerita, pirita, galena y cobres grises.

Según el diagrama de Wilkinson, los resultados de las inclusiones fluidas indican temperaturas de homogenización entre 200 °C a 350 °C Vs. la salinidad de los fluidos entre 0.15 % a 10 % eq. peso NaCl. Los cuales corresponden a un rango cercano de ambiente epitermal y vetas de Au.

La Unidad Minera Atacocha fue descrita como un yacimiento tipo Skarn, por lo tanto, las estructuras mineralizadas del Open Pit Tajo San Gerardo fueron modeladas como cuerpos. Sin embargo, Con la reinterpretación geológica, de la cual forma parte el presente trabajo, se logró definir un sistema de vetas epitermales de sulfuración intermedia de rumbo Noroeste - Sureste. Desde entonces se ha redefinido los objetivos de la malla de perforación diamantina ampliando los recursos minerales al Noroeste - Sureste y Norte del Tajo San Gerardo, incrementando volumen y cantidad de estructuras mineralizadas. Además, se definió nuevas áreas con potencial geológico con controles estructurales similares a los cuerpos mineralizados ya identificados en el corredor de vetas, Ore Bodies: Asunción, Chercher y Norte.

Recomendaciones

Se recomienda continuar con el estudio estratigráfico, para tener mayor entendimiento de las ocurrencias mineralizadas en las unidades del Grupo Pucará, esta caracterización ayudará en el modelamiento litológico.

Se recomienda reforzar la interpretación de alteraciones con el uso de firmas espectrales de muestras de roca, obtenidas por el espectrómetro Terraspec.

Es conveniente realizar un estudio litogeoquímico para caracterizar y clasificar los diferentes pulsos magmáticos del Tajo San Gerardo con el objetivo de encontrar el pulso con mayor mineralización económica.

Realizar pruebas geometalúrgicas en los diferentes ensambles mineralógicos que influenciarán en el tratamiento del mineral.

Continuar con el programa de perforación al NW y SE del Tajo San Gerardo, como también de la zona de Santa Bárbara donde aflora una serie de vetas, para incrementar los recursos minerales.

Referencias bibliográficas

- Ángeles, C. (1999). Los sedimentos cenozoicos de Cerro de Pasco: Estratigrafía, sedimentación y tectónica. En: Sociedad Geológica del Perú, Volumen Jubilar N.º 5: 75º Aniversario de la Sociedad Geológica del Perú. Lima: Sociedad Geológica del Perú, p. 103-118.
- Ángeles, C., y Bendezú, A. (2005). Geología de Superficie de la Mina Atacocha y Alrededores – ExploAndes, Volumen I.
- Benavides, V. (1956). Geología de la región de Cajamarca. Boletín Sociedad Geológica del Perú, (30).
- Berger, B., y Eimon, P. (1983). Conceptual models of epithermal precious metal deposits, en Shanks, W.C. (ed.), Cameron volume on unconventional mineral deposits: New York, New York, E.U.A., Society of Mining Engineers, 191-205.
- Camprubí, A., y Albinson, T. (2006). Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 58(1), 27-81.
- Canchaya, S. (2016). Evaluación geometalúrgica de la Unidad Minera Pasco - Atacocha con énfasis en la ocurrencia de oro - Sampling OK.
- Canchaya, S. (2017a). Informe de ensamble de Sulfuros-sulfosales para la Compañía Minera Atacocha S.A. - Sampling OK.
- Canchaya, S. (2017b). Informe de Concentrado de Plomo para la Compañía Minera Atacocha S.A. - Sampling OK.
- Canchaya, S. (2017c). Informe del estudio de microscópico óptico – pórfido dacítico para la Compañía Minera Atacocha S.A. - Sampling OK.
- Code, J. O. R. C. (1999). Australasian Code for Reporting of Mineral Resources and Ore Reserves. Prepared by the Joint Ore Reserves Committee of The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia (JORC).

- Corbett, T., y Leach (1998). Southwest Pacific rim gold-copper systems: Structure, alteration and mineralization. *Economic Geology*, Special Publication 6, 238p., Society of Economic Geologists.
- Dávila, D. (2017). Informe Final de Exploraciones Geológicas - Anglo Peruana Terra. Pasco.
- Delgado, H. (1980). Resumen de la geología de Atacocha, informe inédito. Cerro de Pasco: Cía Minera Atacocha S.A., 8 p.
- Einaudi, M., Hedenquist, J., e Inan, E. (2003). Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: transitions from porphyry to epithermal environments. Society of Economic Geologists, Special Publication, 10, 285-313.
- Geología Operaciones (2023). Informe interno de Largo Plazo, Atacocha – Pasco.
- Gunnesch, K. (1984). Investigaciones geoquímicas en rocas magmáticas en el distrito minero de Atacocha (Departamento Pasco). Boletín Sociedad Geológica del Perú, (73).
- Gunnesch, K., y Gunnesch, M. (1988). Evolución magmática en el distrito de Atacocha: morfología de crecimiento y composición química de las plagioclasas. Boletín Sociedad Geológica del Perú, (78).
- Harrison, J. (1943). Geología de los Andes Centrales en parte del departamento de Junín.
- Heald, P., Foley, N., y Hayba, D. (1987). Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid-sulfate and adularia-sericite types. *Economic Geology*, 82, 1-26.
- Hedenquist, J., Arribas, A., y Gonzalez-Urien, E. (2000). Exploration for epithermal gold deposits.
- Hirdes, W. (1976). Schichtgebundene Vererzungen und Gänge der Blei Zink-Grube Machcán im nördlichen Zentralperu und ihr geologischer Rahmen. Diplomarbeit, Mineralogisch-Petrographisches Institut, Ruprecht-Karl Universität, Heidelberg, 156 p.
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET (2023). Estudios minerográficos https://portal.ingemmet.gob.pe/web/lab/minerograficos_pt

- Jenks, W. (1951). Triassic to Tertiary stratigraphy near Cerro de Pasco, Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 62(2)
- Johnson, R., Lewis, R., y Abele, G. (1955). Geology and ore deposits of Atacocha district, department of Pasco, Peru. U.S. Geological Survey Bulletin, 975-E.
- Lavado, M. (2016). Informe Geológico N°5 CMM – GEO, Proyecto Atacocha.
- Lazo, J. (2019). Estudio petrográfico de rocas intrusivas, superunidad San Luis, localidades de Santa Rosa y El Molino, Sancos - Lucanas, Ayacucho.
- Lindgren, W. (1922). A suggestion for the terminology of certain mineral deposits. *Economic Geology*, 17, 202-294.
- Lindgren, W. (1933). Mineral Deposits: New York, New York, E.U.A., McGraw-Hill Book Co., 930 p.
- Mc Laughlin, D. (1924). Geology and physiography of the Peruvian Cordillera. Departments of Junin and Lima. *Geological Society of America Bulletin*, 35(3).
- Mégard, F. (1968). Geología del cuadrángulo de Huancayo. Servicio de Geología y Minería, Boletín 18.
- Noble, D., McKee, E., y Mégard, F. (1979). Early Tertiary "Incaic" tectonism, uplift, and volcanic Activities, Andes of central Peru. *GSA Bulletin*, 90 (10).
- Oldham, L., Dávila, D., Chamorro, R., Vargas, C., Esparza, E., y Marín, P. (2017). Reporte Final de Exploraciones Geológicas del Área – Falla13, Anglo Peruana Terra.
- Pedemonte, G. (2017). Caracterización de la mineralización aurífera en la U.M. Atacocha. *PERUMIN*, 33.
- Reyes, A. (1990). Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 43, 279-309.
- Reyes, A. (1991). Mineralogy, distribution and origin of acid alteration in Philippine geothermal systems. *Geological Survey of Japan. Reports*, 277, 59-65.
- Rodríguez, C. (2020). Modelo de Alteraciones del Tajo San Gerardo, Nexa Resources Atacocha.

- Rodríguez, M., y Condori, J. (2002). Geología del yacimiento Atacocha, nuevos horizontes mineralizados en el Distrito Minero de Atacocha. XI Congreso Peruano de Geología, Soc. Geol. Perú, Resúmenes, 106 p.
- Rodríguez, R., Cueva, E., y Carlotto, V. (2011). Geología del Cuadrángulo de Cerro de Pasco, Hoja 22-k, Boletín N°144 Serie A
- Roedder, E. (1984). Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy*. Mineral. Soc. America, Washington., v.12, 644p.
- Rubo, H. (1979). Petrographische Beobachtungen in der Pb-Zn-Skarn Lagerstätte Milpo, Zentralperu. Dipl. Thesis, Universität Heidelberg, 140 p.
- Silberman, M., Stewart, J., y McKee, E. (1976). Igneous activity, tectonics and hydrothermal precious-metal mineralization in the Great Basin during Cenozoic time: AIME Transactions, 260, 253-263.
- Sillitoe, R. (1977). Metallic mineralization affiliated to subaerial volcanism: a review, en Volcanic processes in ore genesis: Institution of Mining and Metallurgy-Geological Society of London, 99-116.
- Sillitoe, R. (1988). Environments, styles and origins of gold deposits in western Pacific island arcs, en Bicentennial Gold 88. *Geological Society of Australia, Abstracts*, 22, 127-138.
- Sillitoe, R., y Hedenquist, J. (2003). Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions, and Epithermal Precious Metal Deposits. *Society of Economic Geologists, Special Publication Series*, 10, 314-343.
- Sillitoe, R. (2010). Porphyry copper systems. *Economic geology*, 105(1), 3-41.
- Stappenbeck, R. (1929). Geologie des Chicamatales in Nordperu und seiner Anthrazitlagerstätten. *Geologische und Palaeontologische Abhandlungen*, 16(4).
- Tapia, M., Mendoza, C., y Arias, H. (2019). Estilos de mineralización en el Complejo Pasco. Compendio Proexplo, 83-88. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/Lib-122-75.pdf>

- Torres, L., y Bojórquez, G. (2017). Modelo matemático “áreas de influencia” aplicado en perforación y voladura en el cruceo 934 sur de la Compañía Minera Atacocha S.A.
- White, N., Leake, M., Mc Caughey, S., y Parris, B. (1995). Epithermal gold deposits of the southwest Pacific. *Journal of Geochemical Exploration*, 54, 87-136.
- Wilkinson, J. (2001). Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits, LITHOS. https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/24542/Wilk_01.pdf?sequence=1
- Wilson, J. (1963). Cretaceous stratigraphy of Central Andes of Peru. *AAPG Bulletin*, 47 (1).
- Yparraguirre, C. (2015). Inclusiones Fluidas Aplicada a Exploración de Yacimientos Minerales.
- Yparraguirre, C. (2021). Estudios petrominerográficos con microscopio de polarización, análisis mineralógicos por difracción de rayos x (DRX) con tubo de cobalto e inclusiones fluidas de veinte muestras- IL-OTSG-028-2021_Rev.0, Nexa Resources Atacocha - Minemetallurgy S.A.C.

Anexos

Anexo 1: Siglas de ayuda	2
Anexo 2: Estudios petromineragrficos.....	3
Anexo 3: Inclusiones fluidas.....	31

Anexo 1:

Siglas de ayuda

SIGLA	DESCRIPCIÓN
LR	Luz Reflejada
LT	Luz Transmitida
MIN	Mineral donde está contenida la IF, para este caso es CZ (cuarzo).
TIPO	Tipo de inclusión Fluida: BIF (IF Bifásica), POL (IF polifásicas) o TRI(IF trifásica).
Øμ	Diámetro de la IF en micrómetros.
FILL	Grado de relleno IF.
-Tf	Temperatura de fusión (°C).
Th	Temperatura de homogeneización (°C).
Th (L/V)	Temperatura de homogeneización del líquido-vapor (°C).
TsKCl	Temperatura de disolución de la silvita (°C).
TsNaCl	Temperatura de disolución de la halita (°C).
NaCl (wt%)	Grado de salinidad (%).
ρ(g/cm³)	Densidad del fluido mineralizante
P (bar)	Presión
LD	Límite de Detección

Nota: Fuente propia.

Anexo 2

Estudios petrominerográficos

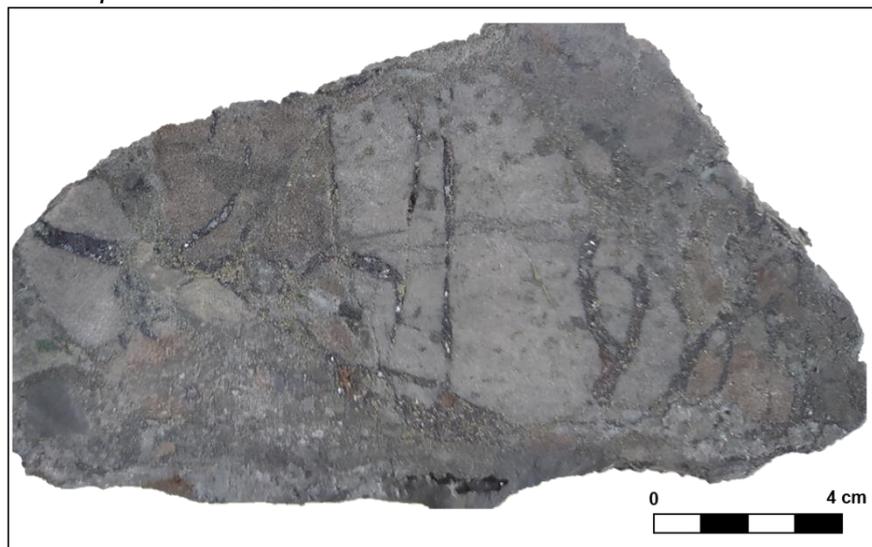
Muestra AT-MI-003

Estudios petrominerográficos

Descripción macroscópica: La Figura 1 está mostrando una brecha sedimentaria, con matriz soportada que posee fragmentos de roca I, roca II, cristales de cuarzo, muscovita, en una matriz de sericita y arcillas. El fragmento de roca I es una arenisca de grano fino compuesta por cuarzo en una matriz de sericita, parte de la matriz presentan una estructura de relleno tapizada por cuarzo III, galena, esfalerita y sulfosales de plomo. La galena rellena espacios y la pirita se encuentra diseminada.

Figura 1

Muestra macroscópica AT-MI-003



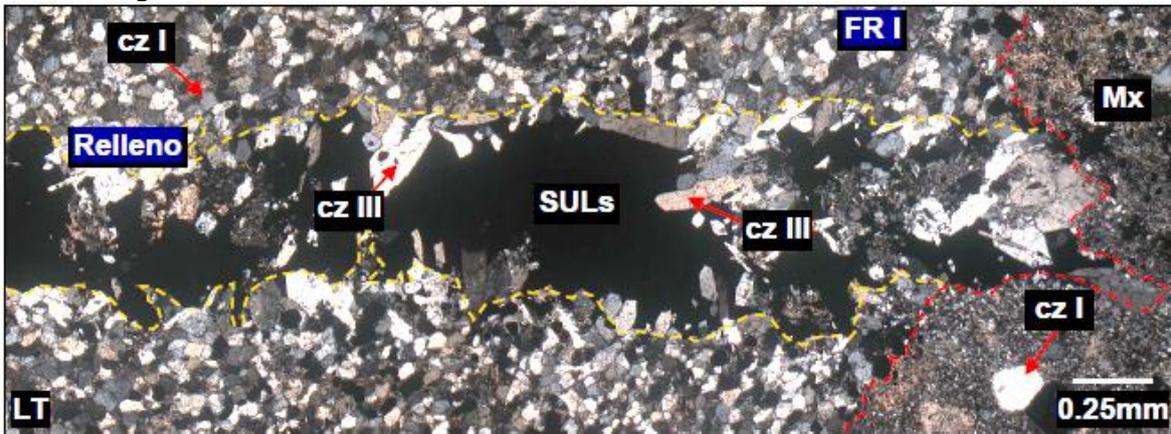
Nota: Fuente propia.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 2, las fotomicrografías 12) Estructura de relleno, compuesta por cuarzo (cz III) y sulfuros (SULs) en su interior, atraviesa al fragmento de roca I (FR I) y a la matriz (Mx); 13) Roca A, compuesta por granos de cuarzo, matriz de sericita y pirita diseminada; 14) Fractura tapizada por cristales de cuarzo (cz III) y relleno de galena, sulfosales de plomo (SFsPb) y pirita; 15) y 16) Fractura tapizada por cristales de cuarzo y relleno de esfalerita, galena y pirita.

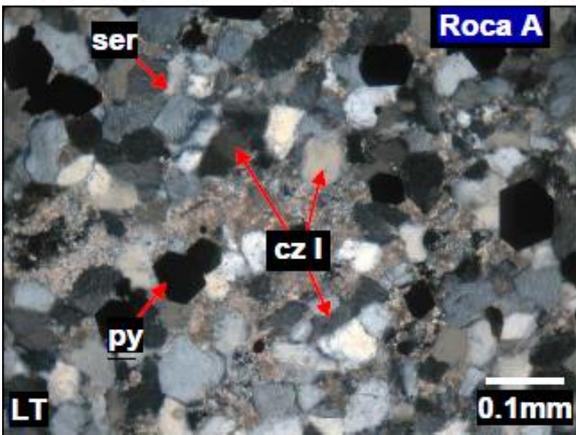
Tipo de Textura: Textura Clástica, de relleno.

Figura 2

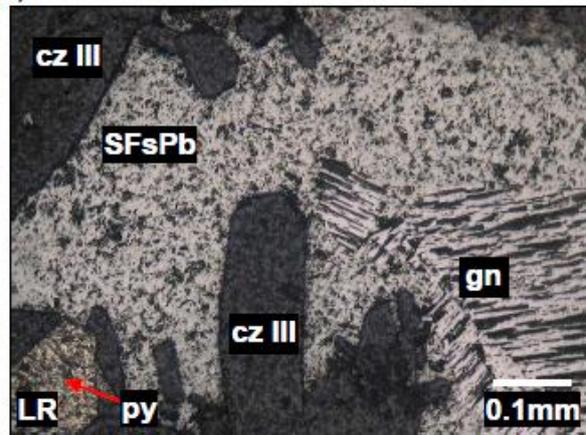
Fotomicrografías LT-LR AT-MI-003



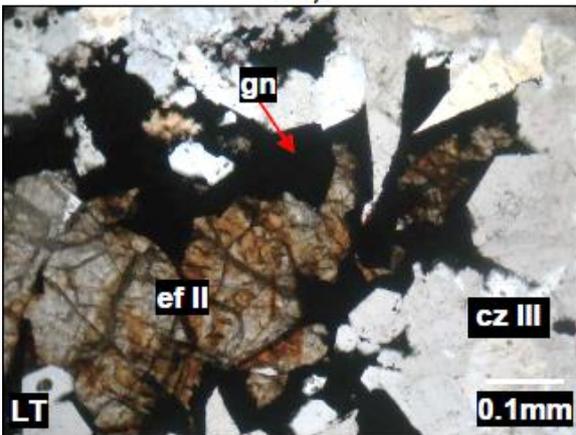
12)



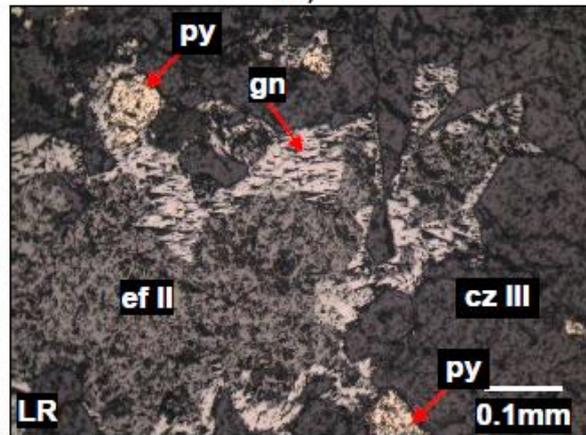
13)



14)



15)



16)

Nota: Fotomicrografías en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR)

Análisis DRX. En la tabla 1 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X.

Tabla 1

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-003

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Esfalerita	(Zn, Fe) S	28.0
Cuarzo	SiO ₂	23.1
Feldespato K (Ortoclasa)	KAlSi ₃ O ₈	22.1
Feldespato potásico	(Na, K) AlSi ₃ O ₈	6.9
Galena	PbS	6.7
Pirita	FeS ₂	6.0

Nota: Limite de detección (L.D.)

Muestra AT-MI-005

Estudios petrominerográficos

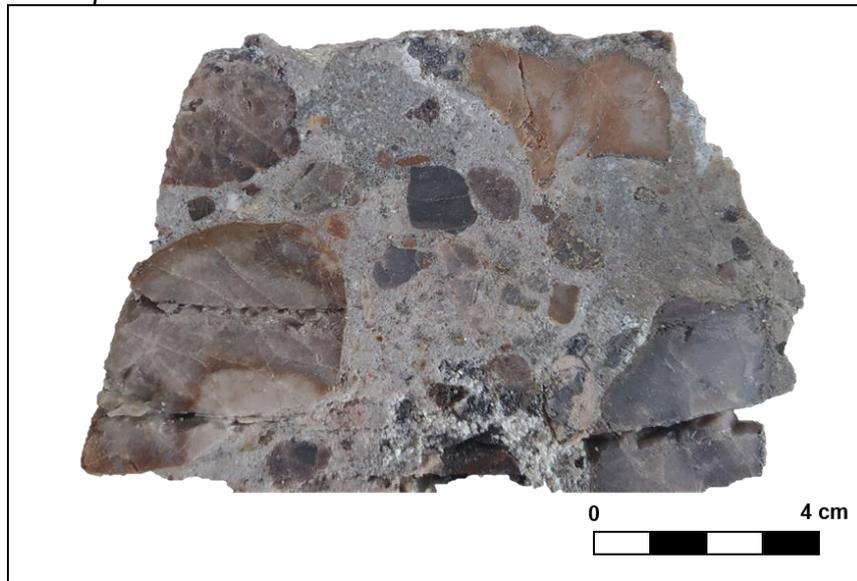
Descripción macroscópica: La Figura 3 está mostrando una brecha polimíctica clastosoportada fuertemente silicificada y mineralizada, constituida por cuatro tipos de fragmentos silicificados con formas subredondeadas a redondeadas, además de fragmentos de cristales de cuarzo deformados con bordes corroídos por la matriz. Los fragmentos I y II, son de origen volcánico.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 4, las fotomicrografías **25** y **26**) Fragmento de roca I (FR I) y fragmento de cristal de cuarzo (cz) contenidos en la matriz, la matriz está compuesta de cristales de cuarzo III (cz III) con bordes corroídos por cuarzo criptocristalino (cz IV) intercrecidos con sericita (cz IV + ser); **27**) Fragmento de roca II (FR II) compuesto por cuarzo y con venillas rellenas por otro evento síliceo; **28**) Fragmento de roca I (FR I) con mineralización de pirita I (py I), esfalerita I (ef I) y galena (gn).

Tipo de textura: Brechoide

Figura 3

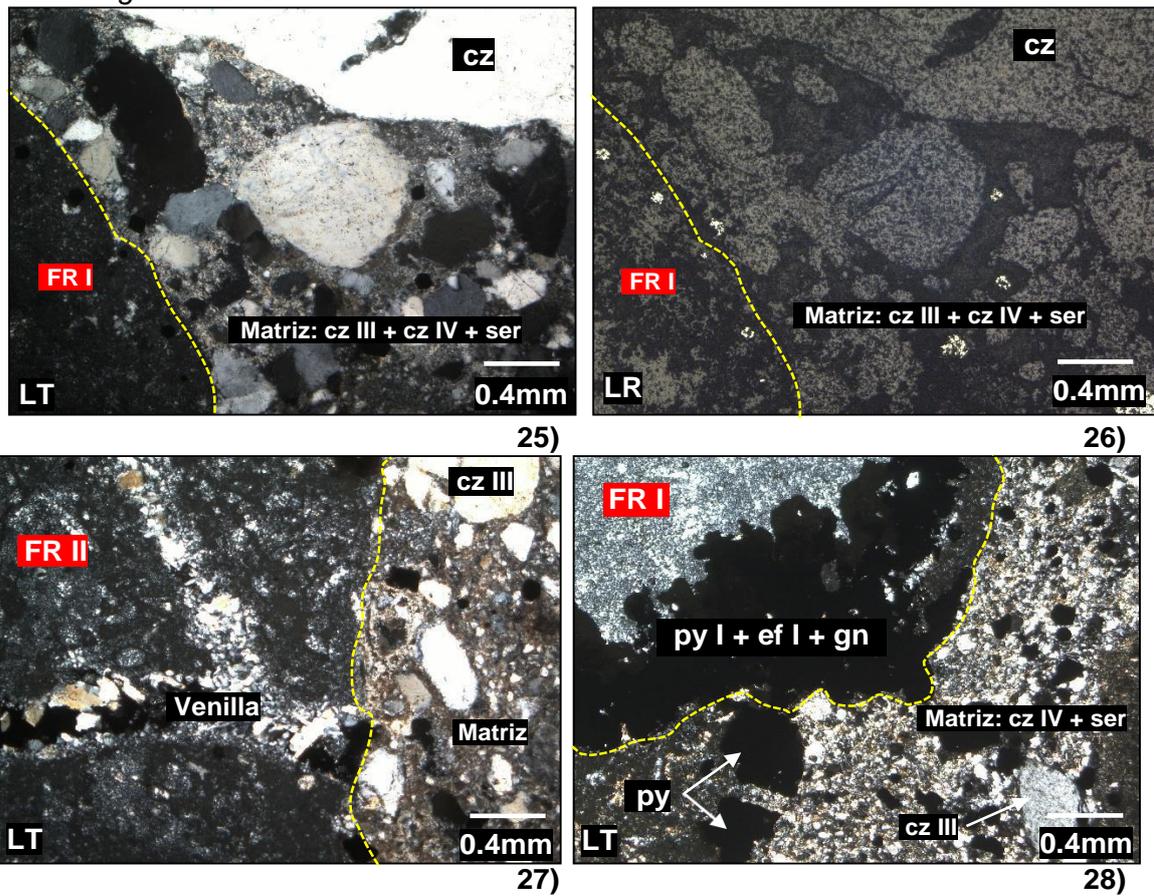
Muestra macroscópica AT-MI-005



Nota: Fuente propia.

Figura 4

Fotomicrografías LT-LR AT-MI-005



Nota: Fotomicrografías en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR).

Análisis DRX. En la tabla 2 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X de la muestra AT-MI-005.

Tabla 2
Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-005

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	94.6
Pirita	FeS ₂	2.0
Moscovita (Sericita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	1.8
Galena	PbS	1.2
Esfalerita	(Zn, Fe) S	< L.D.
Anatasa	TiO ₂	< L.D.

Nota: Limite de detección (L.D.).

Muestra AT-MI-008

Estudios petrominerográficos

Descripción macroscópica: Cuarzoarenita de grano fino, mal clasificada, conformada principalmente por granos de cuarzo (cz I), como matriz se encuentra la sericita y como minerales accesorios se encuentran la turmalina, el zircón y el rutilo la que es cortada por varias estructuras de relleno.

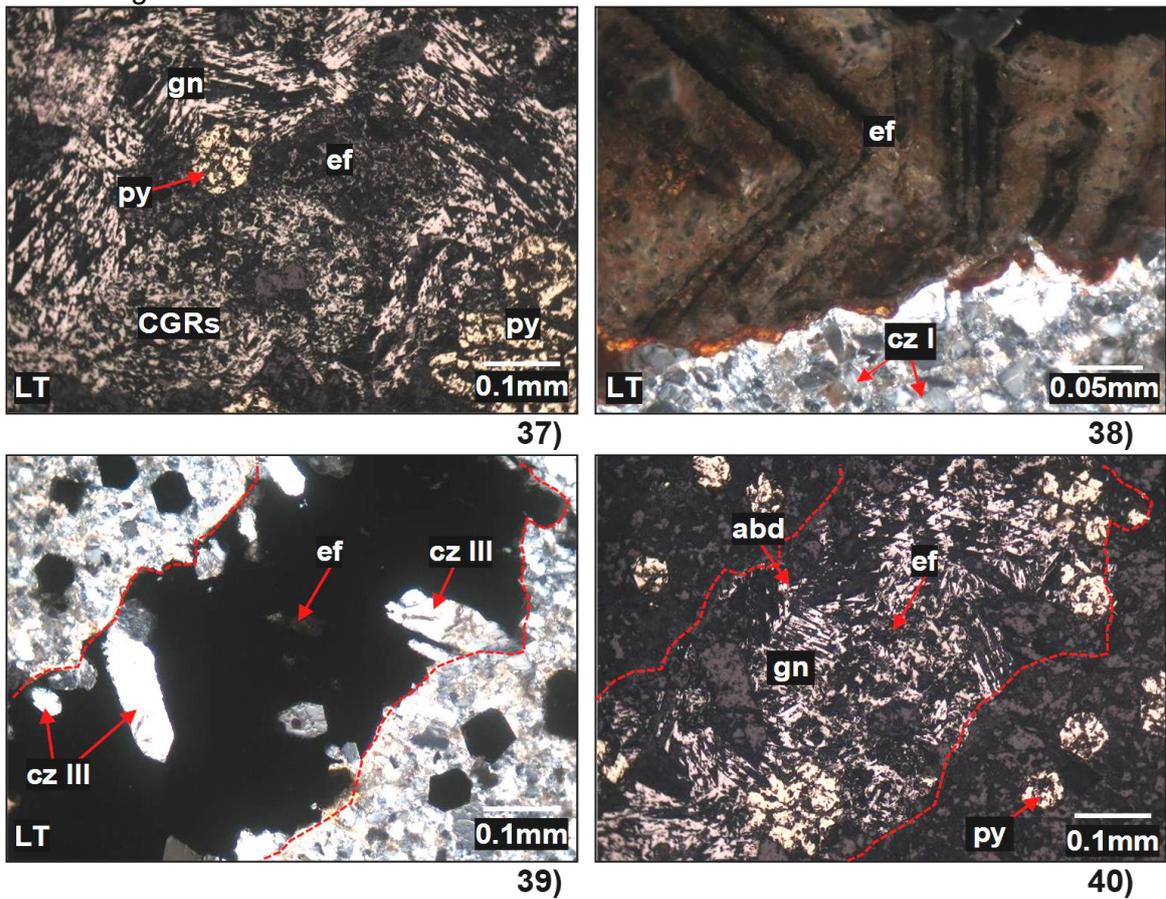
Estructura de relleno tapizada por cristales de cuarzo III, en su interior se encuentra galena levemente reemplazada por cobres grises, en ocasiones la esfalerita se encuentra en el interior, también se observan diseminaciones de pirita (mayormente piritoedros).

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 5, las fotomicrografías **37)** Cobres grises (CGRs) reemplazando a la galena (gn), en su interior se encuentra la esfalerita (ef) asociado a la pirita (py); **38)** Cristal de esfalerita (ef), presenta zonación, rellena fracturas y; **39)** y **40)** Oquedad tapizada por cuarzo (cz III), rellena por galena (gn), esfalerita (ef) y pirita (py).

Tipo de textura: Clástica, de relleno.

Figura 5

Fotomicrográficas LT-LR AT-MI-008



Nota: Fotomicrográficas en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR).

Análisis DRX. En la tabla 3 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X de la muestra AT-MI-008.

Tabla 3

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-008

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	41.9
Hidromica (Illita)	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ .(H ₂ O)]	35.6
Pirita	FeS ₂	14.9
Galena	PbS	6.9
Anatasa	TiO ₂	< L.D.
Esfalerita	(Zn, Fe)S	< L.D.

Nota: Limite de detección (L.D.).

Muestra AT-MI-009

Estudios petrominerográficos

Descripción macroscópica: La Figura 6 está mostrando una estructura de relleno formada por agregados de carbonatos + cuarzo III + adularia, la mineralización de sulfuros se forma mayormente entre oquedades, siendo principalmente galena reemplazada por cobres grises, y la galena tiene covelita como textura de corona, la cual por sectores es reemplazada por calcocita, rara vez se observa galena con inclusiones de telurio nativo, en menor cantidad disseminaciones de esfalerita y calcopirita. La roca caja ha sido totalmente obliterada.

Figura 6

Muestra macroscópica AT-MI-009



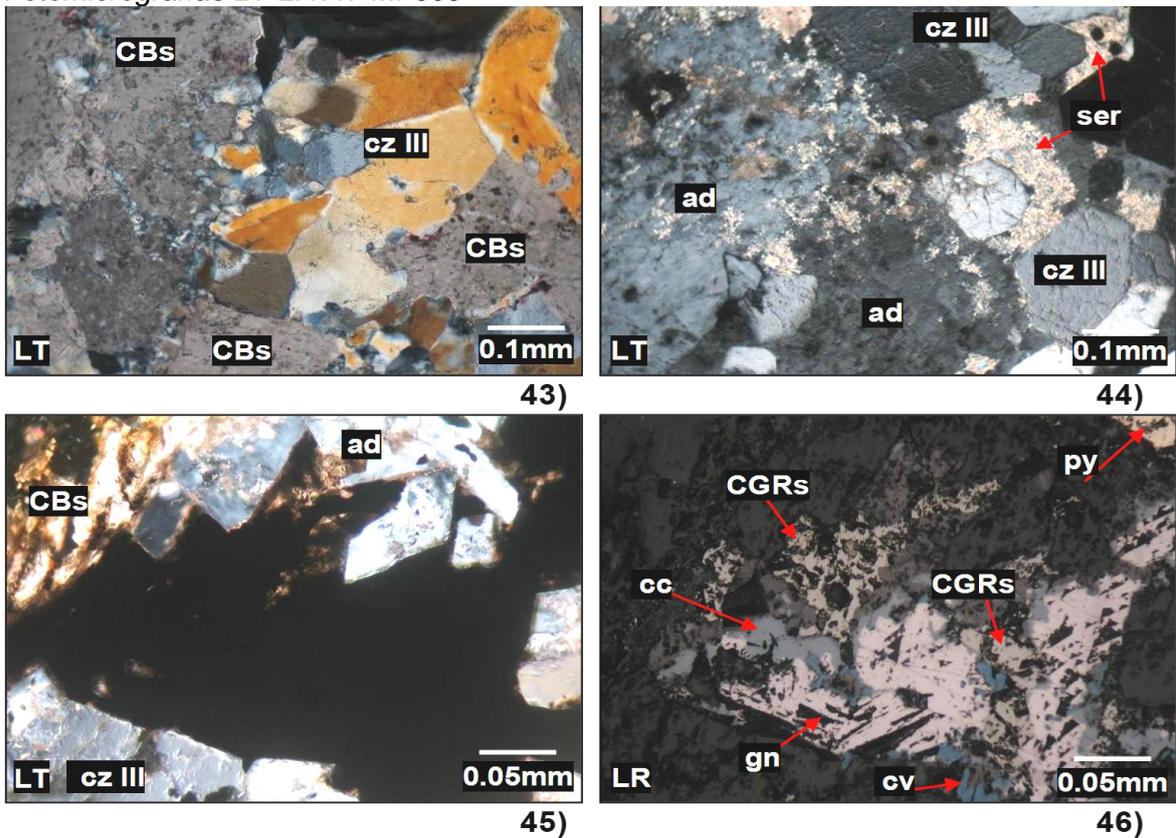
Nota: Fuente propia.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 7, las fotomicrografías **43)** Relleno de cuarzos prismáticos (cz III) y carbonatos (CBs); **44)** Relleno de cuarzo (cz III), adularia (ad) y sericita (ser) entre sus intersticios; **45)** y **46)** Oquedad tapizada por carbonatos (CBs), adularia (ad) y cuarzo (cz III), en su interior se encuentra galena con coronas parciales de calcocita y reemplazada por cobres grises (CGRs), la calcocita también se encuentra alterada a covelita.

Tipo de textura: Textura de relleno.

Figura 7

Fotomicrográficas LT-LR AT-MI-009



Nota: Fotomicrográficas en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR).

Análisis DRX. En la tabla 4 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X de la muestra AT-MI-009.

Tabla 4
Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-009

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Carbonato (Calcita)	CaCO ₃	40.4
Cuarzo	SiO ₂	39.9
Pirita	FeS ₂	6.9
Carbonato (Ankerita)	Ca(Fe ⁺² ,Mg,Mn)(CO ₃) ₂	4.6
Feldespato K (Microclina)	KAlSi ₃ O ₈	2.6
Moscovita (Sericita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	2.3
Carbonato (Cerusita)	PbCO ₃	1.1
Huntita	CaMg ₃ (CO ₃) ₄	< L.D.
Galena	PbS	< L.D.
Esfalerita	(Zn, Fe)S	< L.D.

Nota: Limite de detección (L.D.)

Muestra AT-MI-011

Estudios petrominerográficos

Descripción macroscópica: La Figura 8 está mostrando por conglomerado arenáceo, compuesta por Fragmentos de Roca I (tamaño grava y arena) y fragmento de roca II (tamaño Grava) y cuarzo I (tamaño arena), la matriz del conglomerado está conformada por sericita, arcillas y rutilo. En la matriz se encuentran oquedades las cuales han sido rellenadas por cantidades variables de cuarzo (cz III), galena (gn), sulfosales de plomo (SFsPb) y hematita (hm), la última se encuentra en los bordes de la galena.

Figura 8

Muestra macroscópica AT-MI-011



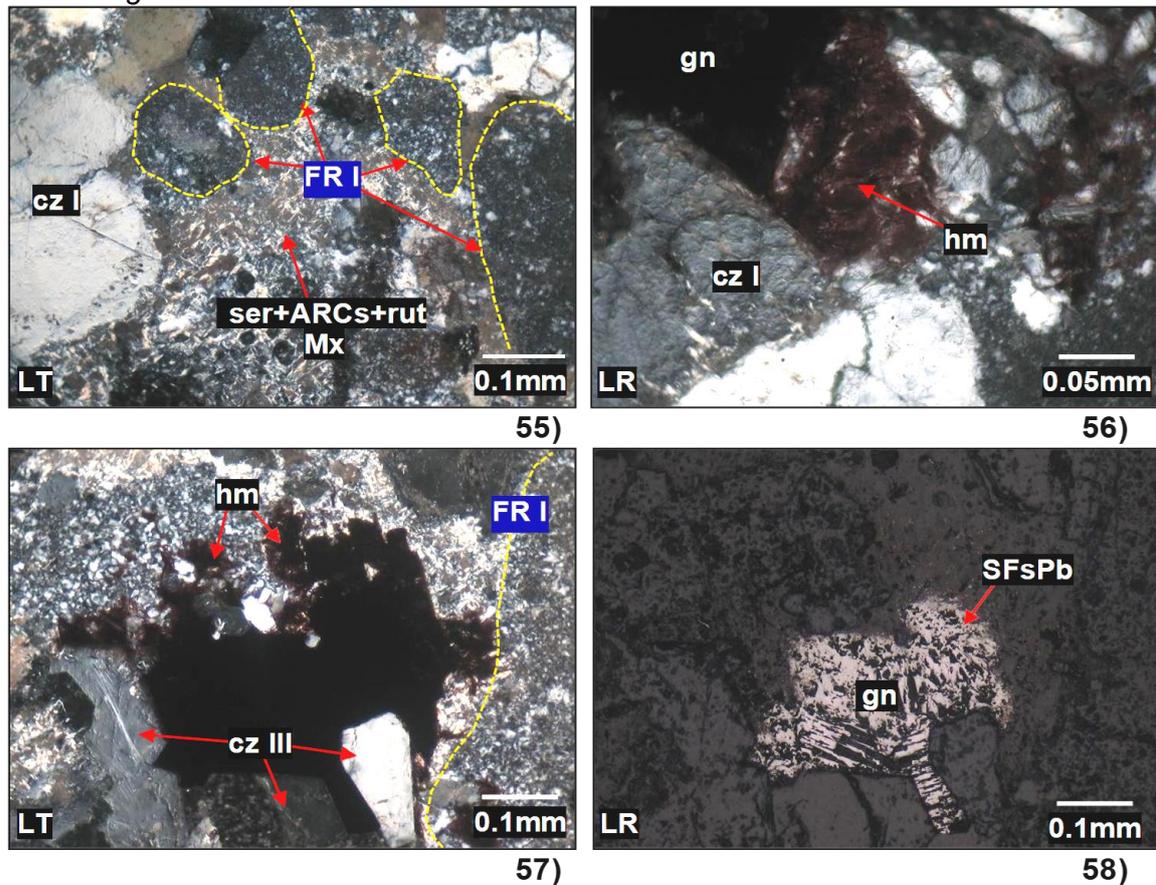
Nota: Fuente propia.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 9, las fotomicrografías **55)** Granos de arena conformados por cuarzo (cz I) y fragmentos de roca I (FR I), inmersos en una matriz de sericita y arcillas (ser+ARCs); **56)** Agregados capilares de hematita (hm) relleno una oquedad en la matriz de la roca; **57)** y **58)** Cristales de cuarzo (cz III) relleno una oquedad en la matriz de la roca junto a la galena (gn) rodeada por sulfosales de plomo (SFsPb) y en sus bordes agregados capilares de hematita (hm).

Tipo de Textura: Clástica, de relleno.

Figura 9

Fotomicrográficas LT-LR AT-MI-011



Nota: Fotomicrográficas en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR).

Análisis DRX. En la tabla 5 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X de la muestra AT-MI-0011.

Tabla 5

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-011

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	95.5
Pirita	FeS ₂	1.7
Moscovita (Sericita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	1.6
Galena	PbS	< L.D.
Cobres Grises (Tetraedrita)	(Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	< L.D.
Anatasa	TiO ₂	< L.D.

Nota: Limite de detección (L.D.)

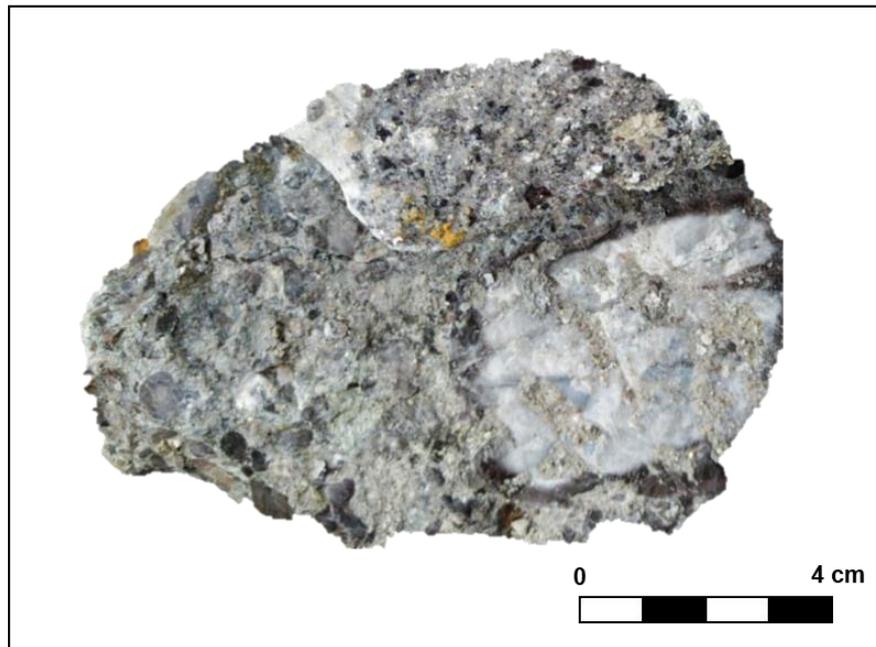
Muestra AT-MI-012

Estudios petrominerográficos

Descripción macroscópica: La Figura 10 está mostrando un toba litocristalina moderadamente alterada constituida por fragmentos líticos silicificados con bordes subredondeados, acompañados de cristales de feldespatos, relictos de muscovita y cristales de cuarzo primario. Están contenidos en una matriz reemplazada de cuarzo de alteración, intercrecida con sericita. Presenta diseminaciones de pirita y relictos de rutilo en la matriz.

Figura 10

Muestra macroscópica AT-MI-012



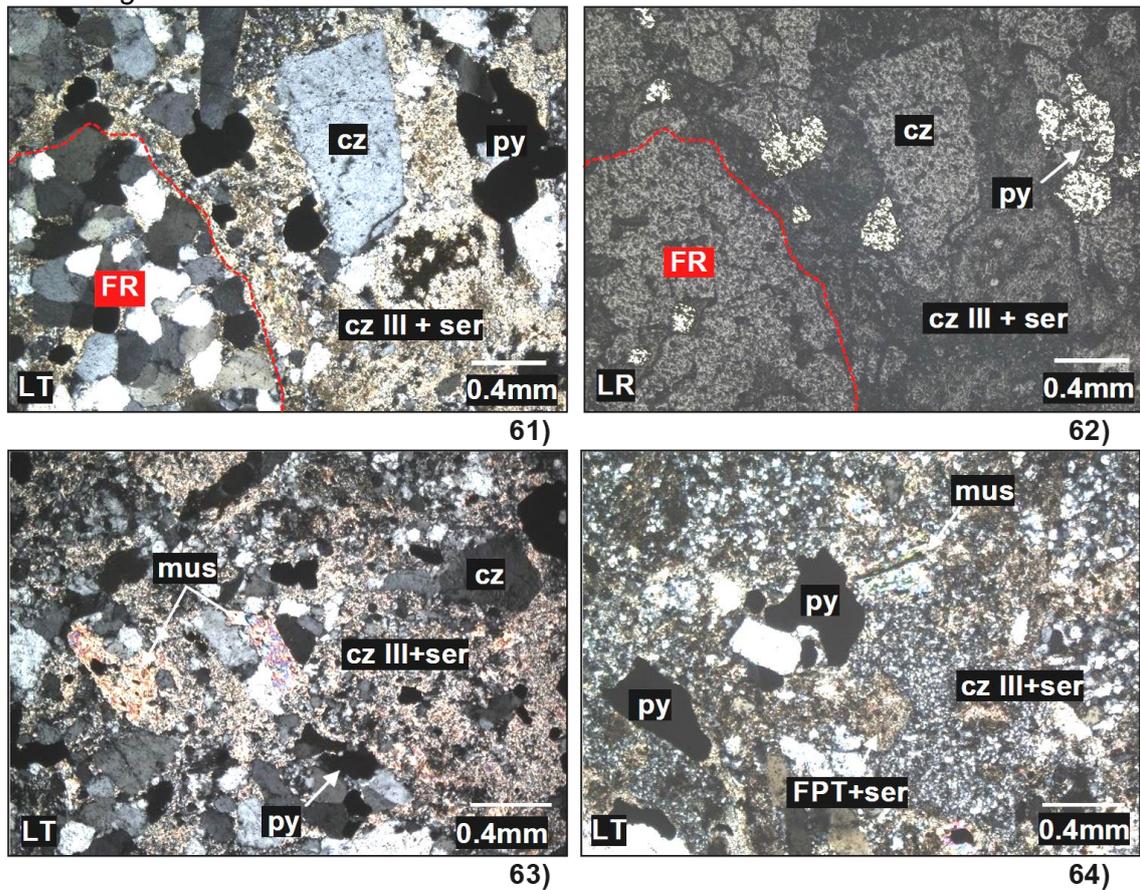
Nota: Fuente propia.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 11, las fotomicrografías **61)** y **62)** Fragmento de roca silicificada (FR) y fragmento de cuarzo (cz) con bordes corroídos por cuarzo III con sericita (cz III+ser); **63)** y **64)** Cristal primario de cuarzo (cz I) y relictos de muscovita (mus) con bordes corroídos por la matriz de cuarzo III intercrecida con sericita (cz III+ser) (Ver Figura 51).

Tipo de textura: Textura Piroclástica.

Figura 11

Fotomicrográficas LT-LR AT-MI-012



Nota: Fotomicrográficas en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR).

Análisis DRX. En la tabla 6 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X de la muestra AT-MI-0012.

Tabla 6

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-012

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	73.9
Palygorskita	(Mg,Al) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) •4(H ₂ O)	6.5
Clinopiroxeno (Augita)	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al,Ti)(Si,Al) ₂ O ₆	4.7
Moscovita (Sericita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	4.5
Pirita	FeS ₂	2.9
Plagioclasas (Oligoclasa)	(Na,Ca)(Si,Al) ₄ O ₈	2.6

Nota: Limite de detección (L.D.).

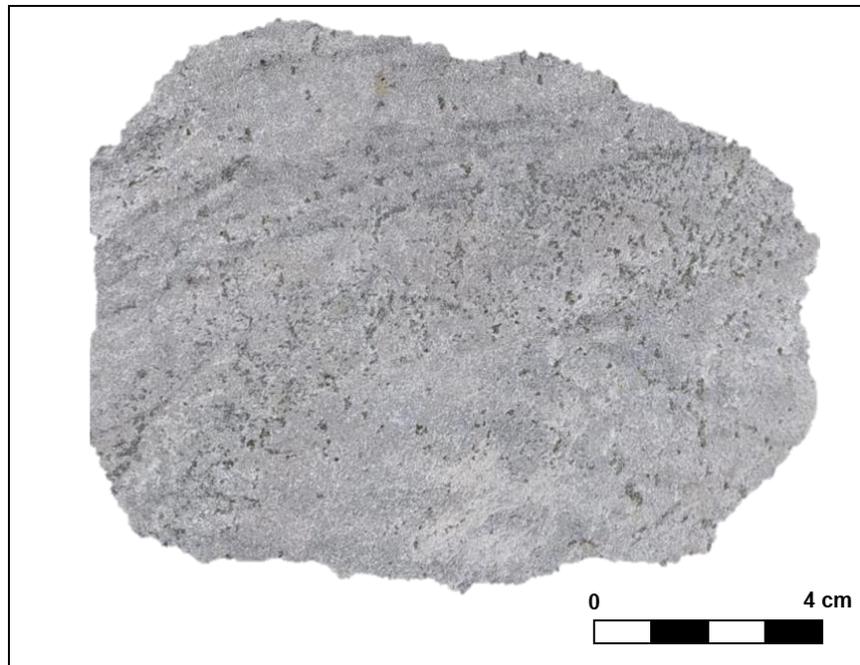
Muestra AT-MI-013

Estudios petrominerográficos

Descripción macroscópica: La Figura 12 está mostrando una cuarzoarenita, de grano fino a medio, compuesta principalmente por granos de cuarzo, la matriz está conformada por agregados de sericita y arcillas, como minerales accesorios se encuentran el zircón y rutilo. La pirita se encuentra en diseminaciones y rellenando fracturas irregulares como agregados.

Figura 12

Muestra macroscópica AT-MI-013



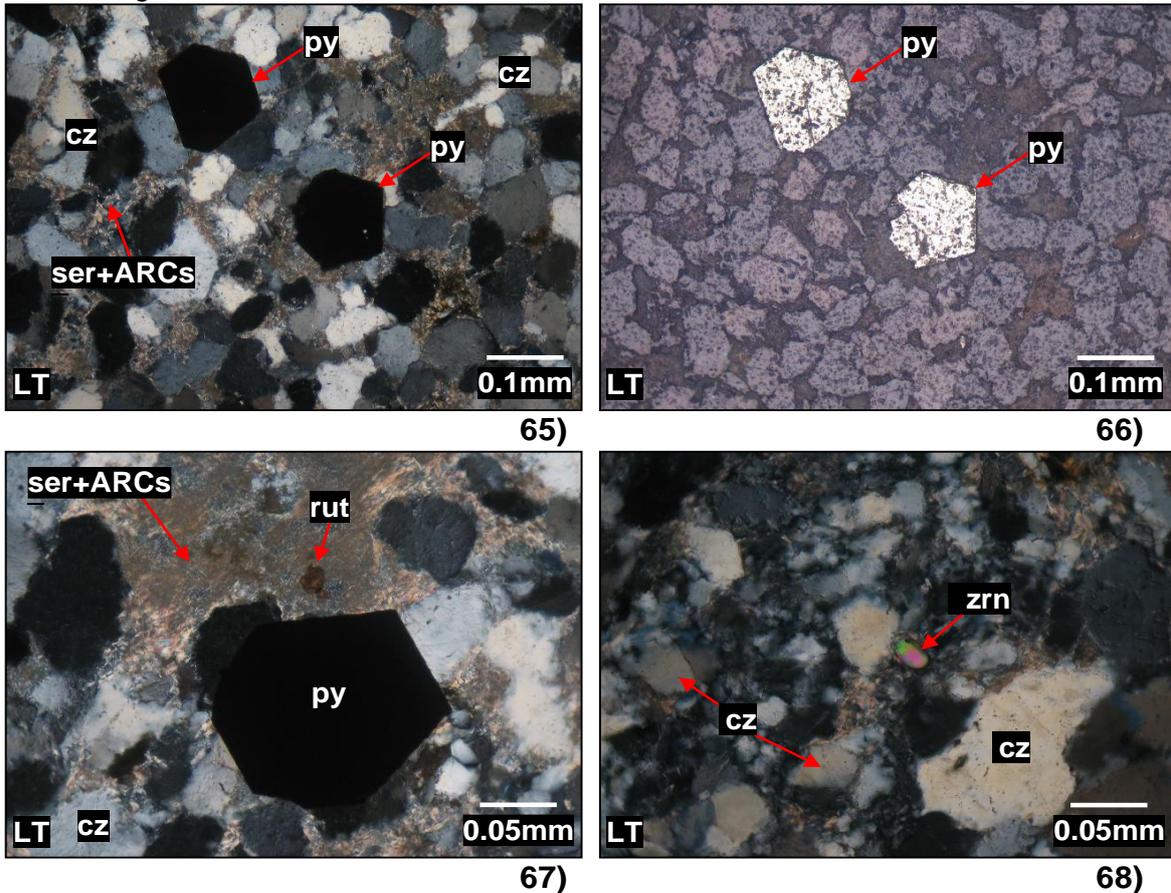
Nota: Fuente propia.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 13, las fotomicrografías **65)** y **66)** Cristales de cuarzo (cz), entre sus intersticios se observan (ser+ARCs), y se observa diseminaciones de pirita (py); **67)** Agregados de sericita y arcillas (ser+ARCs) como matriz de la roca, también se observa un cristal de rutilo (rut); **68)** Zircón en los intersticios de cuarzo (cz).

Tipo de textura: Clástica, de relleno.

Figura 13

Fotomicrográficas LT-LR AT-MI-013



Nota: Fotomicrográficas en Luz Transmitida (LT).

Análisis DRX. En la tabla 7 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X de la muestra AT-MI-0013.

Tabla 7

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-013

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	91.6
Clinopiroxeno (Augita)	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al,Ti)(Si,Al) ₂ O ₆	4.6
Moscovita (Sericita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	1.9
Pirita	FeS ₂	1.9

Nota: Limite de detección (L.D.).

Muestra AT-MI-014

Estudios petrominerográficos

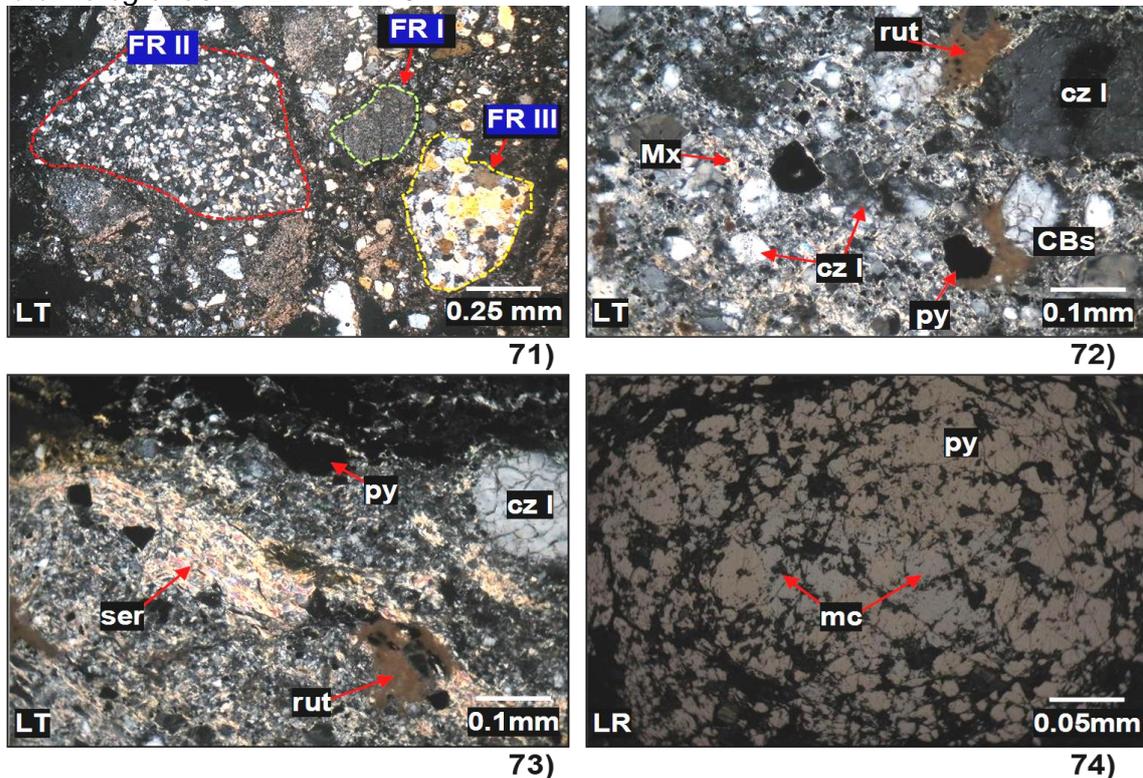
Descripción macroscópica: Arenisca conglomerádica, compuesta por fragmentos de roca I (tamaño grava y arena) y fragmento de roca II (tamaño grava y arena) y cuarzo I (tamaño arena) con una matriz de sericita, rutilo.

La pirita se encuentra diseminada en la matriz de la roca y también en algunos fragmentos de roca, y mediante fracturas, la pirita también es levemente reemplazada por marcasita.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 14, las fotomicrografías **71)** Fragmentos de Roca I, II y III (FR I-II-III), conformado con diámetros que varían desde arena hasta grava; **72)** Granos de arena de cuarzo (cz I), diseminaciones de pirita (py) en una matriz (Mx) de sericita; **73)** Agregados fibrosos de sericita (ser) y rutilo (rut) conformando la matriz (Mx) de la roca; **74)** Pirita masiva (py) levemente reemplazada por marcasita (mc).

Figura 14

Fotomicrografías LT-LR AT-MI-014



Nota: Fotomicrografías en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR).

Análisis DRX. En la tabla 8 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X de la muestra AT-MI-0014.

Tabla 8

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-014

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	85.2
Pirita	FeS ₂	11.2
Sericita (Moscovita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	3.6

Nota: Limite de detección (L.D.).

Muestra AT-MI-015

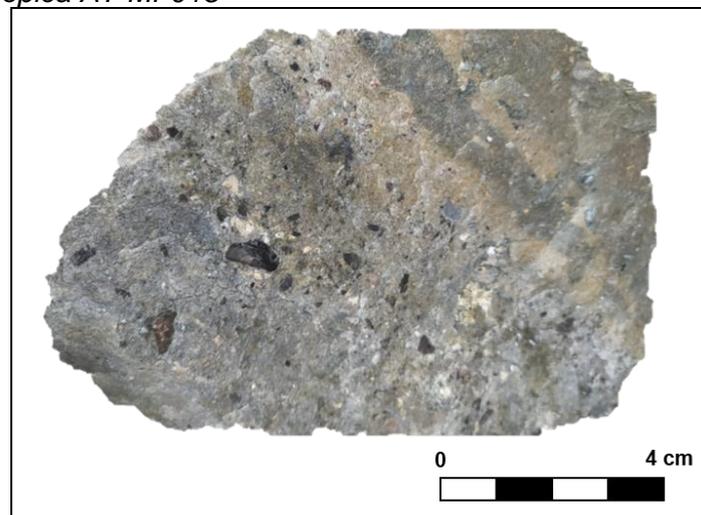
Estudios petrominerográfico

Descripción macroscópica: La Figura 15 está mostrando una brecha sedimentaria, matriz soportada, compuesta por Fragmentos de Roca I (diámetros de grava y arena) y Fragmento de Roca II (diámetro de grava), en la roca la matriz fue reemplazada por hematita y rellenada por pirita y carbonatos I, del mismo modo los carbonatos I también rellenan los fragmentos de roca I.

Los Fragmentos de Roca I y II han perdido sus texturas originales, y su clasificación tentativa para ambas es de origen sedimentario.

Figura 15

Muestra macroscópica AT-MI-015

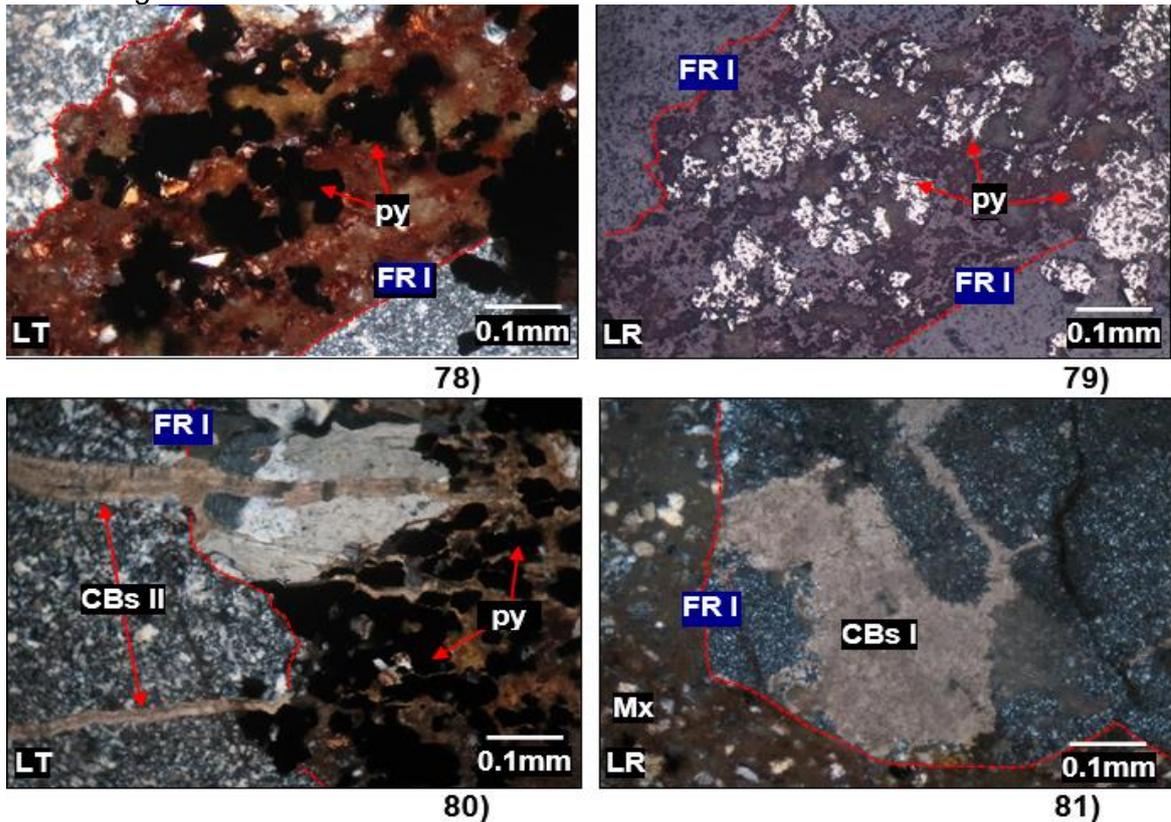


Nota: Fuente propia.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 16 las fotomicrografías **78)** y **79)** Agregados de piritita (py), con patinas de oxidación, relleno de la matriz de la roca; **80)** Venillas de carbonatos (CBs II) cortan a los fragmentos de Roca I y a la matriz y **81)** Fragmento de Roca I (FR I) reemplazado por carbonatos (CBs I) mediante fracturas.

Figura 16

Fotomicrografías LT-LR AT-MI-015



Nota: Fotomicrografías en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR).

Análisis DRX. En la tabla 9 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X de la muestra AT-MI-0015.

Tabla 9

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-015

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	31.8
Hematita	Fe ₂ O ₃	20.4
Huntita	CaMg ₃ (CO ₃) ₄	14.7
Carbonato (Siderita)	Fe ²⁺ (CO ₃)	12.7

Nota: Limite de detección (L.D.).

Muestra AT-MI-016

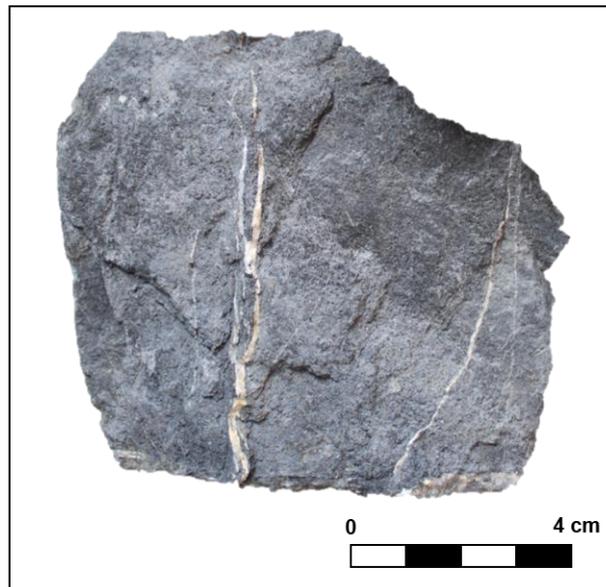
Estudios petrominerográficos

Descripción macroscópica: La Figura 17 está mostrando una estructura de relleno, la estructura consiste principalmente de cuarzo III y Carbonatos I, posteriormente rellenando las oquedades se encuentra el cuarzo IV y la adularia junto a venillas de carbonatos II asociados a la mineralización de sulfuros de galena, esfalerita, la pirita esta diseminada en toda la roca.

La roca caja está compuesta únicamente de agregados de cuarzo, y menores cantidades de sericita y rutilo, posiblemente se trate de una roca ígnea. y también se observa un fragmento de roca (lutita limosa).

Figura 17

Muestra macroscópica AT-MI-016

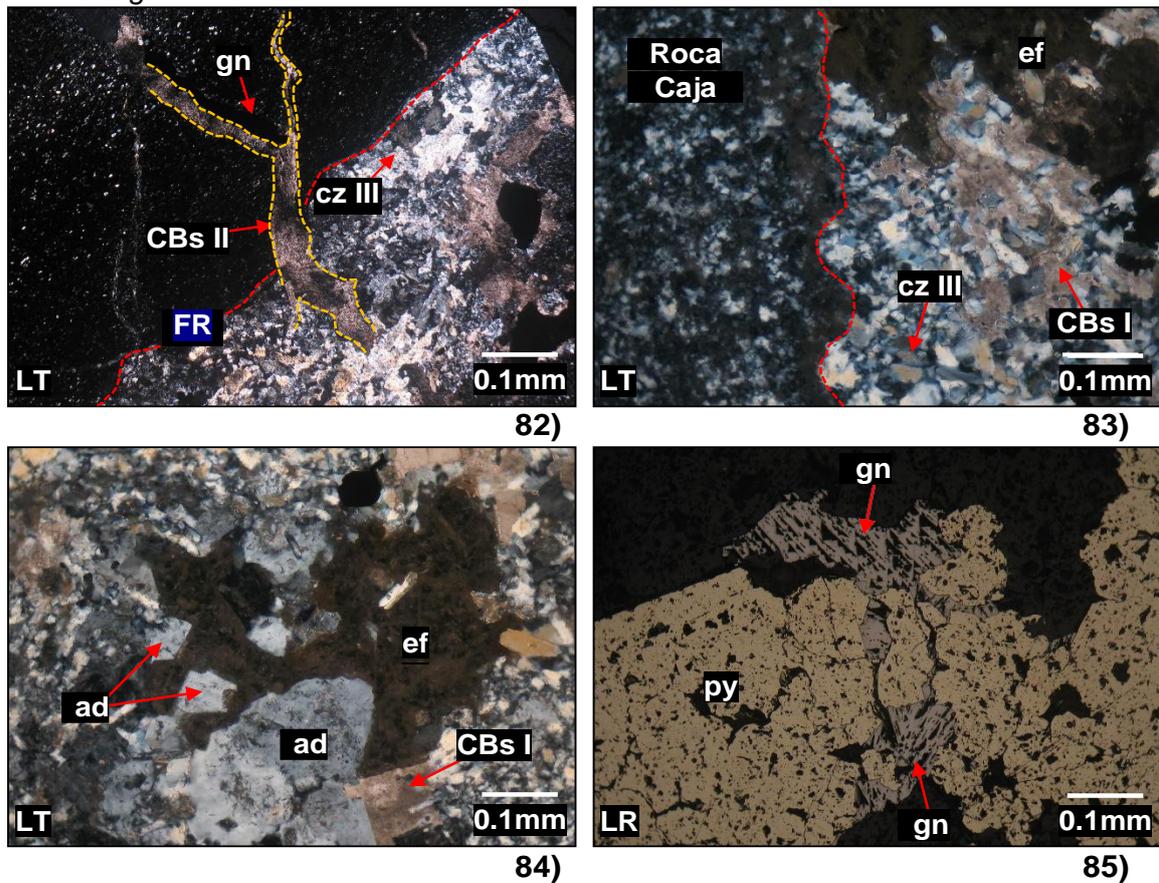


Nota: Fuente propia.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 18 las fotomicrografías **82)** Venilla de carbonatos (CBs II) cortando al cuarzo (cz III) de la estructura de relleno y fragmento de roca (FR); **83)** Estructura de relleno conformada por cuarzo (cz III), carbonatos (CBs I) y esfalerita (ef) dispersa y también se observa un relicto de la roca caja; **84)** Oquedad rellena por adularia (ad), carbonatos (CBs) y esfalerita (ef); **85)** Galena reemplazando a la pirita mediante fracturas. Tipo de Textura: de relleno.

Figura 18

Fotomicrográficas LT-LR AT-MI-016



Nota: Fotomicrográficas en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR)

Análisis DRX. En la tabla 10 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X de la muestra AT-MI-0016.

Tabla 10

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-016

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	40.4
Feldespato K (Ortoclasa)	KAISi ₃ O ₈	24.2
Carbonato (Dolomita)	CaMg(CO ₃) ₂	18.4
Carbonato (Ankerita)	Ca(Fe ⁺² ,Mg,Mn)(CO ₃) ₂	8.0
Galena	PbS	3.3
Esfalerita	(Zn, Fe) S	3.0
Pirita	FeS ₂	1.8

Nota: Limite de detección (L.D.).

Muestra AT-MI-017

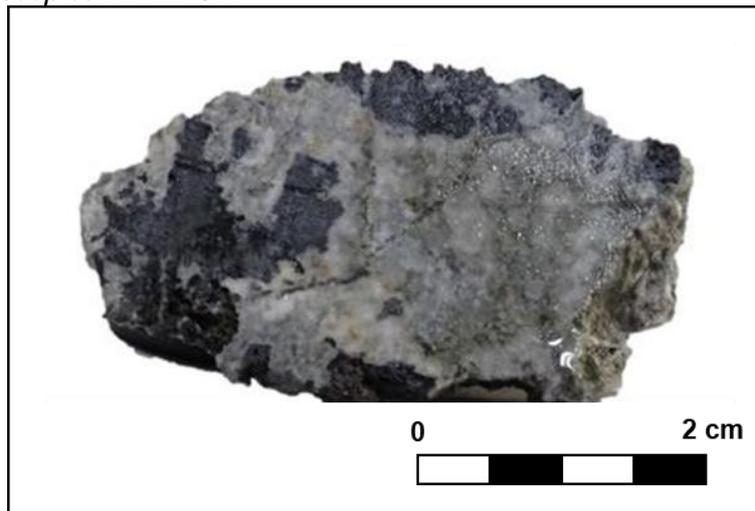
Estudios petrominerográficos

Descripción macroscópica: La Figura 19 está mostrando una estructura de relleno formada por agregados de carbonatos I (CBs I) asociado a la alabandita. La alabandita está reemplazada por bandas de pirolusita e hidróxidos de manganeso, también se observan carbonatos bipiramidales (CBs II).

Por sectores los carbonatos tienen fracturas y oquedades ocupadas por cuarzo III (sílice amorfa), y sericita, también por bandas coloformes de rodocrosita (CBs III). La esfalerita y la galena se encuentran sobre los carbonatos I y la pirita esta diseminada en toda la estructura.

Figura 19

Muestra macroscópica AT-MI-017



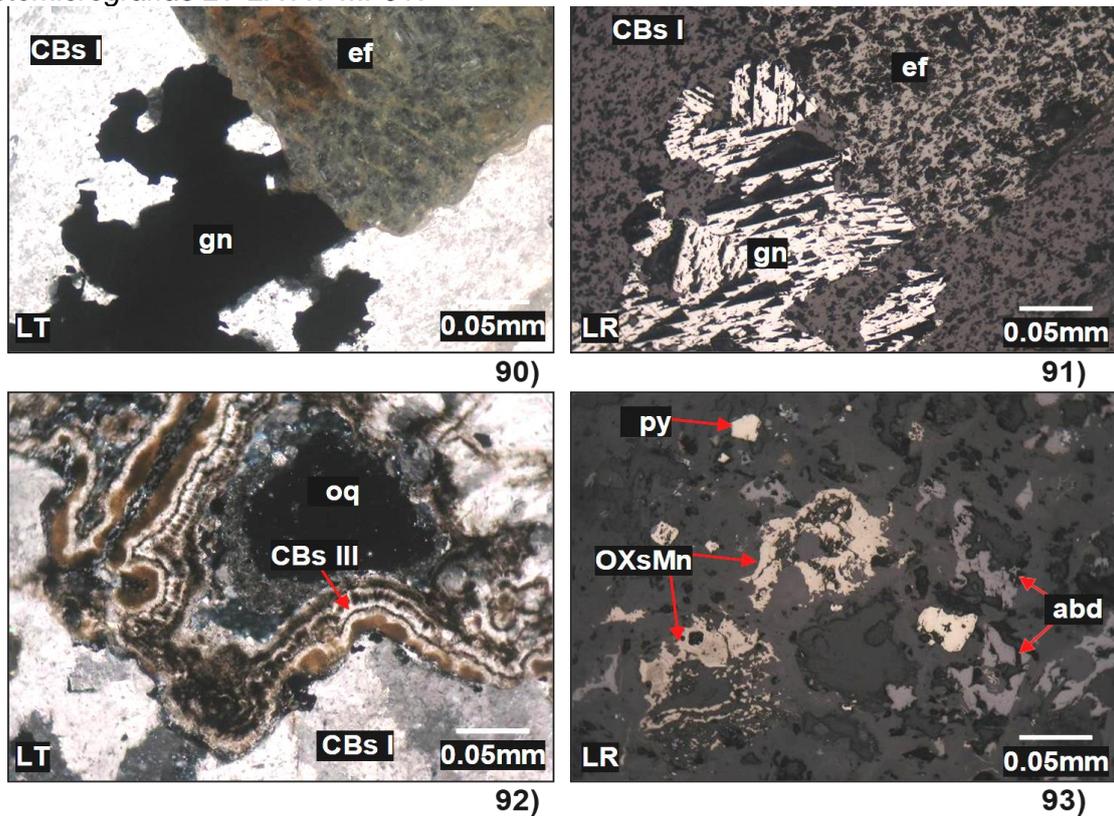
Nota: Fuente propia.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 20 las fotomicrografías **90)** y **91)** Galena (gn) asociada a la esfalerita (ef) y **92)** Bandas coloformes de carbonatos III (CBs III) relleno oquedades (oq) parcialmente en los carbonatos I (CBs I) y **93)** Alabandita (abd) asociada a la pirita (py) e hidróxidos de manganeso (OXsMn).

Tipo de textura: Textura de relleno.

Figura 20

Fotomicrográficas LT-LR AT-MI-017



Nota: Fotomicrografías en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR).

Análisis DRX. En la tabla 11 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X de la muestra AT-MI-0017.

Tabla 11

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-017

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Carbonato (Ankerita)	$\text{Ca}(\text{Fe}^{+2}, \text{Mg}, \text{Mn})(\text{CO}_3)_2$	41.0
Carbonato (Dolomita)	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	21.1
Cuarzo	SiO_2	14.2
Carbonato (Kutnahorita)	$\text{Ca}(\text{Mn}, \text{Mg}, \text{Fe}^{2+})(\text{CO}_3)_2$	8.8
Pirita	FeS_2	5.6
Carbonato (Rodocrosita)	MnCO_3	4.5
Clinopiroxeno (Hedenbergita)	$\text{CaFe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_6$	2.9
Esfalerita	$(\text{Zn}, \text{Fe})\text{S}$	1.3
Cymrita	$\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot (\text{H}_2\text{O})$	< L.D.
Cobres Grises (Tennantita)	$(\text{Cu}, \text{Fe})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$	< L.D.

Nota: Limite de detección (L.D.).

Muestra AT-MI-018

Estudios petrominerográficos

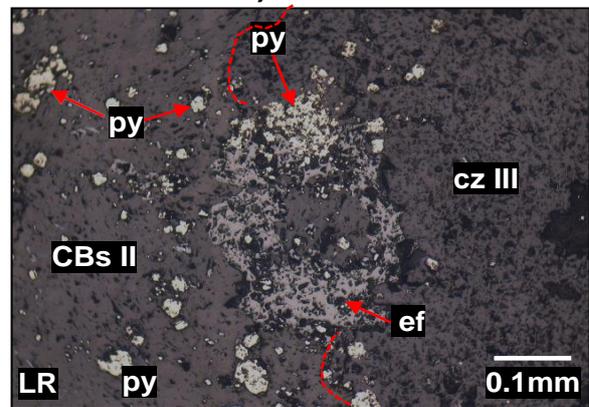
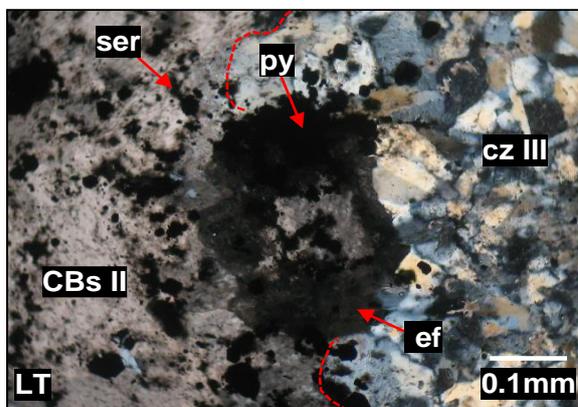
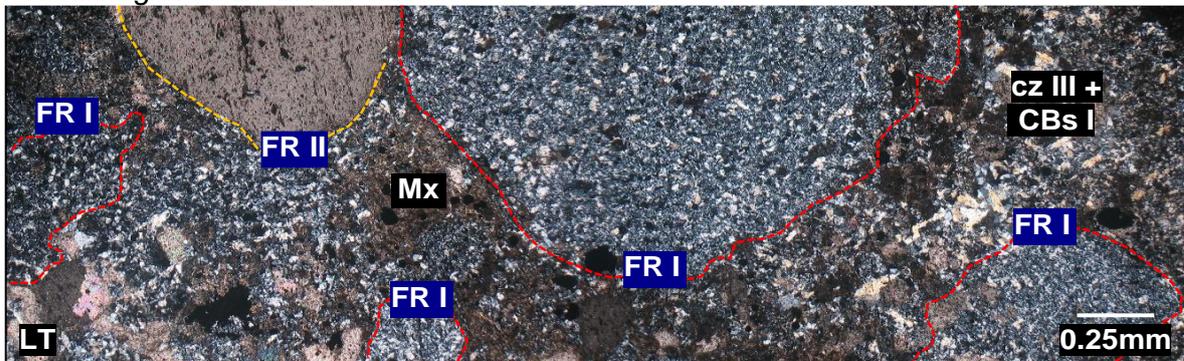
Descripción macroscópica: Conglomerado, compuesto por Fragmentos de Roca I y II, los cuales tienen matriz de sericita + arcillas, la matriz también tiene aperturas las cuales tienen relleno hidrotermal de carbonatos II, cuarzo III, esfalerita y galena, pirita, la última también esta diseminada en los fragmentos.

Los Fragmentos de Roca I y II han perdido sus texturas originales, y su clasificación tentativa para el Fragmento de Roca I sería microgranito o limolita, y el Fragmento de Roca II sería un fragmento de mármol.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 21 las fotomicrografías **94)** Conglomerado conformada por fragmentos subredondeados (FR I-II) y una matriz (Mx) reemplazada por carbonatos I y cuarzo III; **95)** y **96)** Esfalerita (ef) y pirita (py) entre los intersticios de cristales de cuarzo (cz III) y carbonatos (CBs II). Textura clástica y relleno.

Figura 21

Fotomicrografías LT-LR AT-MI-018



Nota: Fotomicrografías en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR).

Análisis DRX. En la tabla 12 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X de la muestra AT-MI-0018.

Tabla 12

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-018

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Carbonato (Ankerita)	Ca(Fe ⁺² ,Mg,Mn)(CO ₃) ₂	39.4
Cuarzo	SiO ₂	27.3
Feldespato K (Ortoclasa)	KAlSi ₃ O ₈	16.3
Carbonato (Calcita)	CaCO ₃	8.9
Moscovita (Sericita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	3.8
Pirita	FeS ₂	1.4
Esfalerita	(Zn, Fe) S	1.4
Galena	PbS	1.0
Calcopirita	CuFeS ₂	< L.D.

Nota: Limite de detección (L.D.).

Muestra AT-MI-019

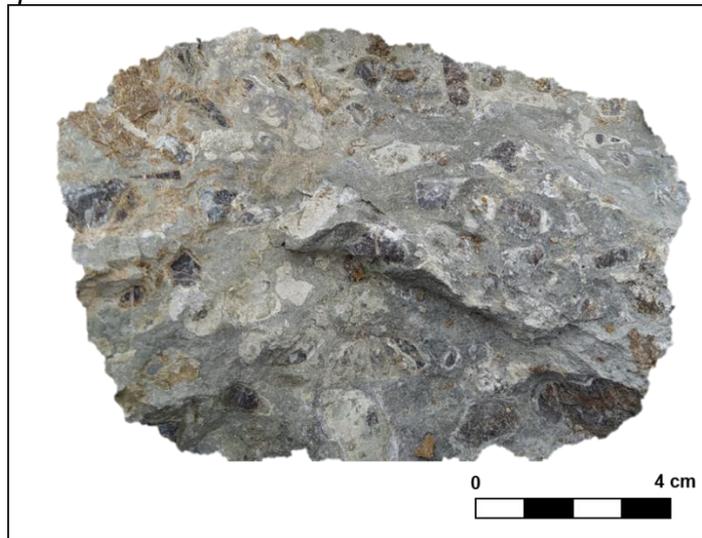
Estudios petrominerográficos

Descripción macroscópica: La Figura 22 está mostrando por un conglomerado sedimentario, compuesta por Fragmentos de Roca I y II, los cuales tienen matriz (cemento) de sericita y de relleno hidrotermal de carbonatos y cuarzo III, y esfalerita y galena, los carbonatos y la pirita, dentro de los agregados de carbonatos se encuentran agregados de adularia. Los Fragmentos de Roca I y II han perdido sus texturas originales, y su clasificación tentativa para el Fragmento de Roca I sería Microgranito o limolita, y el Fragmento de Roca II sería chert.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 23 las fotomicrografías; **100** y **101**) Esfalerita (ef) asociada a los carbonatos (CBs II), galena (gn) y pirita (py); **102**) Agregados de cristales de carbonatos (CBs II), en su interior agregados de cristales de adularia (ad); **103**) Carbonatos I (CBs I) y cuarzo III (cz III) reemplazando a la matriz de la roca principalmente compuesta por sericita (ser). Textura clástica y de relleno.

Figura 22

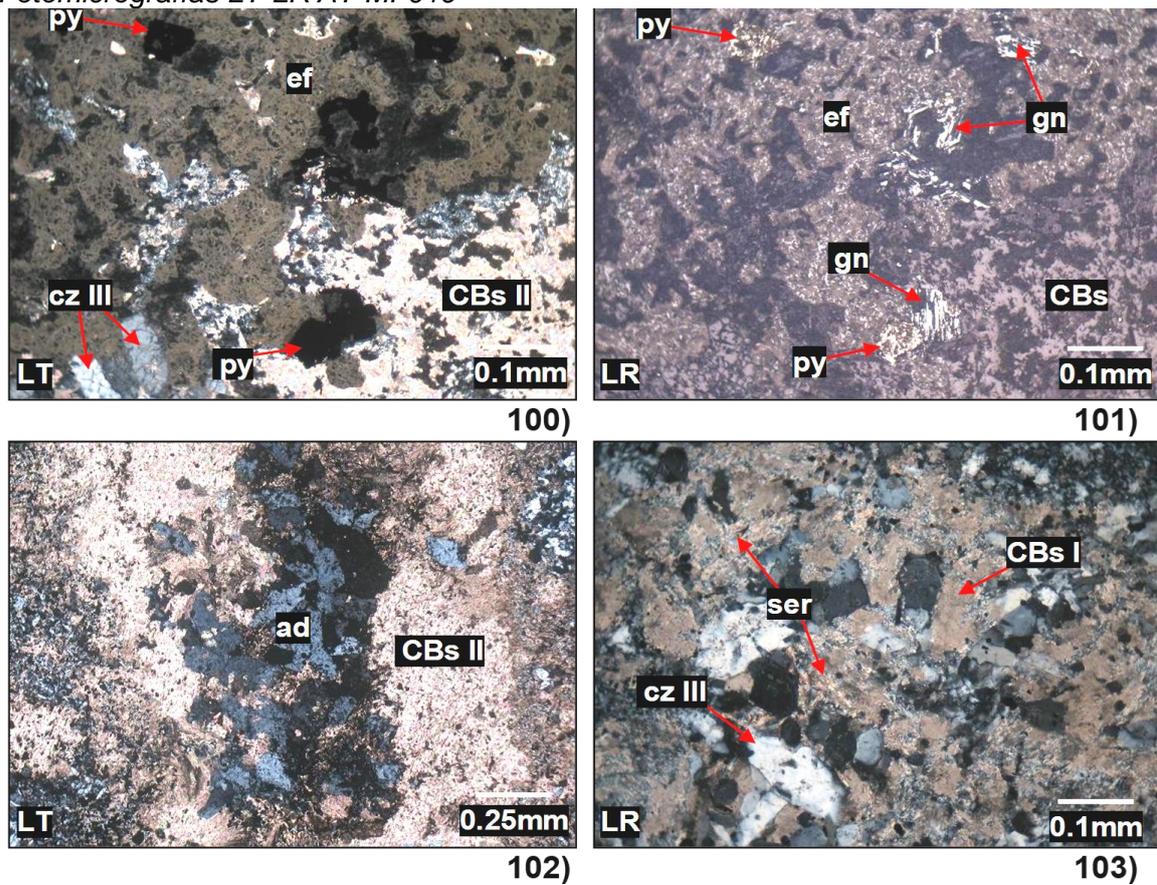
Muestra macroscópica AT-MI-019



Nota: Fuente propia.

Figura 23

Fotomicrografías LT-LR AT-MI-019



Nota: Fotomicrografías en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR).

Análisis DRX. En la tabla 13 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X de la muestra AT-MI-0019.

Tabla 13

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-019.

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	63.4
Carbonato (Calcita)	CaCO ₃	14.1
Moscovita (Sericita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	8.7
Feldespato K (Ortoclasa)	KAlSi ₃ O ₈	6.8

Nota: Limite de detección (L.D.).

Muestra AT-MI-020

Estudios petrominerográficos

Descripción macroscópica: La Figura 24 está mostrando por un protolito de roca volcánica silicificada compuesta por moldes de feldespatos y relictos de cuarzo primario contenidos y corroídos por una matriz completamente reemplazada de cuarzo hidrotermal (cuarzo III), acompañada de Sericita y carbonato I; los cuales ocupan cavidades y pequeñas fracturas en la matriz. Contiene cristales diseminados de pirita I, esfalerita I y galena I. En algunas zonas se observan cavidades rellenas de sílice amorfa en la matriz. Se observa un fragmento de estructura de relleno compuesto por carbonatos II, acompañado con cristales de cuarzo IV e inclusiones de pirita.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 25 las fotomicrografías; **106)** y **107)** Diseminaciones de hábitos cúbicos y formas relícticas pirita I (py I) en la matriz de cuarzo III con sericita y carbonatos I (cz III+ser+CBs I); **108)** Molde de feldespato reemplazado por carbonatos I (FPT+CBs I) contenido en la matriz (cz III+ser+CBs I); **109)** Fractura irregular de carbonatos I (CBs I) que cortan la matriz de cuarzo III con sericita y carbonatos I (cz III+ser+CBs I).

Tipo de textura: Porfirítica, de relleno y reemplazamiento.

Figura 24

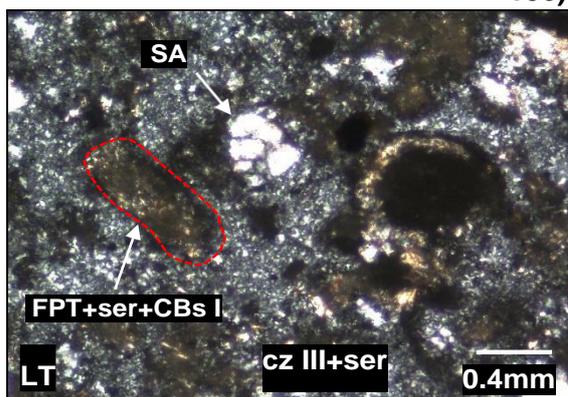
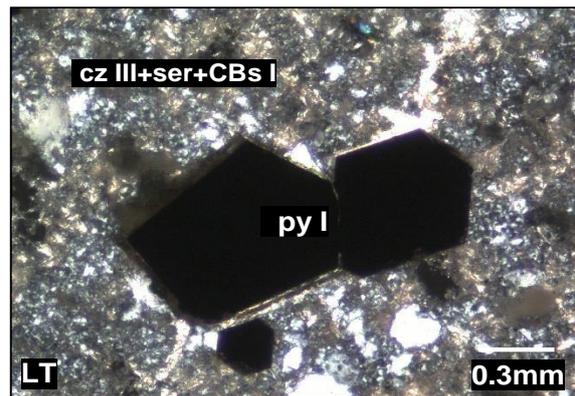
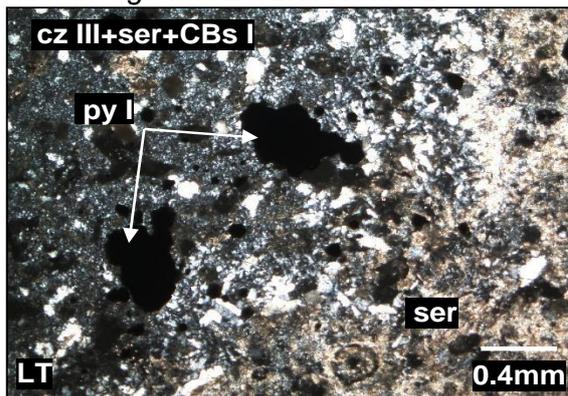
Muestra macroscópica AT-MI-020



Nota: Fuente propia.

Figura 25

Fotomicrografías LT-LR AT-MI-020



Nota: Fotomicrografías en Luz Transmitida (LT).

Análisis DRX. En la tabla 14 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X de la muestra AT-MI-0020.

Tabla 14

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-020

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	65.7
Carbonato (Dolomita)	CaMg(CO ₃) ₂	9.1
Esfalerita	(Zn, Fe) S	8.7
Feldespato K (Ortoclasa)	KAlSi ₃ O ₈	8.5

Nota: Limite de detección (L.D.).

Muestra AT-MI-021

Estudios petrominerográficos

Descripción macroscópica: La Figura 26 está mostrando una estructura de relleno, compuesta principalmente por adularia y menores cantidades de carbonatos I, la galena y la pirita está asociada a los carbonatos, por otro lado, la esfalerita se encuentra en toda la estructura. La galena presenta inclusiones de cobres grises y rara vez calcopirita.

La estructura es cortada por venillas irregulares de carbonatos II, también se observa sericita en algunos intersticios de la adularia.

Descripción microscópica: Se observa en la Figura 27 las fotomicrografías; **110**) Estructura de relleno conformada principalmente por adularia (ad I) es cortada por una segunda generación de adularia (ad II) asociada a carbonatos (CBs II), galena (gn) y pirita (py); **111**) y **112**) Galena (gn) entre los intersticios agregados masivos de esfalerita (ef), es cortada por venillas de carbonatos (CBs II).

Tipo de textura: Textura de relleno.

Figura 26

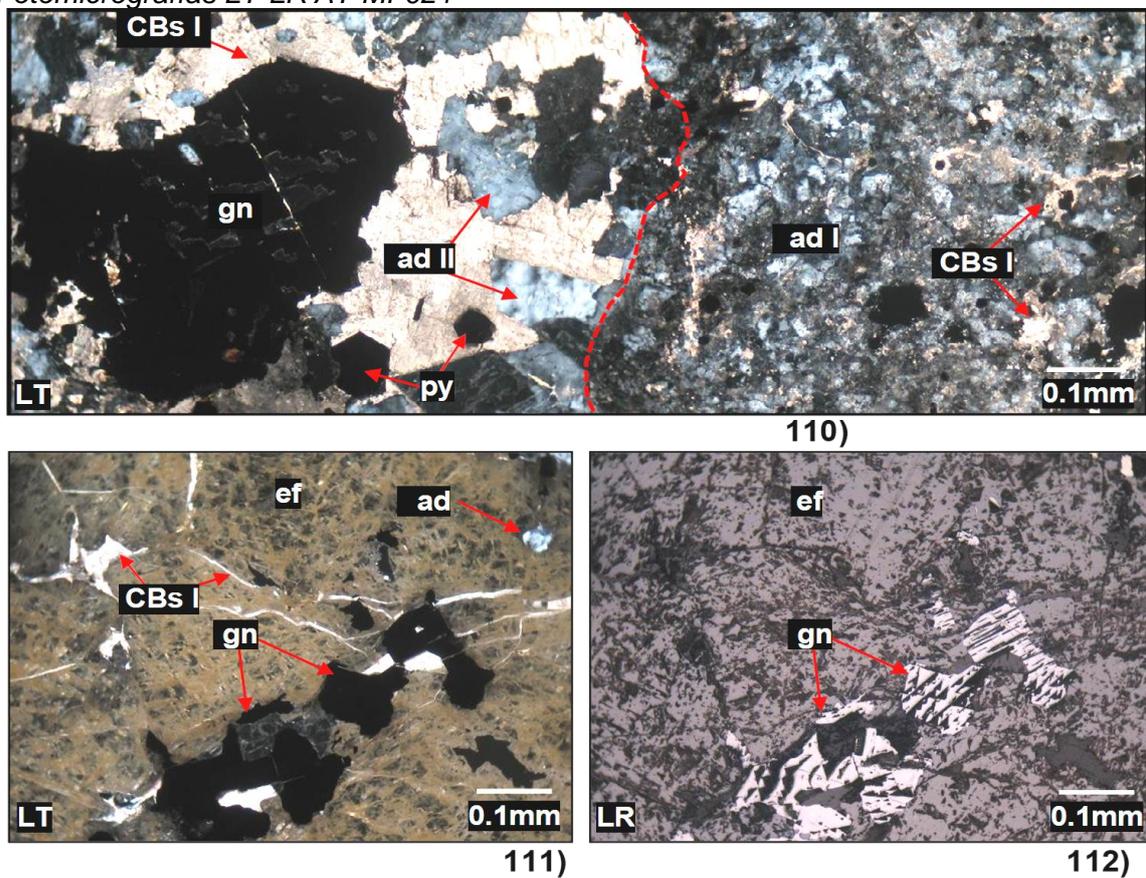
Muestra macroscópica AT-MI-021



Nota: Fuente propia.

Figura 27

Fotomicrografías LT-LR AT-MI-021



Nota: Fotomicrografías en Luz Transmitida (LT) y Luz Reflejada (LR).

Análisis DRX. En la tabla 15 se observa los resultados obtenidos de difracción de rayos X de la muestra AT-MI-0021.

Tabla 15

Análisis mineralógico por difracción de rayos X AT-MI-021

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Feldespato K (Ortoclasa)	$KAlSi_3O_8$	50.6
Esfalerita	$(Zn, Fe) S$	18.3
Carbonatos (Dolomita)	$CaMg(CO_3)_2$	9.4
Galena	PbS	6.8
Pirita	FeS_2	5.1
Bornita	Cu_5FeS_4	3.9
Hidromica (Illita)	$(K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2 \cdot (H_2O)]$	2.4

Nota: Limite de detección (L.D.).

Anexo 3

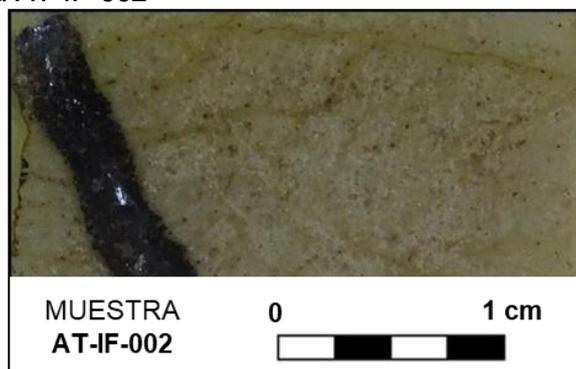
Inclusiones fluidas

Muestra AT-IF-002

A continuación, se detalla la descripción microscópica en luz transmitida (LT) y luz reflejada (LR) de la muestra AT-IF-002.

Figura 28

Muestra macroscópica AT-IF-002



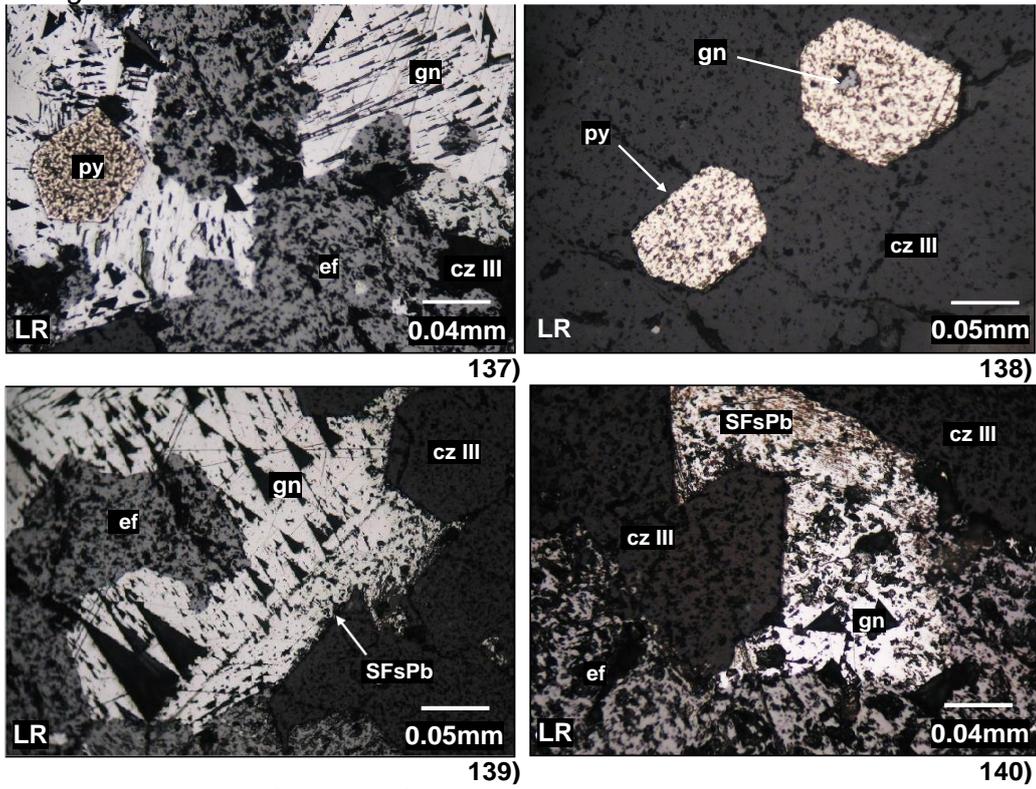
Nota: Nexa Resources Atacocha.

Fotomicrografías LR: 137) Galena (gn) reemplazando a la esfalerita (ef) e inclusión de pirita (py); **138)** Cristales euhedrales de pirita (py); presenta inclusión de galena (gn); **139) y 140)** Intercrecimientos entre esfalerita (ef) y galena (gn); la galena es reemplazada por sulfosales de plomo (SFsPb) desde los bordes (Ver Figura 29).

Fotomicrografías LT: 141 a 144 inclusiones fluidas primarias bifásicas ricas en líquido (Tipo L) con formas ovaladas y alargadas con tamaños hasta de 16µm capturas en cuarzo de relleno (cz III) y hasta de 24 µm en esfalerita (Ver Figura 30).

Figura 29

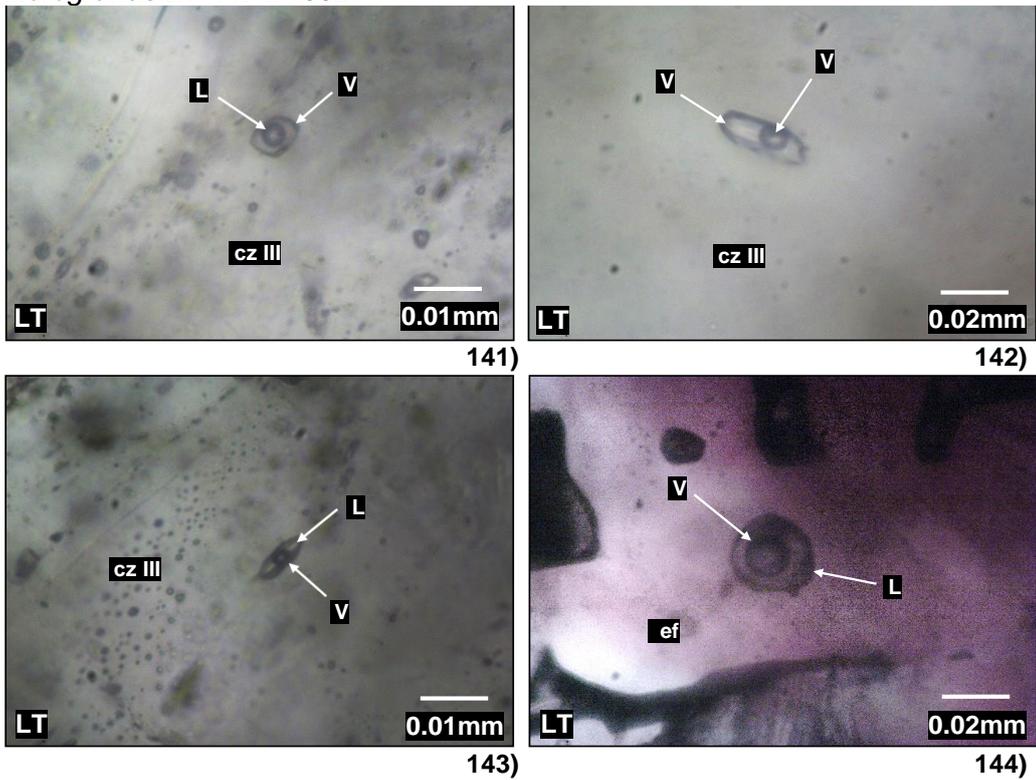
Fotomicrografías LR- AT-IF-002



Nota: Fotomicrografías en Luz Reflejada (LR).

Figura 30

Fotomicrografías LT- AT-IF-002



Nota: Fotomicrografías en Luz Transmitida (LT).

En la tabla 16 se muestran los datos del análisis microtermométrico de temperatura de homogeneización y salinidad realizados.

Tabla 16

Datos microtermométricos de la muestra AT-IF-002

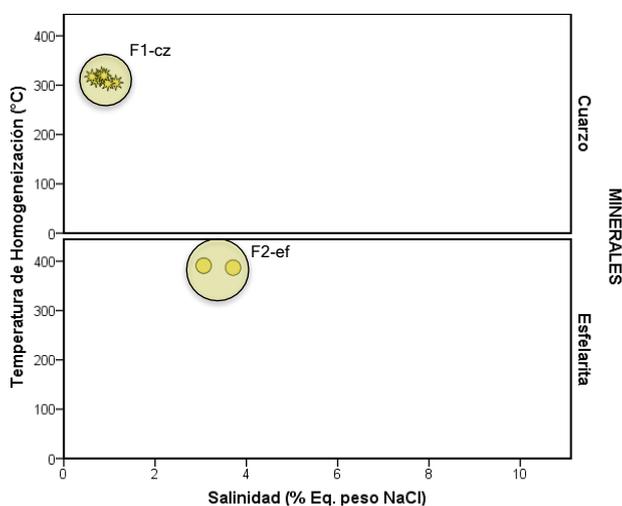
Nº	MUESTRA	CLAF.	MIN	TIPO	Øµ	FILL	-Tf (°C)	Th (°C)	NaCl	ρ(g/cm ³)	P (bar)
						(L/V)			(wt%)		
1	S1 046036	BIF	cz	P-Lw	10	0.60	0.45	312.00	0.79	1.07	67.88
2	S1 046036	BIF	cz	P-Lw	8	0.70	0.40	310.50	0.70	1.07	66.58
3	S1 046036	BIF	cz	P-Lw	8	0.60	0.35	317.40	0.62	1.07	72.70
1	S1 046036	BIF	cz	P-Lw	16	0.40	0.65	305.10	1.14	1.07	62.05
2	S1 046036	BIF	cz	P-Lw	13	0.50	0.55	303.70	0.97	1.07	60.91
1	S1 046036	BIF	cz	P-Lw	7	0.70	0.47	322.00	0.83	1.07	76.97
2	S1 046036	BIF	cz	P-Lw	9	0.60	0.50	319.40	0.88	1.07	74.53
1	S1 046036	BIF	ef	P-Lw	18	0.50	1.80	391.00	3.06	1.08	159.22
2	S1 046036	BIF	ef	P-Lw	24	0.70	2.20	387.00	3.71	1.08	153.63

Nota: Las diferencias en numeración entre las diferentes filas es la agrupación según el grado de asociación de las IF (familias FIF) y de IF aisladas.

Se puede observar (Ver Figura 31), dos posibles poblaciones; la primera población (F1-cz), se encuentra entre 300 y 330 °C con salinidad entre 0.5 y 1.5 % eq. peso NaCl; seguida de una segunda población (F2-ef), la cual presenta temperaturas de homogeneización (Th °C) cerca a los 400 °C con salinidades entre 3 y 4 % eq. peso NaCl.

Figura 31

Familias identificadas en homogeneización vs salinidad

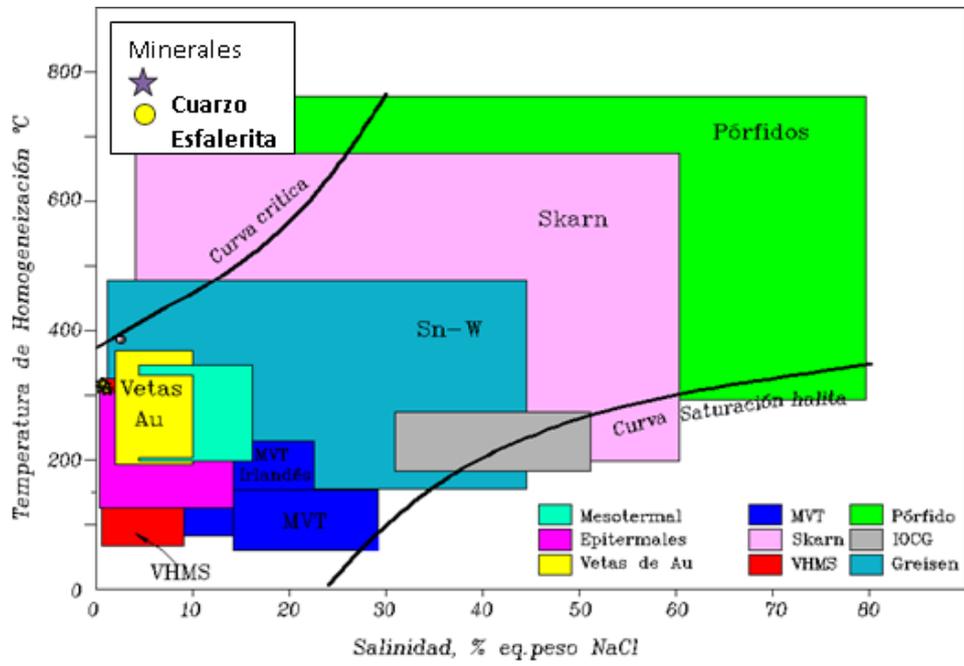


Nota: Familias identificadas en minerales de cuarzo y esfalerita.

Según el diagrama modificado de Wilkinson (2001) se trata de fluidos que corresponden a depósitos epitermales (Ver Figura 32).

Figura 32

Diagrama temperatura de homogeneización vs salinidad



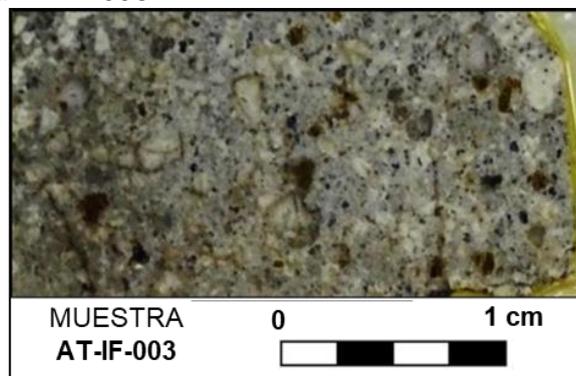
Nota: Modificado de Wilkinson (2001).

Muestra AT-IF-003

A continuación, se detalla la descripción microscópica en luz transmitida (LT) y luz reflejada (LR) de la muestra AT-IF-003.

Figura 33

Muestra macroscópica AT-IF-003

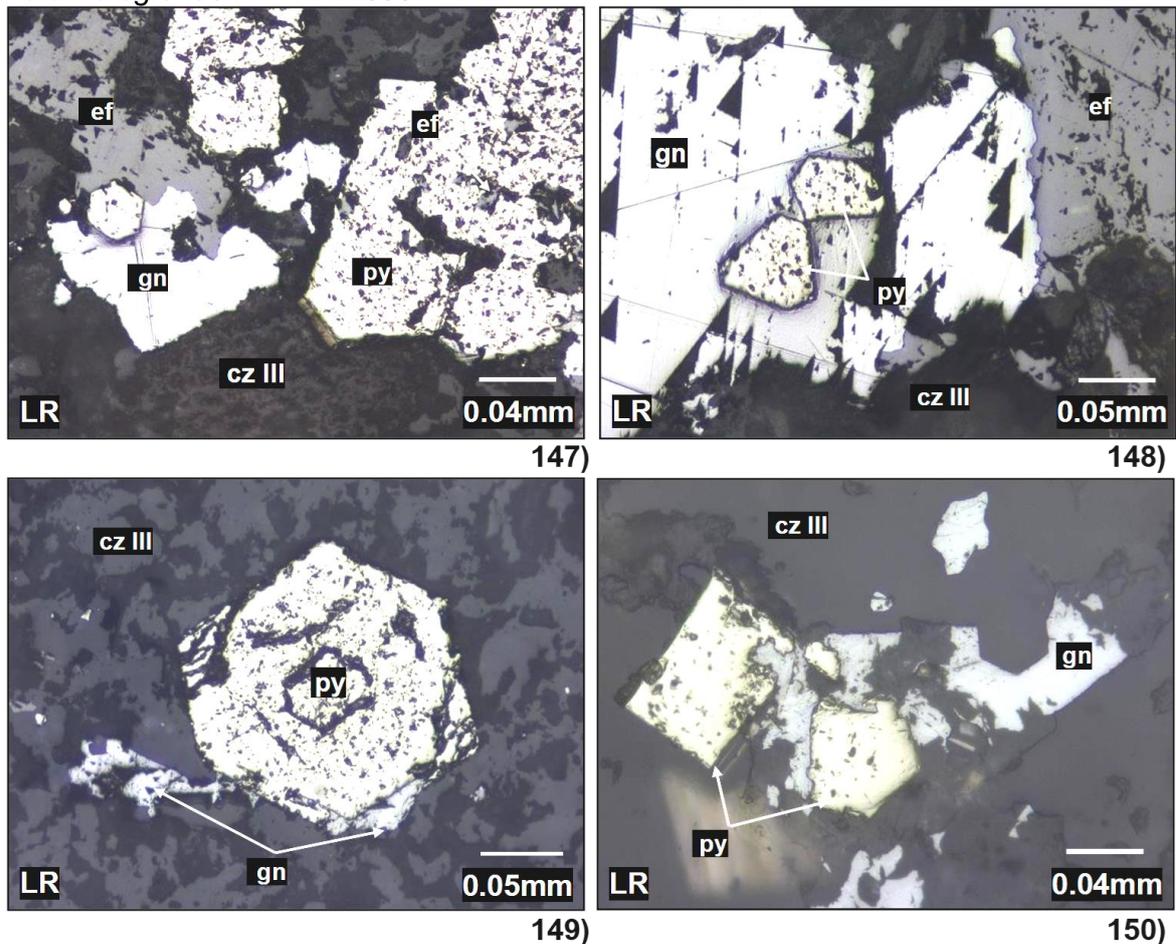


Nota: Nexa Resources Atacocha.

Fotomicrografías LR: 147) Cristales subhedrales de pirita (py) con inclusiones de esfalerita (ef); **148)** Galena (gn) reemplazando a la esfalerita (ef) e inclusiones de pirita (py); **149)** Cristal euhedral de pirita (py) intercrecida con galena (gn) en los bordes; **150)** Sulfosales de plomo (SFsPb) reemplazando a la galena (gn); está acompañado con cristales de pirita (py) (Ver Figura 34).

Figura 34

Fotomicrografías LR-AT-IF-003

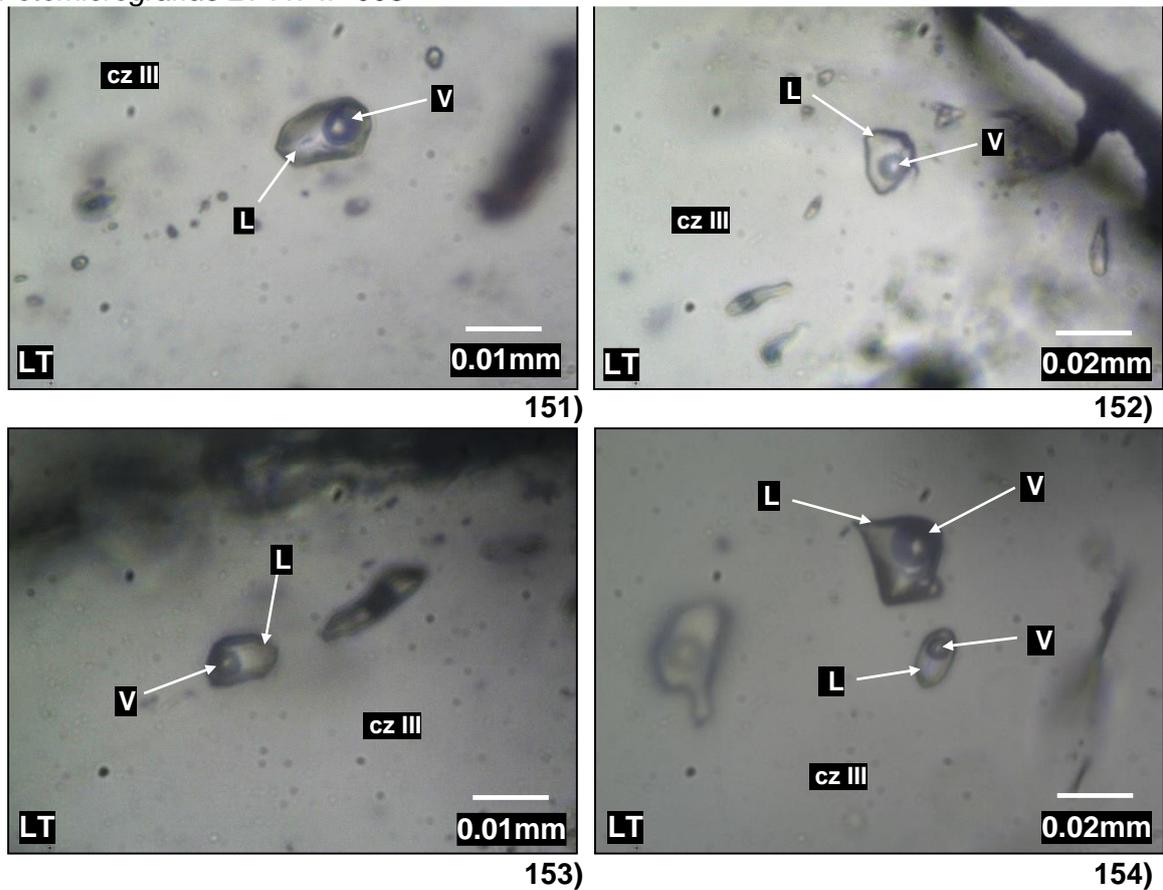


Nota: Fotomicrografías en Luz Reflejada (LR).

Fotomicrografías LT: 141 a 144 inclusiones fluidas primarias bifásicas ricas en líquido (tipo L) con formas ovaladas, subredondeadas e irregulares con tamaños entre 10 a 24 μm capturas en cuarzo de relleno (cz III) y con tamaños hasta de 36 μm en esfalerita (Ver Figura 35).

Figura 35

Fotomicrográficas LT-AT-IF-003



Nota: Fotomicrográficas en Luz Transmitida (LT).

En la tabla 17 se muestran los datos del análisis microtermométrico de temperatura de homogeneización y salinidad realizados.

Tabla 17

Datos microtermométricos de la muestra AT-IF-003

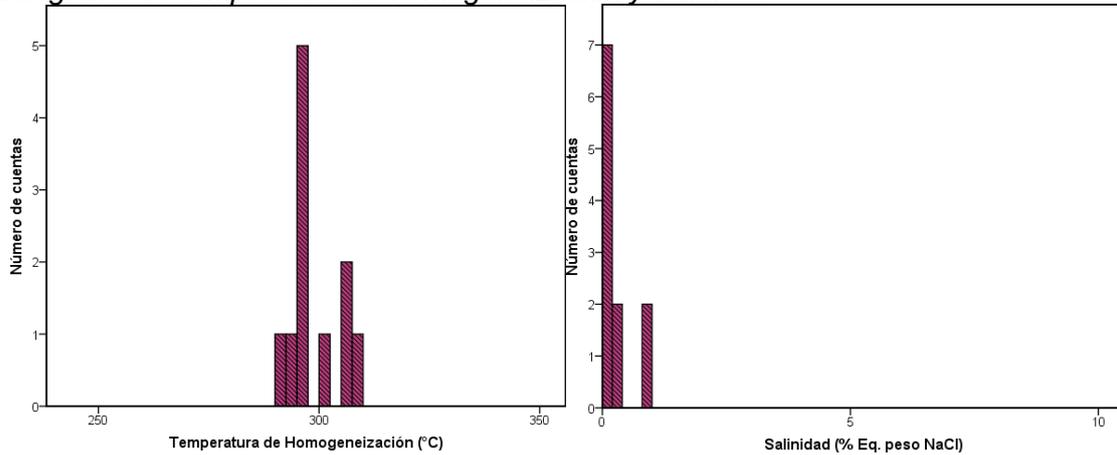
Nº	MUESTRA	CLAF.	MIN	TIPO	Øµ	FILL (L/V)	-Tf (°C)	Th (°C)	NaCl (wt%)	ρ(g/cm ³)	P (bar)
1	S1 046037	BIF	cz	P-Lw	24	0.60	0.10	292.00	0.18	1.07	51.95
2	S1 046037	BIF	cz	P-Lw	10	0.70	0.15	297.00	0.27	1.07	55.66
1	S1 046037	BIF	cz	P-Lw	14	0.70	0.17	297.00	0.30	1.07	55.66
2	S1 046037	BIF	cz	P-Lw	20	0.40	0.08	296.00	0.14	1.07	54.90
1	S1 046037	BIF	cz	P-Lw	12	0.50	0.05	306.00	0.09	1.07	62.79
2	S1 046037	BIF	cz	P-Lw	8	0.80	0.08	302.00	0.14	1.07	59.55
1	S1 046037	BIF	cz	P-Lw	12	0.60	0.50	308.50	0.88	1.07	64.88
2	S1 046037	BIF	cz	P-Lw	10	0.50	0.56	305.40	0.98	1.07	62.30

Nota: Las diferencias en numeración entre las diferentes filas es la agrupación según el grado de asociación de las IF (familias FIF) y de IF aisladas.

En los histogramas que se muestran (Ver Figura 36), se puede observar que las temperaturas de homogeneización (T_h °C) para el cuarzo relacionado con la mineralización económica está entre 290 y 310 °C y salinidad no mayor a 1 % eq. peso NaCl.

Figura 36

Histograma de temperatura de homogeneización y salinidad

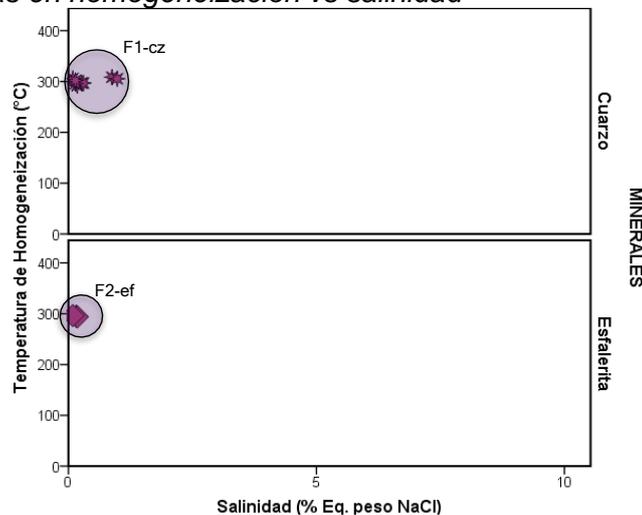


Nota: Histogramas vs números de cuentas.

Se puede observar (Ver Figura 37), dos posibles poblaciones; la primera población (F1-cz), se encuentra entre 290 y 310 °C con salinidad promedio de 0.37 % eq. peso NaCl; además de una segunda población (F2-ef), la cual presenta temperaturas de homogeneización (T_h °C) entre 290 y 300 °C con salinidades en promedio de 0.15 % eq. peso NaCl.

Figura 37

Familias identificadas en homogeneización vs salinidad

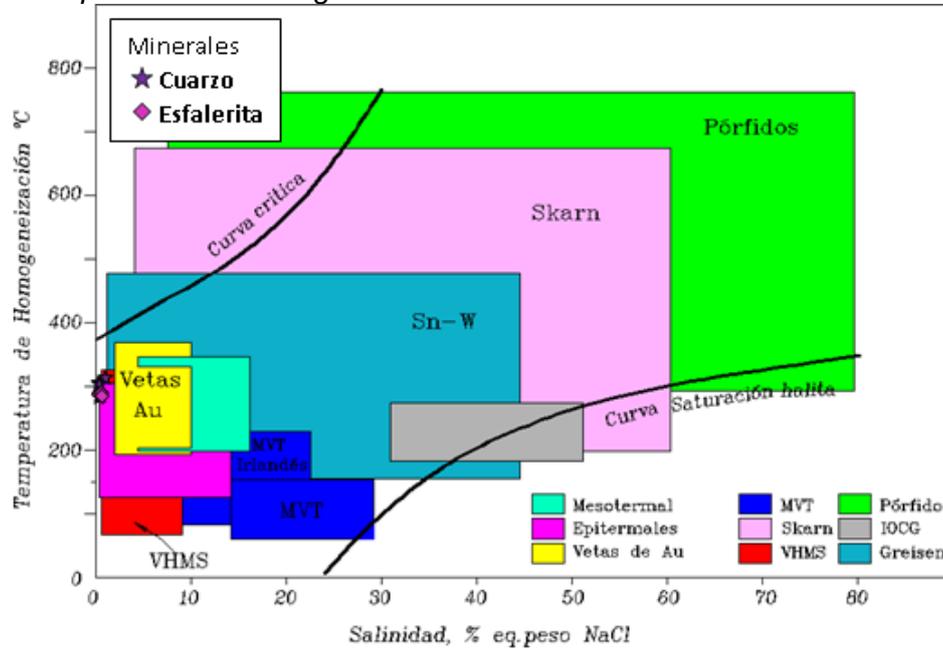


Nota: Familias identificadas en minerales de cuarzo y esfalerita.

Según el diagrama modificado de Wilkinson (2001) se trata de fluidos que corresponden a depósitos epitermales (Ver Figura 38).

Figura 38

Diagrama temperatura de homogeneización vs salinidad



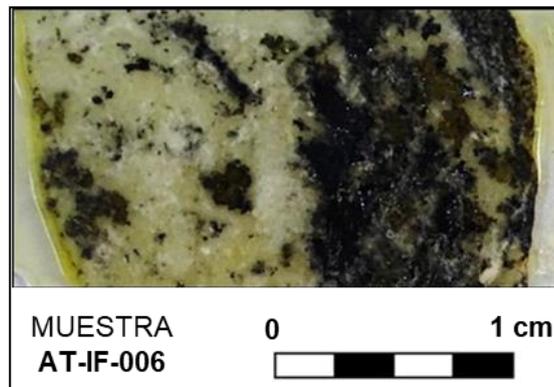
Nota: Modificado de Wilkinson (2001).

Muestra AT-IF-006

A continuación, se detalla la descripción microscópica en luz transmitida (LT) y luz reflejada (LR) de la muestra AT-IF-006.

Figura 39

Muestra macroscópica AT-IF-006

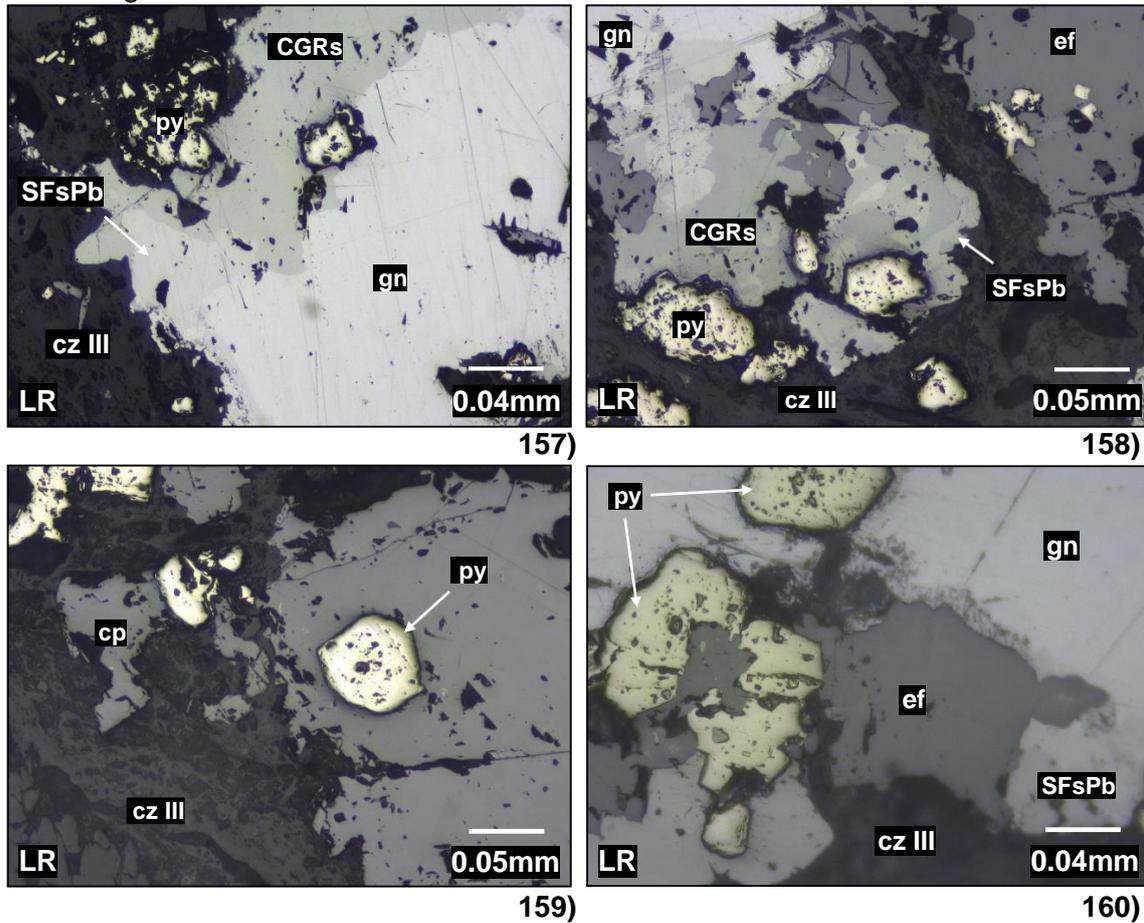


Nota: Nexa Resources Atacocha.

Fotomicrografías LR: 157) Galena (gn) reemplazada por cobres grises (CGRs) y sulfosales de plomo (SFsPb); **158)** Esfalerita (ef) con relictos de pirita (py) en contacto con galena (gn) reemplazada por cobres grises (CGRs) y sulfosales de plomo (SFsPb); **159)** Cristal subhedrales de pirita (py) incluido en esfalerita (ef); **160)** Esfalerita (ef) reemplazada por galena (gn) y sulfosales de plomo (SFsPb) reemplazada en los bordes de la galena (gn) (Ver Figura 40).

Figura 40

Fotomicrografías LR- AT-IF-006

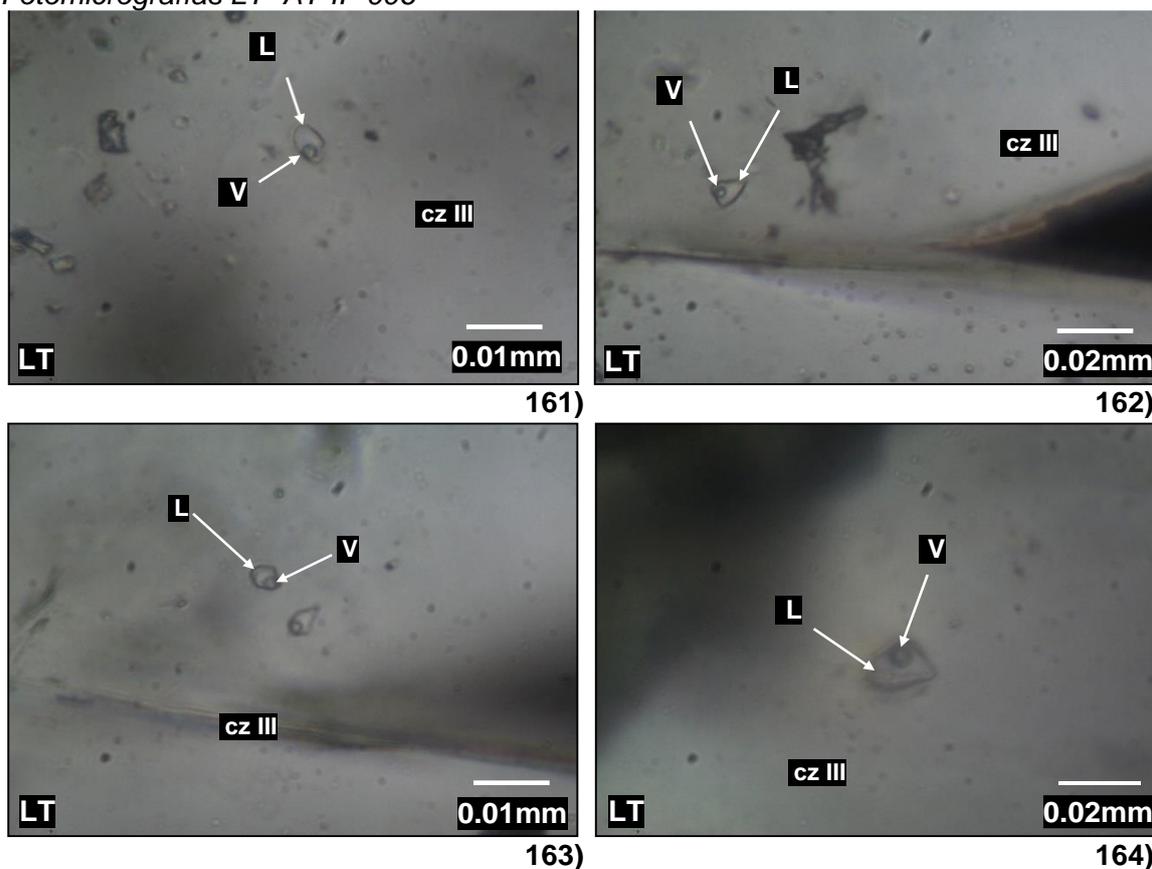


Nota: Fotomicrografías en Luz Reflejada (LR).

Fotomicrografías LT: 161 a 164 inclusiones fluidas primarias bifásicas ricas en líquido de tipo L y con formas ovaladas e irregulares con tamaños entre 10 a 14µm capturas en cuarzo de relleno (cz III) y hasta 40µm en esfalerita (Ver Figura 41).

Figura 41

Fotomicrográficas LT- AT-IF-006



Nota: Fotomicrográficas en Luz Transmitida (LT).

En la tabla 18 se muestran los datos del análisis microtermométrico de temperatura de homogeneización y salinidad realizados.

Tabla 18

Datos microtermométricos de la muestra AT-IF-006

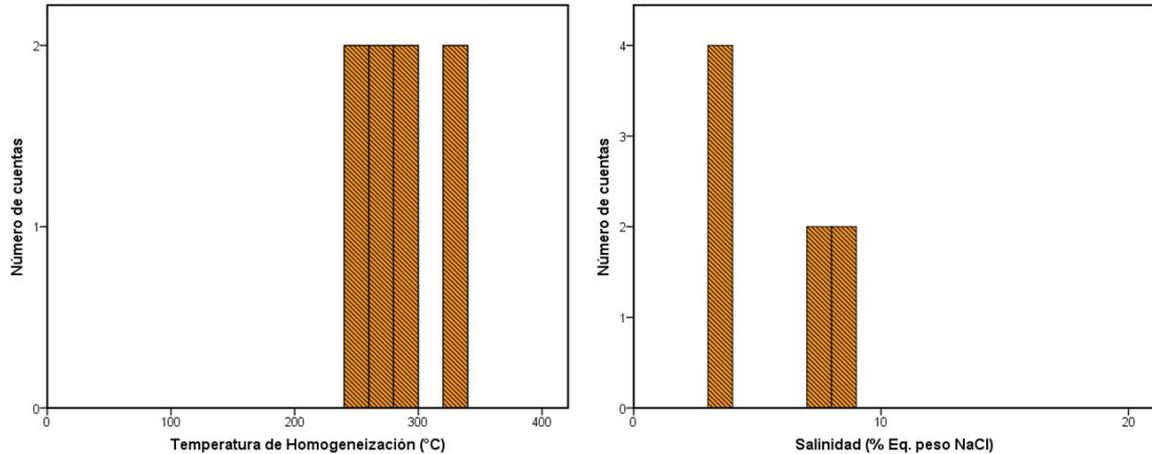
Nº	MUESTRA	CLAF.	MIN	TIPO	Øµ	FILL (L/V)	-Tf (°C)	Th (°C)	NaCl (wt%)	ρ(g/cm ³)	P (bar)
1	S1 046038	BIF	ef	P-Lw	40	0.60	5.50	254.70	8.55	1.09	29.77
2	S1 046038	BIF	ef	P-Lw	32	0.50	5.10	252.80	8.00	1.09	28.87
3	S1 046038	BIF	ef	P-Lw	40	0.60	4.50	270.00	7.17	1.08	37.75
4	S1 046038	BIF	ef	P-Lw	32	0.50	4.58	268.40	7.28	1.08	36.85
1	S1 046038	BIF	cz	P-Lw	12	0.70	2.19	290.00	3.69	1.07	50.52
2	S1 046038	BIF	cz	P-Lw	10	0.80	2.25	287.40	3.79	1.08	48.70
1	S1 046038	BIF	cz	P-Lw	12	0.80	2.20	333.00	3.71	1.07	87.83
2	S1 046038	BIF	cz	P-Lw	14	0.70	1.80	330.50	3.06	1.07	85.29

Nota: Las diferencias en numeración entre las diferentes filas es la agrupación según el grado de asociación de las IF (familias FIF) y de IF aisladas.

En los histogramas que se muestran (Ver Figura 42), se puede observar que las temperaturas de homogeneización (T_h °C) para el cuarzo relacionado con la mineralización económica está entre 250 y 350 °C y salinidad entre 3 y 9 % eq. peso NaCl.

Figura 42

Histograma de temperatura de homogeneización y salinidad

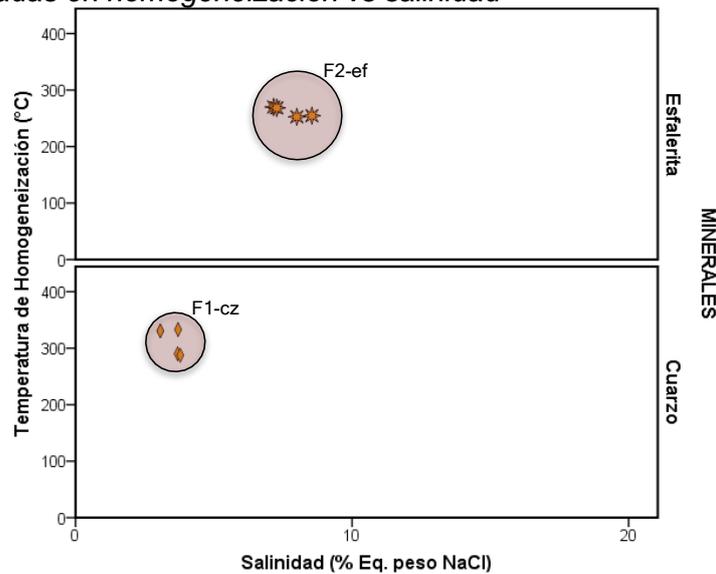


Nota: Histogramas vs números de cuentas.

Se puede observar (Ver Figura 43), dos posibles poblaciones; la primera población (F1-cz), se encuentra entre 280 y 340°C con salinidades entre 3 y 4 % eq. peso NaCl; además de una segunda población (F2-ef), la cual presenta temperaturas de homogeneización (T_h °C) entre 250 y 270 °C con salinidades entre 7 y 9 % eq. peso NaCl.

Figura 43

Familias identificadas en homogeneización vs salinidad

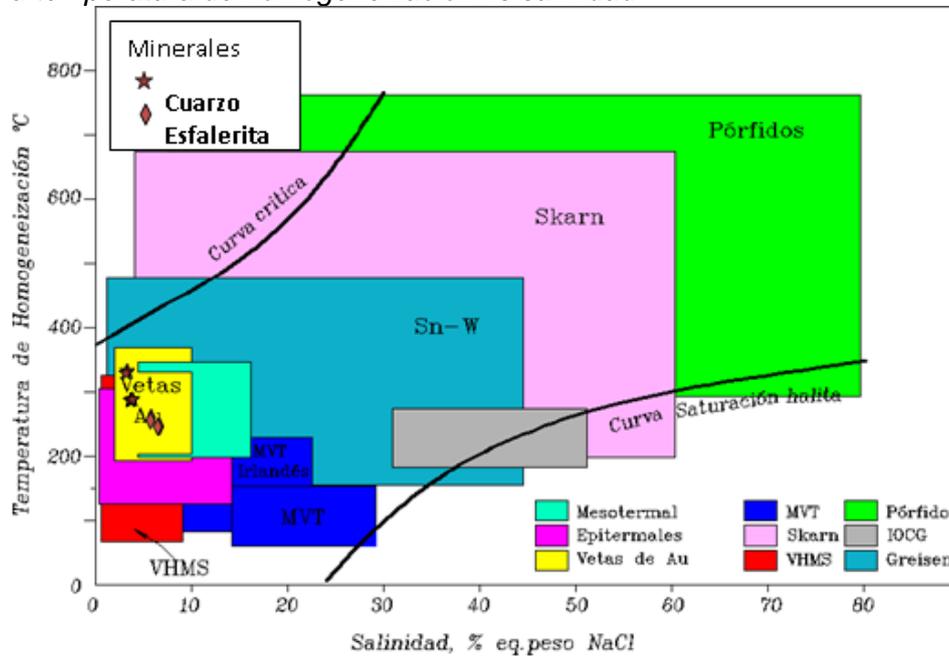


Nota: Familias identificadas en minerales de cuarzo y esfalerita.

Según el diagrama modificado de Wilkinson (2001) se trata de fluidos que corresponden a depósitos de vetas de oro (Ver Figura 44).

Figura 44

Diagrama temperatura de homogeneización vs salinidad



Nota: Modificado de Wilkinson (2001).

Muestra AT-IF-007

A continuación, se detalla la descripción microscópica en luz transmitida (LT) y luz reflejada (LR) de la muestra AT-IF-007.

Figura 45

Muestra macroscópica AT-IF-007



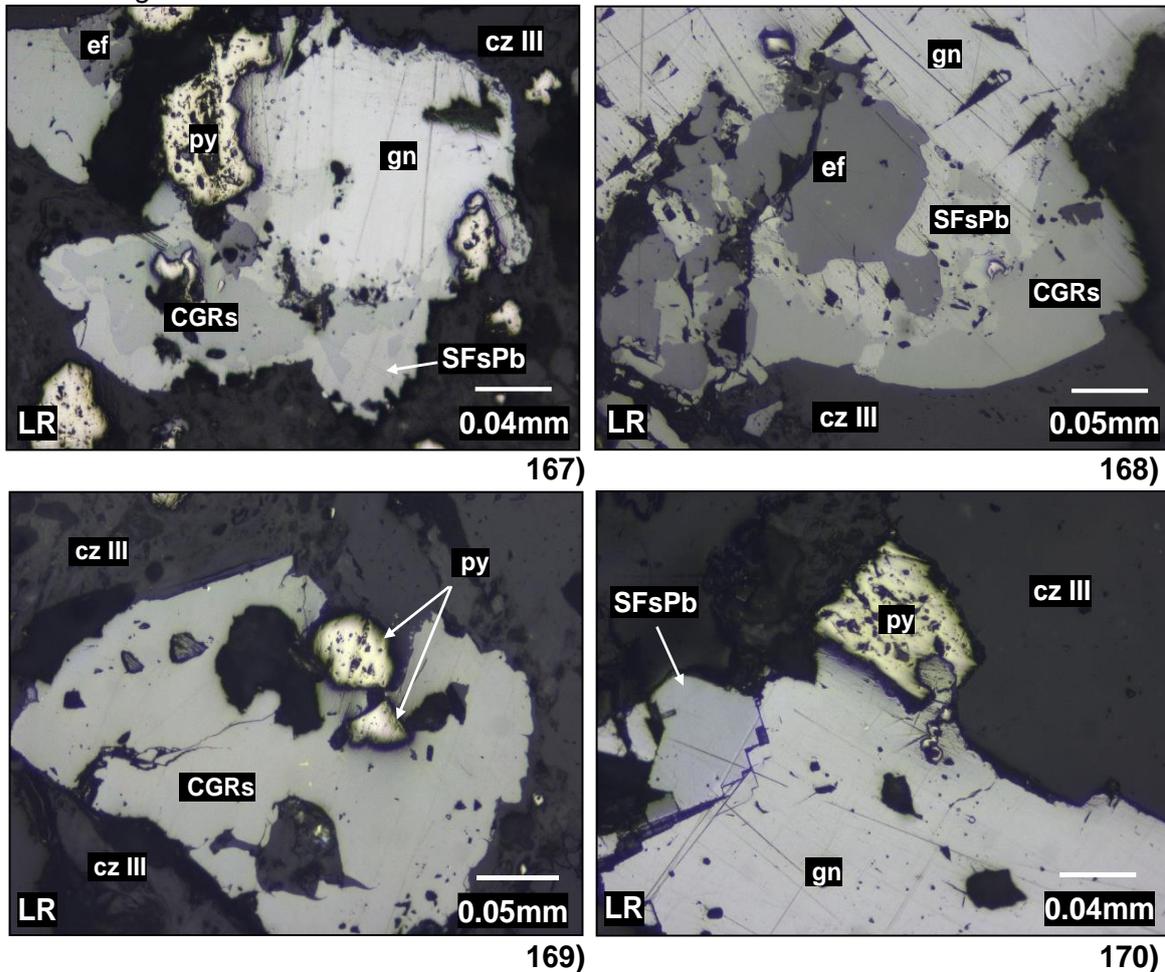
Nota: Nexa Resources Atacocha.

Fotomicrografías LR: 167) Forma anhedral de galena (gn) reemplazada por cobres grises (CGRs) y sulfosales de plomo (SFsPb); están intercrecidos con pirita (py);
168) Esfalerita (ef) reemplazada por galena (gn); en los bordes se observan cobres grises

(CGRs) y sulfosales de plomo (SFsPb); **169**) Cobres grises (CGRs) incluidos en cuarzo de relleno (cz III) y cristales subhedrales de pirita (py); **170**) Galena (gn) reemplazada por sulfosales de plomo (SFsPb) acompañado de pirita (py) (Ver Figura 46).

Figura 46

Fotomicrografías LR- AT-IF-007

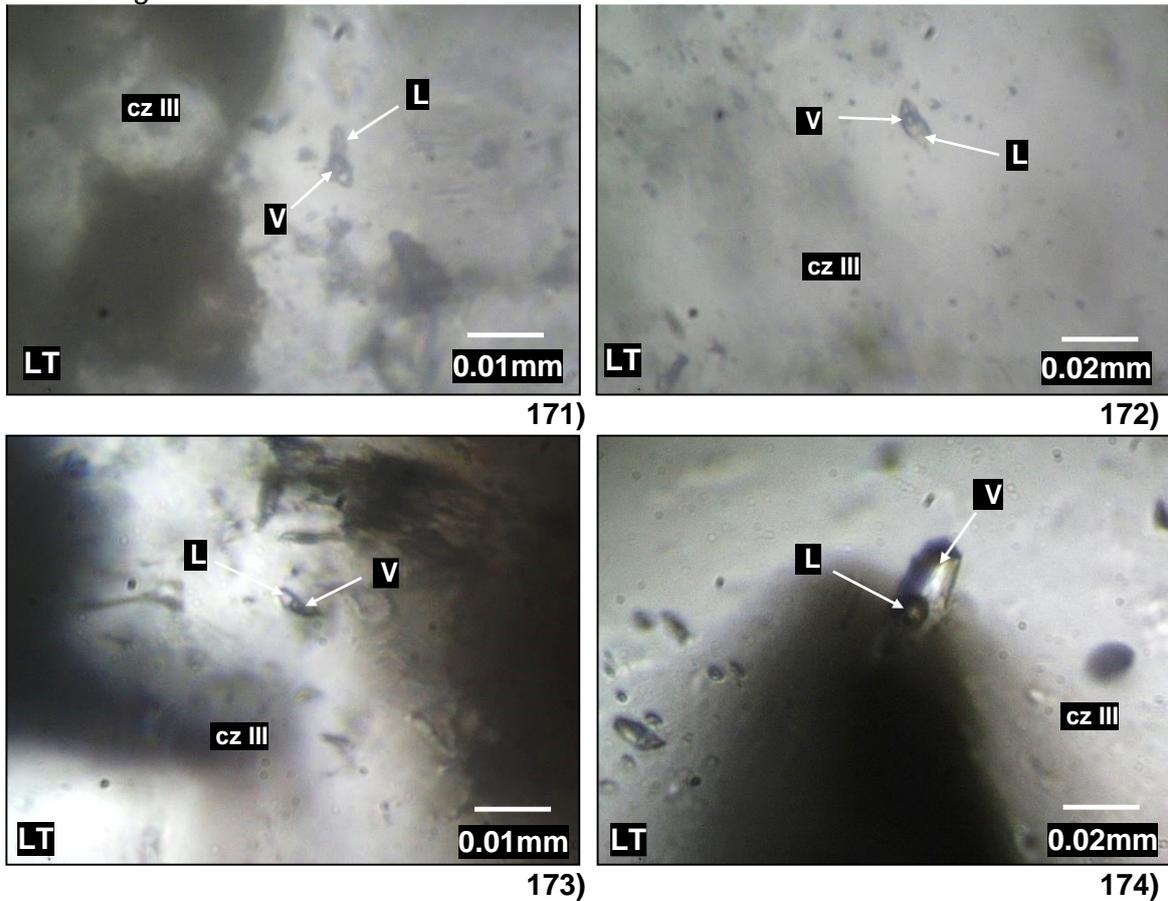


Nota: Fotomicrografías en Luz Reflejada (LR).

Fotomicrografías LT: 171 a 174 inclusiones fluidas primarias bifásicas ricas en líquido de tipo L con formas ovaladas, alargadas e irregulares con tamaños entre 5 a 20 μm capturas en cuarzo de relleno (cz III) (Ver Figura 47).

Figura 47

Fotomicrográficas LT- AT-IF-007



Nota: Fotomicrográficas en Luz Transmitida (LT).

En la tabla 19 se muestran los datos del análisis microtermométrico de temperatura de homogeneización y salinidad realizados.

Tabla 19

Datos microtermométricos de la muestra AT-IF-007

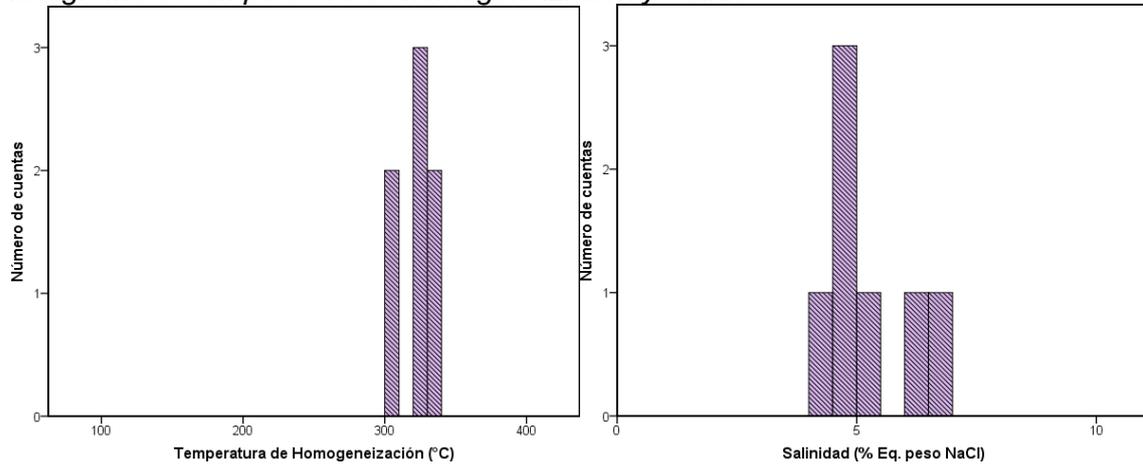
Nº	MUESTRA	CLAF.	MIN	TIPO	Øµ	FILL (LV)	-Tf (°C)	Th (°C)	NaCl (wt%)	ρ(g/cm ³)	P (bar)
1	S1 046039	BIF	cz	P-Lw	10	0.70	3.90	332.00	6.30	1.07	86.81
2	S1 046039	BIF	cz	P-Lw	9	0.60	4.20	329.40	6.74	1.07	84.18
1	S1 046039	BIF	cz	P-Lw	14	0.70	2.50	303.40	4.18	1.07	60.67
2	S1 046039	BIF	cz	P-Lw	20	0.80	3.00	309.40	4.96	1.07	65.64
1	S1 046039	BIF	cz	P-Lw	10	0.70	3.20	325.80	5.26	1.07	80.62
2	S1 046039	BIF	cz	P-Lw	9	0.60	3.00	329.70	4.96	1.07	84.48
3	S1 046039	BIF	cz	P-Lw	14	0.70	2.80	334.20	4.65	1.07	89.07

Nota: Las diferencias en numeración entre las diferentes filas es la agrupación según el grado de asociación de las IF (familias FIF) y de IF aisladas.

En los histogramas que se muestran (Ver Figura 48), se puede observar que las temperaturas de homogeneización (T_h °C) para el cuarzo relacionado con la mineralización económica está entre 200 y 350 °C y salinidad entre 4 y 7 % eq. peso NaCl.

Figura 48

Histograma de temperatura de homogeneización y salinidad

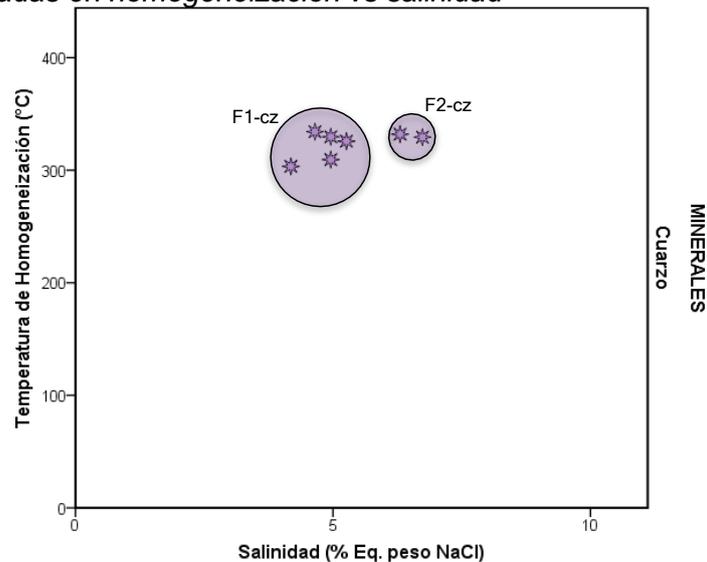


Nota: Histogramas vs números de cuentas.

Se puede observar (Ver Figura 49), una posible población (F-cz), cuya menor temperatura de homogeneización medida es de 303.40 °C y la máxima de 334.20 °C con una salinidad con valores entre 4.18 y 6.74 % eq. peso NaCl.

Figura 49

Familias identificadas en homogeneización vs salinidad

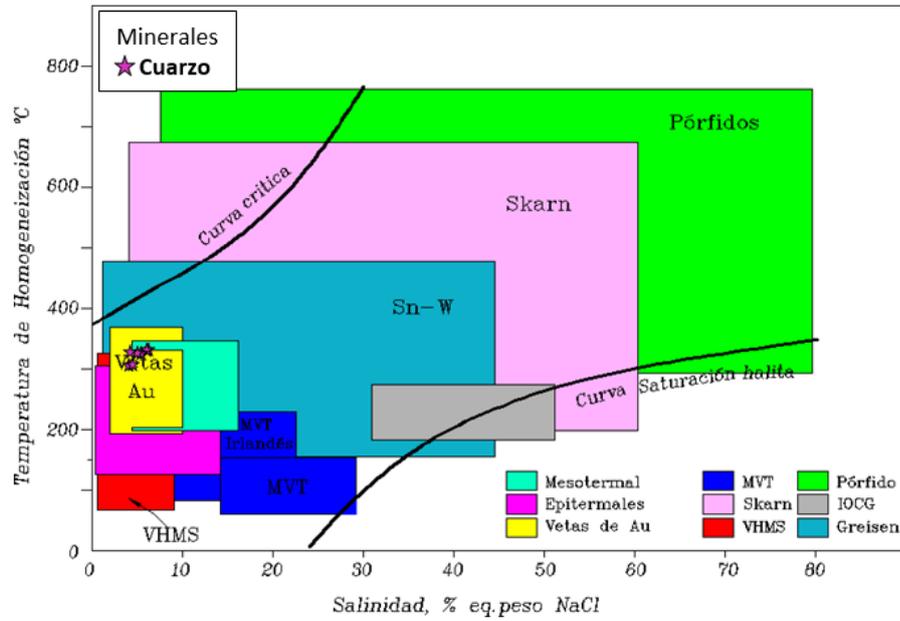


Nota: Familias identificadas en minerales de cuarzo.

Según el diagrama modificado de Wilkinson (2001) se trata de fluidos que corresponden a depósitos de vetas de oro en contacto con depósitos mesotermales (Ver Figura 50).

Figura 50

Diagrama temperatura de homogeneización vs salinidad



Nota: Modificado de Wilkinson (2001).

Muestra AT-IF-008

A continuación, se detalla la descripción microscópica en luz transmitida (LT) y luz reflejada (LR) de la muestra AT-IF-008.

Figura 51

Muestra macroscópica AT-IF-008

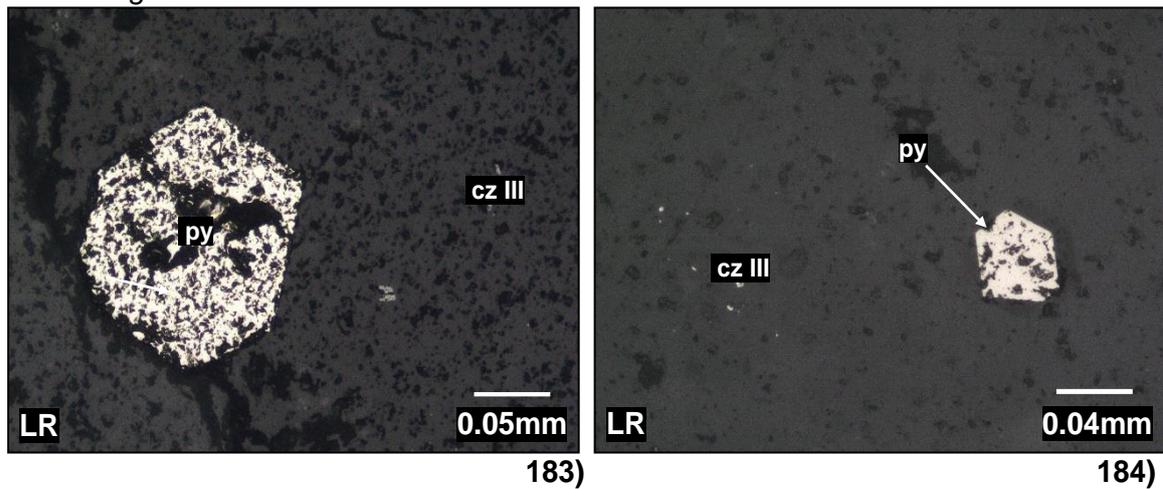


Nota: Nexa Resources Atacocha.

Fotomicrografías LR: 183 y 184) Inclusiones de pirita (py) en cuarzo de relleno (cz III) (Ver Figura 52).

Figura 52 77

Fotomicrografías LR- AT-IF-008

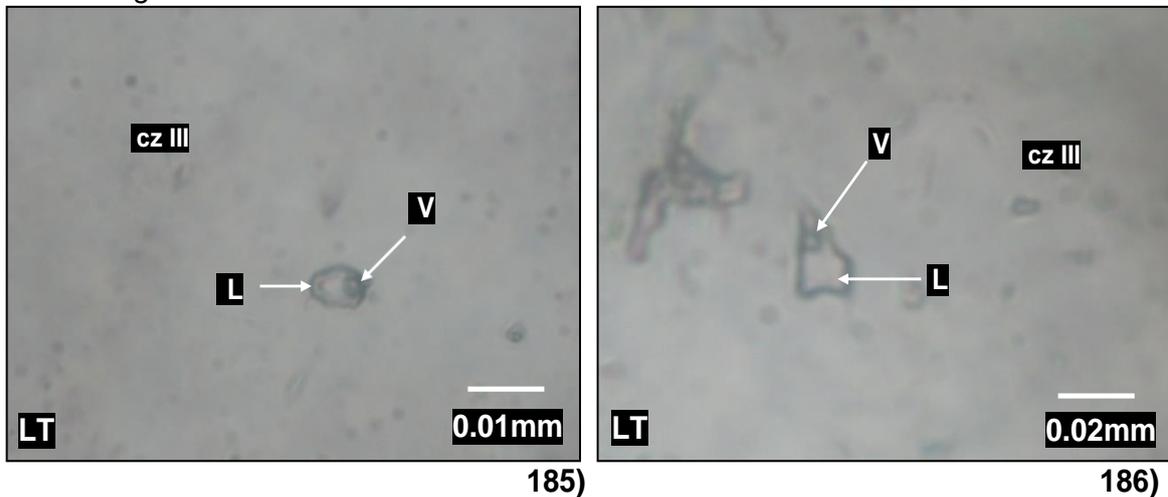


Nota: Fotomicrografías en Luz Reflejada (LR).

Fotomicrografías LT: 185 a 186 inclusiones fluidas primarias bifásicas ricas en líquido con formas ovaladas e irregulares con tamaños inferiores a 8 μm capturas en cuarzo de relleno (cz III), según se observó (Ver Figura 53).

Figura 53

Fotomicrografías LT- AT-IF-008



Nota: Fotomicrografías en Luz Transmitida (LT).

En la tabla 20 se muestran los datos del análisis microtermométrico de temperatura de homogeneización y salinidad realizados.

Tabla 20

Datos microtermométricos de la muestra AT-IF-008

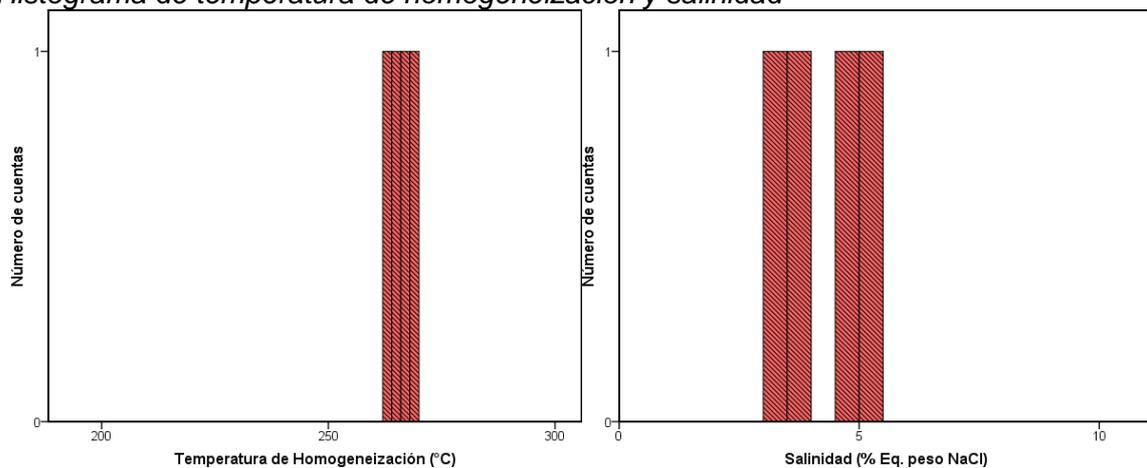
Nº	MUESTRA	CLAF.	MIN	TIPO	Øµ	FILL		Th (°C)	NaCl		P (bar)
						(L/V)	-Tf (°C)		(wt%)	ρ(g/cm ³)	
1	S2 046040	BIF	cz	P-Lw	8	0.80	3.10	269.70	5.11	1.08	37.58
2	S2 046040	BIF	cz	P-Lw	7	0.60	2.90	264.50	4.80	1.08	34.71
1	S2 046040	BIF	cz	P-Lw	8	0.60	1.90	262.00	3.23	1.08	33.39
2	S2 046040	BIF	cz	P-Lw	7	0.50	2.20	267.80	3.71	1.08	36.51

Nota: Las diferencias en numeración entre las diferentes filas es la agrupación según el grado de asociación de las IF (familias FIF) y de IF aisladas.

En los histogramas que se muestran (Ver Figura 54), se puede observar que las temperaturas de homogeneización (Th °C) para el cuarzo relacionado con la mineralización económica está entre 260 y 670 °C y salinidad entre 3 y 5 % eq. peso NaCl.

Figura 5478

Histograma de temperatura de homogeneización y salinidad

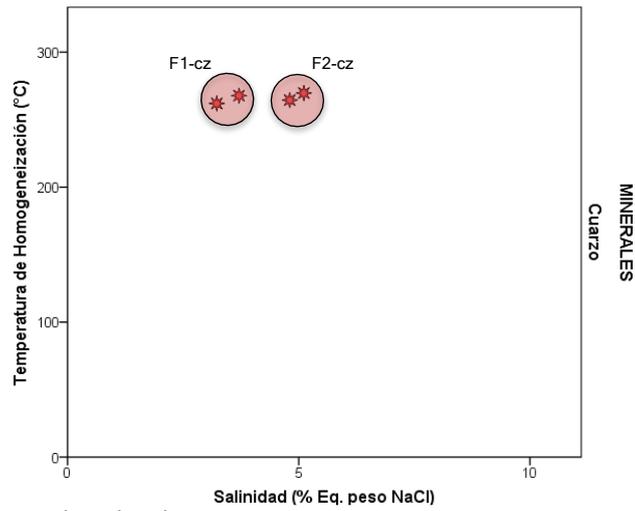


Nota: Histogramas vs números de cuentas.

Se puede observar (Ver Figura 55), dos posibles poblaciones; la primera población (F1-cz), presenta temperaturas de homogeneización entre 260 y 270 °C con salinidad promedio de 3.5 % eq. peso NaCl; seguida de una segunda población (F2-cz), la cual presenta temperaturas de homogeneización (Th °C) promedio de 265 °C con salinidades cercanas al 5 % eq. peso NaCl.

Figura 55

Familias identificadas en homogeneización vs salinidad

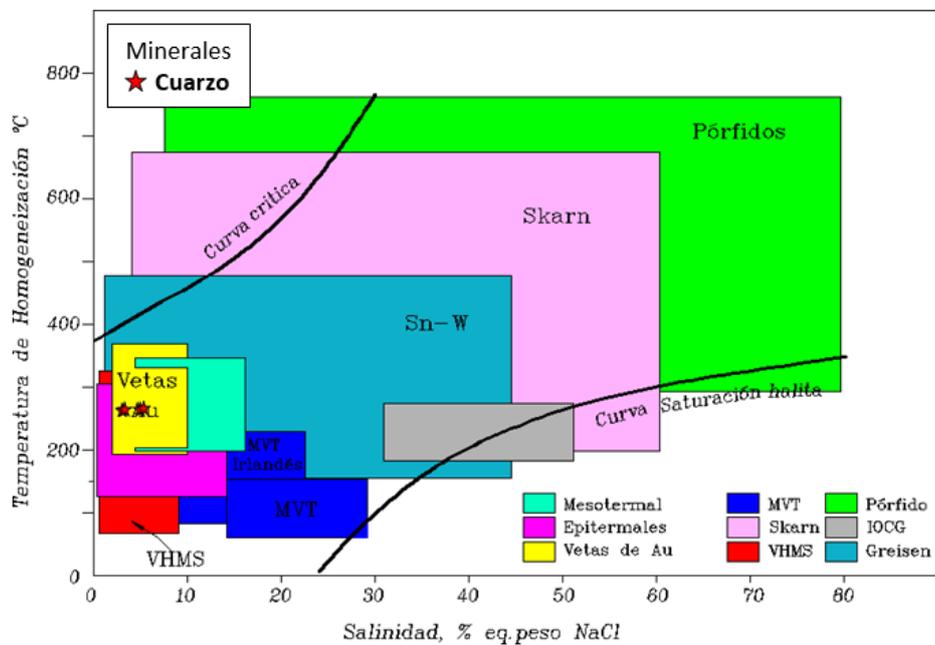


Nota: Familia identificada en minerales de cuarzo.

Según el diagrama modificado de Wilkinson (2001) se trata de fluidos que corresponden a depósitos de vetas de oro (Ver Figura 56).

Figura 56

Diagrama temperatura de homogeneización vs salinidad



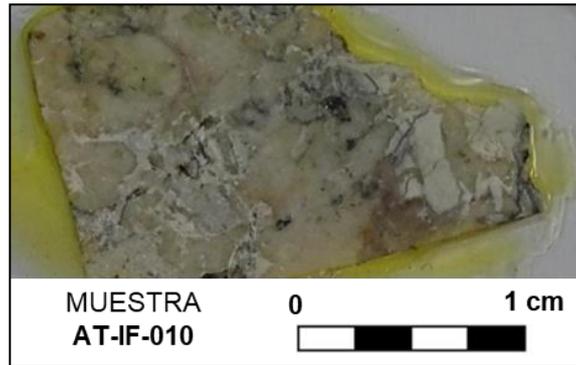
Nota: Modificado de Wilkinson (2001).

Muestra AT-IF-010

A continuación, se detalla la descripción microscópica en luz transmitida (LT) y luz reflejada (LR) de la muestra AT-IF-010.

Figura 5779

Muestra macroscópica AT-IF-010

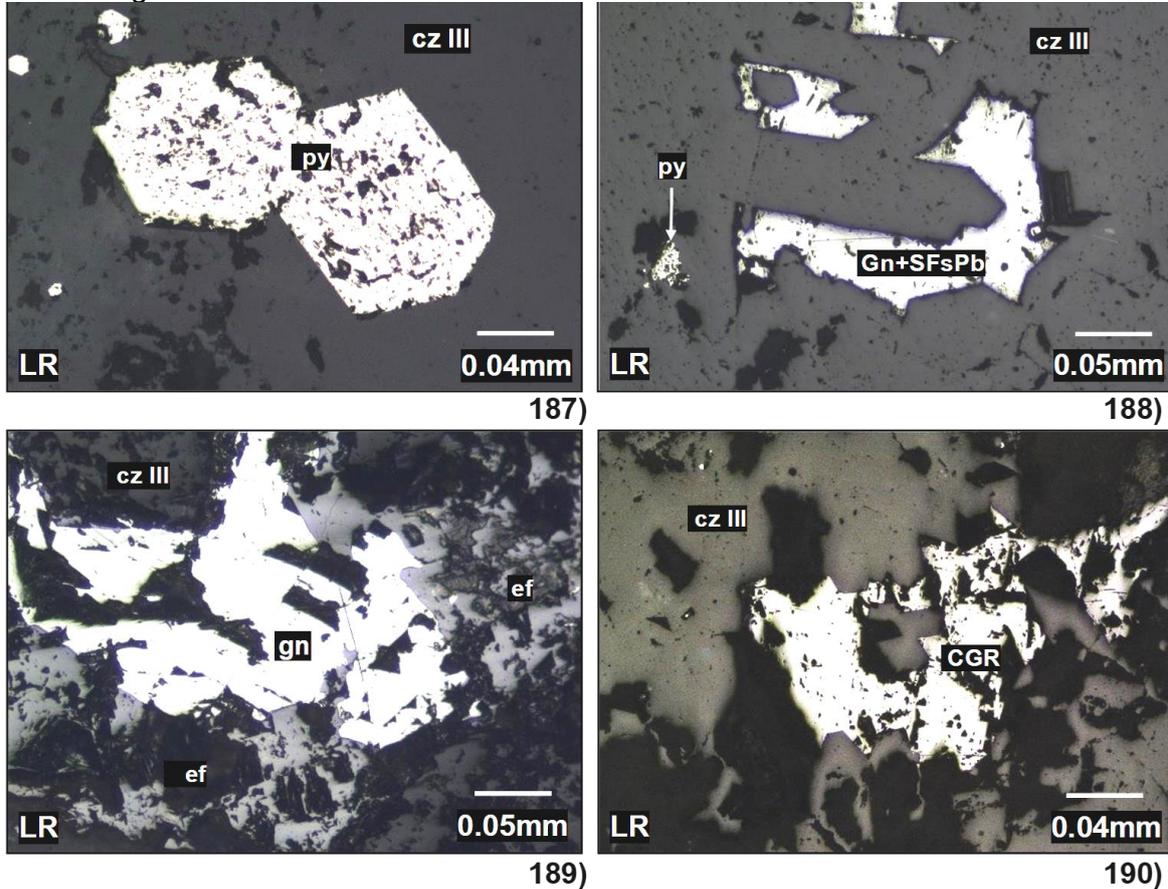


Nota: Nexa Resources Atacocha.

Fotomicrografías LR: 187) Cristales euhedrales de pirita (py) dispersos en el cuarzo de relleno (cz III); **188)** Cavidades rellenas de galena (gn) reemplazadas con sulfosales de plomo (SFsPb); **189)** Galena (gn) reemplazando a la esfalerita (ef) y **190)** Cobres grises (CGRs) contenido en cuarzo de relleno (cz III) (Ver Figura 58).

Figura 5880

Fotomicrografías LR- AT-IF-010

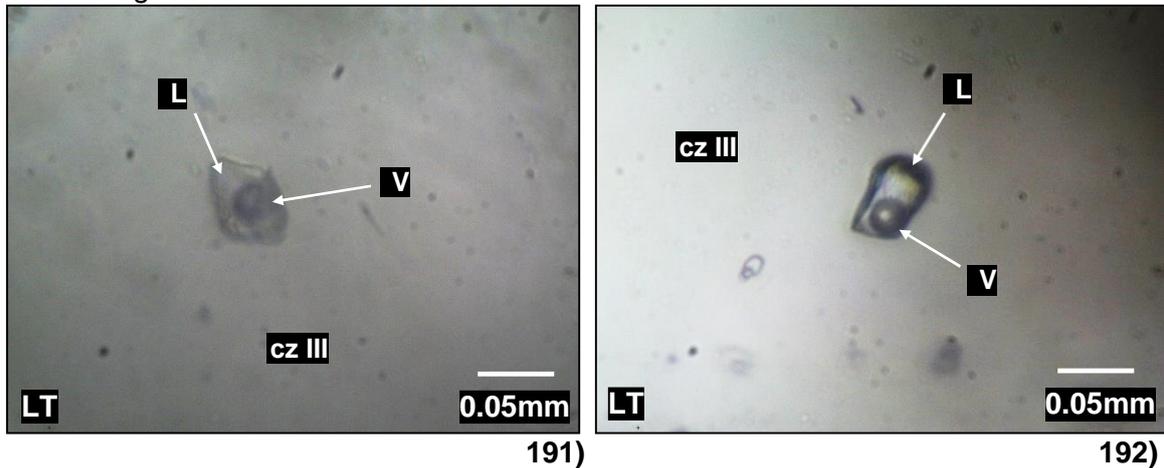


Nota: Fotomicrografías en Luz Reflejada (LR).

Fotomicrografías LT: 191 a 192 inclusiones fluidas primarias bifásicas ricas en líquido con formas ovaladas e irregulares con tamaños entre 5 a 20 μ m capturas en cuarzo de relleno (cz III) (Ver Figura 59).

Figura 5981

Fotomicrografías LT- AT-IF-010



Nota: Fotomicrografías en Luz Transmitida (LT).

En la tabla 21 se muestran los datos del análisis microtermométrico de temperatura de homogeneización y salinidad realizados.

Tabla 21

Datos microtermométricos de la muestra AT-IF-010

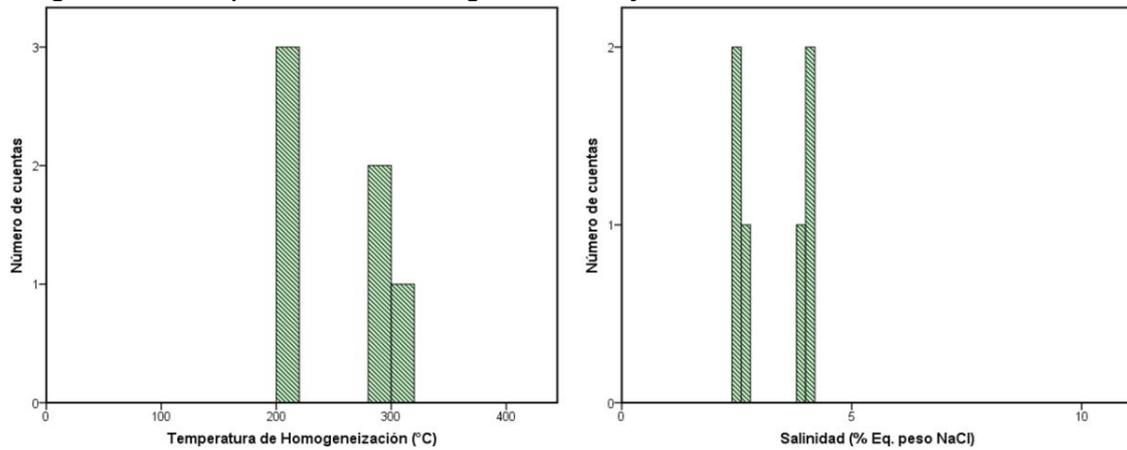
Nº	MUESTRA	CLAF.	MIN	TIPO	$\varnothing\mu$	FILL		Th (°C)	NaCl		P (bar)
						(L/V)	-Tf (°C)		(wt%)	ρ (g/cm ³)	
1	S2 046041	BIF	cz	P-Lw	20	0.60	1.50	210.40	2.57	1.11	13.90
2	S2 046041	BIF	cz	P-Lw	18	0.50	1.57	212.80	2.69	1.11	14.53
3	S2 046041	BIF	cz	P-Lw	15	0.80	1.45	215.20	2.49	1.11	15.18
1	S2 046041	BIF	cz	P-Lw	12	0.60	2.50	283.70	4.18	1.08	46.20
2	S2 046041	BIF	cz	P-Lw	10	0.50	2.35	285.20	3.95	1.08	47.20
1	S2 046041	BIF	cz	P-Lw	6	0.70	2.40	305.40	4.03	1.07	62.30

Nota: Las diferencias en numeración entre las diferentes filas es la agrupación según el grado de asociación de las IF (familias FIF) y de IF aisladas.

En los histogramas que se muestran (Ver Figura 60), se puede observar que las temperaturas de homogeneización (Th °C) para el cuarzo relacionado con la mineralización económica está entre 200 y 300°C y salinidad entre 2 y 5 % eq. peso NaCl.

Figura 6082

Histograma de temperatura de homogeneización y salinidad

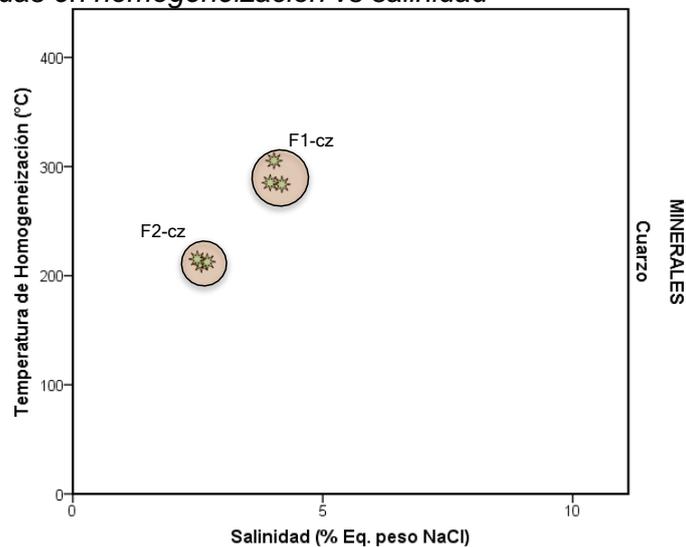


Nota: Histogramas vs números de cuentas.

Se puede observar (Ver Figura 61), dos posibles poblaciones; la primera población (F1-cz), presenta temperaturas entre 280 y 310 °C con salinidades entre 3 y 4 % eq. peso NaCl; seguida de una segunda población (F2-cz), la cual presenta temperaturas de homogeneización (Th °C) entre 210 y 220 °C con salinidades entre 2 y 3 % eq. peso NaCl.

Figura 61

Familias identificadas en homogeneización vs salinidad

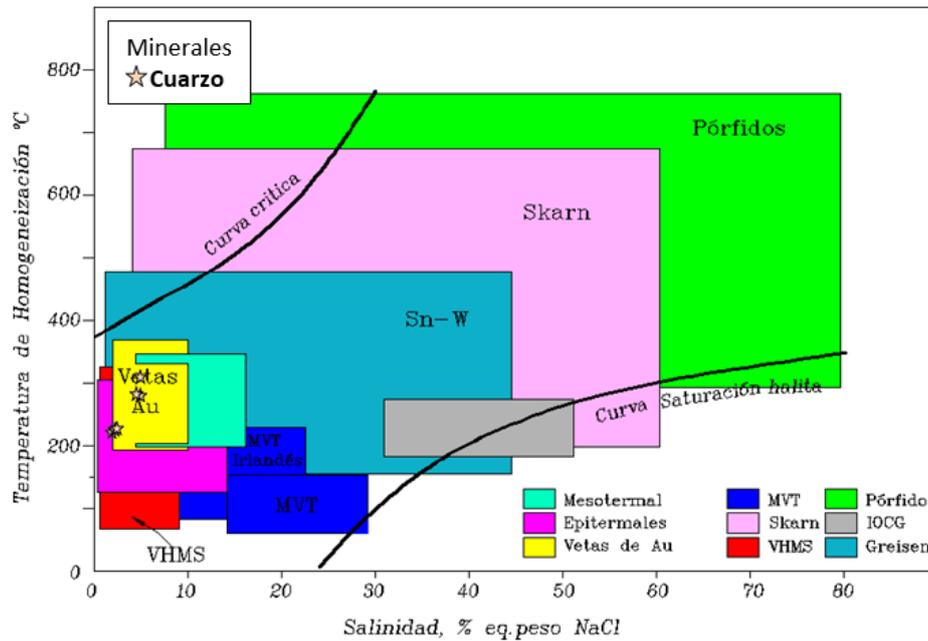


Nota: Familias identificadas en minerales de cuarzo.

Según el diagrama modificado de Wilkinson (2001) se trata de fluidos que corresponden a depósitos de vetas de oro en contacto con depósitos mesotermales (Ver Figura 62).

Figura 6283

Diagrama temperatura de homogeneización vs salinidad



Nota: Modificado de Wilkinson (2001).

Muestra AT-IF-011

A continuación, se detalla la descripción microscópica en luz transmitida (LT) y luz reflejada (LR) de la muestra AT-IF-011.

Figura 63

Muestra macroscópica AT-IF-011

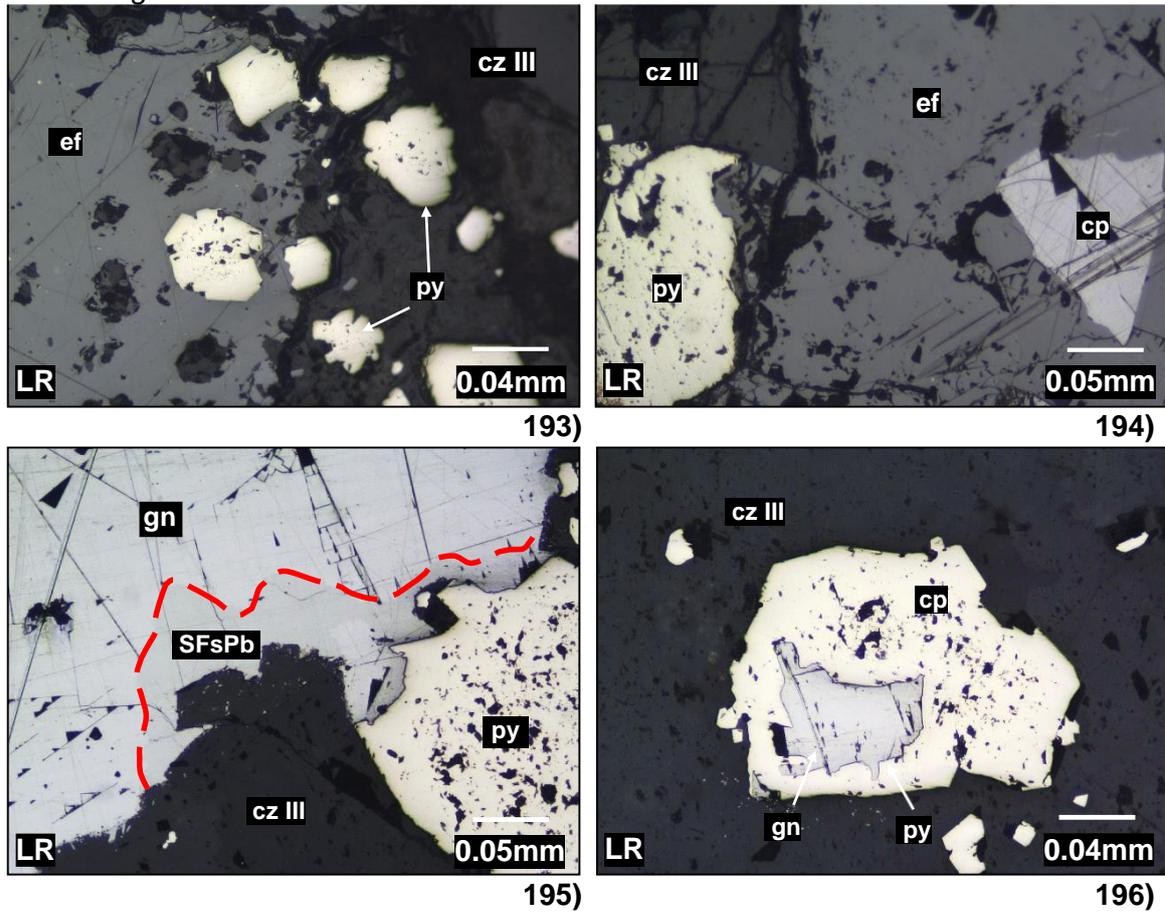


Nota: Nexa Resources Atacocha.

Fotomicrografías LR: 193) Cristales subhedrales cúbicos de pirita (py) contenidos en esfalerita (ef) y cuarzo de relleno (cz III); **194)** Intercrecimientos entre pirita (py), esfalerita (ef) y galena (gn); **195)** Sulfosales de plomo (SFsPb) reemplazando a la galena (gn) desde los bordes; en contacto con pirita (py); **196)** Galena (gn) ocupando cavidad en cristal subhedral de pirita (py); está contenido en cuarzo de relleno (cz III) (Ver Figura 64).

Figura 64

Fotomicrografías LR- AT-IF-011

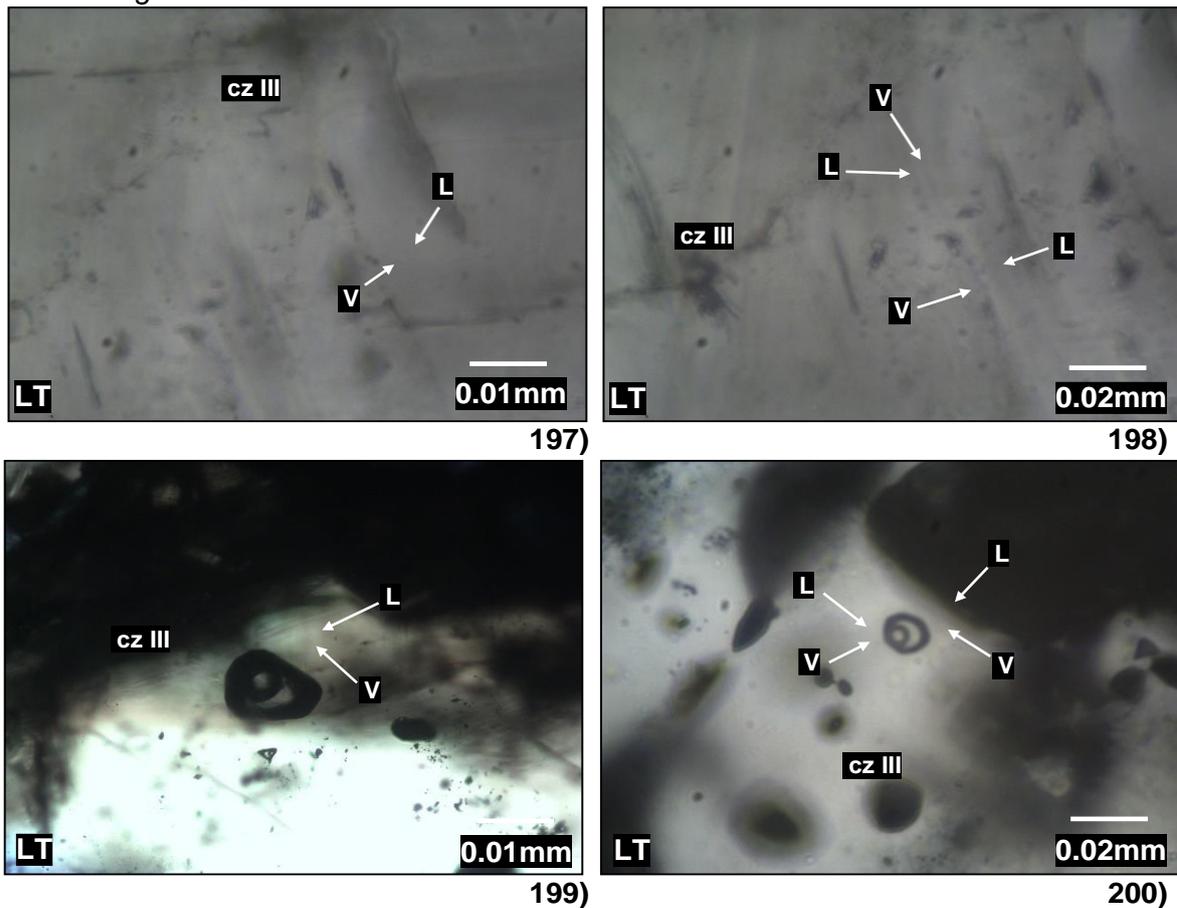


Nota: Fotomicrografías en Luz Reflejada (LR).

Fotomicrografías LT: 197 a 200 inclusiones fluidas primarias bifásicas ricas en líquido de tipo L con formas irregulares y con tamaños de 8 μm en carbonatos; además de formas subredondeadas y con tamaños desde 5 hasta 40 μm capturas en esfalerita (Ver Figura 65).

Figura 65

Fotomicrográficas LT- AT-IF-011



Nota: Fotomicrografías en Luz Transmitida (LT).

En la tabla 22 se muestran los datos del análisis microtermométrico de temperatura de homogeneización y salinidad realizados.

Tabla 22

Datos microtermométricos de la muestra AT-IF-011

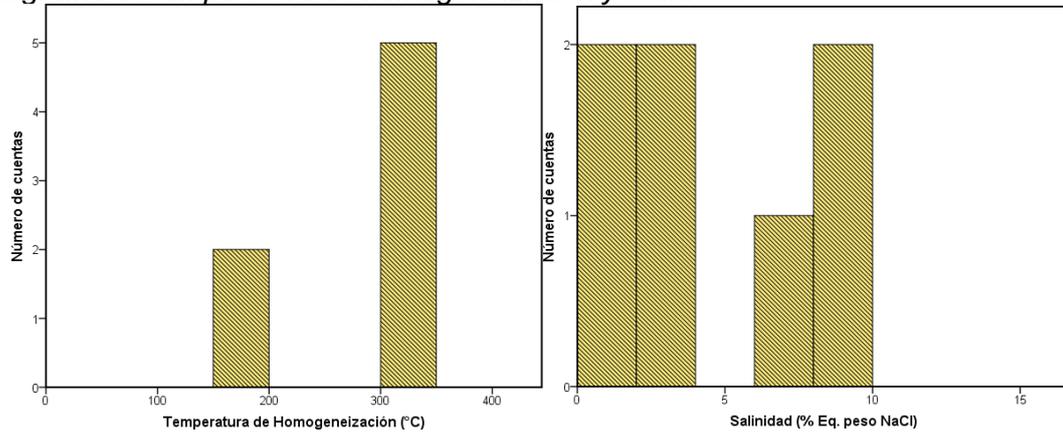
Nº	MUESTRA	CLAF.	MIN	TIPO	Øµ	FILL (L/V)	-Tf (°C)	Th (°C)	NaCl (wt%)	ρ(g/cm ³)	P (bar)
1	S2 046042	BIF	ef	P-Lw	18	0.80	3.70	320.00	6.01	1.07	75.09
1	S2 046042	BIF	ef	P-Lw	9	0.70	2.05	315.60	3.47	1.07	71.07
2	S2 046042	BIF	ef	P-Lw	8	0.80	2.18	318.40	3.68	1.07	73.61
1	S2 046042	BIF	ef	P-Lw	40	0.50	5.20	308.00	8.14	1.07	64.46
2	S2 046042	BIF	ef	P-Lw	34	0.60	5.35	305.60	8.34	1.07	62.46
1	S2 046042	BIF	cz	P-Lw	8	0.80	0.40	179.40	0.70	1.13	7.50
2	S2 046042	BIF	cz	P-Lw	7	0.80	0.50	170.80	0.88	1.13	6.19

Nota: Las diferencias en numeración entre las diferentes filas es la agrupación según el grado de asociación de las IF (familias FIF) y de IF aisladas.

En los histogramas que se muestran (Ver Figura 66), puede observar que las temperaturas de homogeneización (Th °C) para el cuarzo relacionado con la mineralización económica está entre 170 y 320 °C y salinidad entre 0.5 y 8.5 % eq. peso NaCl.

Figura 66

Histograma de temperatura de homogeneización y salinidad

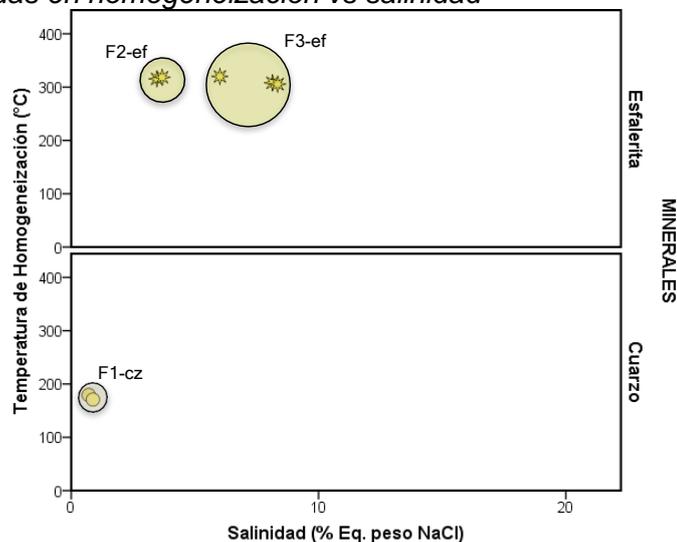


Nota: Histogramas vs números de cuentas.

Se puede observar (Ver Figura 67), tres posibles poblaciones; la primera población (F1-cz), se encuentra entre 170 y 180°C con salinidades menores a 1 % eq. peso NaCl; seguida de una segunda población (F2-ef), la cual presenta temperaturas de homogeneización (Th °C) entre los 315 a 320 °C con salinidades entre 3 y 4 % eq. peso NaCl; además de una tercera población (F3-ef), con temperatura de homogeneización entre 300 y 320°C con salinidades entre 6 y 8.5 % eq. peso NaCl.

Figura 67

Familias identificadas en homogeneización vs salinidad

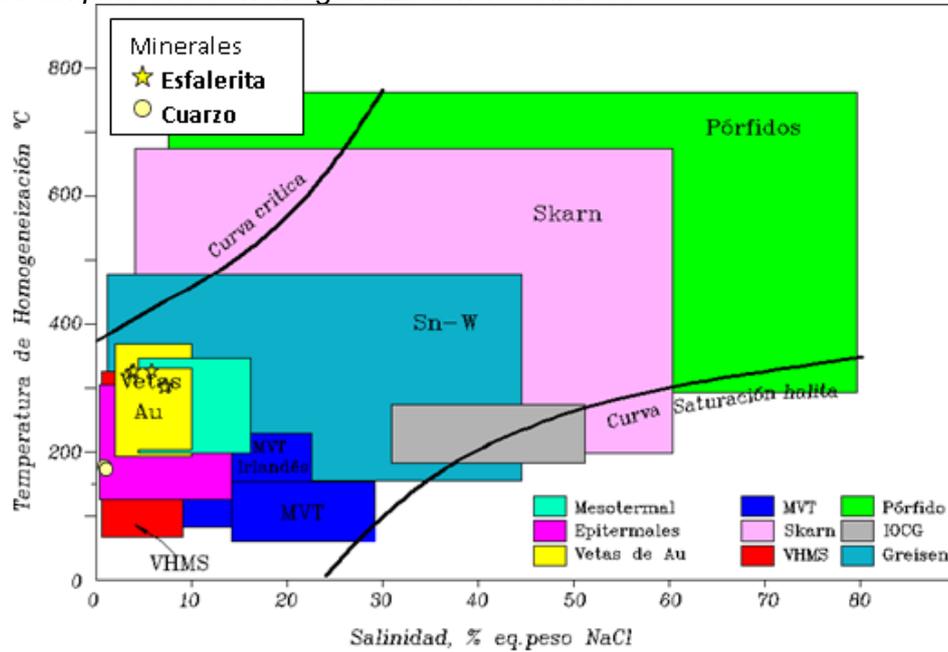


Nota: Familias identificadas en minerales de cuarzo y esfalerita.

Según el diagrama modificado de Wilkinson (2001) se trata de fluidos que corresponden a depósitos de vetas de oro en contacto con depósitos epitermales (Ver Figura 68).

Figura 68

Diagrama temperatura de homogeneización vs salinidad



Nota: Modificado de Wilkinson (2001).

Muestra AT-IF-012

A continuación, se detalla la descripción microscópica en luz transmitida (LT) y luz reflejada (LR) de la muestra AT-IF-012.

Figura 69

Muestra macroscópica AT-IF-012

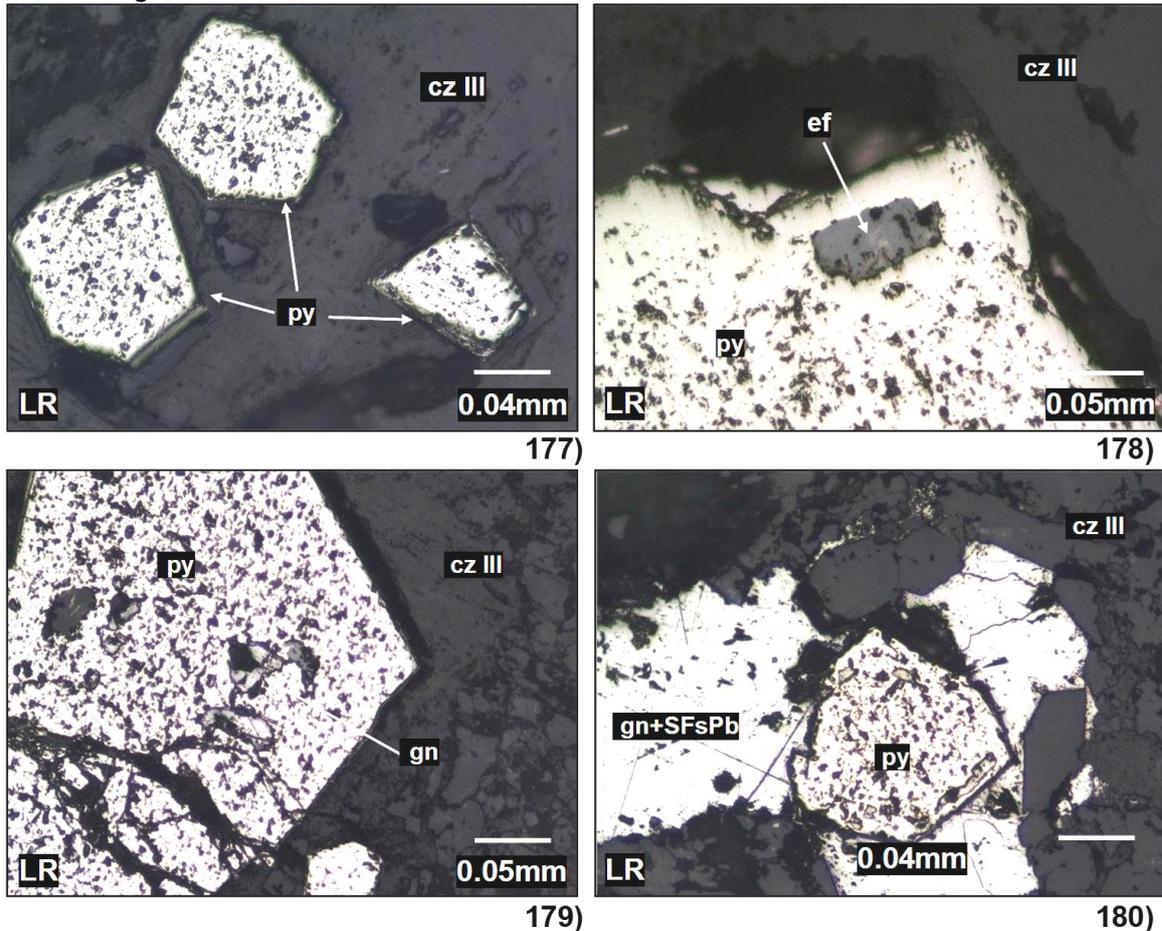


Nota: Nexa Resources Atacocha.

Fotomicrografías LR: 177) Cristal euhedrales de pirita (py) contenidos en cuarzo de relleno (cz III); **178)** Inclusión de esfalerita (ef) en pirita (py); **179)** Inclusión de galena (gn) en pirita (py); **180)** Cristal subhedral de pirita (py) intercrecido con galena (gn) que está reemplazada por sulfosales de plomo (SFsPb) (Ver Figura 70).

Figura 70

Fotomicrografías LR- AT-IF-012

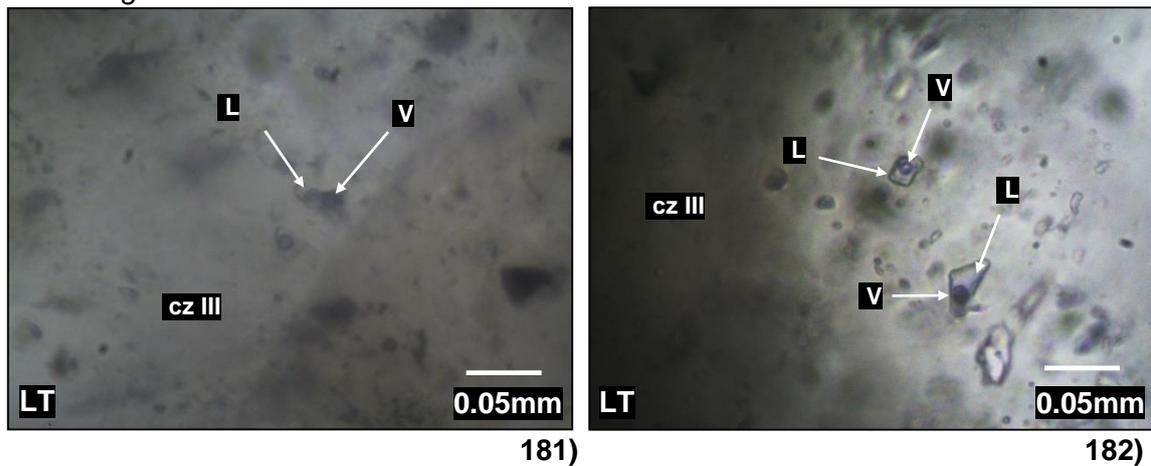


Nota: Fotomicrografías en Luz Reflejada (LR).

Fotomicrografías LT: 181 a 182 inclusiones fluidas primarias bifásicas ricas en líquido de tipo L con formas subredondeadas y ovaladas con tamaños hasta de 12 μ m capturas en cuarzo de relleno (cz III) (Ver Figura 71).

Figura 71

Fotomicrográficas LT- AT-IF-012



Nota: Fotomicrográficas en Luz Transmitida (LT).

En la tabla 23 se muestran los datos del análisis microtermométrico de temperatura de homogeneización y salinidad realizados.

Tabla 23

Datos microtermométricos de la muestra AT-IF-012

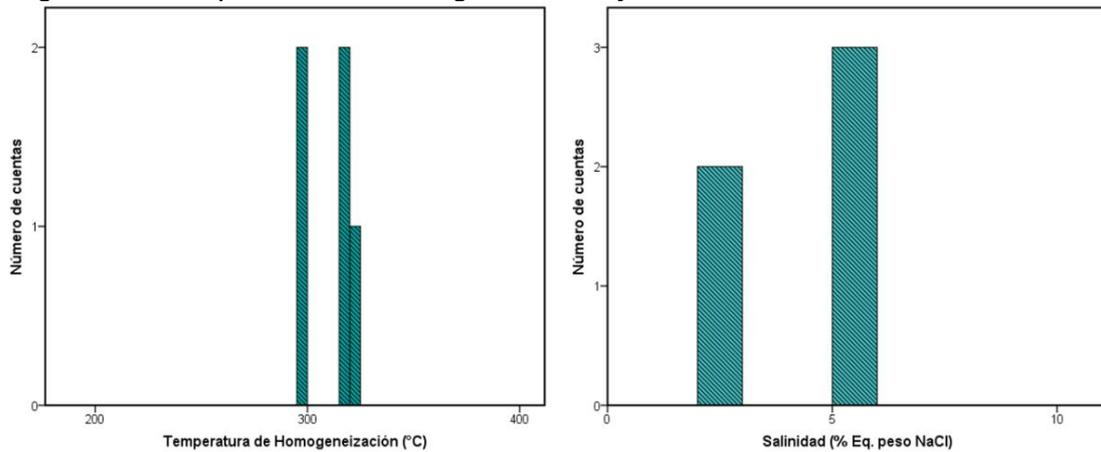
Nº	MUESTRA	CLAF.	MIN	TIPO	Øµ	FILL (L/V)	-Tf (°C)	Th (°C)	NaCl (wt%)	ρ(g/cm ³)	P (bar)
1	S2 1439	BIF	cz	P-Lw	8	0.60	3.50	318.00	5.71	1.07	73.24
2	S2 1439	BIF	cz	P-Lw	12	0.50	3.15	319.70	5.19	1.07	74.81
3	S2 1439	BIF	cz	P-Lw	9	0.80	3.45	321.20	5.64	1.07	76.21
1	S2 1439	BIF	cz	P-Lw	8	0.70	1.50	298.40	2.57	1.07	56.73
2	S2 1439	BIF	cz	P-Lw	7	0.60	1.35	297.50	2.32	1.07	56.04

Nota: Las diferencias en numeración entre las diferentes filas es la agrupación según el grado de asociación de las IF (familias FIF) y de IF aisladas.

En los histogramas que se muestran (Ver Figura 72), se puede observar que las temperaturas de homogeneización (Th °C) para el cuarzo relacionado con la mineralización económica está entre 300 y 320 °C y salinidad entre 2 y 6 % eq. peso NaCl.

Figura 72

Histograma de temperatura de homogeneización y salinidad

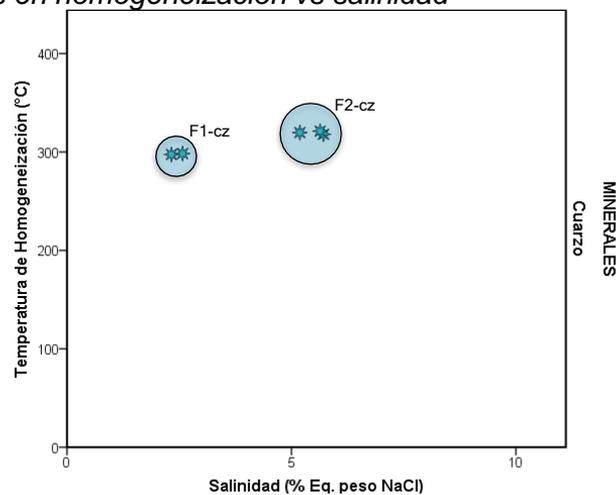


Nota: Histogramas vs números de cuentas.

Se puede observar (Ver Figura 73), dos posibles poblaciones; la primera población (F1-cz), presenta temperaturas cerca a los 300 °C con salinidades entre 2 y 3 % eq. peso NaCl; seguida de una segunda población (F2-cz), la cual presenta temperaturas de homogeneización (Th °C) promedio de 320 °C con salinidades entre 5 y 6 % eq. peso NaCl.

Figura 73

Familias identificadas en homogeneización vs salinidad

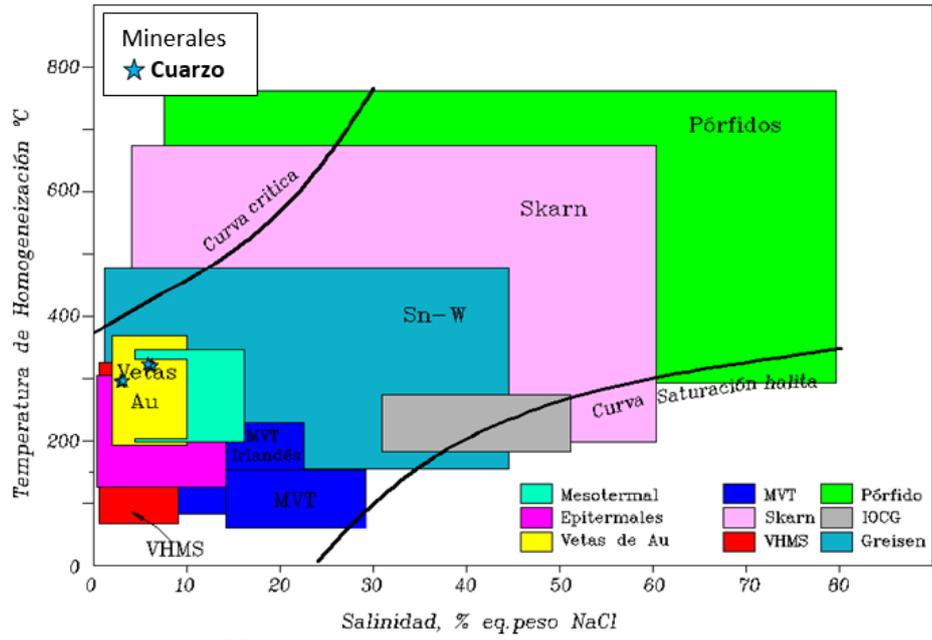


Nota: Familias identificadas en minerales de cuarzo.

Según el diagrama modificado de Wilkinson (2001) se trata de fluidos que corresponden a depósitos de vetas de oro (Ver Figura 74).

Figura 74

Diagrama temperatura de homogeneización vs salinidad



Nota: Modificado de Wilkinson (2001).