

APORTES AL CONOCIMIENTO DE LA METALOGÉNESIS DEL Au EN LA MINA LA
PROVIDENCIA (MUNICIPIO DE VETAS, MACIZO DE SANTANDER)

DAYANNA STEPHANY GRIMALDOS MARTÍNEZ

EDITH GISELA BARRERA ROJAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA

2016

APORTES AL CONOCIMIENTO DE LA METALOGÉNESIS DEL Au EN LA MINA LA
PROVIDENCIA (MUNICIPIO DE VETAS, MACIZO DE SANTANDER)

DAYANNA STEPHANY GRIMALDOS MARTÍNEZ

EDITH GISELA BARRERA ROJAS

TESIS DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

LUIS CARLOS MANTILLA FIGUEROA
GEÓLOGO PHD.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

A Dios, por todas sus bendiciones y por permitirme culminar exitosamente esta etapa.

A mis padres, Fernando y Cruz Delina, quienes con su esfuerzo, dedicación y amor incondicional han hecho de mí una gran persona.

A mi hermana, Yaneira, por su compañía, amor y cariño absoluto. Por ser mi compañera de vida.

A mi tío, Jairo, quien ha sido parte fundamental de este logro, por su colaboración, solidaridad y apoyo.

A mi geólogo, Luis Fernando, por su apoyo, comprensión y amor incondicional. Gracias por recorrer conmigo el camino de la vida.

A los angelitos que me cuidan desde el cielo, Ramiro y Oliva.

A mis amigos por su sincero e incondicional apoyo.

A todos mis familiares y demás personas, que de una u otra manera han hecho parte de este logro.

Gisela B.

DEDICATORIA

Dedicada principalmente a Dios y a mis padres por brindarme su amor, apoyo incondicional y sus consejos. Gracias por enseñarme que con esfuerzo puedo lograr todos mis sueños, sin ustedes este logro no hubiese sido posible.

A mi hermano y mi cuñada por estar para mí cuando más los he necesitado y darme el mejor regalo del mundo.

A mi sobrino por llenar de alegría mi vida y ser mi motivación.

A mis amigos por brindarme su amistad y ayuda a lo largo de los años.

Dayanna G.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras del presente proyecto queremos agradecer al Grupo de Investigación de Geología Básica y Aplicada, por permitirnos utilizar sus laboratorios e instalaciones para la realización de los estudios.

Al director de la tesis Ph.D. Luis Carlos Mantilla Figueroa, por su colaboración, generosidad y apoyo incondicional en la elaboración del proyecto.

A la Sociedad Minera La Providencia LTDA, por permitirnos realizar este proyecto en su empresa y por el suministro de la información necesaria, especialmente al señor Jairo Barrera, por su colaboración y acompañamiento en las campañas de campo.

A todas y cada una de las personas que ayudaron e hicieron parte de la realización de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. OBJETIVOS	20
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
2. GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO	21
3. ANTECEDENTES Y CONTEXTO GEOLÓGICO.....	24
3.1. ESTRATIGRAFÍA Y TECTÓNICA.....	24
3.2. GEOLOGÍA ECONÓMICA.....	25
4. MARCO GEOLÓGICO	26
4.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	26
4.2 MARCO GEOLÓGICO LOCAL	27
4.2.1. Distrito Minero de Vetas-California	27
4.2.2. Mina La Providencia.....	30
4.3. ESTRATIGRAFÍA	33
5. MARCO TEÓRICO	35
5.1 PETROGRAFÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS.....	36
5.2 MICROTERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS.....	37
5.2.1 Cálculos de salinidad, densidad, presión y profundidad de las inclusiones fluidas	38
6 METODOLOGÍA.....	43
7 RESULTADOS	48
7.1 VARIEDADES LITOLÓGICAS A ESCALA DEL DEPÓSITO LA PROVIDENCIA. 48	48
7.1.1. Gneis de Bucaramanga	48
7.1.2. Grupo plutónico de Santander (Leucogranitos)	50
7.2 ALTERACIONES HIDROTERMALES Y MINERALIZACIÓN ASOCIADA.....	52
7.2.2. Evento II (Alteración sericítica).....	55
7.2.3. Evento III. Alteración argílica avanzada (Qz+Kln+Dck)	59
7.2.4. Evento IV (alteración argílica avanzada Qz+Alu y silicificación):	67
7.2.5. Alteración Supérgena: Jarosita, calcantita y óxidos como minerales característicos	76
7.3 TEXTURAS DEL CUARZO.....	78
7.4 RESUMEN DE LOS CONTEXTOS PARAGENÉTICOS ASOCIADOS A LOS DIFERENTES EVENTOS DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL Y MINERALIZACIÓN ASOCIADA.....	80
7.5 PETROGRAFÍA Y MICROTERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS EN CRISTALES DE CUARZO.	84

7.6.1 Petrografía de Inclusiones fluidas Mina La Providencia	85
7.5.1. Microtermometría de inclusiones fluidas en cristales de cuarzo.....	93
8 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	95
8.1 PETROGRAFÍA Y MICROTERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS.....	99
9 CONCLUSIONES	106
10 RECOMENDACIONES.....	108
BIBLIOGRAFIA	109

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura. 1: Localización del Municipio de Vetas, Santander y mapa geológico de parte del distrito minero de Vetas y California donde se muestra la ubicación de la mina La Providencia.	21
Figura 2: Mapa topográfico donde se observa el polígono que delimita la Mina La Providencia.	22
Figura 3: Imagen ilustrativa, en la cual se señalan las vías de acceso a la zona de estudio.....	23
Figura 4: Mapa de localización del Macizo de Santander, ubicado en la intersección entre el Terreno Chibcha y la Subplaca de Maracaibo.	26
Figura. 5: Localización de Distrito Minero de Vetas-California (DMVC) en relación al Terreno Chibcha (Ch) y el Dominio de la Subplaca de Maracaibo (MSP) donde se observan los sistemas de fallas que dividen estos bloques tectónicos, en la figura de la derecha se observa el Mapa geológico de un sector del departamento de Santander donde se ubica el Distrito Minero de Vetas-California.	28
Figura 6: Mapa geológico de una sección de la Plancha H-13, donde se observan las principales unidades geológicas aflorantes en el Distrito Minero de Vetas-California y la ubicación de la mina La Providencia.	29
Figura 7: Mapa geológico de la mina La Providencia donde se observa el trazo de los túneles y las vías de acceso.	31
Figura 8: Mapa geológico del Distrito Minero de Vetas-California.....	33
Figura 9: Esquema de la clasificación de inclusiones fluidas según su génesis: primarias (P), secundarias (S) y pseudosecundarias (Ps) en un cristal de cuarzo; b. clasificación de inclusiones fluidas según sus componentes observados a temperatura ambiente.....	37
Figura. 10: Esquemas de inclusiones fluidas bifásicas con distintas morfologías, para determinar el grado de relleno (F).....	39
Figura 11: Grafica que relaciona el grado de relleno de la inclusión y la densidad total para diferentes salinidades.....	40
Figura 12: Densidad de los fluidos en un sistema H ₂ O-NaCl. Las isocoras se basan en los datos obtenidos de Haas (1971); Copeland y Cols, 1953 y Urusova, 1975; Ahmad y Rose (1980).	41
Figura 13: Monograma para determinar Ph, para inclusiones fluidas bifásicas, a partir de T _{m ice} y Th... ..	42
Figura 14: Esquema metodológico.....	43
Figura 15: Imágenes del laboratorio del microscopio electrónico de barrido.	44
Figura 16: Microscopio de luz transmitida al cual se le adapta una platina calentadora-enfriadora marca Linkam modelo THMS 600, que es controlado por dos consolas encargadas de regular la tasa de cambio de la temperatura y la cantidad de nitrógeno inyectado al equipo.....	46
Figura 17: Mapa geológico de la mina La Providencia.	48

Figura 18: Aspecto a escala de afloramiento, macroscópico y microscópico de los gneises pertenecientes a la unidad Gneis de Bucaramanga.	49
Figura 19: Aspecto a escala macroscópica y microscópica de los granitoides pertenecientes al Grupo Plutónico de Santander observados en la Mina La Providencia.	51
Figura 20: Aspecto microscópico en el que se observa la presencia de relictos de minerales ígneos como la monacita.	52
Figura 21: Aspecto a escala macroscópica y microscópica de las muestras afectadas por alteración propilítica.	53
Figura 22: Aspecto a escala de microscopía electrónica donde se observa la presencia de calcita como evidencia de alteración propilítica, sobreimpuesta a esta alteración se presenta sericita (Muestra GD-03-06).	54
Figura 23: Aspecto a escala macroscópica y microscópica de las rocas afectadas por alteración sericítica.	55
Figura. 24: Aspecto a escala de microscopía electrónica de las rocas afectadas por alteración sericítica. a. Microfotografía donde se observa la presencia de sericita alterando los cristales de albita y en algunos sectores sobreimpuesta a la alteración propilítica además se observan los minerales leucoxeno y magnetita (muestra GD-03-06).	56
Figura. 25: Imágenes SEM donde se observan las vetillas asociadas a la alteración sericítica.	57
Figura 26: Aspecto de afloramientos observados en el túnel de la Mina La Providencia.	58
Figura 27: Aspecto en muestra de mano de las brechas hidrotermales.	60
Figura 28: Aspecto a escala microscópica de las brechas hidrotermales.	60
Figura. 29: Aspecto a escala microscópica de la parte distal de la zona alteración argílica avanzada.	61
Figura. 30: Aspectos microscópicos de las venas de Qz+Ccp+Py.	63
Figura 31: Aspectos microscópicos de las venas de Qz+Py+Sph; Fotografías SEM donde se observa la presencia de venas de cuarzo + pirita + esfalerita pobre en Fe y leucoxeno (Muestra GD-11-21).	64
Figura. 32: Aspectos microscópicos de las venas de Qz+Py+Sph formando estructuras de tipo stockworks.	65
Figura 33: Aspecto macroscópico y microscópico de la secuencia de bandas del último contexto paragenético.	66
Figura 34: Aspecto macroscópico y microscópico de rocas afectadas por alteración Qz+Alu.	68
Figura 35: Aspectos microscópicos de las rocas afectadas por silicificación; a y b. Microfotografías donde se observa el intercrecimiento de microcristales de cuarzo entre los relictos de cuarzo de la roca caja (Muestra GD-11-21-2).	70
Figura. 36: Aspectos microscópicos de las venas de Qz+Alu+Py. Imágenes SEM de la secuencia de venas, en esta imagen resalta la presencia de una vena de Alu +Qz+ Py con relictos de cristales alargados de Hüb, cristales de cuarzo y pirita.	71

Figura 37: Aspecto de afloramiento observados en el túnel de la Mina La Providencia, donde se observa Neis biotítico afectado por un evento de alteración argílica avanzada, donde también se identifica la presencia de venas de cuarzo y alunita.....	72
Figura 38: Imágenes SEM a. Alunita pura con pequeños cristales de posible esfalerita y b. Jarosita, alunita y pequeños cristales de esfalerita pobre en hierro	73
Figura 39: Aspectos macroscópicos bajo lupa binocular en las que se observa la presencia de oro libre asociado con diferentes minerales como enargita, esfalerita, teluros y pirita.....	74
Figura 40: Aspectos macroscópicos de las muestras hospedantes de la mineralización.	76
Figura 41: Aspectos a escala microscópica de las rocas afectadas por alteración supérgena.....	77
Figura 42: Aspecto de afloramiento observado en el túnel de la Mina La Providencia, en el cual se identifican la secuencia de eventos paragenéticos presentes. Estación GD-08. Neis biotítico cortado por un evento de alteración filica, a la cual se le sobrepone un evento de alteración argílica avanzada caracterizada por la presencia de cuarzo+caolinita+alunita y venas de alunita. Finalmente se presenta un último evento de alteración evidenciado por la presencia de una vena de cuarzo + pirita	83
Figura 43: Aspecto de afloramiento, macroscópico y microscópico (estación GD-06)..	85
Figura 44: Aspecto microscópico donde se observan inclusiones fluidas, NII 40 X (muestra GD-06-12). Imágenes donde se observa la asociación de Inclusiones fluidas 1 (AIF 1) caracterizada por Inclusiones fluidas con atrapamiento heterogéneas, primarias, bifásicas tipo I y Tipo II con relaciones L/V variables.	87
Figura. 45: Petrografía de inclusiones fluidas, NII 40 X, sección delgada de la muestra GD-06-12. Imágenes donde se observa la asociación de Inclusiones fluidas 2 (AIF 2) la cual presenta atrapamiento homogéneo de inclusiones pseudosecundarias tipo I. a y b presentan proporciones L/V 80/20.	88
Figura 46: Petrografía de inclusiones fluidas, NII 40 X, sección delgada de la muestra GD-06-12. Imágenes donde se observa una asociación de inclusiones fluidas con atrapamiento homogéneo de inclusiones fluidas Primarias (P) Bifásicas Tipo II (AIF 3) que presentan relación L/V, 30/70.	88
Figura 47: Petrografía de inclusiones fluidas, NII 40 X, sección delgada de la muestra a. GD-06-12 y b. GD-08-16, donde se identifica la asociación de inclusiones primarias tipo I (AIF 4), relación L/V 70/30.	89
Figura 48: Petrografía de inclusiones fluidas, NII 40 X, sección delgada de la muestra GD-06-12. Imágenes donde se observa asociación AIF 5 la cual presenta un atrapamiento heterogéneo de inclusiones pseudosecundarias tipo I y tipo II. a. Se observan dos tipos de asociaciones AIF 5 con inclusiones tipo I ($L > V$, 70/30) y tipo II ($L < V$, 20/80) y AIF 4.	89
Figura. 49: Petrografía de inclusiones fluidas, NII 40 X, sección delgada de la muestra GD-06-12. Imágenes donde se observa asociación AIF 6.	90
Figura. 50: Petrografía de inclusiones fluidas, NII 40 X, sección delgada de la muestra GD-06-12. Imágenes donde se observa asociación AIF 7.	91
Figura 51: Petrografía de inclusiones fluidas, NII 40 X, sección delgada de la muestra GD-06-12. Imágenes donde se observa asociación AIF 8.	92
Figura 52: Microfotografía (40x) en la que se observa la AIF 9. a. Muestra GD-06-12; b. Muestra GD-09-19.....	92

Figura 53: Diagrama donde se observa el patrón de zonificación alteración-mineralización de los depósitos tipo pórfido de Cu.	95
Figura 54: Diagrama donde se muestran los estados de sulfuración de magmas y su relación con minerales de sulfuración a 1 bar. La línea roja es la representación del rango de minerales dentro de la secuencia paragenética de la Mina La Providencia y la evolución del fluido hidrotermal. El fluido presenta condiciones de baja sulfuración en la primera etapa de mineralización, seguido de intermedia sulfuración y en las últimas etapas del sistema se presentan condiciones de alta sulfuración asociadas a la depositación de oro.	96
Figura 55: a. Aspecto microscópico donde se observan cristales de hübnerita asociados con la textura crustiforme; b. Aspecto microscópico de los relictos de cuarzo, pirita y hübnerita dentro de una vena de Alu + Qz + Py producto de un evento posterior.	98
Figura 56: Diagrama Temperatura (°C) vs Densidad (g/cm ³) del sistema H ₂ O en el que se muestran los tipos principales de homogenización de inclusiones según su densidad.	100
Figura 57: Diagrama esquemático que muestra los espacios de tendencia típicos de Th y salinidad debidos a varios procesos de evolución de fluidos.	101
Figura. 58: Grafica Th Vs Salinidad en la que se muestra la tendencia de las inclusiones fluidas de la AIF 1 al campo de ebullición y ebullición enfriamiento, basado en el diagrama mostrado en la figura anterior.	102
Figura 59: Gráfica de Profundidad (m) vs Temperatura de homogenización (°C) para las muestras GD-06-12.	103
Figura 60: Diagrama ternario del sistema H ₂ O-NaCl-KCl utilizado para la determinación de la proporción de sales disueltas.	104
Figura 61: Th Vs Salinidad en la que se muestra la tendencia de las inclusiones fluidas de la AIF 1, basado en el diagrama de Velasco (2004).	105

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Lista de abreviaciones de los minerales.....	45
Tabla 2: Texturas del cuarzo observadas en la Mina La Providencia.....	78
Tabla 3: Relaciones minerales y alteraciones presentes en la mina La Providencia.....	81
Tabla 4: Secuencia paragenética de la Mina La Providencia. Tabla donde se observa la distribución de los minerales mena y ganga de acuerdo a su ocurrencia dentro de los distintos estilos de mineralización hidrotermal determinados en base a los tipos de alteración. La continuidad y grosor de las líneas indica la abundancia de cada mineral.	82
Tabla 5: Caracterización de inclusiones fluidas en la Mina La Providencia y nomenclatura asociada.....	86
Tabla 6: Datos y resultados obtenidos a partir de análisis microtermométrico de inclusiones fluidas del Evento II de alteración-mineralización. Los datos de inclusiones fluidas resaltados no se tuvieron en cuenta a la hora de la interpretación ya que estos datos son erróneos debido a que son de inclusiones ricas en vapor de una asociación heterogénea.....	94

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Mapa geológico de una sección de la Plancha H-13, donde se observa la ubicación de la mina La Providencia.

Anexo B. Mapa geológico de la mina La Providencia.

Anexo C. Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM).

Anexo D. Informe de análisis de difracción de rayos X en muestras de alunita.

NOTA: LOS ANEXOS DE ESTE PROYECTO PUEDEN CONSULTARSE EN LA BIBLIOTECA DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER: SALA BASE DE DATOS.

RESUMEN

TITULO: APORTES AL CONOCIMIENTO DE LA METALOGÉNESIS DEL AU EN LA MINA LA PROVIDENCIA (MUNICIPIO DE VETAS, MACIZO DE SANTANDER). *

AUTORES: DAYANNA STEPHANY GRIMALDOS MARTINEZ; EDITH GISELA BARRERA ROJAS. **

PALABRAS CLAVES: Mineralización porfirítica, Mineralización epitermal, venas, brechas hidrotermales, eventos de alteración hidrotermal-mineralización, Contexto paragenético, sulfuración intermedia, alta sulfuración, inclusiones fluidas, oro.

DESCRIPCIÓN:

La Providencia es un depósito mineral con estilos de mineralización porfirítico y epitermal; localizado a 1.2km al NW del Municipio de Vetas (Distrito Minero Vetas-California); el cual se hospeda mayoritariamente en rocas metamórficas temporalmente relacionadas con la orogenia Grenviliense y en menor medida en rocas ígneas de finales del Triásico Tardío-comienzos del Jurásico Temprano. Los cuerpos mineralizados de mayor interés en este depósito están representados en venas y brechas hidrotermales.

Los eventos de alteración hidrotermal-mineralización, reconocidos a escala del depósito, están representados por los siguientes eventos de estilo porfirítico: (a) Evento I (alteración propilítica), relacionado con la presencia de clorita-epidota-calcita-cuarzo-pirita; (b) Evento II (alteración sericitica), asociado a la presencia de venas de cuarzo-pirita y cuarzo-pirita-arsenopirita. Los eventos de estilo epitermal, están representados por: (c) Evento III (Zona distal de la alteración argílica avanzada) el cual se asocia a un estado de intermedia sulfuración relacionado con la presencia de venas de cuarzo-pirita-calcopirita, venas de cuarzo-pirita-esfalerita pobre en Fe y venas con textura crustiforme de cuarzo-pirita-galena-hübnerita; y (e) Evento IV (alteración Qz-Alu y silicificación) incluye venas de cuarzo-alunita-pirita, venas de alunita-esfalerita pobre en Fe y zonas con sílice residual en donde se presenta el ultimo contexto paragenético cuarzo-enargita-esfalerita-Au-pirita-teluros. Éste último evento, ha sido interpretado como formado bajo condiciones de alta Sulfuración. La mineralogía referida en cada uno de los eventos es afectada en diferente grado por procesos de alteración supérgena.

Los estudios de Inclusiones Fluidas Primarias en cuarzos relacionados con el evento II, sugieren que éste estuvo relacionado a fluidos acuoso-salinos con temperaturas entre 260-320°C y con salinidades variables de 4-16% en peso.

Los datos anteriormente mencionados, apuntan a que los eventos de alteración-mineralización en el área del municipio de Vetas, son muy similares a los reportados a lo largo de la Quebrada La Baja (Municipio de California).

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Luis Carlos Mantilla Figueroa.

ABSTRACT

TITLE: CONTRIBUTIONS TO THE GEOLOGICAL KNOWLEDGE OF THE AU METALLOGENESIS IN THE PROVIDENCIA MINE (VETAS, SANTANDER MASSIF). *

AUTHORS: DAYANNA STEPHANY GRIMALDOS MARTINEZ; EDITH GISELA BARRERA ROJAS. **

KEYWORDS: Hydrothermal alterations, Veins, Mineral paragenesis, Mineralization stages, Fluid inclusions, Gold.

DESCRIPTION

La Providencia is a mineral deposit by means of porphyritic and epithermal style; it is located 1.2 km to the northwest of municipality of Vetás (Vetas- California Mining District); in which it is stayed mainly by metamorphic rocks related to the Grenvillian Orogeny and to a lesser degree by igneous rocks of finals of Late Triassic- beginnings of the Early Jurassic. The most interesting ore bodies in this deposit are represented by hydrothermal veins and gaps.

The events of hydrothermal-mineralization alteration, recognized by scaled deposit, are represented by the following events of porphyritic style: (a) Event I (propylitic alteration), related to the presence of chlorite-epidote-calcite-quartz-pyrite. (b) Event II (sericite alteration), associated to the presence of quartz-pyrite and quartz-pyrite-arsenopyrite veins. The events of epithermal style, are represented by: (C) Event III (advanced argillic alteration Qz+Kln+Dck) in which is associated to an state of intermedia sulfidation related to presence of quartz - pyrite – chalcopyrite veins, quartz - pyrite – Fe poor sphalerite veins, and veins using crustiform texture of quartz-pyrite-galena-hübnerite; and (e) Event IV (Qz-Alu alteration and silification) include quartz-alunite-pyrite veins, alunite- Fe poor sphalerite veins and area using residual silica where it presents the last paragenetic enargita-quartz-sphalerite-pyrite-Au-tellurides context. This last event has been interpreted as a form under the high sulfidation condition. The mineralogy referred in each one of the events is affected in different grade by supergene alteration process.

The studies of Primary Fluid Inclusions by quartz related to the Event II, suggest that this was related to the aqueous – saline fluids with temperatures between 260-320°C and with variable salinities of 4-16% by weight.

The above- mentioned data, indicate that the event of alteration – mineralization in the municipality of Vetás, are very similar to the brought events along the La Baja Gorge in the Municipality of California.

* Degree Work

** Faculty of Physic-Chemical Engineering. School of Geology. Director: Luis Carlos Mantilla Figueroa.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la metalogénesis de un determinado depósito mineral es una de las tareas geológicas básicas que permite, entre otros varios aspectos, identificar la fuente de los fluidos mineralizantes, sus efectos sobre las rocas por las cuales éstos circularon y se emplazaron, y los mecanismos que dieron lugar al transporte y la precipitación de sus metales asociados. El conocimiento derivado de estos estudios, aportan las bases necesarias para entender la formación y evolución de un depósito mineral, y por consiguiente contribuye también a conocer el potencial (en términos de los recursos del subsuelo) de un distrito minero e incluso de la franja metalogénica en la cual éste se localiza.

El Distrito Minero de Vetas-California (Macizo de Santander), es el único sector de la Cordillera Oriental de Colombia, en el cual se reconocen estilos de mineralización porfirítico y epitermal, relacionados a eventos magmáticos-hidrotermales de edad Neógeno. Los estudios sobre la metalogénesis de éste distrito se han concentrado en los últimos 10 años, mayoritariamente a lo largo de una franja de dirección aproximada NE-SW (Franja de la Quebrada la Baja), de aproximadamente 7 Km de longitud, localizada en el sector del Municipio de California. Contrariamente, los sectores mineralizados del área del Municipio de Vetas han sido comparativamente menos estudiados.

En el contexto de lo anteriormente mencionado, y con el propósito de contribuir al conocimiento sobre la metalogénesis del depósito de metales preciosos presentes en la Mina La Providencia (Vereda Borrero, Municipio de Vetas), se desarrolló el presente trabajo de proyecto de pre-grado ‘modalidad investigación’, bajo el auspicio del Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada (GIGBA) de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir al conocimiento de la metalogénesis del Au en la mina La Providencia (Municipio de Vetas, Macizo de Santander)

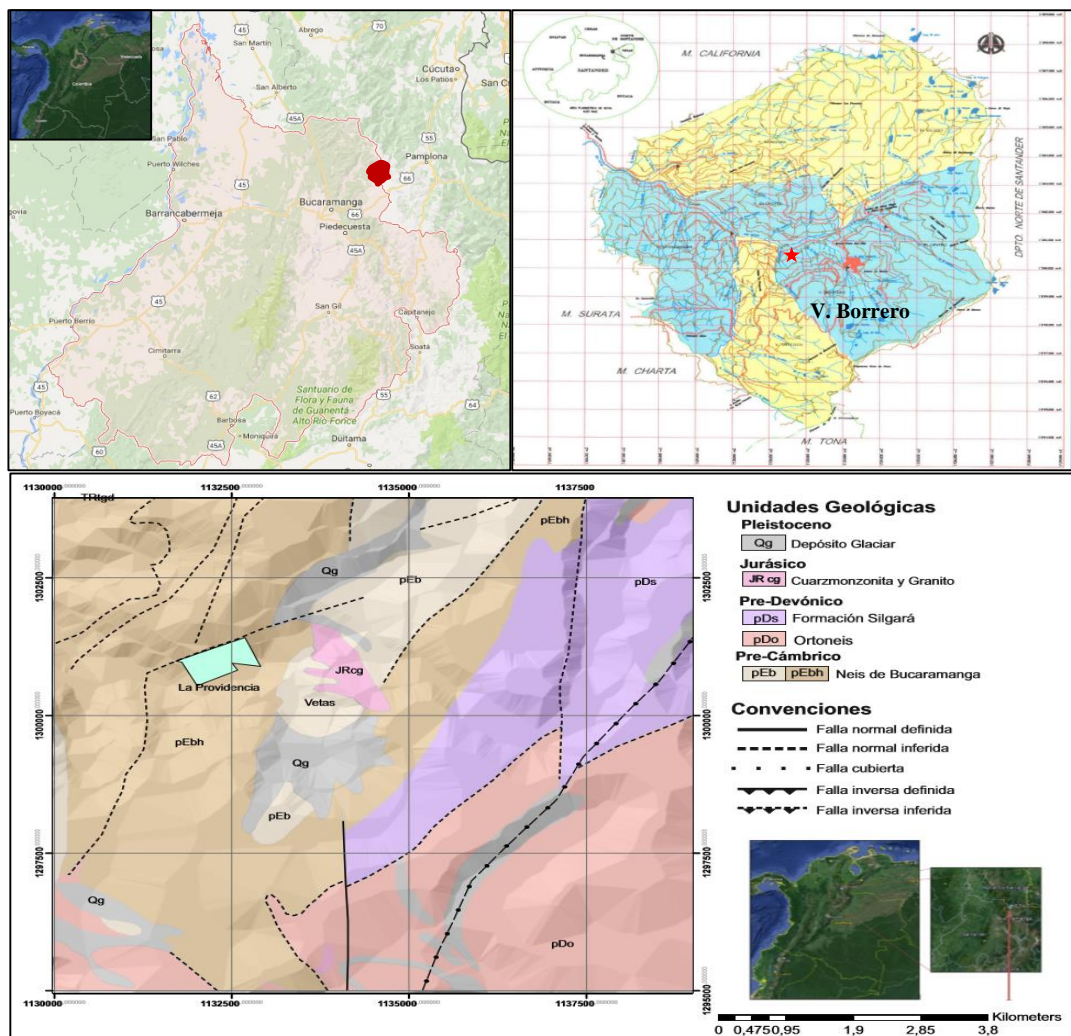
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una compilación y análisis de la información geológica disponible sobre el área de estudio, para fines de contextualizar desde el punto de vista de la geología regional y local, en el sector objeto de estudio.
- Reconocer a escala macroscópica, las relaciones existentes entre las diferentes unidades litológicas (rocas ígneas, metamórficas, venas y/o filones) presentes en el área de estudio, para fines de documentar la temporalidad relativa de éstas.
- Realizar un análisis mineralógico-petrográfico de los cuerpos mineralizados (filones, vetillas, venas, etc.) y sus alteraciones hidrotermales asociadas, para fines de reconocer los diferentes contextos paragenéticos presentes a escala del depósito.
- Realizar un estudio de Inclusiones Fluidas en minerales traslucidos de relleno hidrotermal de los filones auríferos, para fines de identificar las características físico-químicas de los paleofluidos mineralizantes.
- Proponer a la luz de los nuevos datos (previa discusión de éstos, en el contexto de la información previamente publicada); un modelo de formación del depósito (metalogénesis del Au).

2. GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO

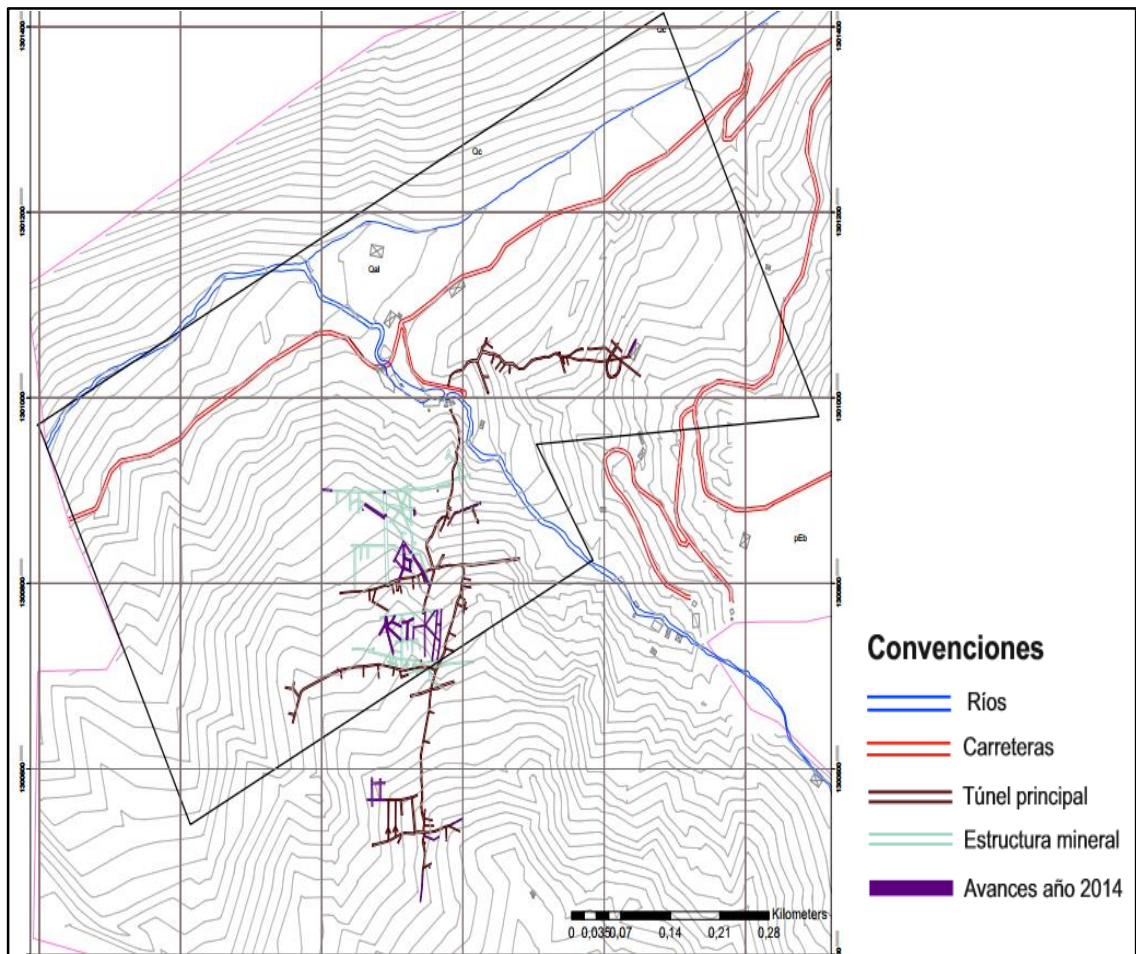
La Mina La Providencia se encuentra ubicada a 1,2 Km al NW del Municipio de Vetas en la Vereda Borrero, aproximadamente a 92 Km de la ciudad de Bucaramanga (Figura 1) (Ver Anexo A). La licencia minera de la empresa encargada de este proyecto “Sociedad Minera La Providencia LTDA” está delimitado por un polígono de coordenadas: X: 1’301.415 Y: 1’132.685; X: 1’300.980 Y: 1’132.905 X: 1’300.950 Y: 1’132.505; X: 1’300.825 Y: 1’132.585; X: 1’300.540, Y: 1’132.015; X: 1’300.970, Y: 1’131.800 (Figura 2).

Figura. 1: Localización del Municipio de Vetas, Santander y mapa geológico de parte del distrito minero de Vetas y California donde se muestra la ubicación de la mina La Providencia.



Tomado de Google Maps, página oficial alcaldía de Vetas y Plancha H13 Pamplona.

Figura 2: Mapa topográfico donde se observa el polígono que delimita la Mina La Providencia.



Tomado de Ortiz y Gómez (1995). Modificado por los autores.

Para llegar a la Mina La Providencia desde la ciudad de Bucaramanga se tienen dos vías de acceso principales, la primera tomando la carretera que conduce al Municipio de Berlín, una vez en el parque central de este municipio se sigue desviando hacia la izquierda por el carreteable hasta llegar al Municipio de Vetas, finalmente se toma la vía que conduce hasta la vereda Borrero en la cual se encuentra ubicada el área objeto de estudio. La segunda vía pasa por los municipios de Matanza, Surata, California y llega directamente a la vereda Borrero (Figura 3), la Mina La Providencia se encuentra aproximadamente a 1.2 km del Casco Urbano del Municipio de Vetas.

Figura 3: Imagen ilustrativa, en la cual se señalan las vías de acceso a la zona de estudio.



Tomada y modificada de Google Maps y Google Earth.

3. ANTECEDENTES Y CONTEXTO GEOLÓGICO

En el Distrito Minero de Vetas y California han sido realizados varios estudios enfocados al conocimiento y entendimiento de la cartografía, distribución, génesis, exploración y explotación de los yacimientos auroargentíferos allí presentes. Estos estudios han sido realizados por investigadores pertenecientes a distintas universidades tanto nacionales como internacionales, así como por diferentes entidades como el Servicio Geológico Colombiano, Colciencias y empresas privadas como EcoOro, AUX, Galway, entre otras. Se han reportado estudios en tesis de grado de diferentes minas tanto de California como de Vetas.

Con el propósito de contextualizar la geología del área de estudio, a continuación, se presenta de manera resumida, los estudios realizados sobre el área, en lo referente a su estratigrafía y tectónica; y por otro lado lo referente a la metalogénesis de los metales preciosos y base allí presentes (Geología Económica).

3.1. ESTRATIGRAFÍA Y TECTÓNICA

A escala regional Ward *et al.* (1970) en García y Pedraza (1996) lleva a cabo un estudio cartográfico y geoquímico del área de los municipios de Vetas y California en el cual se determinaron los prospectos de los depósitos auroargentíferos de la zona. Posteriormente se reporta la cartografía geológica de las planchas H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona a escala 1:100.000 realizado por Ward *et al.* (1973) donde se muestran las diferentes unidades litológicas, su edad y las características estructurales de esta zona. En el informe que acompaña el mapa geológico de Santander Royero y Clavijo (2001) compilan toda la información asociada a la mineralización del distrito minero de Vetas-California.

En el municipio de California se han realizado diferentes estudios de investigación dentro de los que se encuentran, Aceros y Lamus (1993) quienes estudian la edad, asociación mineral y alteraciones hidrotermales presentes en la Mina Barbacoas. Guerrero y Díaz (2006) realizan un estudio de la composición mineralógica de las diferentes menas en el depósito de Angosturas, buscando establecer la relación espacial y genética del oro. En el área del depósito La Mascota, Forero (2010) estudia la petrografía de los minerales mena y Mendoza (2011) estudia la petrografía de las texturas de cuarzo. Finalmente, Rodríguez (2014) presenta un estudio de la geología, alteración y evolución hidrotermal de los depósitos de La Bodega-La Mascota, así

como otros estudios relacionados con los fluidos mineralizantes y datos geocronológicos, obteniendo como resultado modelos de exploración del depósito.

3.2. GEOLOGÍA ECONÓMICA

En el área de los Municipios de Vetas y California, Mendoza y Jaramillo (1979) en García y Pedraza (1996) dan a conocer la relación entre las mineralizaciones auroargentíferas y las estructuras presentes en la zona, mostrando a su vez la presencia de minerales diseminados en la roca encajante, además realizaron la prospección geoquímica en el Municipio de California para determinar las zonas de mayor contenido de oro.

En cuanto al Municipio de Vetas, Lasprilla y Lozano (1990) en García y Pedraza (1996) realizan un estudio geológico de la Mina Reina de Oro, en el cual se describe la mineralización y se definen las asociaciones minerales y alteraciones hidrotermales. Rey y García (1991) presentan el análisis de las estructuras que controlan la mineralización, las asociaciones minerales y las zonas de alteración de los filones del yacimiento de la Mina La Tosca. García y Uribe (2003) presentan la cartografía geológica superficial y subterránea en la Mina Los Delirios junto con un muestreo a partir del cual se determinó la composición, textura y estructura de los filones mineralizados, la roca encajante y la zona de alteración. Así mismo, estos autores realizan un estudio similar en el año 2006 del yacimiento de la Mina La Tosca, buscando obtener la formulación de un modelo genético que pueda ser aplicado en la exploración y el procesamiento mineral de las menas de este depósito.

Dentro de los estudios enfocados en la Mina La Providencia la cual es objeto de análisis de la presente tesis, se reporta una investigación previa realizada por Ortiz y Gómez (1995) en la cual se llevó a cabo un estudio geológico, mineralógico, petrográfico y estructural de la roca encajante, filones y zonas de alteración de este depósito mineral. El estudio anteriormente mencionado fue tomado como base por García y Pedraza (1996) con el fin de presentar un informe de la investigación a Colciencias. Como ya se ha mencionado, este depósito no ha sido ampliamente estudiado por lo cual esta tesis busca aportar información al conocimiento y entendimiento de la metalogénesis del mismo, basada en el análisis de los resultados presentados más adelante.

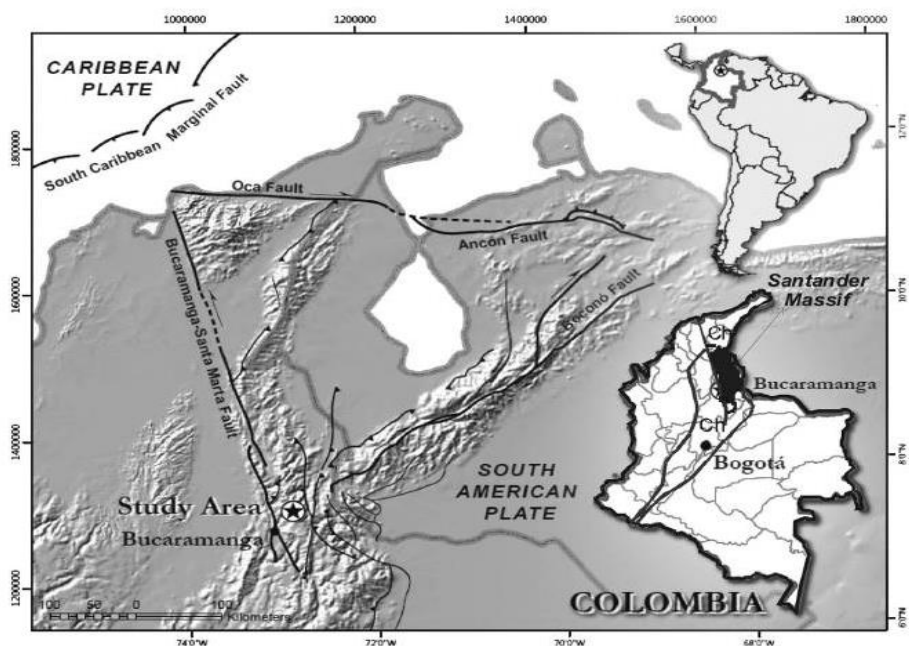
4. MARCO GEOLÓGICO

4.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El Macizo de Santander se encuentra ubicado en la intersección entre el sector noreste del Terreno Chibcha limitado por el sistema de fallas Otú Pericos, la Falla Oca y el sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta en tendencia Noreste y la parte suroeste de la subplaca de Maracaibo (Restrepo y Toussaint, 1988) limitada al norte por la Falla Oca, al Sur-oeste por el sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta y al Sur-este por la Falla Boconó (Rodríguez, 2014) (Figura 4).

El Macizo de Santander se considera como una provincia litotectónica (Royero y Clavijo, 2001) con un fuerte patrón de fracturamiento dominado por el sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta (Ward *et al.*, 1971). Este Macizo se compone de dos dominios geológicos distintos, el primero está conformado por rocas del Precámbrico-Ordovícico que incluyen el complejo orogénico Gneis de Bucaramanga, Formación Silgara y el Ortogneis. El segundo dominio está conformado por una sucesión ígnea desarrollada durante el Paleozoico y el Triásico-Jurásico (Goldsmith *et al.*, 1971; Ward *et al.*, 1973; Mendoza y Jaramillo, 1979; Banks *et al.*, 1985; Boinet *et al.*, 1985; Dörr *et al.*, 1995; Restrepo-Pace, 1995; Ordoñez, 2003; Ordoñez y Mantilla, 2005; Castellanos *et al.*, 2008 en Rodríguez, 2014).

Figura 4: Mapa de localización del Macizo de Santander.



Tomado de Mantilla *et al.*, 2013

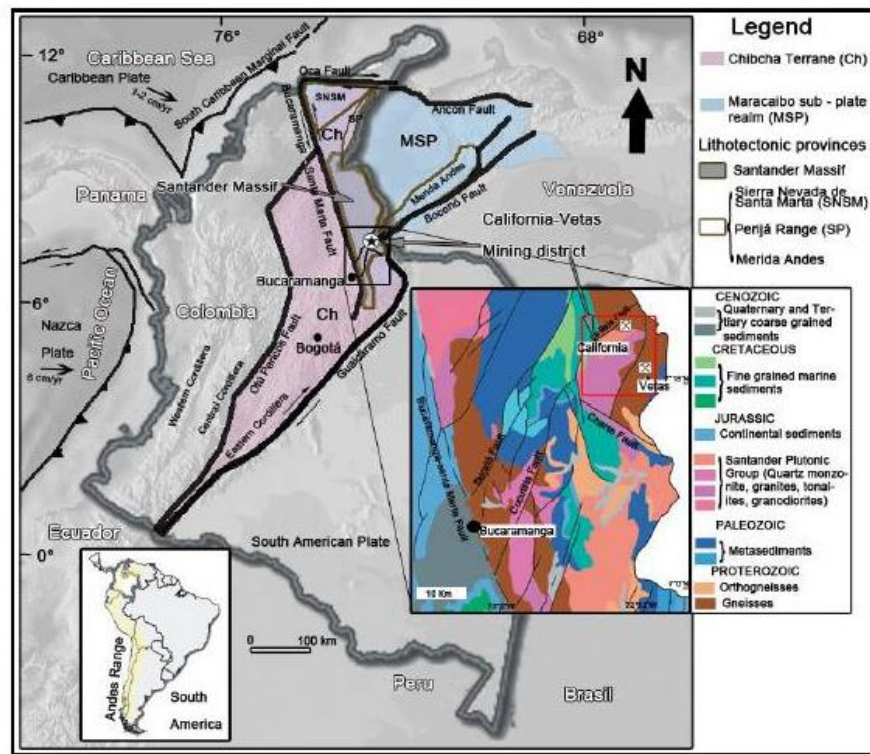
Las rocas más antiguas del primer dominio geológico del Macizo de Santander, están representadas por las formaciones metamórficas, como el Gneis de Bucaramanga, de edad Precámbrico, la cual alcanzó condiciones metamórficas de la facies anfibolita durante la orogenia Grenviliana (Restrepo *et al.*, 1997; Cordani *et al.*, 2005 en Mantilla *et al.*, 2009); los Esquistos del Silgara, con protolito de edad Precámbrica, pero de edad Ordovícica en cuanto al metamorfismo, la cual debió alcanzar condiciones de las facies esquistos verdes o facies anfibolita baja (Ward *et al.*, 1973; García y Ríos, 1999; Castellanos *et al.*, 2004 en Mantilla *et al.*, 2009). El metamorfismo regional del Gneis de Bucaramanga ha alcanzado condiciones de facie anfibolita, zona de la sillimanita superior mientras que las rocas de la Formación Silgara alcanzaron la facie anfibolita, zona de la sillimanita inferior (García y Ríos, 2004 en García y Uribe, 2006). Para esta unidad se reporta la presencia de algunas bandas de cizallamiento, relacionadas con una importante profusión de venas hidrotermales paralelas a la foliación regional y procesos de disolución tectónica de minerales del pico de metamorfismo (Mantilla *et al.* 2003 en Mantilla *et al.*, 2009). Y finalmente, el Ortoneis, de edad Devónico Inferior a Ordovícico, con composición granítica a tonalita y diorita, que se encuentra intruyendo a la Formación Silgará (Royero y Clavijo, 2001), en algunos sectores también intruye las rocas del Neis de Bucaramanga (García y Uribe, 2003). Las formaciones mencionadas anteriormente se encuentran suprayacidas por rocas sedimentarias principalmente de edad Paleozoico Superior, como lo son la Formación Floresta y el Grupo Surata (Formaciones Diamante, Tiburón y Bocas). En sectores específicos del Macizo de Santander afloran otras secuencias de rocas sedimentarias de edad Jurásico de origen continental (Formaciones Jordán y Girón) y Cretácicas de origen Marino. El registro sedimentario de éste Macizo termina con una secuencia de rocas formadas a partir de depósitos de ambiente continental de edad Cenozoico-Cuaternario (Clavijo y Royero, 2001).

4.2 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

4.2.1. Distrito Minero de Vetas-California: Se encuentra localizado en la parte nororiental del Macizo de Santander muy cerca al dominio de la Falla de Boconó con tendencia ENE y el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta con tendencia NNW (Figura 5) (Rodríguez, 2014), el cual presenta mineralizaciones hidrotermales, especialmente de Au-Ag formadas en ambientes epitermales (Felder *et al.*, 2005 en Mantilla *et al.*, 2011) que suelen estar hospedadas

principalmente en rocas metamórficas de edad Pre-Devónico e ígneas de edades Mesozoicas y Cenozoicas (Mantilla et al., 2011).

Figura. 5: Localización de Distrito Minero de Vetas-California (DMVC).

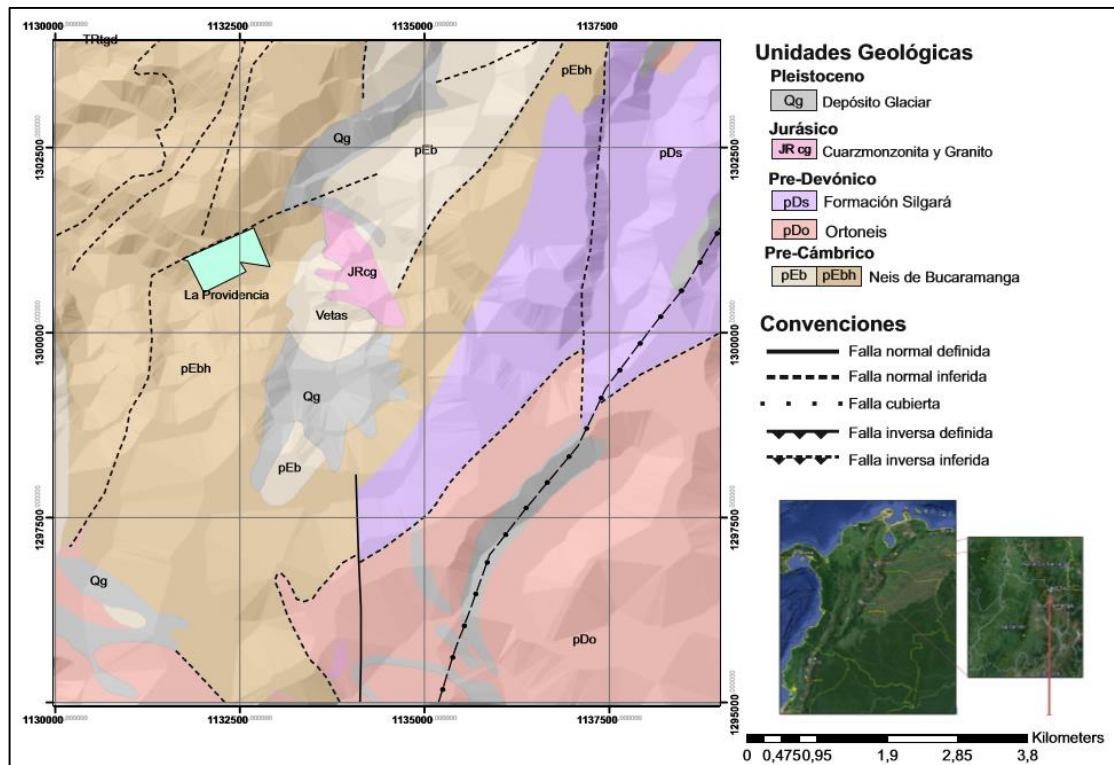


Tomado de Rodríguez, 2014.

Las rocas más antiguas registradas en el Distrito Minero de Vetas-California comprenden tres unidades metamórficas principales (Figura 6) (Ver Anexo A); la unidad principal es el Complejo Bucaramanga (Royero y Clavijo, 2001) de edad Proterozoico Temprano (García y Ríos, 1999; Ordóñez-Cardona *et al.*, 2006 en Mantilla *et al.*, 2013), el cual esta superpuesto por la Formación Silgara de edad Proterozoico Tardío-Paleozoico Temprano (Ward *et al.*, 1973; Schaefer *et al.*, 1998; García y Ríos, 1999; Ríos *et al.*, 2003 en Mantilla *et al.*, 2013), sin embargo esta unidad no se presenta en el Distrito si no en las zonas aledañas a este (Ward *et al.*, 1973 en Mantilla *et al.*, 2013). Las rocas más jóvenes afectadas por el metamorfismo de alto grado datadas en el distrito son metadioritas de aproximadamente 477 Ma (Mantilla *et al.*, 2012) las cuales han sido relacionadas a eventos magmáticos manto derivados en ambientes de subducción posiblemente emplazados durante la orogenia Caparonensis-Famatiniense (Mantilla *et al.*, 2012). Hacia el SE del Distrito en el sector conocido como Paramo Rico se han registrado

tonalitas y granodioritas, mientras que en la parte central se encuentran leucogranitos y cuarzomonzonitas (Goldsmith *et al.*, 1971; Ward *et al.*, 1973 en Mantilla *et al.*, 2013).

Figura 6: Mapa geológico de una sección de la Plancha H-13, donde se observan las principales unidades geológicas aflorantes en el Distrito Minero de Vetas-California y la ubicación de la mina La Providencia.



Tomado de Plancha H13 Pamplona. Modificado por los autores.

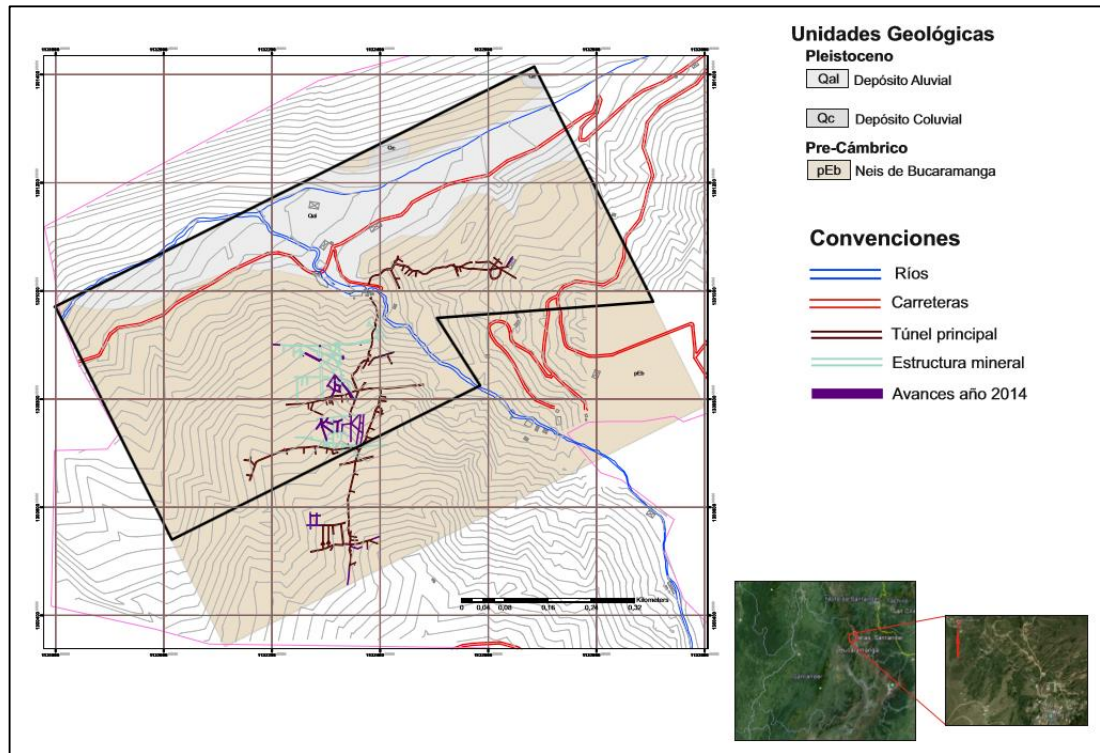
Las unidades anteriormente mencionadas son cubiertas discordantemente hacia la parte occidental del Distrito por rocas sedimentarias que conforman la Formación Tambor del Cretácico Temprano (Mendoza y Jaramillo 1979 en Mantilla *et al.*, 2013), la cual ha sido intruida localmente por cuerpos de granodioritas porfíricas de un diámetro superior a 1 Km (Ward *et al.*, 1973; Polania, 1980, 1983; Galvis, 1998; Cooperación Técnica Colombo-Alemana, 1998; Felder *et al.*, 2005 en Mantilla *et al.*, 2013) y edad 10.9 ± 0.2 y 8.4 ± 0.2 Ma según datos geocronológicos reportados (Mantilla *et al.*, 2009, 2011 en Mantilla *et al.*, 2013), estas rocas fueron generadas por el magmatismo del Mioceno que coincide temporalmente con la reactivación y el movimiento transpresional sinistral del sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta relacionada a la acreción del Bloque Choco y al rápido levantamiento de esta parte de la Cordillera Oriental (Dengo y Covey, 1993; Kellogg y Vega, 1995; Taboada *et al.*, 1999, 2000; Villamil, 1999; Pindell y Kennan, 2001; Villagómez *et al.*, 2011 en Mantilla *et al.*, 2013)

y se encuentra sobreimpuestas por alteraciones magmáticas hidrotermales y la mineralización de Au (Mantilla *et al.*, 2013).

Las principales estructuras presentes en el distrito minero de Vetas–California son: El sistema de Fallas Bucaramanga–Santa Marta el cual es considerado como el más importante que afecta el macizo de Santander y la Falla Cucutilla. El sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta, se considera un sistema inestral – lateral con tendencia N20W de desgarre con un desplazamiento horizontal (Campbell, 1965; Tschanz, et al., 1969, 1974 en Royero and Clavijo, 2002). Otras interpretaciones muestran un componente inverso importante en algunos sectores los cuales han sido reportados por Julivert (1961b) en Ureña, (2014). Interpretaciones más recientes destacan que en este sistema de fallas se diferencian tres segmentos con características y comportamiento distinto (Cuellar *et al.*, 2012 en Ureña, 2014). La Falla Cucutilla es una falla lateral dextral de desgarre con tendencia NE- SW situada al NE del sistema de Fallas Bucaramanga–Santa Marta (Royero y Clavijo (2002) en Rodríguez, 2014) con tendencia NE y cruza por el Rio Vetas y Paramo Rico donde se intersecta con la Falla Charta (Ward *et al.*, 1971 en Rodríguez, 2014).

4.2.2. Mina La Providencia: En la zona de la Mina La Providencia afloran principalmente rocas metamórficas néisicas de grado de metamorfismo de medio a alto cuya foliación varía entre N5°E a N35°W, también afloran depósitos cuaternarios de tipo aluvial y coluvial (Pedraza y García, 1996) (Figura 7) (Ver Anexo B).

Figura 7: Mapa geológico de la mina La Providencia donde se observa el trazo de los túneles y las vías de acceso.



Tomado de Ortiz y Gómez (1995). Modificado por los autores.

Según García y Pedraza (1996) en el área de estudio se encuentran bien expuestas las rocas pertenecientes al Gneis de Bucaramanga, específicamente en el curso del Río Vetas y el sector de Los Lajones, donde se distinguen tres tipos de neis:

- Cuarzo-feldespático: de color blancuzco a rosado con textura granoblástica, el cual se presenta como lentes irregulares compuestos por bandas de cuarzo y ortoclasa de grano grueso como constituyentes esenciales de la roca, y plagioclasa como mineral secundario, el cual se puede encontrar altamente alterado a sericita, y como minerales accesorios se presentan circón y pirita. Se determinó que este neis pertenece a las facies anfibolita, subfacies estauroлита-distena.
- Biotítico: se encuentra aflorando a lo largo de la mayoría de los túneles de la Mina La Providencia, presenta textura granolepidoblástica y se compone de bandas leucocráticas (Qz+Pl) y bandas melanocráticas (Bt) cuyo ancho varía de 0.5 a 6 cm; este neis se ubica dentro de las facies anfibolita subfacies sillimanita-almandino-ortoclasa.

- Hornbléndico – Biotítico: presenta un bandeamiento bastante marcado debido a la presencia de Biotita y Hornblenda, perteneciente a la facies anfibolita subfacies sillimanita-almantino-ortoclasa. En este tipo de neis se evidencia un metamorfismo retrógrado debido al reemplazamiento de biotita por clorita.

Las rocas metamórficas descritas anteriormente fueron cortadas por filones de cuarzo asociados con sulfuros de hierro y cobre que contienen la mineralización aurífera (García y Pedraza, 1996).

Los depósitos cuaternarios coluviales aflorantes en la zona están formados por cantos subangulares a angulares de composición néisica sostenidos en una matriz fina, algunos de ellos se encuentran bordeando la falla de la Quebrada El Salado (García y Pedraza, 1996). La edad para estos depósitos según Ward y Goldsmith (1973) corresponde al periodo pleistoceno-holoceno.

Los depósitos aluviales se localizan principalmente en los márgenes de la Quebrada El Salado y algunos lugares del Río Vetas, que se evidencian por la presencia de terrazas con fragmentos de bloques muy bien redondeados con tamaños menores de 1.5 m, compuestos por granodiorita, tonalitas, granitos y cuarcitas (García y Pedraza, 1996).

La geología estructural de la zona de estudio comprende estructuras producto de diferentes eventos tectónicos, dentro de las que se encuentran foliaciones, diaclasas y fallas. La falla de la quebrada El Salado es una falla de tipo normal, asociada con la falla de Cucutilla descrita por Ward y Goldsmith, 1973. Esta falla presenta una dirección principal N65°-70°E que se extiende paralela a la quebrada El Salado, como evidencia de esta falla se presentan facetas triangulares alineadas al oeste de la vereda Borrero (García y Pedraza, 1996).

En cuanto al tipo de mineralización presente en el Municipio de Vetas Mathur *et al.*, 2003 en García y Uribe (2003) la define como una mineralización epitermal de baja sulfuración contraria a la mineralización que ocurre en California donde las relaciones Re-Os indican una estrecha relación de la mineralización con los fluidos magmáticos. Según Ortiz y Gómez (1995) basados en la clasificación genética de Dijkstra (1977), los yacimientos del distrito minero de Vetas pueden ser clasificados como depósitos tipo “vein”, específicamente en la mina La Providencia las venas auríferas se encuentran encajadas en el neis de Bucaramanga y controladas estructuralmente por un sistema de diaclasas. Según Mendoza (1979) en Ortiz y Gómez (1995)

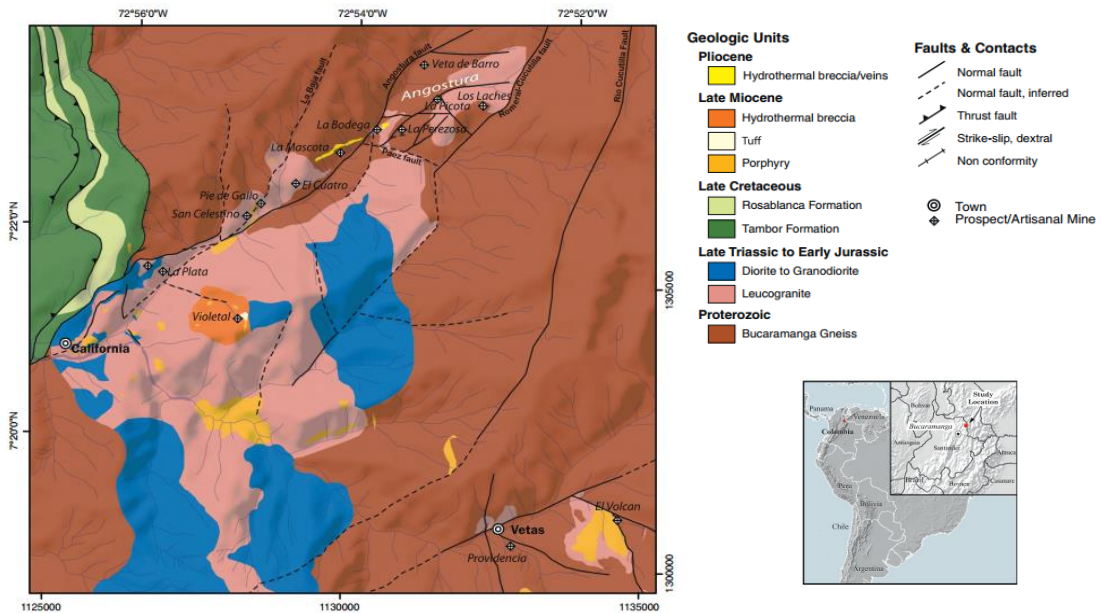
el yacimiento aurífero se relaciona genéticamente al pórfido granodiorítico como el producto residual de cristalización del magmatismo terciario que originó el emplazamiento del cuerpo intrusivo y aportó la energía suficiente para generar estas soluciones hidrotermales. Según Ortiz y Gómez (1995) las venas hidrotermales auroargentíferas están compuestas principalmente por cuarzo, minerales metálicos como sulfuros de hierro y cobre (pirita, calcopirita, pirrotina), magnetita, ilmenita, titanomagnetita, covelina, oro y plata. A su vez proponen dos pulsos mineralizantes los cuales dieron origen a tres tipos de oro; el primer pulso generó la presencia de oro nativo 1 asociado a pirita, calcopirita, pirrotina e ilmenita, el segundo pulso dio origen a dos tipos de oro (oro nativo y oro incluido en pirita). Para el depósito de la mina La Providencia se presentan tres zonas principales de alteración hidrotermal: propilítica, argílica y argílica avanzada (Ortiz y Gómez, 1995).

4.3. ESTRATIGRAFÍA

El Distrito Minero de Vetas-California se compone en su mayoría por rocas metamórficas del Complejo Bucaramanga, las cuales son cortadas por cuerpos de diques pegmatíticos pertenecientes al Grupo Plutónico Santander. Al oeste del distrito aflora una secuencia sedimentaria marina Cretácica, cortada por cuerpos de diques porfiríticos del Mioceno. También se presentan brechas hidrotermales que cortan las unidades anteriormente mencionadas y que a su vez son cortadas por estructuras posteriores como fallas que han sido activadas durante los eventos de mineralización (Rodríguez, 2014) (Figura 8).

Figura 8: Mapa geológico del Distrito Minero de Vetas-California.

Tomado de Bissig *et al.*, 2013



Las unidades anteriormente mencionadas se describen a continuación:

- Complejo Bucaramanga (Gneis de Bucaramanga):** La Formación Neis de Bucaramanga fue definida por Ward *et al.*, 1973 y posteriormente referida como Complejo Bucaramanga por Royero y Clavijo, 2001. El Complejo Bucaramanga está constituido por paraneises migmatíticos de alto grado de metamorfismo y de edad Proterozoico Temprano (García y Ríos, 1999; Mantilla *et al.*, 2013). Según Royero y Clavijo (2001) también se presentan migmatitas, anfibolitas, cuarzolitas, mármoles y granitoides. Según Ward *et al.*, 1973, el Complejo Bucaramanga aflora en tres fajas: La faja Bucaramanga que es la más occidental, localizada al este del sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta, la faja central que comprende el área de Berlín y California-Cachirí y la faja oriental que se encuentra al sur de Pamplona cerca de Chitagá. A partir de geocronología de U-Pb en circones, se determinó que el pico metamórfico data de edad 1057 ± 28 Ma, lo cual se asocia con la Orogenia Greenvilliana (Cordani *et al.*, 2005 en Mantilla *et al.*, 2013).

En el área de Vetás-California, Mantilla *et al.* 2009, determinó que las rocas del Complejo Bucaramanga se encuentran afectadas por numerosos cuerpos intrusivos que han originado

mineralizaciones de Au de edades 8.4 ± 0.2 y 9.0 ± 0.2 Ma (Mioceno Tardío), obtenidas a partir de geocronología de U-Pb en circones de rocas porfiríticas.

- **Grupo Plutónico Santander (Triásico Tardío-Jurásico Temprano):** Dentro de este grupo se encuentran las tonalitas y granodioritas de Páramo Rico ubicado al SE del Distrito Minero de Vetas-California (Goldsmith *et al.*, 1971, Ward *et al.*, 1973 en Rodríguez, 2014) y los leucogranitos y cuarzo monzonitas (alaskitas) en la parte central del distrito (Mendoza y Jaramillo, 1979; Mantilla *et al.*, 2013). Según Dörr *et al.*, 1995 en Rodríguez, 2014, las intrusiones del área de Páramo Rico muestran edades ~210 a 205 Ma, obtenidas mediante geocronología de U-Pb en circones. El Grupo Plutónico de Santander fue dividido por Mantilla *et al.*, 2013 en tres grupos: leucogranitos tempranos de edad 204-199 Ma, rocas intermedias de edad 199-198 Ma y leucogranitos tardíos de edad 198-196 Ma, con base en relaciones de campo, geoquímica de las rocas y geocronología U-Pb en circones con LA-MCICP-MS.
- **Rocas sedimentarias (Cretácico Tardío):** Según Julivert (1968), La secuencia sedimentaria del Cretácico aflora hacia la parte occidental del Distrito Minero de Vetas-California y se encuentra depositada discordantemente sobre las unidades anteriormente mencionadas; esta secuencia incluye la Formación Tambor de edad Valanginiano-Hauteriviano y la Formación Rosa Blanca de edad Hauteriviano-Barremiano.
- **Cuerpos porfiríticos y rocas relacionadas (Mioceno Tardío):** El Grupo Plutónico Santander y las rocas del Complejo Bucaramanga son cortadas por diques, silos y pequeños cuerpos irregulares de textura porfirítica (Mantilla *et al.*, 2013). Hacia el Este del Distrito Minero de Vetas-California afloran pórfidos faneríticos de composición cuarzo-monzodiorítica y granodiorítica mientras que hacia el Oeste se presentan pórfidos afaníticos de composición granodiorítica (Mantilla *et al.*, 2013). La geocronología en circones U-Pb con la técnica LA-MC-ICPMS muestra edades de $9.0-8.4 \pm 0.2$ Ma para los cuerpos porfiríticos de composición Riodacítica (Mantilla *et al.*, 2009), edades de 10.1 ± 0.2 para los pórfidos andesíticos y 10.9 ± 0.2 Ma para las granodioritas con textura porfirítica-fanerítica (Mantilla *et al.*, 2011).

5. MARCO TEÓRICO

5.1 PETROGRAFÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS

Las inclusiones fluidas se han clasificado en varios tipos teniendo en cuenta el momento de formación de las mismas: las primarias son atrapadas durante el crecimiento del cristal a través de un fluido hidrotermal, es decir, que no tienen relación obvia con estructuras que permitan el escape o la entrada de gas o líquido y las secundarias son atrapadas después del crecimiento del cristal, generalmente se encuentran en planos de fracturas u otros donde pudo ser posible la fuga, finalmente, las pseudosecundarias son inclusiones formadas durante el crecimiento del cristal en microfracturas o planos de crecimiento del cristal (Figura 9).

Las inclusiones fluidas pueden presentar formas suaves (esféricas o elípticas), irregulares o cristales negativos (hueco con forma cristalina del mineral que contiene la inclusión fluida).

Una segunda clasificación de las inclusiones fluidas fue presentada por Nash (1976) basada en las fases observables a temperatura ambiente, dentro de las que se encuentran:

Tipo I: Líquido+pequeña burbuja de vapor, sin minerales hijos: originadas por un fluido subsaturado, rico en H₂O (líquido), <26% en peso de NaCl eq; se homogenizan a líquido al calentarlas.

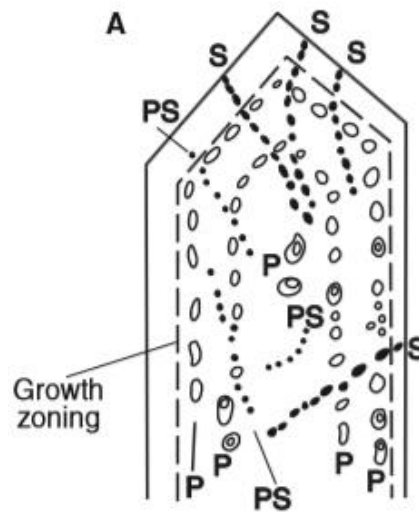
Tipo II: Liquidas con una gran burbuja de vapor, sin minerales hijos: fluido original rico en vapor; al calentarlas se homogenizan a vapor.

Tipo III: Líquido+vapor+sólidos, contienen uno o más minerales hijos: fluido original saturado, con >26% NaCl eq., contienen fases sólidas halita o silvita a temperatura ambiente. Existen dos subtipos (a) fluido subsaturado al atrapamiento: al calentarlas desaparece primero la sal y luego la burbuja y (b) fluido saturado al atrapamiento: al calentarlas desaparece primero la burbuja y luego la sal.

Tipo IV: Dos líquidos y minerales hijos. Son inclusiones con CO₂; típicamente presentan doble burbuja, porque incluyen líquido rico en H₂O y líquido rico en CO₂ y vapor + CO₂ gaseoso, además de fases sólidas.

Tipo V: CO₂ líquido con vapor, sin minerales hijos. Contienen agua líquida, CO₂ líquido y una burbuja pequeña de vapor. Corresponden a un fluido subsaturado en sales y rico en CO₂.

Figura 9: Esquema de la clasificación de inclusiones fluidas según su génesis: primarias (P), secundarias (S) y pseudosecundarias (Ps) en un cristal de cuarzo; b. clasificación de inclusiones fluidas según sus componentes observados a temperatura ambiente.



Tomada de Sheppard et al. (1985) en Pirajno, 2009.

5.2 MICROTERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS

La Microtermometría se basa en la determinación de las temperaturas a las cuales se generan cambios de fases en las inclusiones cuando se congelan y calientan de forma controlada. La temperatura de homogenización (T_h) es considerada como la temperatura de atrapamiento de las inclusiones, siempre y cuando la presión de captura no haya excedido la presión de vapor, de lo contrario se debe introducir una corrección por presión, a partir de la cual se obtiene la temperatura de atrapamiento de la inclusión fluida (Mangas y Sierra, 1991 en Nuñez, 2007), esta temperatura se determina mediante el calentamiento de la inclusión y se grafica en un diagrama de P-T para determinar el rango de presión al cual la inclusión fluida pudo haber sido atrapada (Pirajno, 2009). La temperatura de fusión (T_f) permite determinar la salinidad del fluido en % peso NaCl equivalente de acuerdo a curvas determinadas experimentalmente (Mangas y Sierra, 1991 en Nuñez, 2007), la primera temperatura de fusión también llamada temperatura eutéctica (T_e) indica el tipo de sal (NaCl o MgCl, por ejemplo), la última temperatura de fusión ($T_{m\ ice}$) indica el grado de salinidad de la inclusión (Pirajno, 2009). Otra temperatura que se puede determinar a partir del estudio de microtermometría de IF es la temperatura de decrepitación (T_d) la cual es obtenida cuando la inclusión fluida ha sido sometida a un calentamiento brusco (Pirajno, 2009).

Los análisis de inclusiones fluidas proporcionan datos como: temperatura, presión y composición general del fluido hidrotermal a partir del cual se formó el mineral. Según Mangas y Sierra (1991) en el estudio de inclusiones fluidas es necesario establecer dos tipos de suposiciones básicas las cuales condicionan su utilización y deben asumirse para que los resultados sean válidos:

1. El fluido atrapado en la inclusión primaria representa el fluido a partir de la cual creció el mineral.
2. Una vez atrapado el fluido, se supone que la cavidad permanece hermética y químicamente inerte.

Es necesario tener en cuenta que pueden ocurrir una serie de fenómenos que pueden ser contrarios a la validez de estas hipótesis.

5.2.1 Cálculos de salinidad, densidad, presión y profundidad de las inclusiones fluidas.

A partir de las temperaturas obtenidas en los análisis microtermométricos de inclusiones y utilizando las formulas y gráficos que se mencionan a continuación es posible calcular la salinidad, densidad, presión y profundidad a la cual se encontraba el fluido.

1. Estimación de la salinidad

La salinidad de las inclusiones fluidas fue calculada asumiendo un sistema $H_2O - NaCl$, a partir de la siguiente ecuación (Bodnar, 1992 en Velasco, 2004). Donde se tiene en cuenta la última temperatura de fusión o temperatura de fusión del hielo ($T_{m\ ice}$).

$$Salinidad\ (wt\ \%) = 1.78 T_{m\ ice} - 0.04427 T_{m\ ice}^2 + 0.000557 T_{m\ ice}^3$$

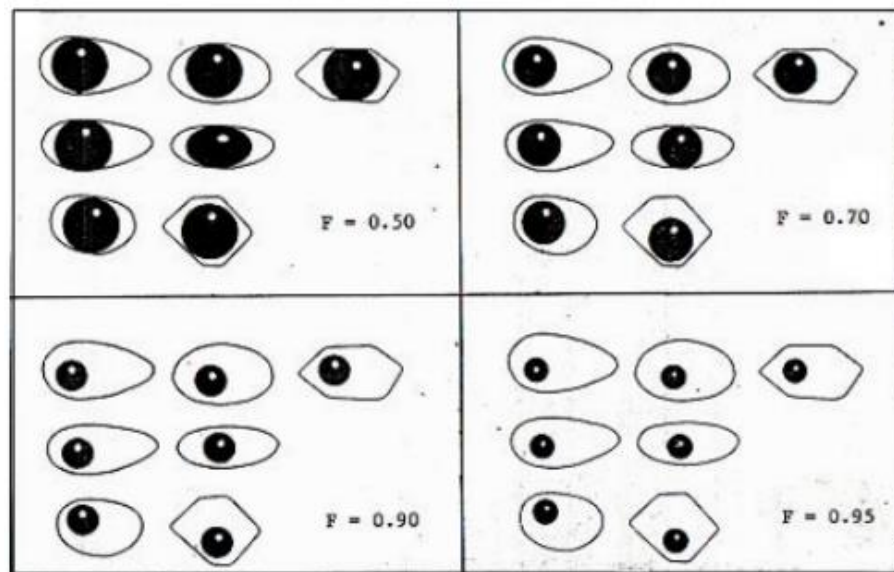
Este cálculo también se puede realizar utilizando el programa Bulk del paquete Fluids desarrollado por Bakker, el cual a partir de la temperatura de fusión del hielo ($T_{m\ ice}$) permite obtener de manera automática la salinidad en % en peso eq. NaCl para un sistema $H_2O - NaCl$.

2. Cálculo de la densidad

Para calcular la densidad de una inclusión fluida es necesario estimar el grado de relleno (F) comparando cada inclusión con los de la figura 10. El grado de relleno para inclusiones bifásicas con líquido L y vapor V se expresa como la relación entre el volumen que ocupa la fase líquida (V_L) respecto al volumen total ($V_L + V_V$).

$$F = V_L / (V_L + V_V)$$

Figura. 10: Esquemas de inclusiones fluidas bifásicas con distintas morfologías, para determinar el grado de relleno (F).



Tomado de Shepherd et al., 1985 en Velasco, 2004.

Posteriormente se puede calcular la densidad total de la inclusión en relación con el grado de relleno (F) a partir de la siguiente ecuación

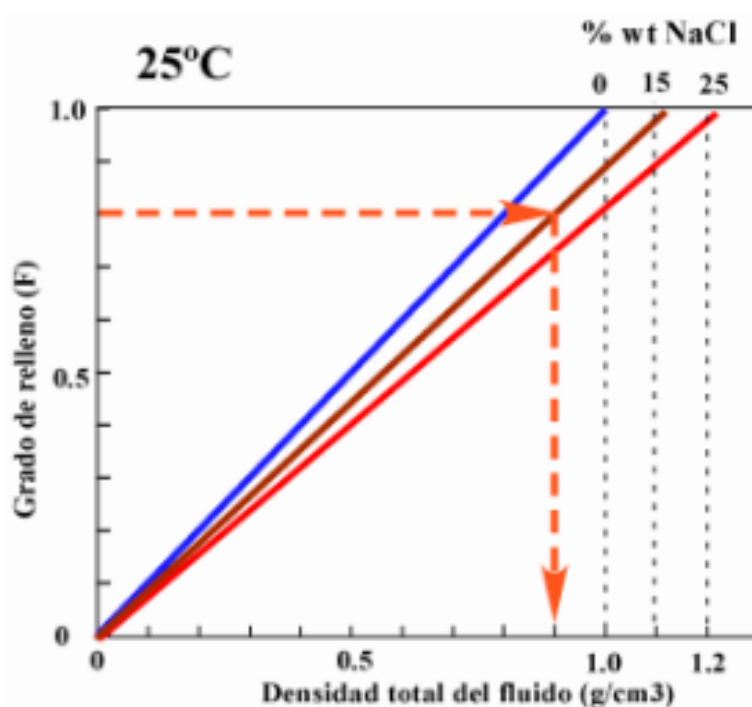
$$\rho = \rho_L * F$$

ρ = Densidad.

ρ_L = Densidad del fluido.

Debido a que la densidad de los fluidos varía proporcionalmente con la concentración de sales disueltas se debe utilizar un gráfico para calcular la densidad total del fluido teniendo en cuenta el grado de relleno y el % wt NaCl (Figura 11).

Figura 11: Grafica que relaciona el grado de relleno de la inclusión y la densidad total para diferentes salinidades

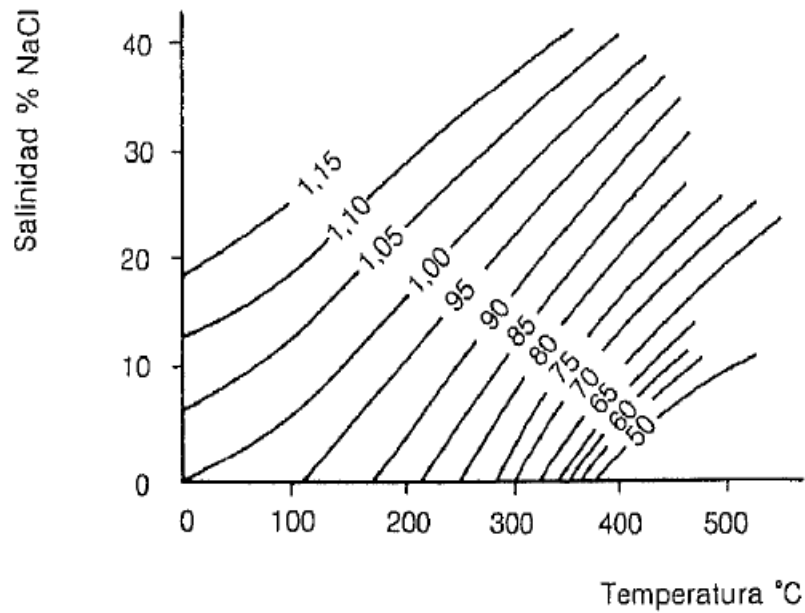


Tomado de Velasco, 2004.

A partir de la estimación de la densidad de cada inclusión se pueden definir una isocora en el espacio P-T y por tanto determinar aproximadamente la temperatura y presión mínima de formación.

La densidad de la inclusión fluida también puede ser estimada a partir de los valores obtenidos de temperatura de homogenización (T_h) y temperatura de fusión del hielo (T_m ice) a partir de una gráfica de isocoras de densidad (Figura 12).

Figura 12: Densidad de los fluidos en un sistema H₂O-NaCl. Las isocoras se basan en los datos obtenidos de Haas (1971); Copeland y Cols, 1953 y Urusova, 1975; Ahmad y Rose (1980).



Tomado de Mangas y Sierra (2004).

3. Cálculo de la presión de homogenización

Talantsev, 1979 desarrolló una fórmula matemática para calcular la presión de homogenización la cual está en función de la temperatura de fusión del hielo ($T_{m\ ice}$) y la temperatura de homogenización de la inclusión (T_h).

$$P_h = 4.32 \cdot 10^{-9} \cdot T_h^{0.182} (1 + 0,009 T_{m\ ice})$$

4. Estimación de la profundidad de formación de la inclusión fluida

La profundidad de formación de las inclusiones fluidas fue calculada asumiendo condiciones de presión hidrostática por lo que se emplea la siguiente fórmula.

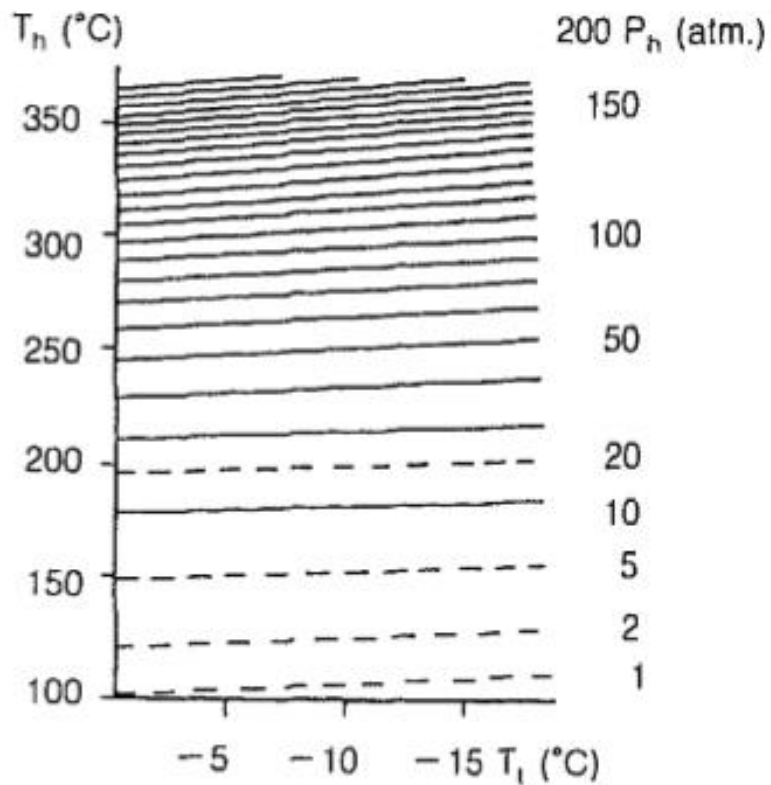
$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

Donde P es la presión de homogenización; ρ es la densidad de la inclusión; g es la aceleración de la gravedad ($g = 9.8\ ms^{-2}$) y h es la profundidad a la cual la inclusión fluida se formó. Entonces,

$$h[m] = \frac{P}{\rho * g}$$

La presión de homogenización también puede ser calculada a partir de un Monograma en función de la temperatura de homogenización y la salinidad de cada inclusión fluida (Figura 13) (Talanstsev, 1979).

Figura 13: Monograma para determinar P_h , para inclusiones fluidas bifásicas, a partir de T_m ice y T_h .

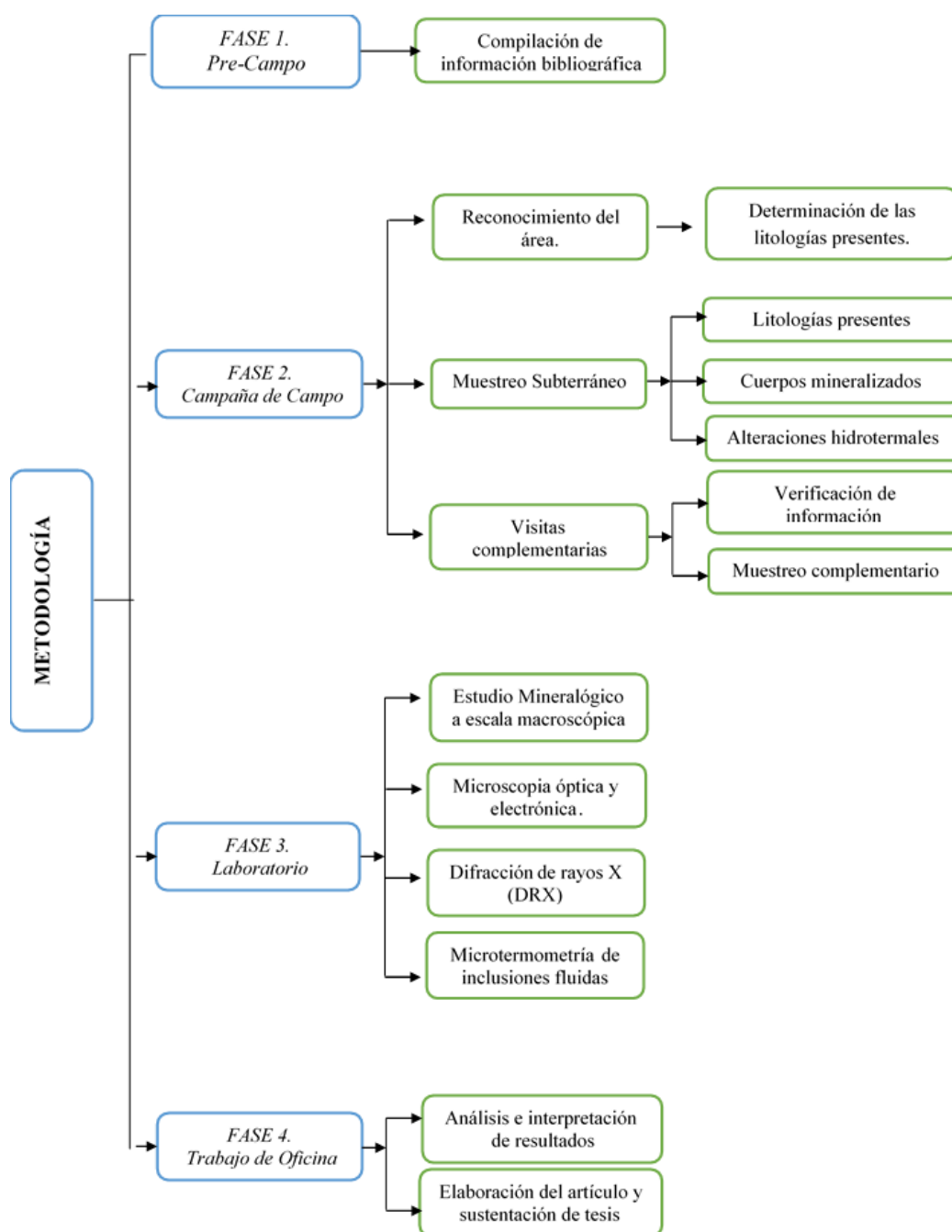


Tomada de Talanstsev, 1979 en Mangas y Sierra, 2004.

6 METODOLOGÍA

Con el propósito de alcanzar los objetivos señalados los apartados 1.1 y 1.2, se siguió una metodología convencional, la cual involucra un trabajo previo de revisión de la información existente (Fase I), un trabajo de campo (Fase II), trabajos de laboratorio (Fase III) y; finalmente una etapa de análisis, interpretación de datos y escritura del informe final (Figura 14).

Figura 14: Esquema metodológico.



Debido a la importancia en la obtención de nuevos datos, a continuación, solo se hará referencia a la fase relacionada con los análisis de laboratorio.

- **Estudio mineralógico y petrográfico a escala macroscópica:** Inicialmente se llevó a cabo el análisis a escala macroscópica de las muestras de mano recolectadas en las campañas de campo donde se determinó la composición mineralógica y los rasgos característicos de estas como venas y alteraciones, a partir de este análisis macroscópico se seleccionaron las muestras que se utilizaron para la realización de las secciones delgadas.
- **Microscopía óptica y electrónica:** Inicialmente se elaboraron 10 secciones delgadas pulidas y 6 secciones delgadas doblemente pulidas con el laboratorio de procesamiento de secciones delgadas y pulidas para petrografía Luis Felipe Peña, las cuales fueron analizadas con ayuda del microscopio de luz transmitida y reflejada marca Nikon a cargo del grupo GIGBA ubicado en el laboratorio de geología, sede Guatiguará.

Con ayuda del microscopio de luz transmitida se determinaron las distintas asociaciones mineralógicas y texturas presentes en cada una de las secciones y con esto se establecieron los distintos eventos mineralógicos. Posteriormente, se seleccionaron las secciones delgadas con abundancia de minerales metálicos y se realizó un estudio metalográfico utilizando el microscopio de luz reflejada con el fin de determinar los distintos tipos de sulfuros, metales presentes y su asociación mineral.

Finalmente, se realizaron análisis con el microscopio electrónico de barrido (SEM) ubicado en la sede Guatiguará (Figura 15) a 4 secciones delgadas con el fin de obtener imágenes digitales de mapeo a ciertas áreas de la sección y análisis puntuales obteniendo el espectro y un resultado semicuantitativo de los elementos presentes en cada punto analizado, esto con el fin de confirmar las distintas asociaciones minerales presentes, observadas a partir de microscopía óptica.

Figura 15: Imágenes del laboratorio del microscopio electrónico de barrido.



A continuación, se presenta la tabla donde se muestran las abreviaciones de minerales utilizadas en el presente estudio.

Tabla 1: Lista de abreviaciones de los minerales

Símbolo	Nombre del mineral	Símbolo	Nombre del mineral
Ab	Albita	Hub	Hübnerita
Alu	Alunita	Jrs	Jarosita
Apy	Arsenopirita	Kln	Caolinita
Bt	Biotita	Kfs	Feldespato potásico
Cal	Calcita	Mag	Magnetita
Ccp	Calcopirita	Mnz	Monacita
Chl	Clorita	Ms	Moscovita
Dck	Dickita	Pl	Plagioclasa
Eng	Enargita	Py	Pirita
Ep	Epidota	Qz	Cuarzo
Fsp	Feldespato	Ser	Sericita
Gln	Galena	Sph	Esfalerita
Gth	Goethita	Ttn	Titanita

Tomado de Whitney and Evans, 2010.

- **Difracción de Rayos X (DRX):** Se realizaron análisis cualitativos para determinar las fases minerales presentes en las muestras, este análisis fue realizado con un difractor de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci ubicado en el laboratorio de Rayos-X sede Guatiguará.
- **Microtermometría en inclusiones fluidas:** Para realizar este estudio fue necesario elaborar secciones delgadas doblemente pulidas a las muestras de filones mineralizados, estas secciones delgadas inicialmente fueron analizadas en un microscopio de luz transmitida marca Nikon donde se determinaron y seleccionaron las distintas asociaciones de inclusiones fluidas presentes.

Para llevar a cabo el análisis de microtermometría, fue necesario realizar la calibración del equipo, mediante el uso de inclusiones fluidas sintéticas de H₂O cuya temperatura eutéctica es 0°C y de homogenización crítica es 374.1 °C y CO₂ cuya temperatura eutéctica es -56.6 °C. A partir de las mediciones de las temperaturas eutéctica y de homogenización de estas inclusiones, se realizó una gráfica de calibración relacionando los valores experimentales arrojados por el equipo y teóricos ya mencionados. Esta gráfica fue utilizada para corregir los datos de temperaturas de las inclusiones fluidas analizadas en este estudio.

Posterior a la calibración del equipo, las muestras de inclusiones seleccionadas fueron analizadas en la platina de microtermometría marca Linkam THMS 600 integrada en un microscopio de luz transmitida, ubicado en el laboratorio de geología, sede Guatiguará (Figura 16). Con base en las mediciones obtenidas, fue posible determinar la temperatura y composición de los fluidos que dieron origen a las mineralizaciones. Todas las inclusiones fluidas estudiadas se encuentran alojadas en cristales de cuarzo los cuales están asociados con la mineralización de oro.

Figura 16: Microscopio de luz transmitida adaptado a una platina calentadora-enfriadora marca Linkam modelo THMS 600.



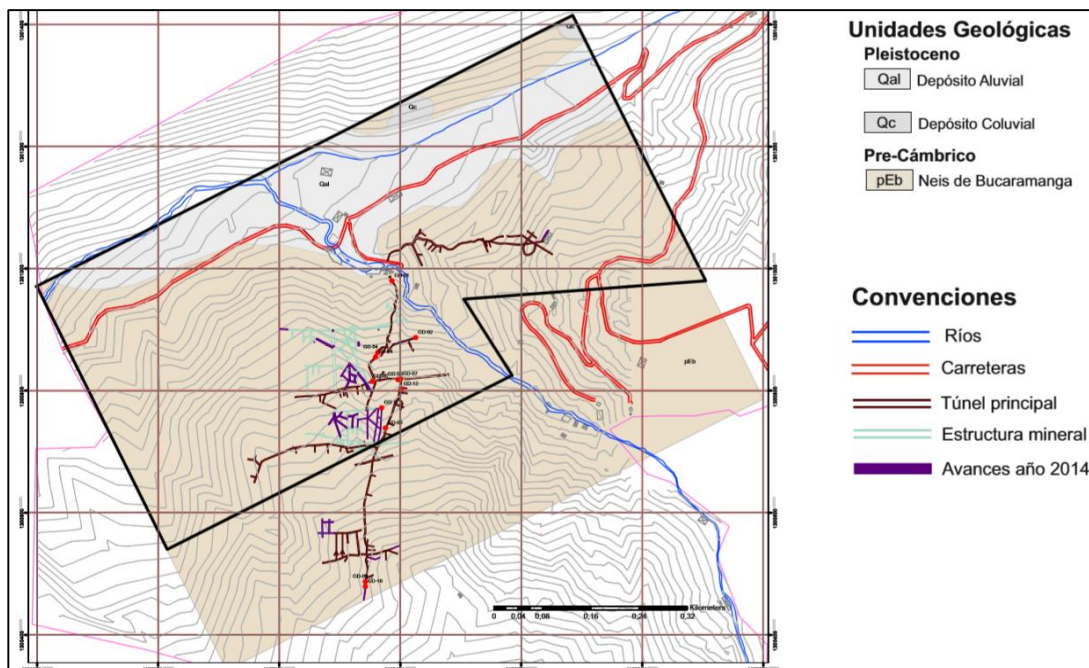
Tomada de Linkam Scientific.

7 RESULTADOS

7.1 VARIEDADES LITOLÓGICAS A ESCALA DEL DEPÓSITO LA PROVIDENCIA.

El área de estudio comprende en su mayor extensión rocas metamórficas pertenecientes a la unidad Gneis de Bucaramanga las cuales forma parte del Macizo de Santander, que a escala de la mina se encuentran cortados por cuerpos intrusivos de composición granítica (Figura 17). Considerados de edad Triásico Tardío-Jurásico Temprano (Mantilla et al., 2011). Cuerpos ígneos menores con textura porfirítica de edad Mioceno, han sido reconocidos en inmediaciones al área de estudio (Reyes, 2013).

Figura 17: Mapa geológico de la mina La Providencia.



Tomado de Ortiz y Gómez (1995). Modificado.

Con el propósito de permitir una mejor idea de las variedades litológicas reconocidas a escala del depósito, a continuación, se indican algunas de sus características.

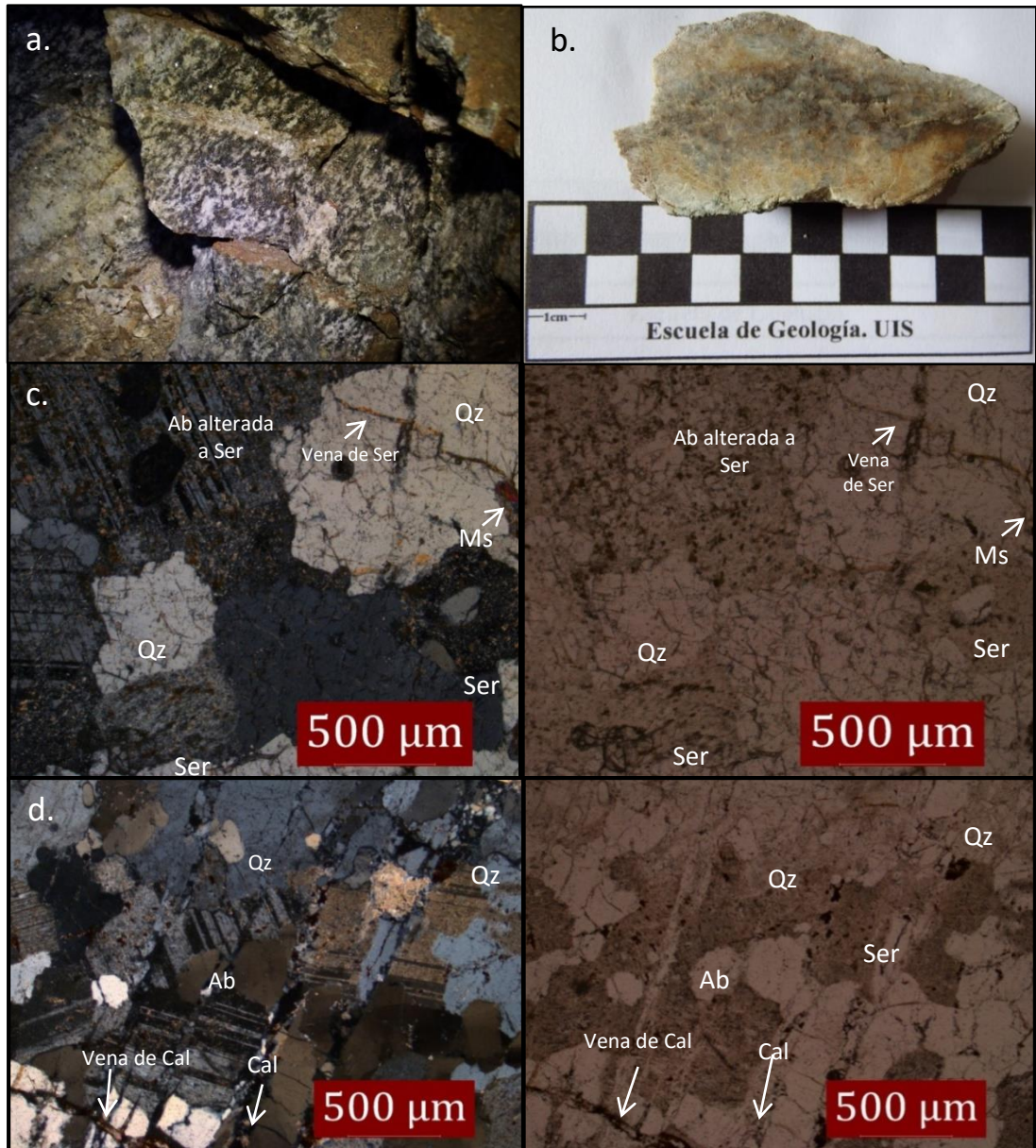
7.1.1. Gneis de Bucaramanga: En la Mina La Providencia el Gneis de Bucaramanga está constituido predominantemente por gneises biotíticos, caracterizados por presentar una marcada estructura néisica evidenciada por bandas micáceas delgadas intercaladas con bandas de cuarzo,

plagioclasa y feldespato potásico, también se observan gneises anfibolíticos y cuarzo-feldespáticos.

Los minerales formadores de la roca son: Cuarzo (55%), Plagioclasa (20%), Feldespato Potásico (14%), Biotita (10%) y como minerales accesorio Pirita (1%), en algunos sectores se observan óxidos de hierro como hematita y limonita (Figura 18 a y b.), el Neis presenta una dirección preferencia de foliación E-W. A escala microscópica fue posible identificar cristales subhedrales de cuarzo altamente fracturados, moscovita la cual no se observó en muestra de mano, feldespato y plagioclasa tipo albita como minerales primarios, además cristales de cuarzo subredondeados incluidos dentro de los cristales de plagioclasa y feldespato redondeado alterado a sericita incluido dentro de un cristal de cuarzo (Figura 18 c.).

Basados en la paragénesis mineral (Qz+Pl+Bt+Ms) determinada a partir de la observación petrográfica de las muestras recolectadas, se estableció que la roca encajante de estructura néisica (gneis biotítico) se encuentra en el campo de facies Anfibolita, subfacie Andalucita-Almandino, concordante a lo reportado en García y Pedraza (1996).

Figura 18: Aspecto a escala de afloramiento, macroscópico y microscópico de los gneises pertenecientes a la unidad Gneis de Bucaramanga; a. Aspecto a escala de afloramiento de los gneises anfibolíticos; b. Aspecto de una muestra de mano de litología tipo Gneis biotítico donde se observa el área a partir de la cual se realizó la sección delgada. c y d. Microfotografías donde se observan los minerales formadores de la muestra de litología Gneis.



7.1.2. Grupo plutónico de Santander (Leucogranitos): Los cuerpos ígneos del límite T3-J1 observados a escala del depósito, son fundamentalmente diques. Estos cuerpos presentan textura fanerítica, holocristalina, que varían en rangos de composición de granitoide rico en cuarzo, granitos y monzogranito (Figura 19), los cuales están compuestos principalmente por cuarzo, plagioclasa y feldespato.

Como minerales primarios se observan: cuarzo (Qz) en contacto con feldespato potásico (Kfs) el cual se encuentra parcial o completamente alterado a sericita (Ser) y plagioclasa (Pl) con presencia de macla polisintética, parcialmente alterado a sericita y ocasionalmente a epidota

(Ep). Como mineral secundario se presentan micas, observadas en sección delgada como cristales alargados y colores de birrefringencia de segundo orden (verde a fucsia) posiblemente por su contenido de cromo (Fucsita). Como minerales ígneos accesorios se reconoce la titanita y la monacita (Figura 20).

Figura 19: Aspecto a escala macroscópica y microscópica de los granitoides pertenecientes al Grupo Plutónico de Santander observados en la Mina La Providencia; a. Granitoide rico en cuarzo (Muestra GD-03-05); b. Granito compuesto principalmente por cuarzo y plagioclasa (Muestra GD-02-03); c. Monzogranito compuesto principalmente por cuarzo y feldespato, presenta pirita como mineral secundario (Muestra GD-05-09).

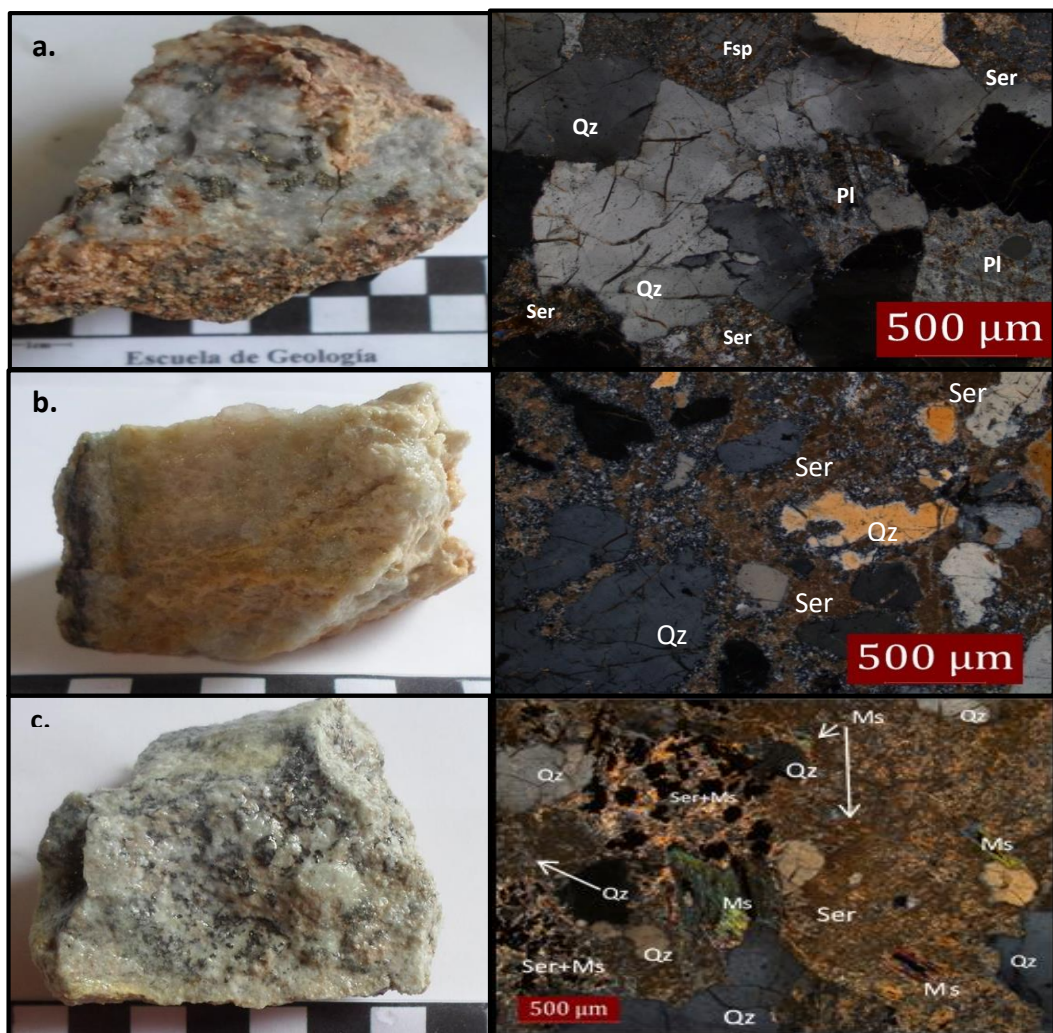
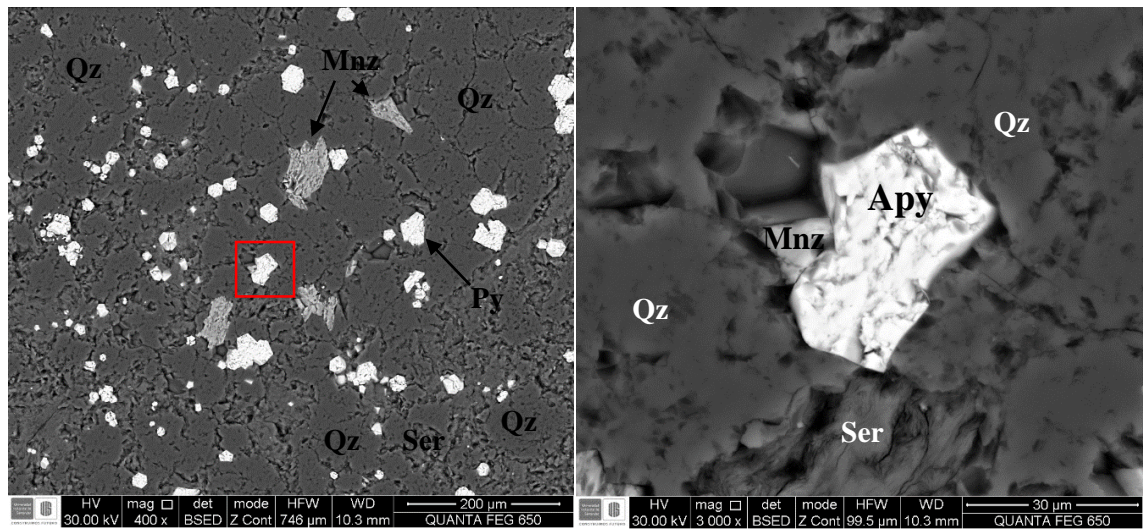


Figura 20: Aspecto microscópico en el que se observa la presencia de relictos de minerales ígneos como la monacita.



7.2 ALTERACIONES HIDROTHERMALES Y MINERALIZACIÓN ASOCIADA

Basados en la clasificación de alteraciones hidrotermales de Silitoe (2010) se definieron cuatro tipos de alteraciones para la zona de estudio, las cuales fueron identificadas mediante análisis petrográficos a escala macroscópica y microscópica. Estas alteraciones, también fueron corroboradas con ayuda de análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM).

Por lo menos dos etapas de alteración hidrotermal-mineralización relacionadas a estilos de mineralización porfirítica fueron reconocidas. Estas han sido denominadas en el presente estudio, como Evento I (Alteración propilítica) y Evento II (Alteración sericítica). A continuación, se describen la mineralogía de ganga y de mena reconocida para cada uno de éstos eventos.

7.2.1. Evento I (Alteración propilítica): Macroscópicamente la alteración propilítica fue reconocida principalmente por el aspecto verdoso en algunas de las rocas (Figura 21). Los minerales característicos en esta zona de alteración en la mina La Providencia incluyen epidota como posible reemplazamiento de plagioclasa y biotitas ígneas ?, calcita como relleno de vetillas y posible clorita por alteración de biotitas.

Dentro de los minerales característicos de esta alteración se encuentran: calcita (Cal) como reemplazamiento de cristales de feldespato y plagioclasa, también en venas delgadas que cortan los minerales formadores de roca caja. Estos cristales son sobreimpuestos por parches de sericita indicativos de un evento posterior (Evento II); epidota (Ep) la cual se presenta principalmente como mineral de alteración de plagioclasas y minerales máficos como biotita, finalmente, clorita (Chl) como mineral de alteración de biotitas y presenta una coloración verde oscura.

Debido a los análisis de microscopía óptica y electrónica de las muestras recolectadas se estableció que la alteración propilítica fue el primer evento hidrotermal presente en este depósito (Figura 21 y 22). Este evento se encuentra asociado a pirita la cual se presenta diseminada en las rocas afectadas por alteración propilítica.

Figura 21: Aspecto a escala macroscópica y microscópica de las muestras afectadas por alteración propilítica; a. Granito (Muestra GD-08-16) donde se observa la presencia de posible clorita; b. Granitoide rico en cuarzo (Muestra GD-03-06) con agregados de calcita y coloración verdosa debido a la presencia de epidota como mineral de alteración; c. Microfotografía en Nx (Muestra GD-02-03) donde se observa alteración propilítica evidenciada por la presencia de cristales de feldespato alterados a calcita, estos cristales presentan sobreimposición de alteración filica debido a que se observan parches de sericita de grano fino sobre la calcita. d. Microfotografía (Muestra GD-08-14) donde se observa la presencia de calcita en venas cortando los minerales formadores de roca.

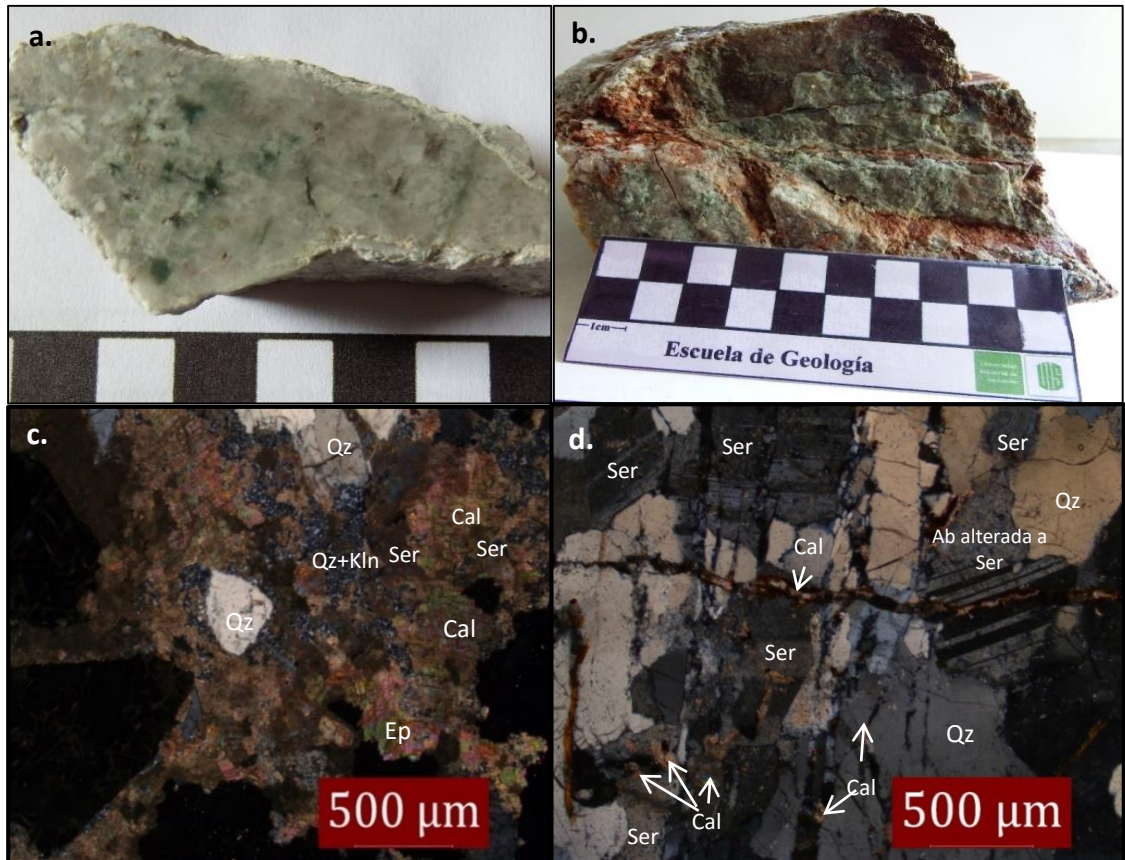
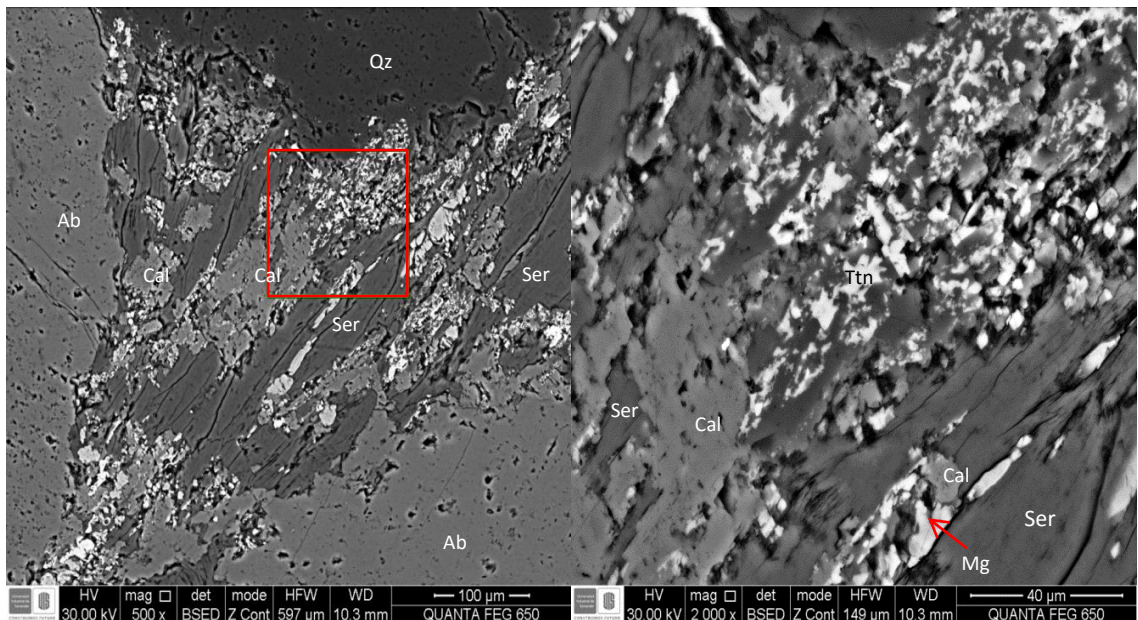


Figura 22: Aspecto a escala de microscopía electrónica donde se observa la presencia de calcita como evidencia de alteración propilítica, sobreimpuesta a esta alteración se presenta sericita (Muestra GD-03-06).



7.2.2. Evento II (Alteración sericítica): A nivel macroscópico la alteración sericítica se identificó por la apariencia parda amarillenta de las rocas (Figura 23 a y b). Los análisis petrográficos demostraron la presencia de sericita como mineral principal de esta alteración (Figura 23 c y d).

Esta alteración se encuentra afectando la mayoría de las muestras que fueron analizadas, es decir, se desarrolla tanto en los gneises como en los leucogranitos. Se evidencia por la presencia de sericita alterando parcial o completamente los cristales de feldespato potásico, plagioclasa, moscovita y en algunas muestras se presenta sobre la calcita lo que indica que esta se superimpuso a la alteración propilítica (Figura 24a). También se presentan venas o fracturas rellenas de sericita cortando los cristales de cuarzo, feldespato y plagioclasa.

Figura 23: Aspecto a escala macroscópica y microscópica de las rocas afectadas por alteración sericítica. a. Granitoide rico en cuarzo con tonalidades marrones amarillentas debido a la presencia de sericita alterando los cristales de plagioclasa y feldespato (Muestra GD-03-06); b. Monzogranito donde se observa sericita alterando minerales de feldespato y plagioclasa, la sericita se encuentra asociada a sulfuros como pirita (Muestra GD-05-09). c. Microfotografía donde se presenta alteración fílica evidenciada por la presencia de feldespato alterado a sericita y venas delgadas de sericita cortando los cristales de cuarzo y feldespato (Muestra GD-03-06); d. Microfotografía donde se identifica el desarrollo de alteración sericítica debido a la presencia de sericita como mineral de alteración y también se observa en sectores sericita + moscovita y pirita (Muestra GD-05-09).

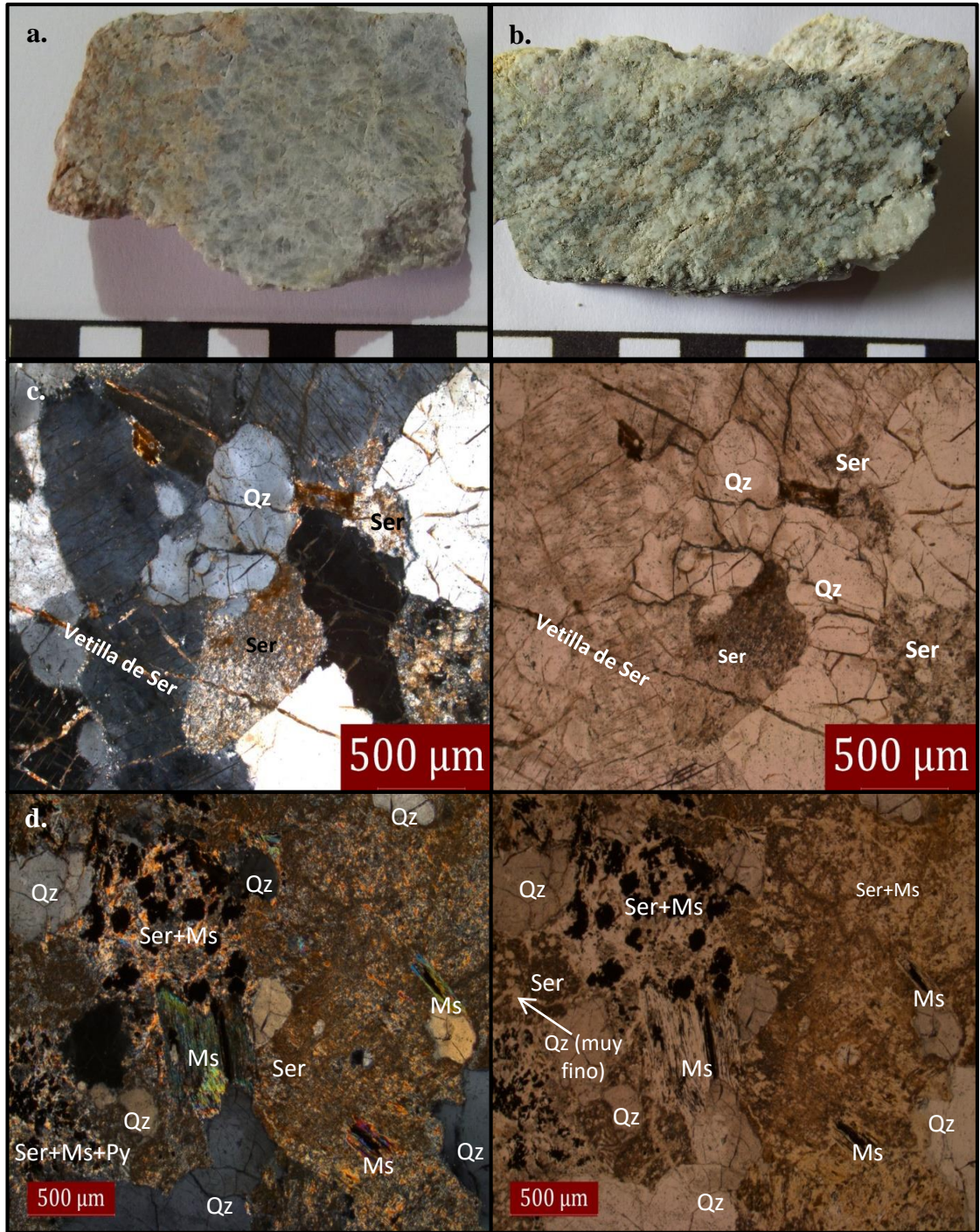
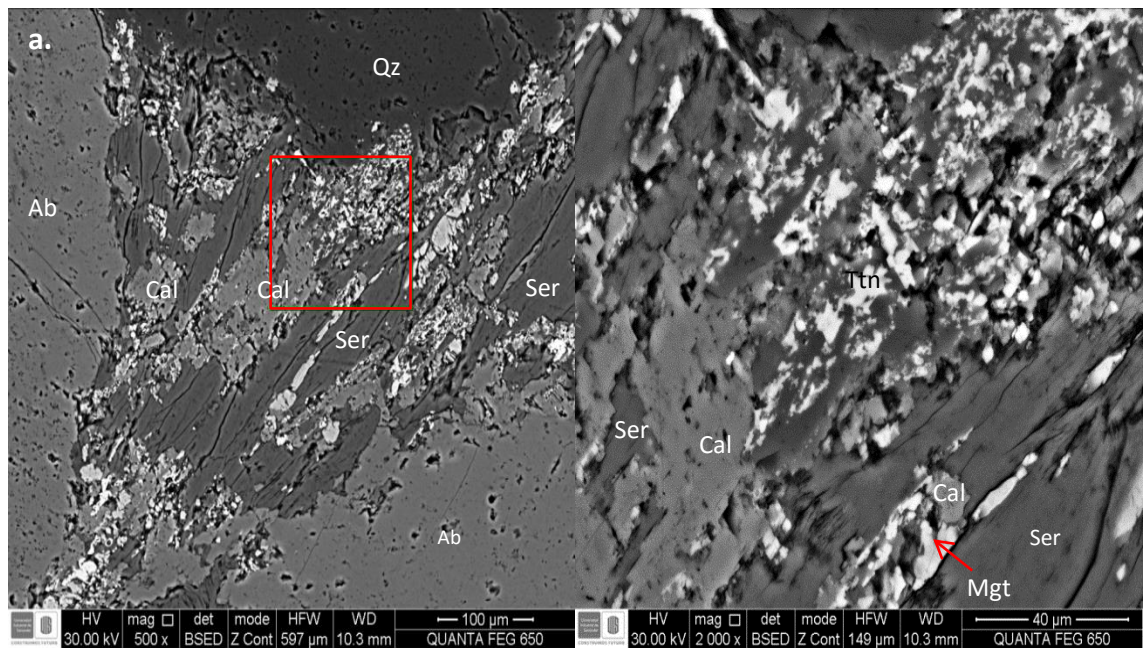


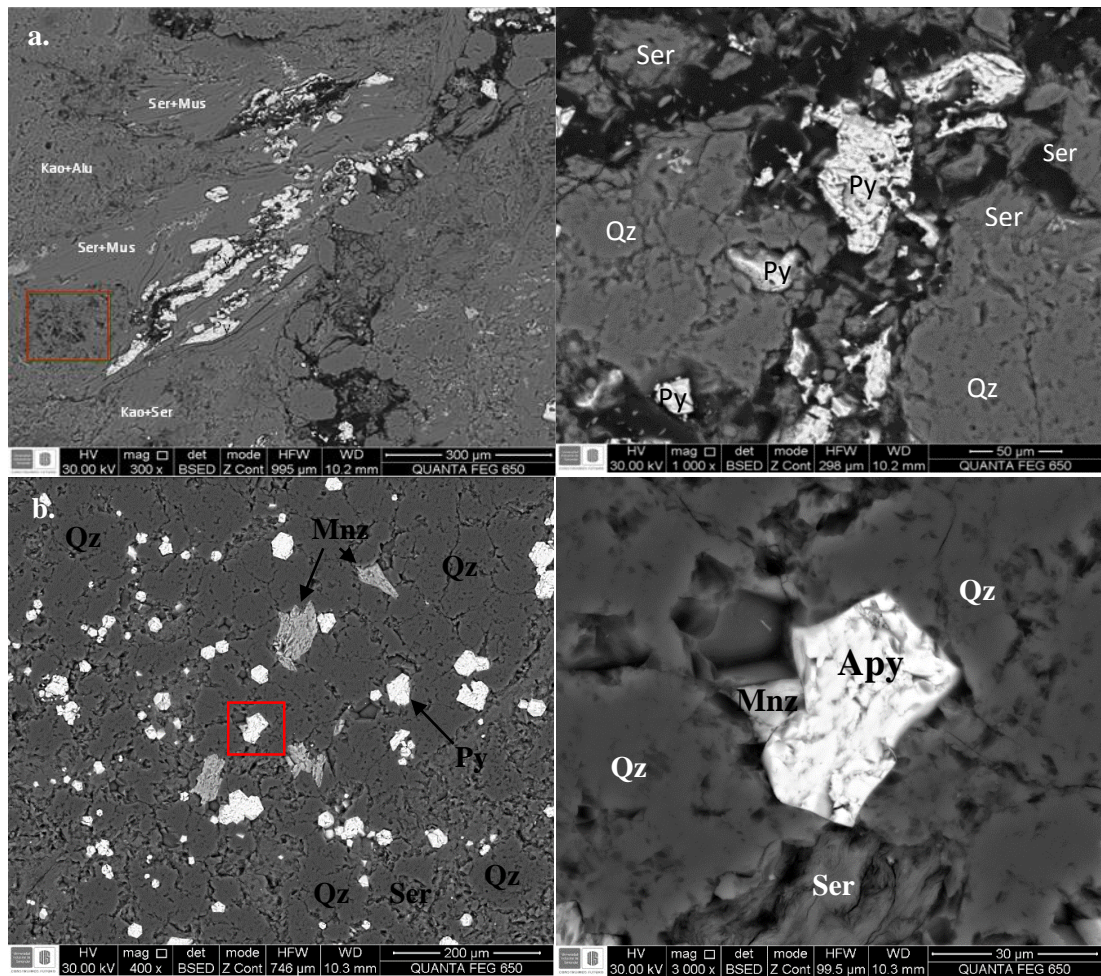
Figura. 24: Aspecto a escala de microscopía electrónica de las rocas afectadas por alteración sericítica. a. Microfotografía donde se observa la presencia de sericita alterando los cristales de albita y en algunos sectores sobreimpuesta a la alteración propilítica además se observan los minerales leucoxeno y magnetita (muestra GD-03-06).



- **Contextos paragenéticos asociados al Evento II (Alteración Sericítica).**

Dentro de la alteración sericítica se desarrollaron tres contextos paragenéticos: venas de Py de poca longitud rodeadas por halos de sericita, el tamaño de los cristales de pirita es muy fino y la forma varia de euhedrales a anhedrales. Venas de Qz+Apy±Py de aproximadamente 1mm de espesor. La arsenopirita y la pirita se presentan como cristales subhedrales y con tamaños variables de 20 a 40 µm (Figura 25).

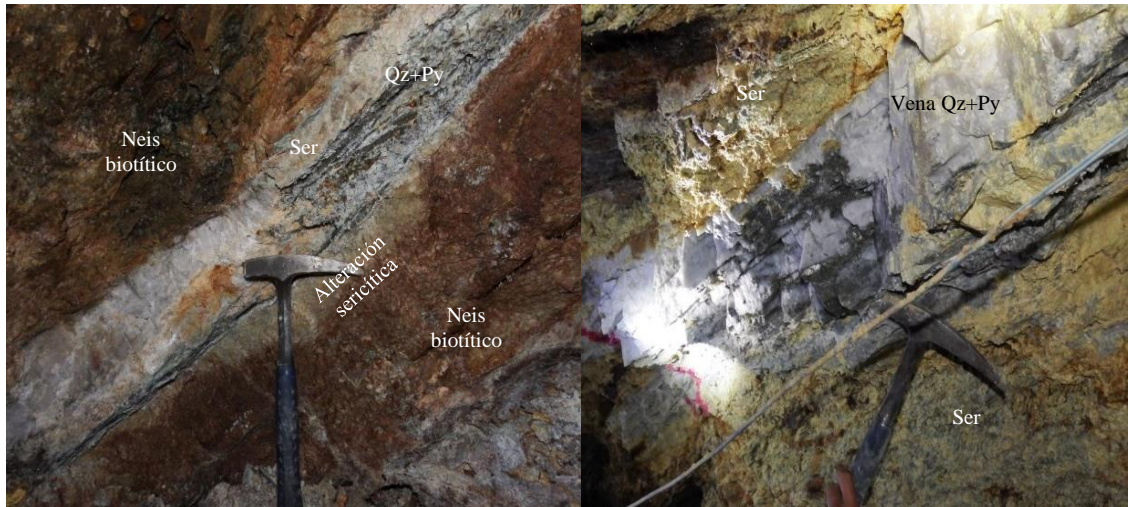
Figura. 25: Imágenes SEM donde se observan las vetillas asociadas a la alteración sericítica; a. Venas de Py rodeadas por halos de sericita; b. Venas de Qz+Apy±Py, se observan cristales de monacita como relictos de roca ígnea.



Las venas de cuarzo+pirita se desarrollan como venas gruesas. La pirita se presenta como cristales de tamaño grueso con formas euhedrales. Estas venas están rodeadas por un halo sericítico por lo cual se pueden interpretar como venas tipo D (Figura 26).

Figura 26: Aspecto de afloramientos observados en el túnel de la Mina La Providencia (a. Filón Cruzada Reca, b. Cruce Frente Real); a. Fotografía donde se observa la presencia de una vena con rumbo 270/43 de cuarzo + pirita cortando el neis biotítico, hacia los bordes de las venas se

observa un halo de alteración posiblemente sericítico. Muestra GD-02-03. b. Fotografía donde se observa la presencia de una vena gruesa de cuarzo + pirita cortando posible alteración sericítica. Muestra GD-06-12.



En la zona de la Mina La Providencia se identificó la presencia de alteración argílica avanzada, que abarca los dos últimos eventos de alteración hidrotermal-mineralización, los cuales están asociados con el sistema epitermal. Estos han sido denominados como Evento III, el cual se desarrolla hacia la parte más distal de la zona de alteración argílica avanzada (Qz+Kln+Dck±Alu) y Evento IV relacionado con parte de la alteración argílica avanzada asociada con Qz+Alu y la zona del núcleo silíceo (silicificación) del sistema epitermal.

7.2.3. Evento III. Alteración argílica avanzada (Qz+Kln+Dck): En la zona de la Mina La Providencia se identificó la presencia de la asociación mineral (Qz+Kln+Dck) como tercer evento. Este evento se encuentra afectando a las diferentes litologías presentes en la mina y está relacionado al desarrollo de brechas hidrotermales de dos tipos, las cuales se caracterizan por ser fragmento soportadas.

La primera brecha fue clasificada como brecha jigsaw debido a que los fragmentos de la roca caja fueron levemente separados por vetillas de cemento silíceo que varían de 0,5 a 1mm de espesor, las cuales se encuentran interconectadas formando una estructura de tipo stockwork. El otro tipo de brecha es una variedad de brechas mosaico en la cual los fragmentos de roca caja presentan una ligera rotación y observándose que algunos de estos fragmentos son redondeados. Los fragmentos de la roca caja en los dos tipos de brechas hidrotermales presentan alteración argílica avanzada debido a la presencia de las asociaciones minerales (Qz+Kln±Dck) (Figura 27 y 28).

Figura 27: Aspecto en muestra de mano de las brechas hidrotermales. a y b Brecha hidrotermal fragmento soportada, la cual ha sido clasificada como brecha mosaico, hay presencia de vetillas de cuarzo, esta brecha está siendo cortada por una sucesión de venas paralelas; c. Brecha hidrotermal clasificada como brecha mosaico donde se observa la presencia de clastos subangulares de cuarzo y alunita y algunas venas de cuarzo microcristalino. d. Brecha hidrotermal clasificada como jigsaw en la cual es posible observar la presencia de vetillas de cuarzo formando estructuras de tipo stockwork.

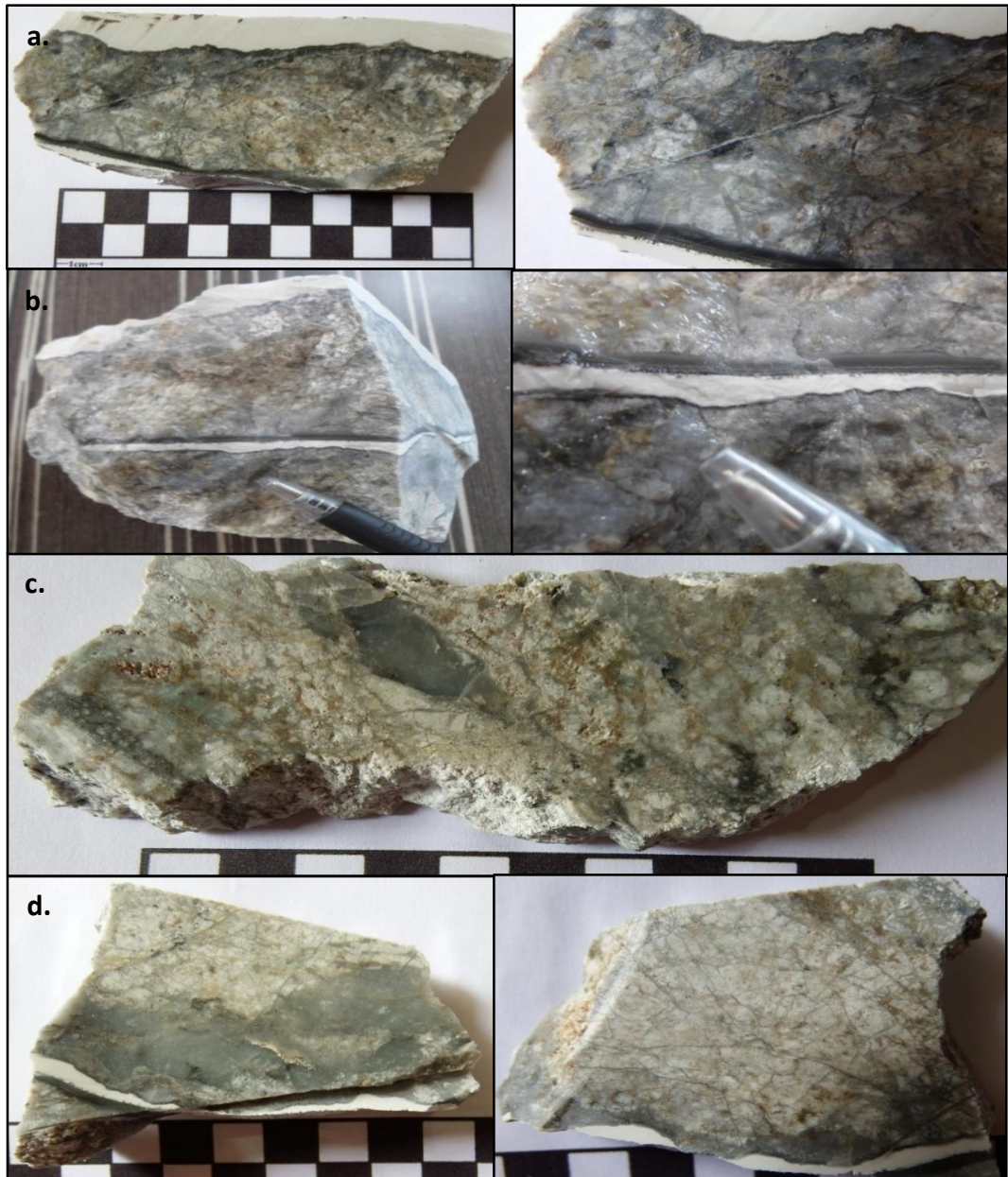
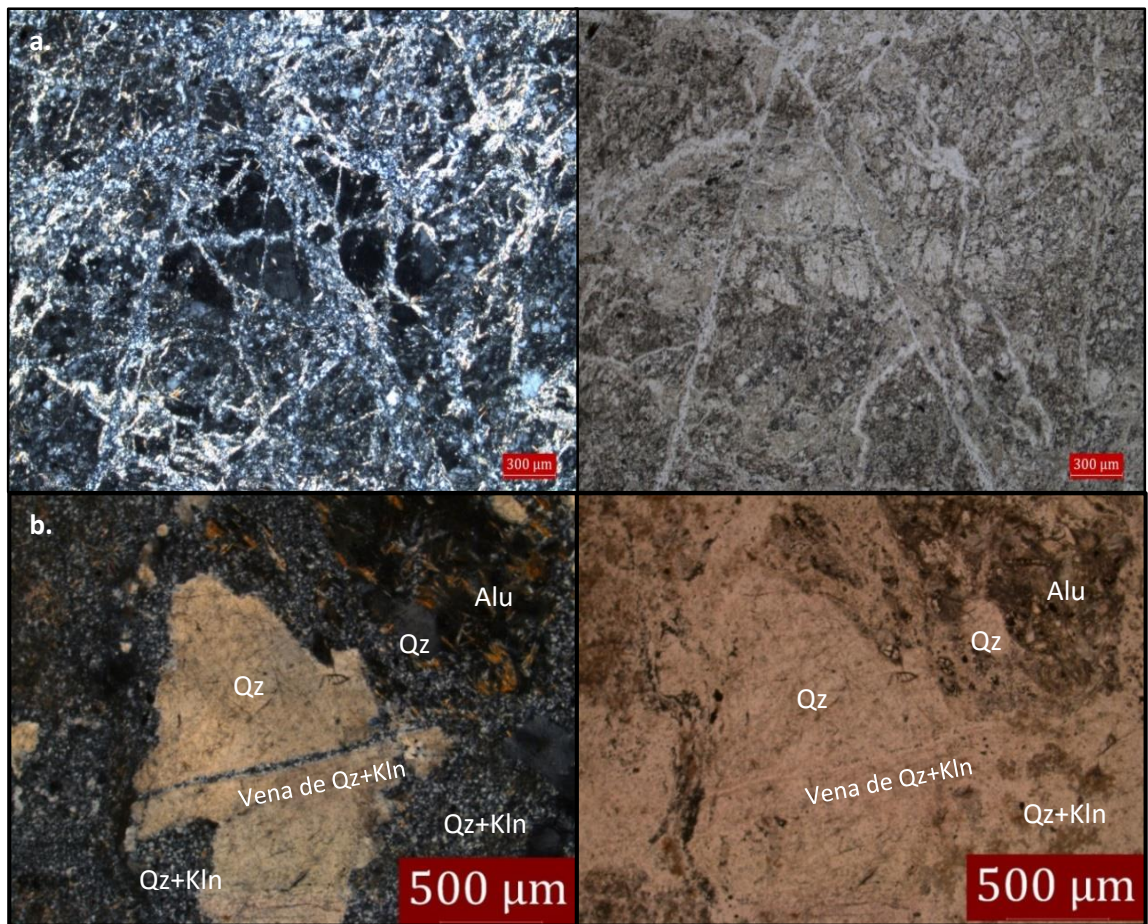


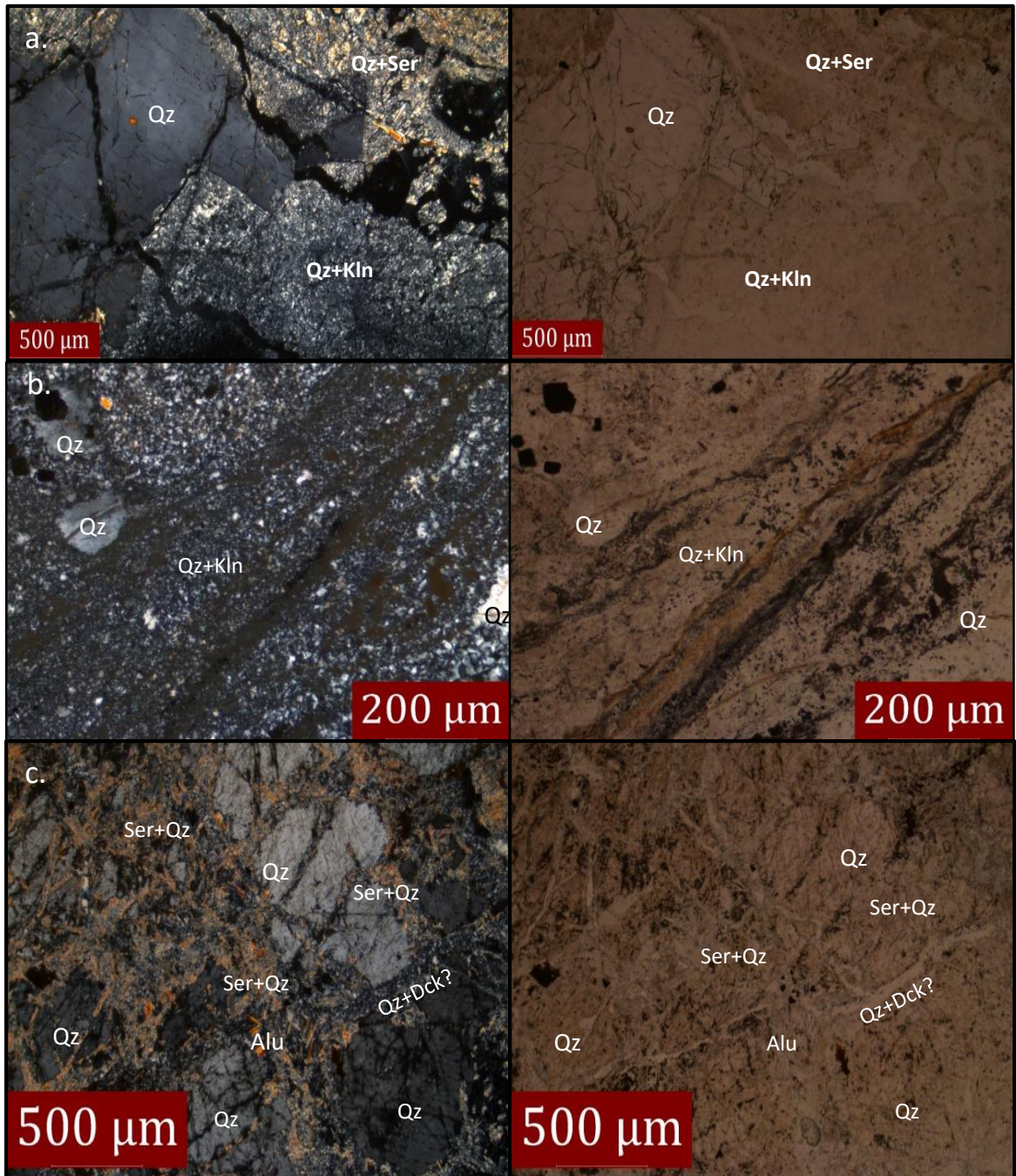
Figura 28: Aspecto a escala microscópica de las brechas hidrotermales. a. Microfotografía donde se observa la presencia venas de tipo stockwork de la brecha hidrotermal tipo jigsaw. b. Microfotografía en la cual es posible identificar la presencia de cristales de cuarzo cortados por

venas de Qz+Kln, rodeados por una matriz compuesta por la misma asociación mineral que rellena las venas; también se identifican posibles cristales de feldespatos alterados a alunita.



La alteración argílica avanzada Qz+Kln+Dck, se identificó a escala macroscópica por la coloración blancuzca de la roca debido a la presencia de arcillas. Esta alteración comprende Cuarzo+Caolinita en mayor proporción y Cuarzo+Dickita (Figura 29) como asociaciones minerales características. Se encuentra sobreimpuesta a la alteración sericítica (Figura 29), se presenta generalmente con un tamaño de grano fino a medio asociada con cuarzo microcristalino, también como parte de la matriz de la roca.

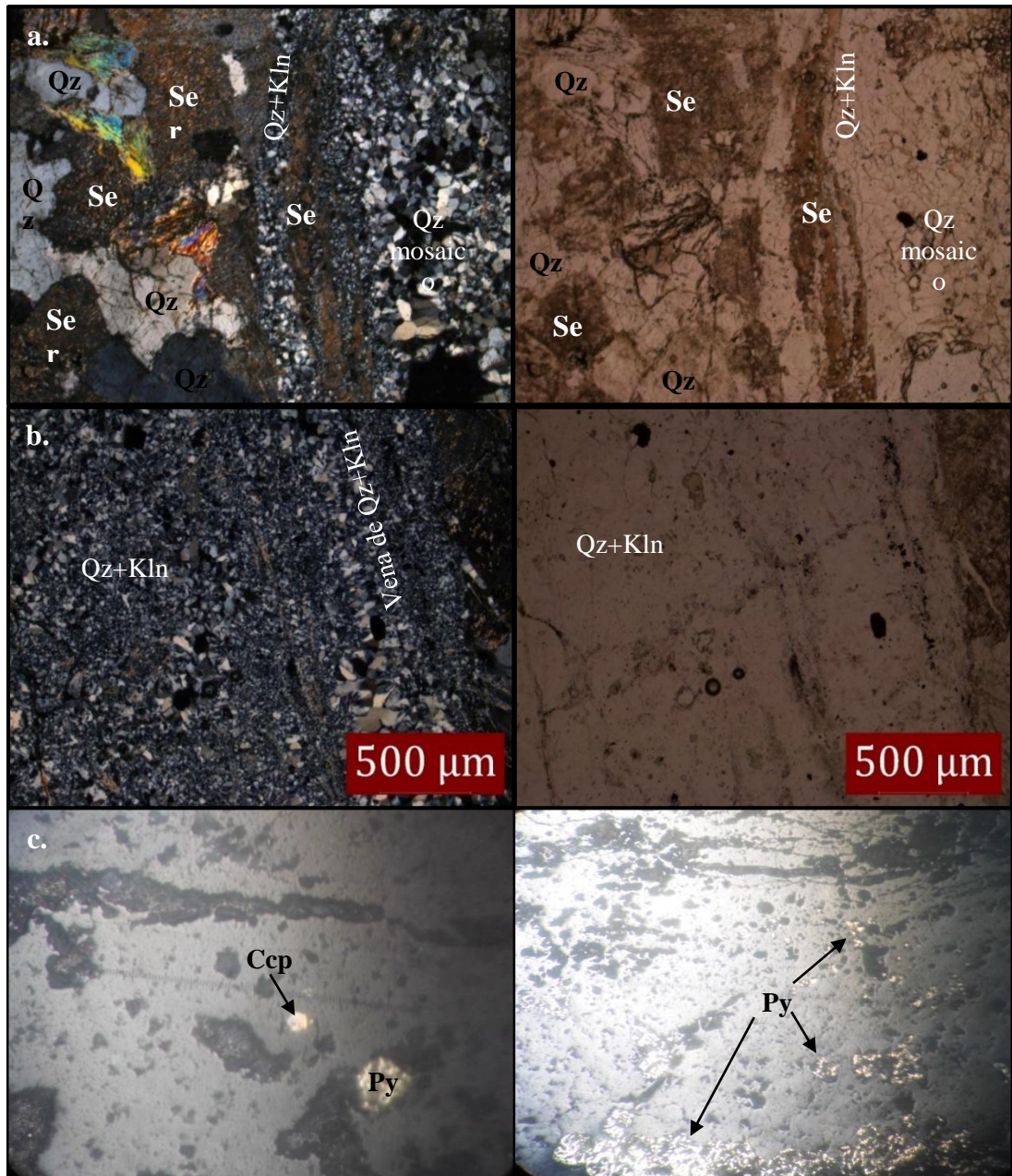
Figura. 29: Aspecto a escala microscópica de la parte distal de la zona alteración argílica avanzada; a. Alteración sericítica sobreimpuesta por alteración Qz+Kln (Muestra GD-08); b. Alteración argílica avanzada Qz+Kln haciendo parte de la matriz de la roca (Muestra GD-11); c. Relictos anhedrales de cuarzo cortados por venas de Ser+Qz y venas Qz+Dck. También se observa presencia de alunita (Muestra GD-11).



- **Contextos paragenéticos asociados al Evento III (alteración argílica avanzada Qz+Kln+Dck)**

En este evento fueron identificados tres contextos paragenéticos. Primero, se identificaron venas de Qz+Ccp+Py que varían de 100 a 400 μm, donde el cuarzo presenta textura mosaico y microcristalina, la pirita se observa como cristales subhedrales muy finos y la calcopirita presenta formas euhedrales y es mucho más fina que la pirita (Figura 30 c).

Figura. 30: Aspectos microscópicos de las venas de Qz+Ccp+Py; a y b. Microfotografía bajo microscopio de luz transmitida donde se observa la presencia de venas de cuarzo+caolinita cortando la alteración sericítica (Muestra GD-01-01). c. Microfotografía observada bajo el microscopio de luz reflejada donde se observa que las venas de cuarzo+caolinita presentan pirita y calcopirita (Muestra GD-01-01).



Como segundo contexto paragenético se presentan venas de Qz+Py+Sph, las cuales se presentan principalmente en las brechas hidrotermales, formando estructuras de tipo stockworks en algunos sectores. Estas venas presentan un espesor que varía de 100 a 400µm

y están compuestas por cuarzo masivo microcristalino, pirita, esfalerita pobre en hierro y en algunos sectores leucoxeno (Figura 31 y 32).

La pirita se presenta como cristales subhedrales que varían de 10 a 50 μm y se encuentra asociada con cristales subhedrales de aproximadamente 30 μm de diámetro de esfalerita pobre en hierro identificada a partir de microscopía óptica y electrónica. En algunos sectores se logró identificar la presencia de cristales anhedrales de aproximadamente 10 μm de leucoxeno (Figura 31 y 32).

Figura 31: Aspectos microscópicos de las venas de Qz+Py+Sph; Fotografías SEM donde se observa la presencia de venas de cuarzo + pirita + esfalerita pobre en Fe y leucoxeno (Muestra GD-11-21).

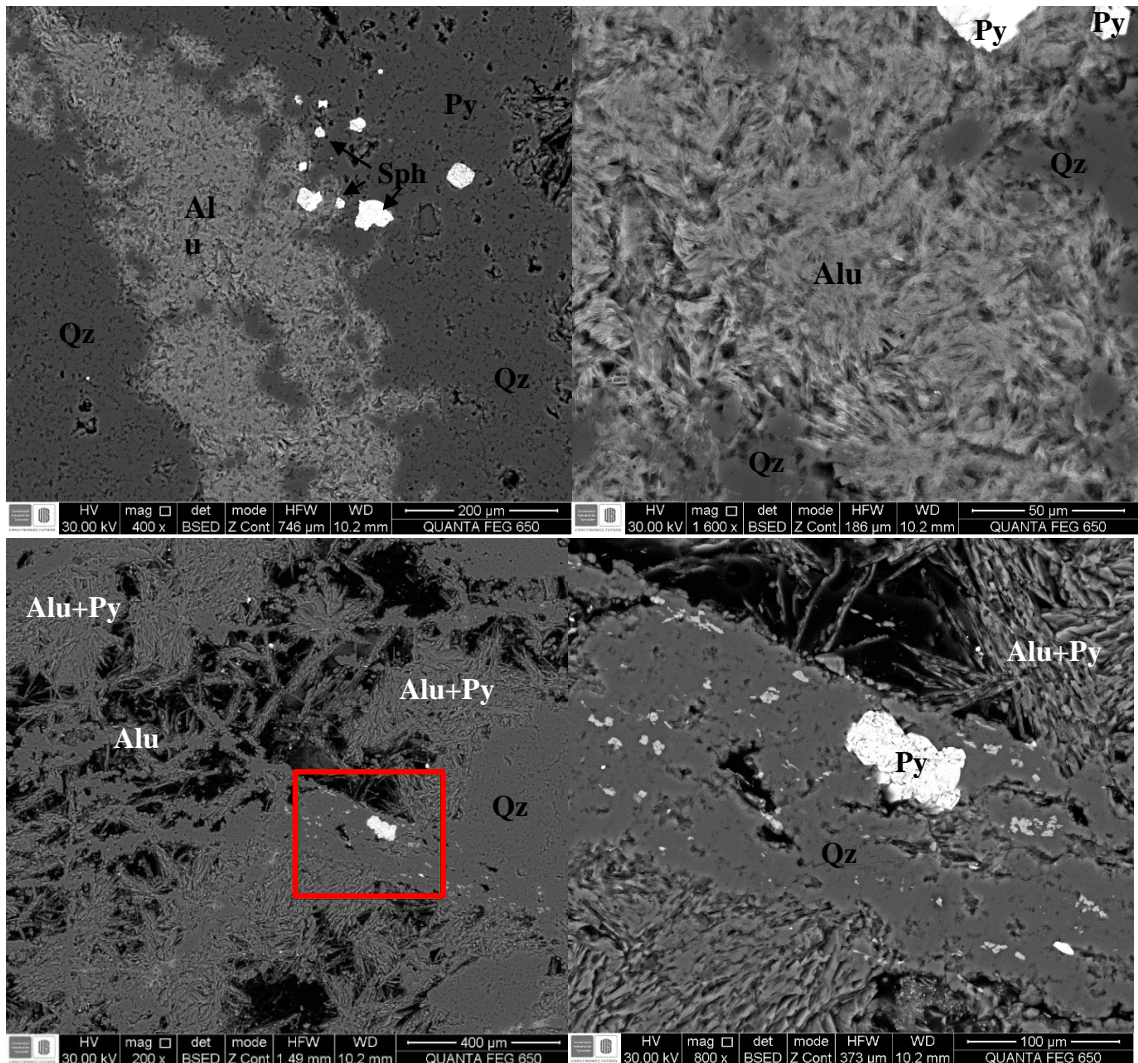
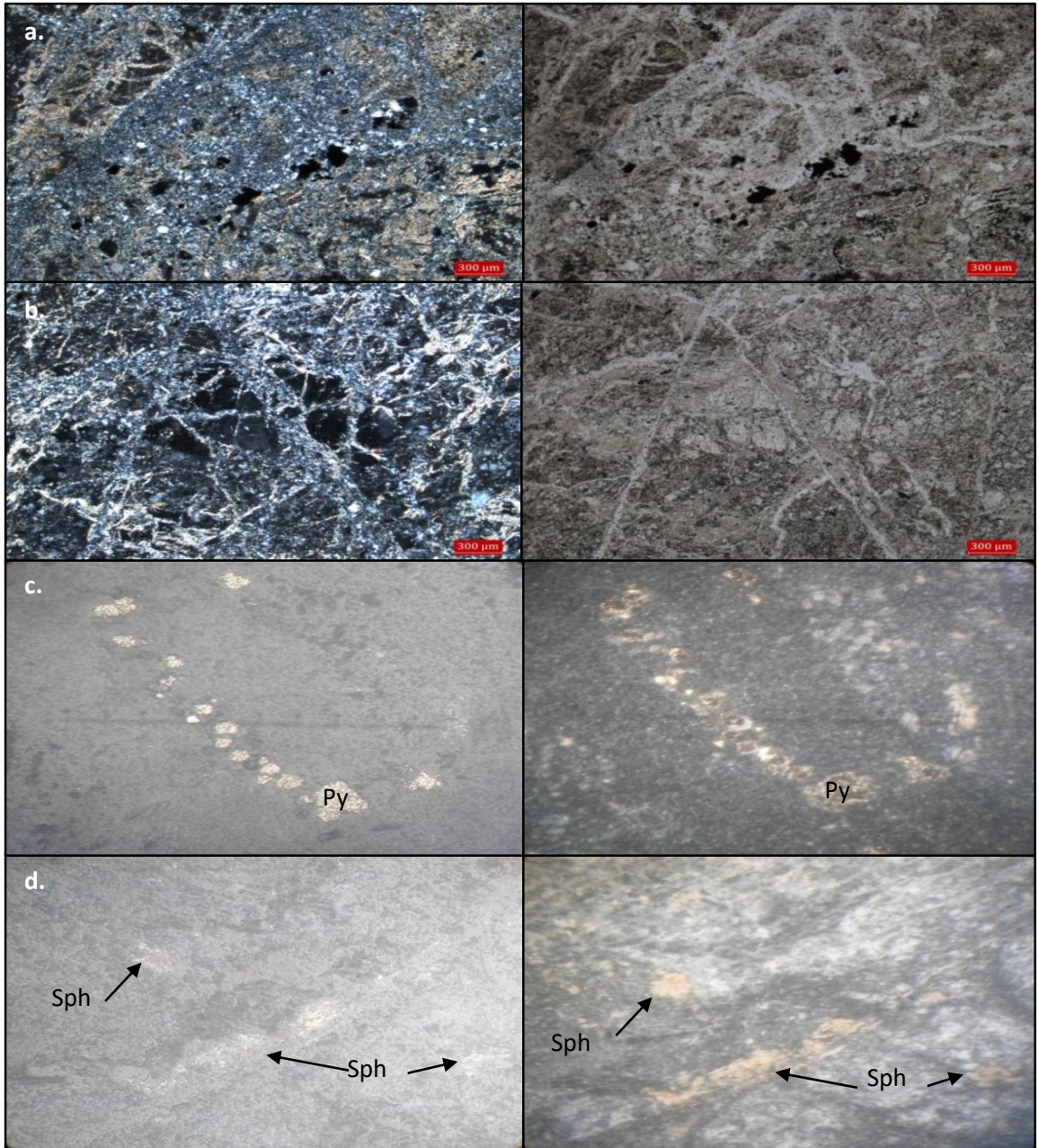


Figura. 32: Aspectos microscópicos de las venas de Qz+Py+Sph formando estructuras de tipo stockworks; a y b. Microfotografías en microscopio de luz transmitida Nx donde se observa la estructura de tipo stockwork (Muestra GD-11-21-4); c y d. Microfotografía bajo el microscopio de luz reflejada donde se observan algunas venas de Qz+ Py+ Sph pobre en hierro.



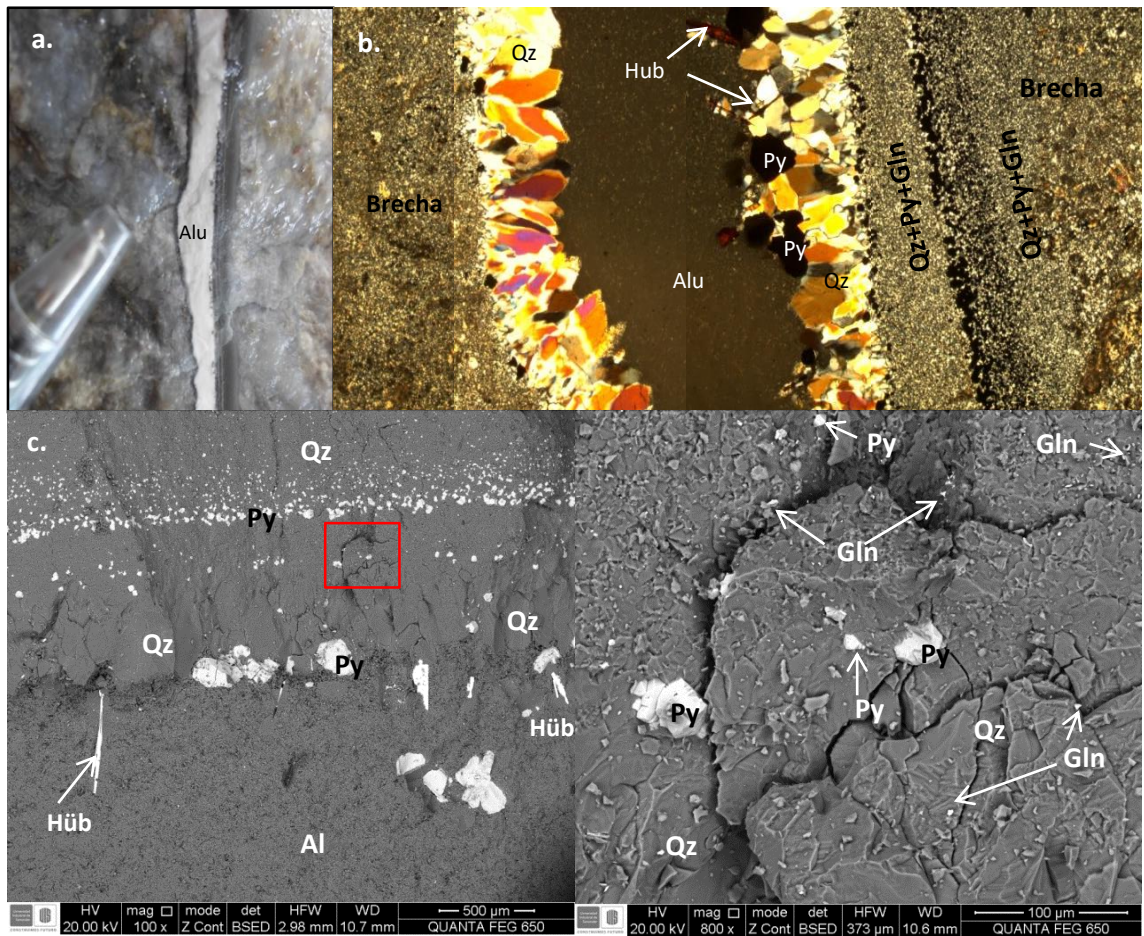
El último contexto paragenético desarrollado en este evento, se caracteriza por una secuencia de bandas paralelas de cuarzo de textura masiva y microcristalina las cuales cortan las brechas hidrotermales y evidencian el desarrollo de una textura crustiforme.

La primera vena tiene un espesor aproximado de 700 μm , presenta relleno de cuarzo masivo microcristalino y tiene contenido de sulfuros como galena y pirita, esta última se concentra hacia los bordes y centro de la vena. La galena se encuentra en el contacto entre estas dos venas como cristales anhedrales de tamaño muy fino. La segunda vena tiene aproximadamente 500 μm de espesor, se caracteriza por la presencia de minerales como cuarzo crustiforme con textura sintaxial (ápices de los bordes apuntando a la banda de alunita de un evento posterior), pirita subhedral gruesa, galena y cristales alargados de wolframita rica en Mn (Hübnerita) y con algún contenido de Fe (Figura 33).

Figura 33: Aspecto macroscópico y microscópico de la secuencia de bandas del último contexto paragenético; a. Brecha hidrotermal donde se observa una secuencia de venas paralelas de dos eventos diferentes (Muestra GD-21-01); b. Microfotografía bajo el microscopio de luz transmitida de la secuencia de venas donde se observa una vena de $\text{Qz}+\text{Py}+\text{Gln}+\text{Hüb}$, una vena de Qz masivo microcristalino+ $\text{Py}+\text{Gln}$ y una vena de $\text{Alu}+\text{Qz}+\text{Py}$ formada posteriormente (Evento IV). c. Imagen SEM donde se observa la secuencia de venas, en esta imagen se resalta la presencia de sulfuros como Py y Sph en las venas de cuarzo.

7.2.4. Evento IV (alteración argílica avanzada Qz+Alu y silicificación): Este evento comprende la alteración Cuarzo+Alunita, la cual macroscópicamente fue identificada por la coloración blancuzca y textura sacarosa característica de la alunita, además por la presencia de venas delgadas a gruesas de este mineral, algunas de estas con presencia de sulfuros como pirita y esfalerita (Figura 34). Mediante análisis de difracción de rayo X (Anexo D) fue posible determinar que la alunita de este evento es hipógena. El Evento IV se desarrolló principalmente en las zonas de los filones y alterando parcialmente la roca caja.

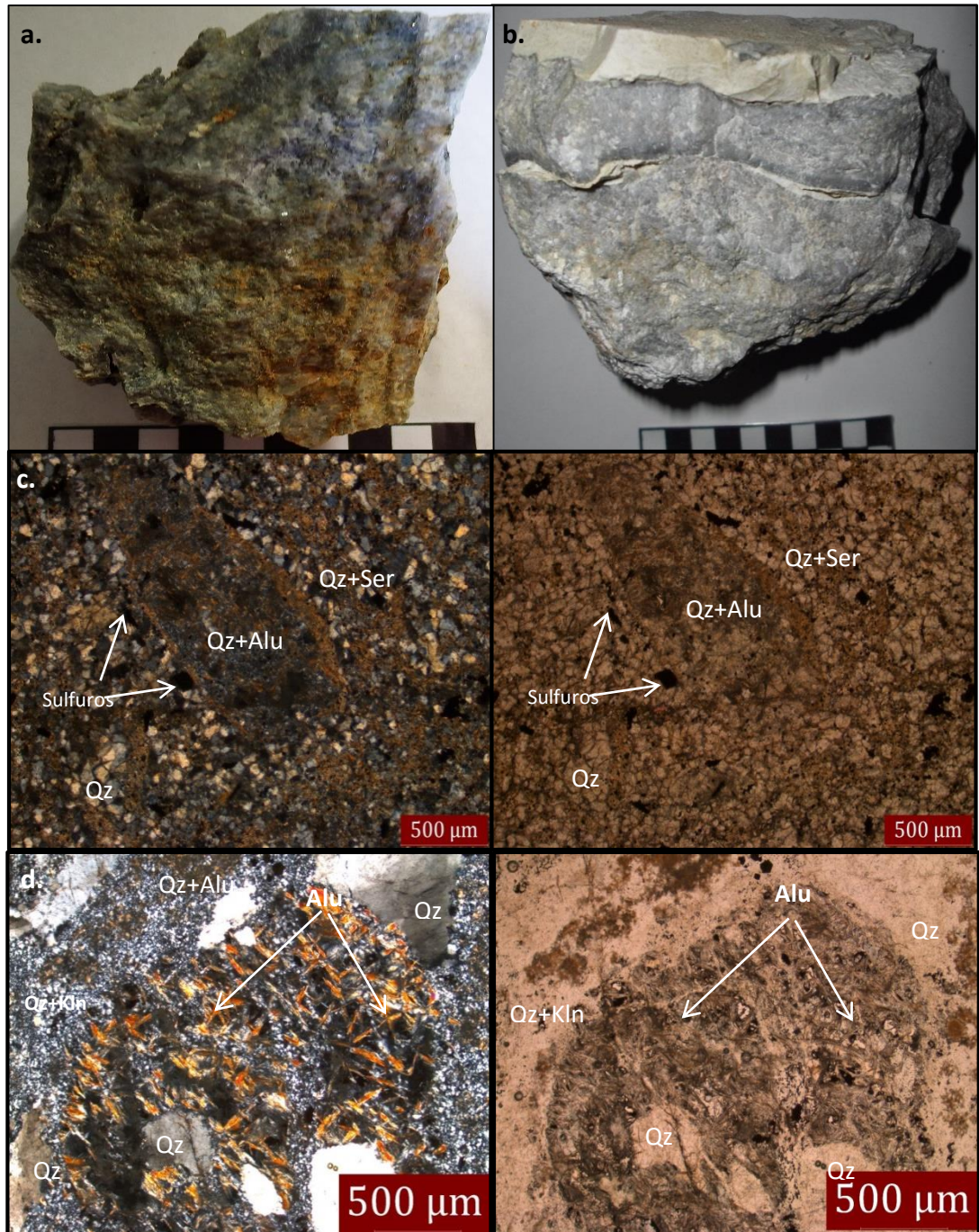
La asociación mineral Cuarzo+Alunita se presenta con variaciones en el tamaño de grano, en algunas muestras se observa cuarzo microcristalino y alunita de grano fino reemplazando la matriz de la roca (Figura 34a), también se presenta como parches y como relleno de venas asociado a sulfuros en poca cantidad (Figura 34 b), finalmente es posible establecer la



presencia de Alunita de grano grueso como reemplazo de posibles cristales de feldespato y

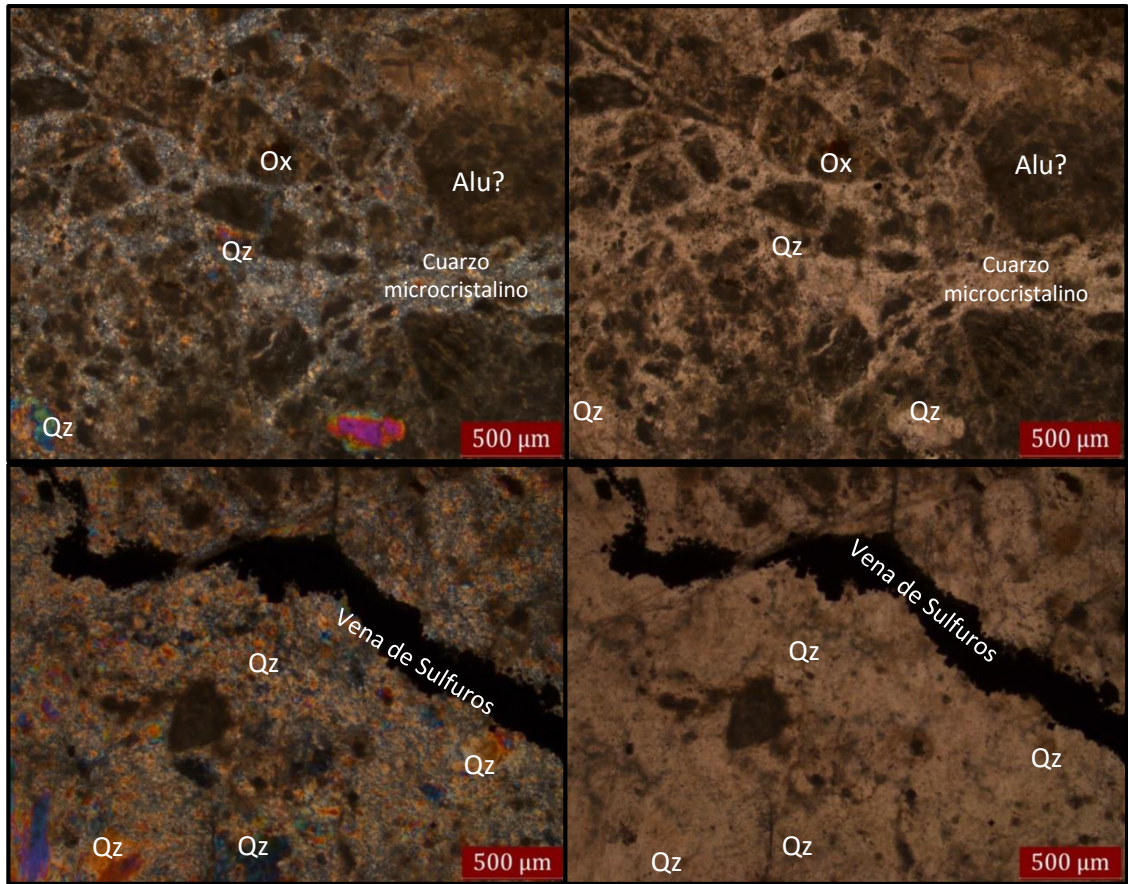
alunita de grano fino como parte de la matriz de la roca (Figura 34 c). El Evento IV se encuentra principalmente afectando las brechas hidrotermales.

Figura 34: Aspecto macroscópico y microscópico de rocas afectadas por alteración Qz+Alu; a y b. Muestra de mano en la que se identifica la alteración cuarzo+alunita como matriz de la roca y como relleno de venas (Muestras GD-08-18 y GD-11-21); c. Microfotografía en la que se observa alteración argílica avanzada (Qz+Alu) rodeada por la alteración sericítica (Muestra GD-08); d. Microfotografía donde se identifica la presencia de alunita de grano grueso alterando cristales de feldespato y alunita de grano fino en la matriz de la roca (Muestra GD-11).



La Silicificación se reconoce por la adición de sílice a la roca, en la zona de la Mina La Providencia se caracteriza por la presencia de cristales de cuarzo microcristalino intercrecidos entre los relictos de cuarzo y alunita, está asociada con sulfuros como: calcopirita, pirita y esfalerita (Figura 35)

Figura 35: Aspectos microscópicos de las rocas afectadas por silicificación; a y b. Microfotografías donde se observa el intercrecimiento de microcristales de cuarzo entre los relictos de cuarzo de la roca caja (Muestra GD-11-21-2).



- **Contextos paragenéticos asociados al Evento IV (alteración argílica avanzada Qz+Alu y silicificación)**

Los contextos paragenéticos asociados a este evento son tres: venas de alunita hipógena y cuarzo con relictos de cuarzo, pirita de aproximadamente 100 µm de diámetro con forma subhedral y cristales alargados de wolframita rica en Mn de aproximadamente 150 µm de largo, provenientes de la secuencia de bandas que se presenta en la etapa anterior (Figura 36 y 37).

Figura. 36: Aspectos microscópicos de las venas de Qz+Alu+Py. Imágenes SEM de la secuencia de venas, en esta imagen resalta la presencia de una vena de Alu +Qz+ Py con relictos de cristales alargados de Hüb, cristales de cuarzo y pirita.

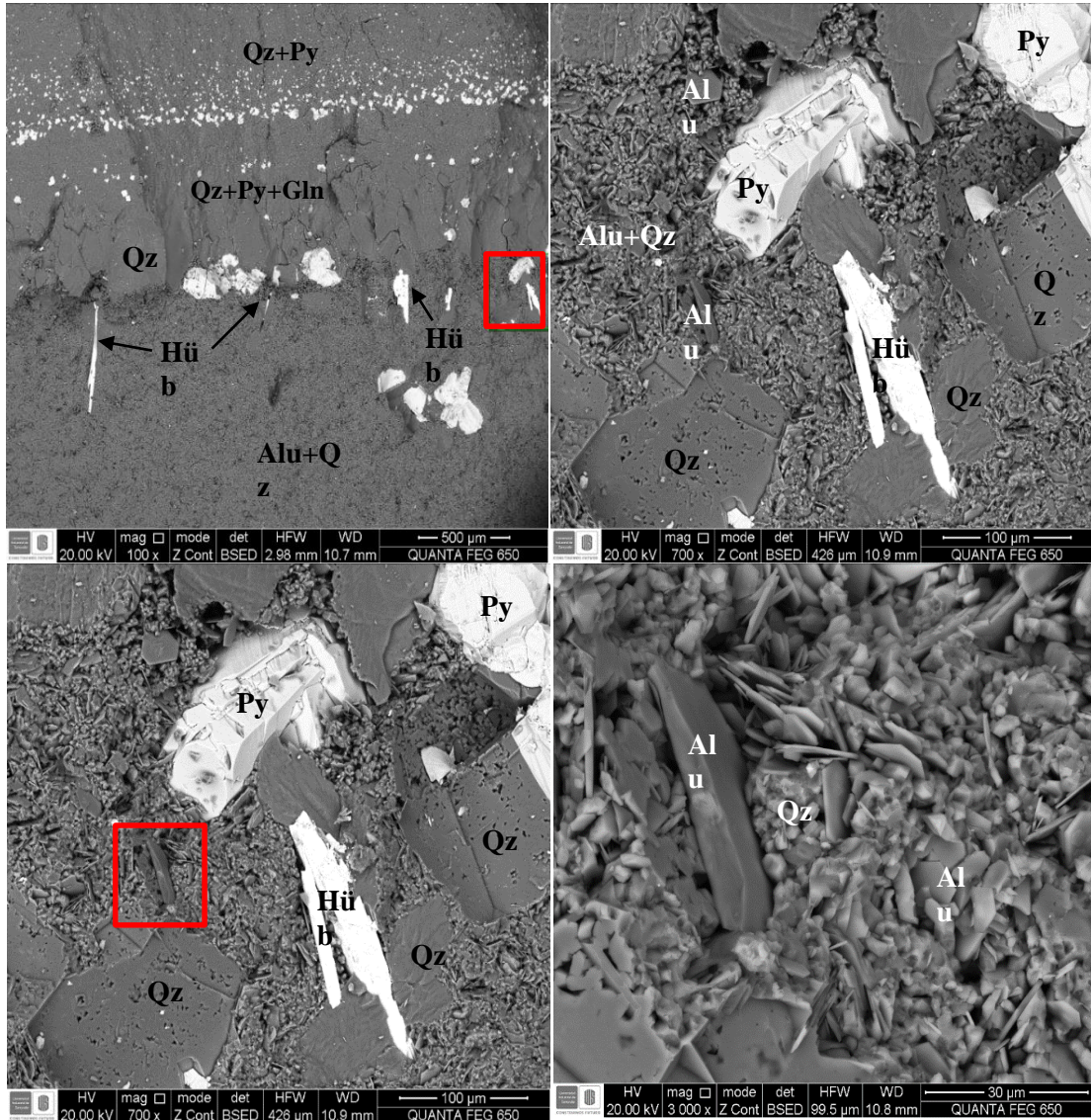
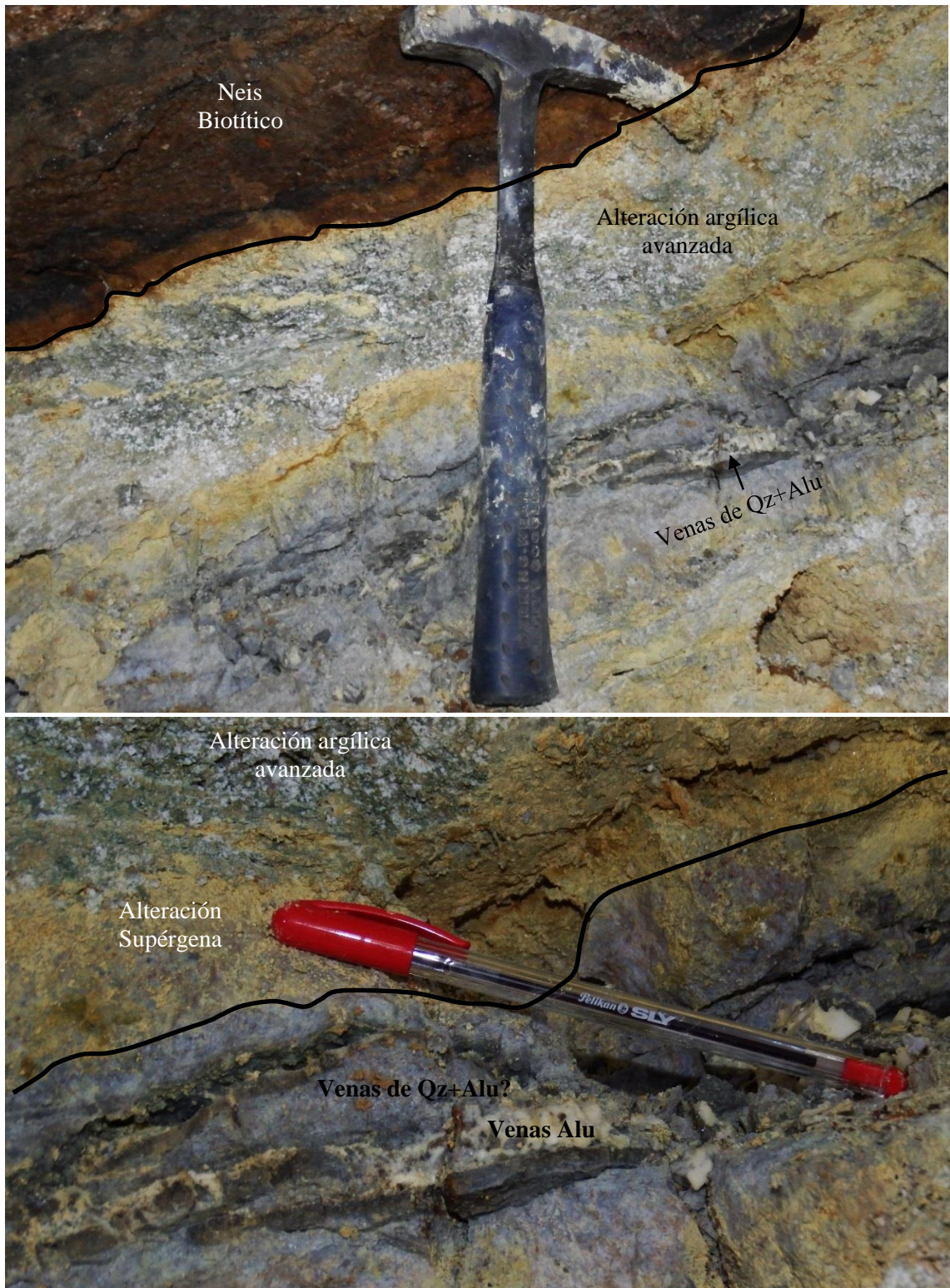
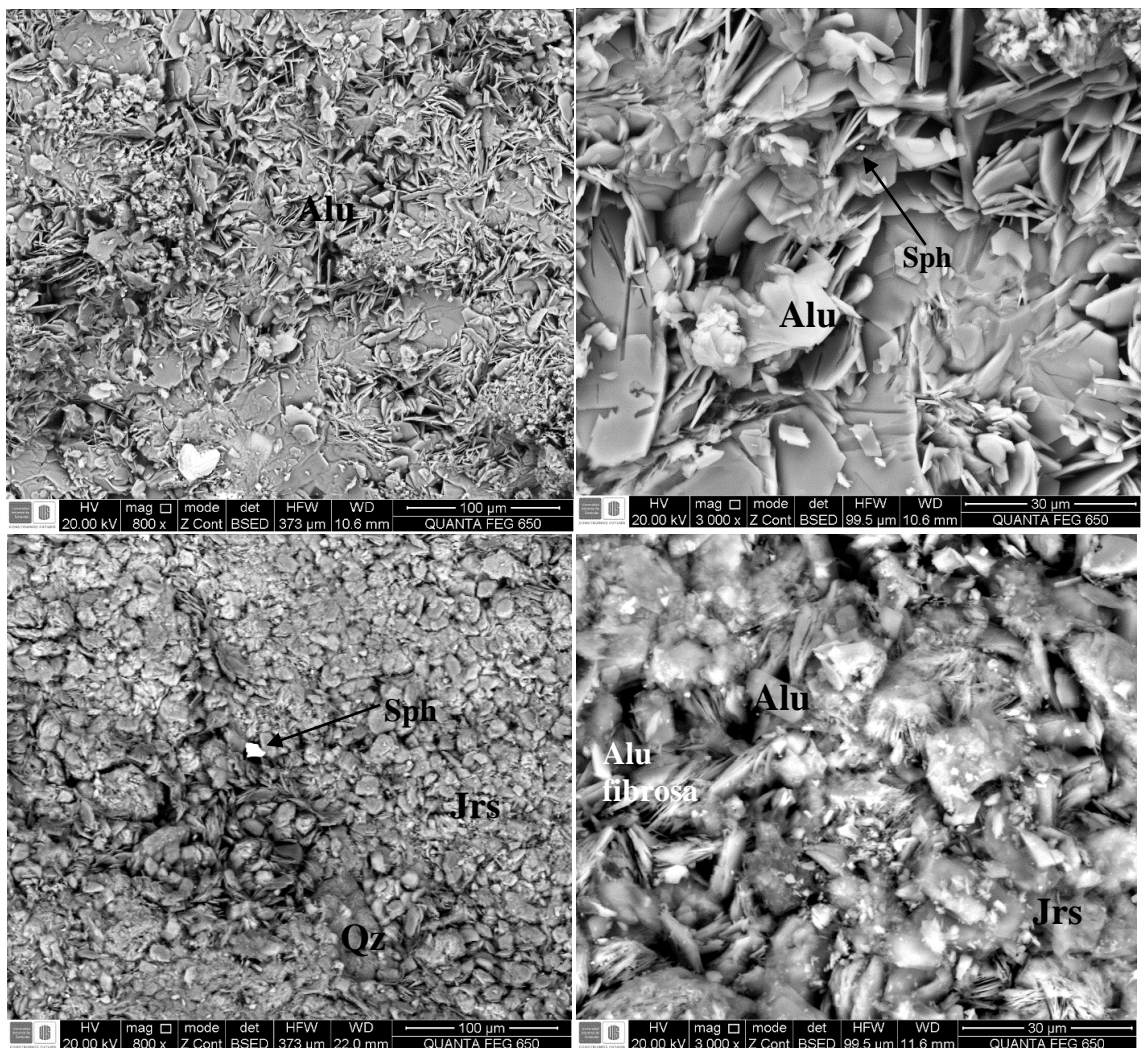


Figura 37: Aspecto de afloramiento observados en el túnel de la Mina La Providencia, donde se observa Neis biotítico afectado por un evento de alteración argílica avanzada, donde también se identifica la presencia de venas de cuarzo y alunita.



Venas de alunita + esfalerita las cuales se encuentran cortando las brechas hidrotermales (Figura 38). La Alunita de estas venas fue identificada mediante análisis SEM presentando habito tabular característico de este mineral y fibroso relacionado con Alunita supérgena (jaroisita) y la esfalerita se presenta ocasionalmente con un tamaño aproximado de 10 μm y con forma anhedral (Figura 38).

Figura 38: Imágenes SEM a. Alunita pura con pequeños cristales de posible esfalerita y b. Jarosita, alunita y pequeños cristales de esfalerita pobre en hierro



Como último contexto paragenético se presentan $\text{Qz} + \text{Eng} + \text{Sph} + \text{Au} \pm \text{Py} \pm \text{Teluros}$, el cual se desarrolló posteriormente a la silicificación (sílice residual). El cuarzo es incoloro con habito

tabular. La enargita es negra con brillo metálico, el tamaño de los cristales es fino de aproximadamente 1mm de diámetro, presenta forma euhedral. La esfalerita es acaramelada lo cual puede indicar que presenta un bajo contenido de hierro, brillo vítreo, el tamaño de los cristales es fino de aproximadamente 1,3mm de diámetro y presenta forma euhedral. Los teluros son plateados con brillo metálico y alargados. La pirita es amarilla con brillo metálico, tamaño de los cristales es muy fino y forma subhedral. El oro se presenta libre asociado a los minerales anteriormente mencionados, es de color amarillo, con brillo metálico, se observa con textura masiva y en algunas ocasiones con hábito fibroso (Figura 39 y 40).

Figura 39: Aspectos macroscópicos bajo lupa binocular en las que se observa la presencia de oro libre asociado con diferentes minerales como enargita, esfalerita, teluros y pirita. a. Au libre asociado a enargita. b y c. Au asociado con cristales de esfalerita de color caramelo y cuarzo. d y e. Au con habito fibroso asociado con teluros. f. Au asociado a esfalerita y enargita.

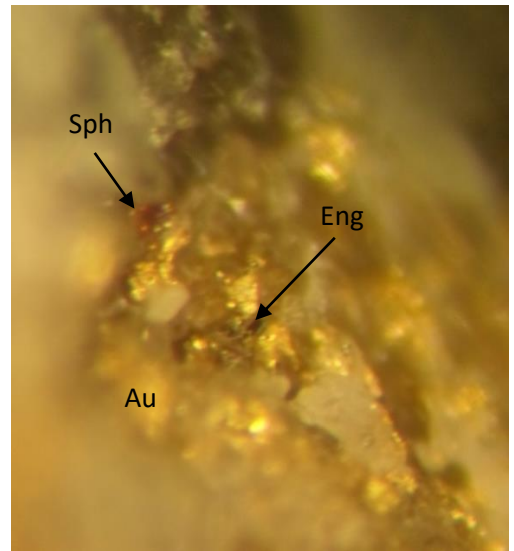
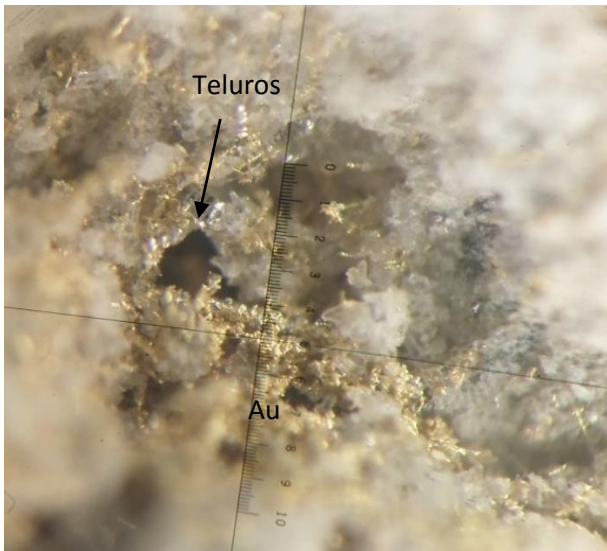
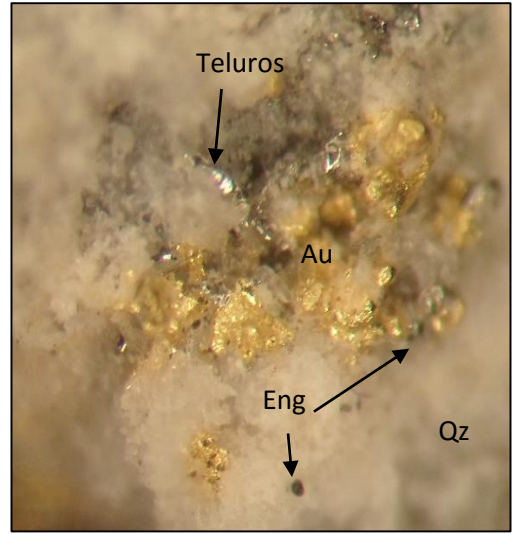
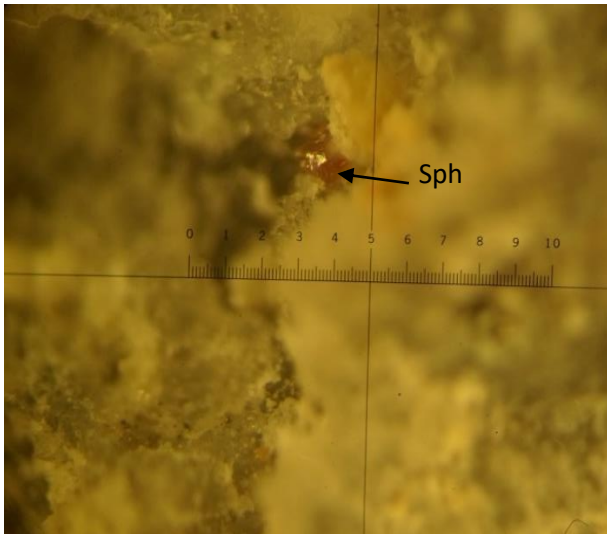
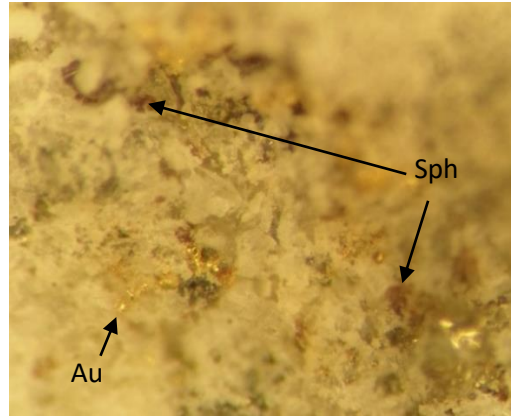
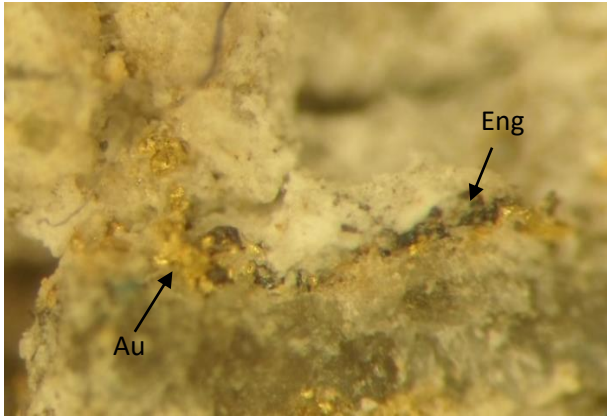
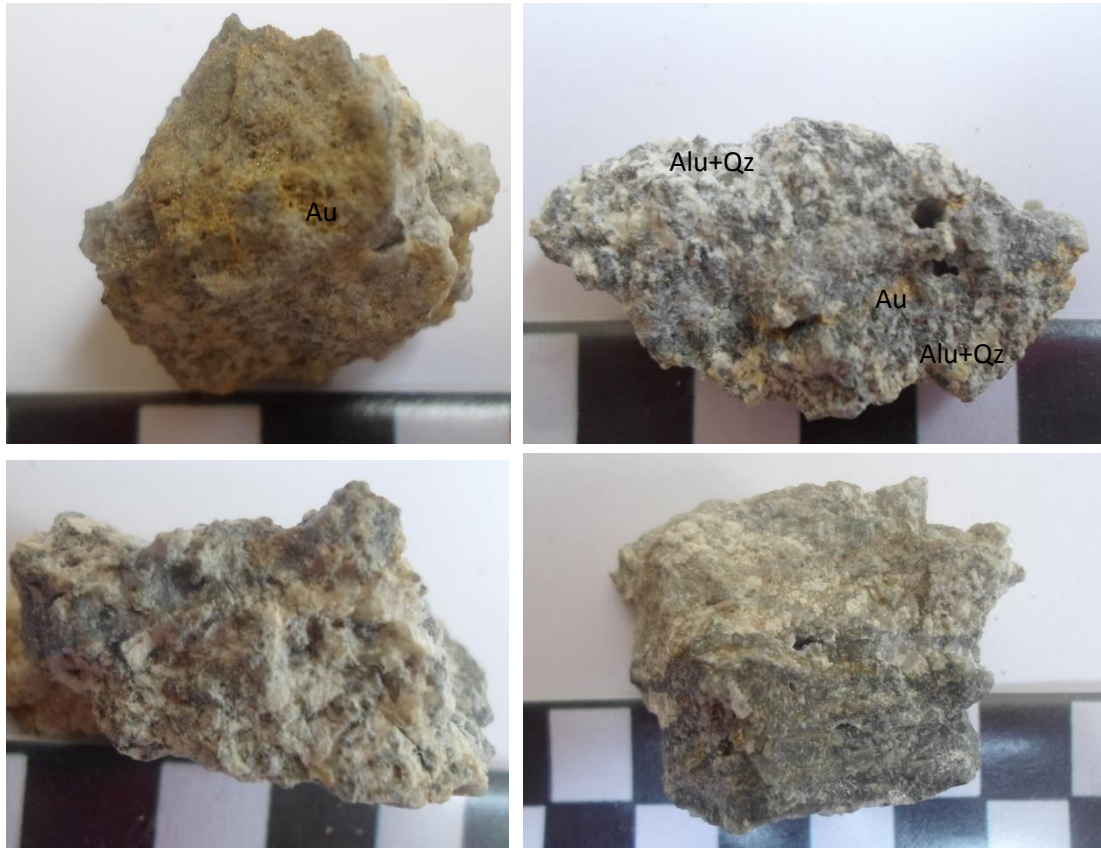


Figura 40: Aspectos macroscópicos de las muestras hospedantes de la mineralización.

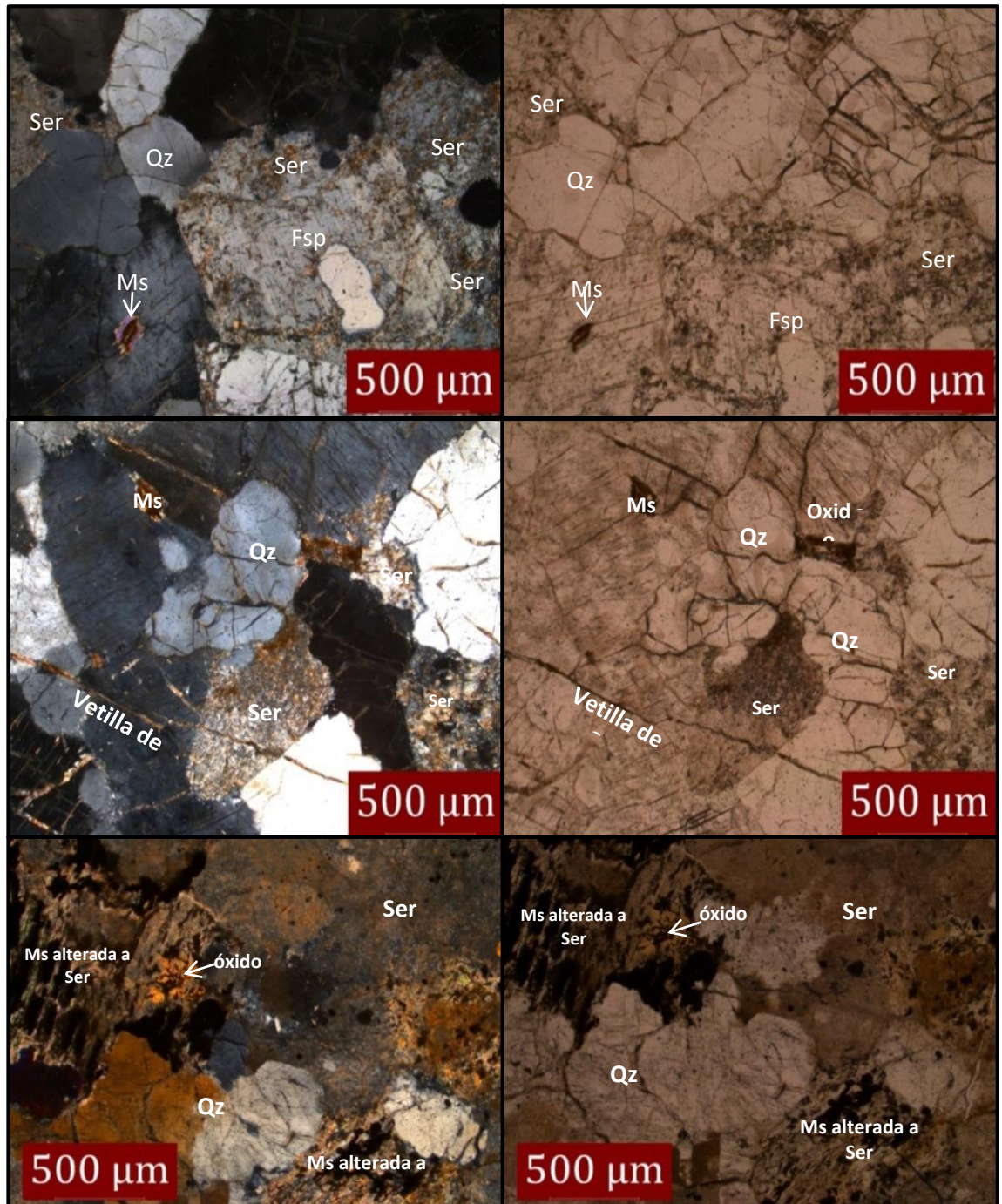


7.2.5. Alteración Supérgena: Jaroisita, calcantita y óxidos como minerales característicos:

La alteración Supérgena se encuentra afectando todos los tipos de roca identificados en la zona de la Mina La Providencia y se evidencia por la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro, calcantita y jaroisita como resultado de la alteración supérgena de la alunita.

A nivel macroscópico se reconoce debido a las tonalidades rojizas amarillentas, a nivel microscópico fue posible observar que los óxidos se presentan como vetillas y afectando principalmente los cristales de moscovita y también algunos sulfuros como pirita, calcopirita y esfalerita (Figura 41).

Figura 41: Aspectos a escala microscópica de las rocas afectadas por alteración supérgena. a. Microfotografía donde se observa la presencia de óxidos de Fe sobre cristales de moscovita (Muestra GD-03-06). b. Se presenta sobre los cristales de moscovita y sobreimponiéndose a la alteración sericítica (Muestra GD-03-06). c. Microfotografía en la que se observa la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro (Muestra GD-06-10).



7.3 TEXTURAS DEL CUARZO.

Se identificaron cuatro tipos de texturas del cuarzo asociadas a los eventos de alteración argílica avanzada y Silicificación, las cuales fueron identificadas claramente por medio de análisis petrográficos de las secciones delgadas (Tabla 2).

Tabla 2: Texturas del cuarzo observadas en la Mina La Providencia.

TEXTURA	OBSERVADA	DESCRIPCIÓN	FOTOGRAFÍA
Cuarzo crustiforme	Brechas hidrotermales	Alternancia de venas paralelas rellenas por cuarzo sintaxial con presencia de Py+Gln+Hüb y cuarzo microcristalino con Py y Gln.	
Cuarzo mosaico	Venas y matriz de las brechas hidrotermales	Agregados microcristalino de cuarzoes anhedrales que se encuentran en contacto irregular. Esta textura está asociada a la alteración argílica avanzada y a la silicificación.	
Cuarzo microcristalino	Venas	Agregados de cuarzo microcristalino intercrecidos entre los cuarzoes relícticos y está asociada con silicificación.	
Cuarzo Vuggy	Rocas con alteración argílica avanzada	Se presenta como sílice residual generando oquedades en la roca.	

7.4 RESUMEN DE LOS CONTEXTOS PARAGENÉTICOS ASOCIADOS A LOS DIFERENTES EVENTOS DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL Y MINERALIZACIÓN ASOCIADA

La mineralización de metales preciosos en la Mina La providencia se encuentra asociada con: pirita como el sulfuro más común el cual se presenta en todos los eventos de alteración ya sea diseminado en la roca o como relleno de venas, calcopirita, arsenopirita, esfalerita pobre en Fe, enargita, galena, telurios y wolframita (tipo hübnerita). A continuación, se presenta una tabla donde se muestran los minerales mena y su modo de ocurrencia en los distintos eventos (Tabla 3).

Dentro de los cuatro eventos de alteración hidrotermal-mineralización identificados en este estudio se desarrollaron diez contextos paragenéticos a partir de los cuales se determinó la secuencia paragenética y la evolución hidrotermal de este depósito (Tabla 4).

Tabla 3: Relaciones minerales y alteraciones presentes en la mina La Providencia.

Grupo Mineral	Mineral	Fórmula química	Eventos de alteración-mineralización	Modo de ocurrencia
Sulfuros	Pirita	FeS ₂	Evento I (Alteración propilítica)/ Evento II (Alteración Sericítica)/ Evento III (alteración argílica avanzada Qz+Kln+Dck)/ Evento IV (alteración argílica avanzada Qz+Alu y silicificación)	Se presenta diseminada en la roca y como relleno de venas. Hábito: Cubico de grano fino, cubico de grano grueso, dodecahédrico y anhedral
	Calcopirita	CuFeS ₂	Evento III (Zona distal de la alteración argílica avanzada)/ Evento IV (Silicificación y alteración Qz+Alu)	Venas y diseminada en la roca.
	Arsenopirita	FeAsS	Evento II (Alteración Sericítica)	Se presenta en venas y en brechas con forma subhedral y euhedral (Dodecahédrica).
	Esfalerita	(Zn,Fe)S	Evento III (alteración argílica avanzada Qz+Kln+Dck)/ Evento IV (alteración argílica avanzada Qz+Alu y silicificación)	Diseminada en las venas de cuarzo microcristalino que cortan las brechas y en las venas de alunita. Presenta forma anhedral.
	Galena	PbS	Evento III (alteración argílica avanzada Qz+Kln+Dck)/ Evento IV (alteración argílica avanzada Qz+Alu y silicificación)	Diseminada en venas de cuarzo+py. Presenta forma anhedral y el tamaño de los cristales es muy fino.
Tugsteno	Wolframita (Hubnerita)	MnWO ₄	Evento III (alteración argílica avanzada Qz+Kln+Dck)	Se presenta como cristales alargados dentro de venas de alunita.
Sulfosa/sulfuro	Enargita	Cu ₃ AsS ₄	Evento IV (alteración argílica avanzada Qz+Alu y silicificación)	Se encuentran en venas de cuarzo asociada a oro libre y en las brechas hidrotermales.
Teluros		Los cristales presentan formas alargadas con hábito fibroso y se encuentran asociados zonas con oro libre.		
Metales	Oro	Au		Se presenta libre en venas de cuarzo asociado a teluros, sulfosales (Enargita) y sulfuros (Py,Sph)
Óxidos	Limonita	FeO(OH)·nH ₂ O	Alteración supérgena	Se encuentra afectando gran parte de las rocas, se observa en venas, en las brechas hidrotermales y en general en todas las rocas.
	Hematita	Fe ₂ O ₃		
	Goetita?	FeO(OH)		
	Magnetita	Fe ²⁺ (Fe ³⁺) ₂ O ₄		Presenta forma anhedral y se encuentra diseminada en la roca.
Sulfato	Jaroisita	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆		Presenta un hábito masivo de color crema.
	Calcantita	CuSO ₄ ·5H ₂ O		Tiene forma euhedral, de color azul, observada bajo la lupa.

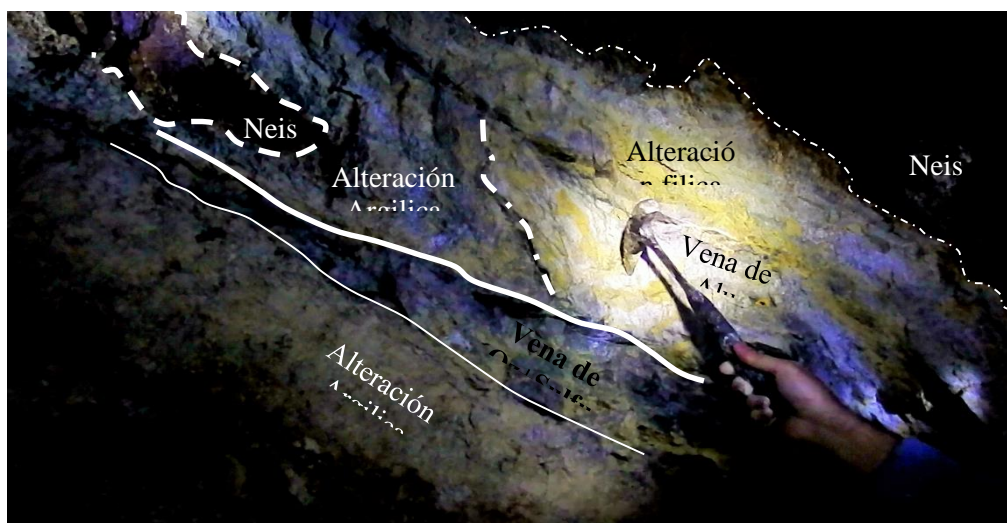
Tabla 4: Secuencia paragenética de la Mina La Providencia. Tabla donde se observa la distribución de los minerales mena y ganga de acuerdo a su ocurrencia dentro de los distintos estilos de mineralización hidrotermal determinados en base a los tipos de alteración. La continuidad y grosor de las líneas indica la abundancia de cada mineral.

Minerales		Tabla paragenética					
		Estilo porfirítico		Estilo epitermal			Alteración supergena
		Evento I (Alteración Propilitica)	Evento II (Alteración Sericitica)	Evento III (Alteración argílica avanzada)	Evento IV (alteración argílica avanzada y Silicificación)		
Cal-Ep-Chl	Ser-Qz-Ms	Qz-Kln-Dck	Qz-Alu	Qz	óxidos e hidróxidos de Fe-Calcanita-Jarositita		
Mineralización	Epidota	-----					
	Calcita	-----					
	Sericita		-----				
	Alunita			-----			
	Cuarzo	-----	-----	-----	-----		
	Cuarzo Crustiforme(Venas)			-----			
	Cuarzo Mosaico				-----		
	Cuarzo Microcristalino			-----	-----		
	Cuarzo Vuggy				-----		
	Caolinita			-----			
	Dickita?			-----			
	Jarositita					-----	
Mineralización	Pirita	-----	-----	-----	-----		
	Calcopirita			-----	-----		
	Arsenopirita		-----				
	Galena			-----			
	Esfalerita			-----	-----		
	Wolframita (Hübnerita)			-----			
	Enargita				-----		
	Teluros				-----		
	Oro				-----		
	Limolita					-----	
	Hematita					-----	
	Magnetita					-----	
	Otros oxidos					-----	
Venas	Cal	-----					
	Py		-----				
	Qz+Py		-----				
	Qz+Apy+Py		-----				
	Qz+Py+Cpy±Gln			-----			
	Qz+Py+Sph			-----			
	Qz+Py+Gln±Hüb			-----			
	Alu+Qz+Py				-----		
	Alu+Sph				-----		
Qz+Eng+Sph+Teluros+Au					-----		

Los eventos I y II de alteración hidrotermal-mineralización en la Mina La Providencia muestran características que se relacionan con un estilo de depósitos porfiríticos. Inicialmente se evidencia la alteración propilítica (Evento I), en la cual se presenta pirita diseminada como mineral mena, posteriormente se identifica el Evento II (alteración sericitica), el cual está relacionado con la primera etapa de depositación del Au según información de la empresa (Sociedad minera La Providencia LTDA), indicada por la presencia de venas de $Qz+Py+Apy$ (Figura 42).

Los eventos III y IV presentan características de estilo de depósitos epitermales y se asocian con alteración argílica avanzada y silicificación. El Evento III de alteración hidrotermal-mineralización está relacionado con la zona distal de la alteración argílica avanzada ($Qz+Kln±Dck±Alu$) y se identificaron tres contextos paragenéticos: el primero se caracteriza por la presencia de venas de Qz, Py, Cpy , el segundo contexto se desarrolla como venas y stockworks de $Qz+Py+Sph$, el ultimo contexto paragenético se presenta como venas con textura crustiforme de $Qz+Py+Gln±Hüb$. El Evento IV se relaciona con alteración $Qz+Alu$ y silicificación, dentro de este evento se identifican tres contextos paragenéticos, el primer contexto está asociado con la presencia de venas de alunita con relictos de cuarzo, pirita y hübnerita del evento anterior, el segundo contexto se desarrolla como venas de alunita + esfalerita, finalmente como último contexto se identifica por la asociación $Qz+Eng+Sph+Au±Py±Teluros$ y se presenta dentro de las oquedades de las rocas afectadas por sílice residual.

Figura 42: Aspecto de afloramiento observado en el túnel de la Mina La Providencia, en el cual se identifican la secuencia de eventos paragenéticos presentes. Neis biotítico cortado por un evento de alteración filica, a la cual se le sobreimpone un evento de alteración argilica avanzada. Finalmente se presenta un último evento de alteración evidenciado por la presencia de una vena de cuarzo + pirita.



7.5 PETROGRAFÍA Y MICROTERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS EN CRISTALES DE CUARZO.

Para realizar el estudio de inclusiones fluidas se deben realizar secciones delgadas doblemente pulidas, las cuales pueden observarse en un microscopio y ser calentadas o enfriadas en una platina especialmente diseñada para este propósito. Para este estudio se seleccionaron 5 muestras principalmente de las brechas hidrotermales y de los filones. Estas secciones delgadas doblemente pulidas fueron pegadas al portaobjetos mediante una resina soluble en acetona.

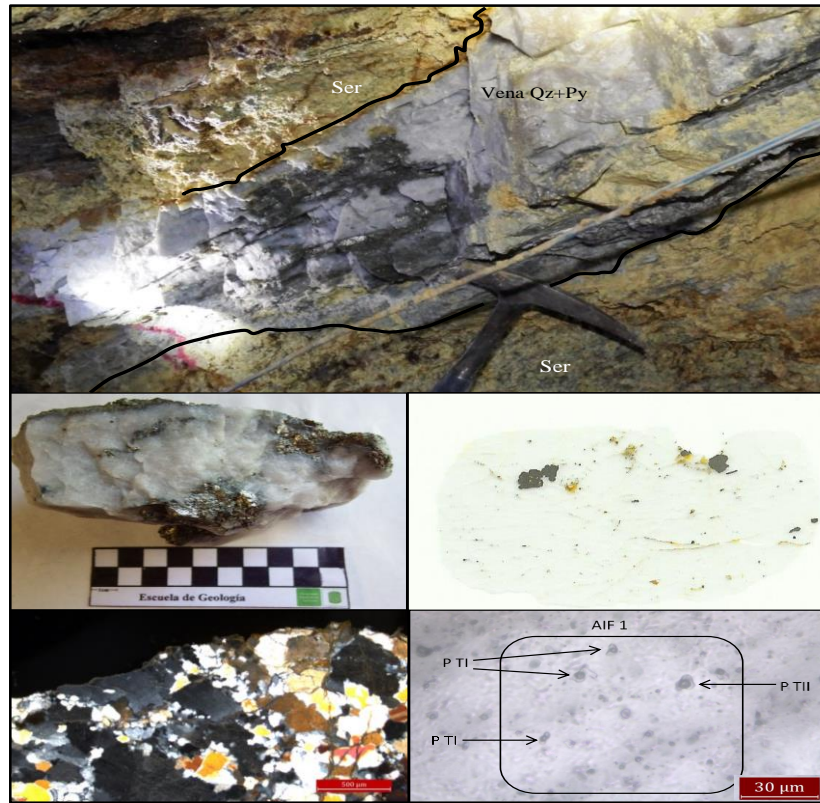
Previamente al estudio termométrico de las inclusiones fluidas se realizó un estudio petrográfico detallado de las muestras lo cual permitió establecer en qué tipo de alteraciones se presentan las venas y la etapa de mineralización, posteriormente se estudiaron al microscopio cada una de las venas de cuarzo presentes en las secciones para establecer los tipos de inclusiones fluidas presentes, las inclusiones fluidas fueron observadas en un microscopio de luz transmitida bajo un objetivo de 40x y en nicols paralelos. Para una mayor precisión se realizó un mapa de las secciones para marcar las zonas con las mejores inclusiones, estas inclusiones fueron descritas mencionando la forma, tamaño y tipo (primarias, secundarias, pseudosecundarias). Finalmente se eligieron las mejores secciones delgadas doblemente pulidas y estas se disolvieron en acetona durante una noche para que las láminas de roca se separaran del portaobjetos y así se pudo partir la superficie en fragmentos de aproximadamente 1 cm² para poderlas colocar en la platina y realizar los análisis termométricos.

El estudio de Microtermometría fue realizado en el laboratorio del grupo GIGBA ubicado en el parque tecnológico de Guatiguará donde se cuenta una platina de enfriamiento y calentamiento THMS 600 marca Linkam montada sobre un microscopio petrográfico de luz transmitida marca con objetivos hasta de 50 X, La platina es controlada por dos equipos, el primero es una consola electrónica la cual controla la variación de la temperatura y el otro equipo el cual controla la salida de nitrógeno y cuenta con una bomba de refrigeración de nitrógeno; estos equipos cuenta con el programa Linksys 32 instalado en el computador que permite controlar y modificar la temperatura y velocidad de calefacción y enfriamiento con nitrógeno líquido de manera automática. A partir de estos equipos que nos permitieron enfriar y calentar las inclusiones fluidas presentes en los fragmentos de cuarzo fue posible determinar las diferentes temperaturas necesarias (Temperatura de fusión y temperatura de homogenización) para establecer las características físico-químicas del fluido que género estos minerales.

Este equipo de termometría tiene un rango de temperatura de -196°C a 600°C y su respectiva calibración se realizó a partir de inclusiones fluidas sintéticas de agua cuya temperatura de homogenización crítica es 374.1°C y CO_2 cuya temperatura es -56.6°C . En las mediciones de inclusiones fluidas realizadas para el presente estudio el proceso de enfriamiento siempre fue anterior al proceso de calentamiento con el fin de evitar la decrepitación de otras inclusiones de menor temperatura de atrapamiento y todos los análisis fueron realizados con el mismo montaje de encapsulamiento.

7.6.1 Petrografía de Inclusiones fluidas Mina La Providencia: En la zona de la Mina La Providencia fueron escogidas dos muestras con el fin de realizar los estudios de petrografía de las inclusiones fluidas que se encuentra en los cristales de cuarzo de las muestras GD-06-12 (Figura 43) perteneciente a una vena de cuarzo con presencia de piritas gruesas asociada al Evento II (alteración sericitica) y GD-08-16 tomadas de venas de cuarzo microcristalino relacionadas con el Evento III.

Figura 43: Aspecto de afloramiento, macroscópico y microscópico (estación GD-06). a y b. Aspecto de afloramiento y macroscópico donde se observa la presencia de una vena gruesa de cuarzo + pirita; c. Escáner de sección delgada. d. Microfotografía (4x) donde se observa cuarzo microcristalino. e. Microfotografía (40x) en la que se identifican inclusiones fluidas.



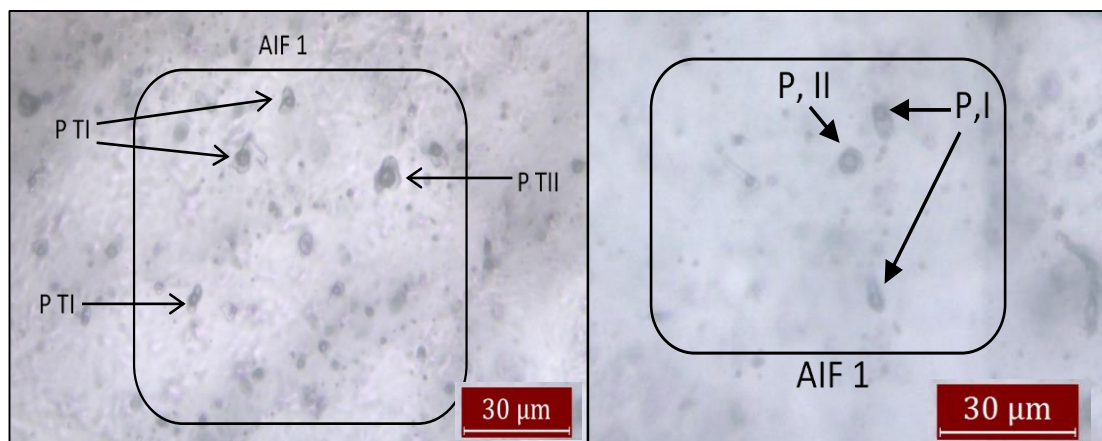
Las

inclusiones fluidas encontradas en los cristales de cuarzo fueron caracterizadas en base a la nomenclatura mostrada en la Tabla 5.

Tabla 5: Caracterización de inclusiones fluidas en la Mina La Providencia y nomenclatura asociada.

Característica	Nomenclatura	Descripción	Observaciones
Zona	LP	La Providencia	
Muestra	GD-06-12	Vena de Qz+Py	Evento II
	GD-08-16	Vena de Qz	Evento III
	GD-09-19	Vena de Qz+Kln	Evento III
Tipo de inclusiones basadas en su clasificación genética	P	Primaria	Entrampadas durante la cristalización.
	Ps	Pseudosecundaria	Alineadas y entrampadas durante la cristalización.
	S	Secundaria	Entrampadas después de la cristalización, relacionadas con fracturas.
Componentes	L	Líquido	

	V	Vapor	
	S	Sólido	



Tipo de inclusiones basadas en sus componentes (L,V,S)	I	Líquido>Vapor	Proporciones L/V que varían de 70/30 y 60/40.
	II	Líquido<Vapor	Proporciones L/V de 40/60.
	III	Líquido, Vapor, Sólido	
Forma		Ovalada, alargada, irregular	

De acuerdo al estudio petrográfico de las inclusiones se determinaron 9 asociaciones de inclusiones fluidas en base al tipo de atrapamiento que tuvieron.

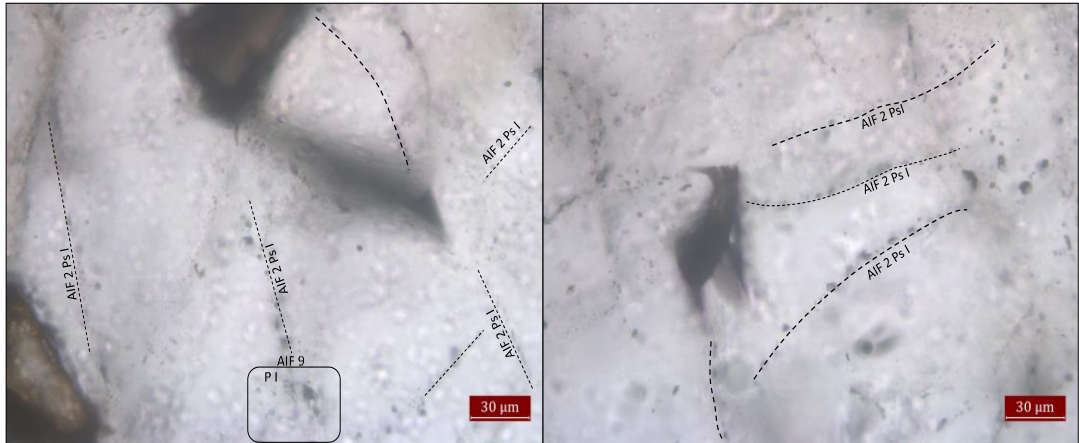
1. **Asociación de inclusiones fluidas 1 (AIF 1):** Se caracteriza por presentar inclusiones fluidas primarias con un atrapamiento heterogéneo de inclusiones bifásicas tipo I y tipo II con una relación L/V variable. Esta asociación se presenta en el interior de los cristales de cuarzo relacionados con el Evento II (alteración sericitica) (Figura 44).

Figura 44: Aspecto microscópico donde se observan inclusiones fluidas, Nil 40 X (muestra GD-06-12). Imágenes donde se observa la asociación de Inclusiones fluidas 1 (AIF 1) caracterizada por Inclusiones fluidas con atrapamiento heterogéneas, primarias, bifásicas tipo I y Tipo II con relaciones L/V variables.

2. **Asociación de inclusiones fluidas 2 (AIF 2):** Se caracteriza por la presencia de inclusiones fluidas bifásicas tipo I, pseudosecundarias relacionadas a microfracturas dentro de los cristales de cuarzo, estas inclusiones presentan un atrapamiento homogéneo con una

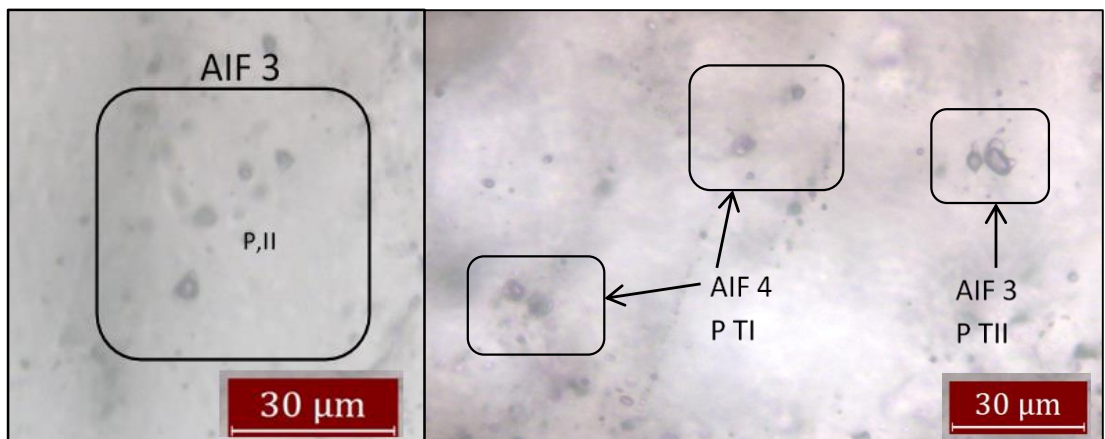
relación L/V 60/40 y están asociadas al Evento II y III de alteración-mineralización hidrotermal (Figura 45).

Figura. 45: Petrografía de inclusiones fluidas, NII 40 X, sección delgada de la muestra GD-06-12. Imágenes donde se observa la asociación de Inclusiones fluidas 2 (AIF 2) la cual presenta atrapamiento homogéneo de inclusiones pseudosecundarias tipo I. a y b presentan proporciones L/V 80/20.



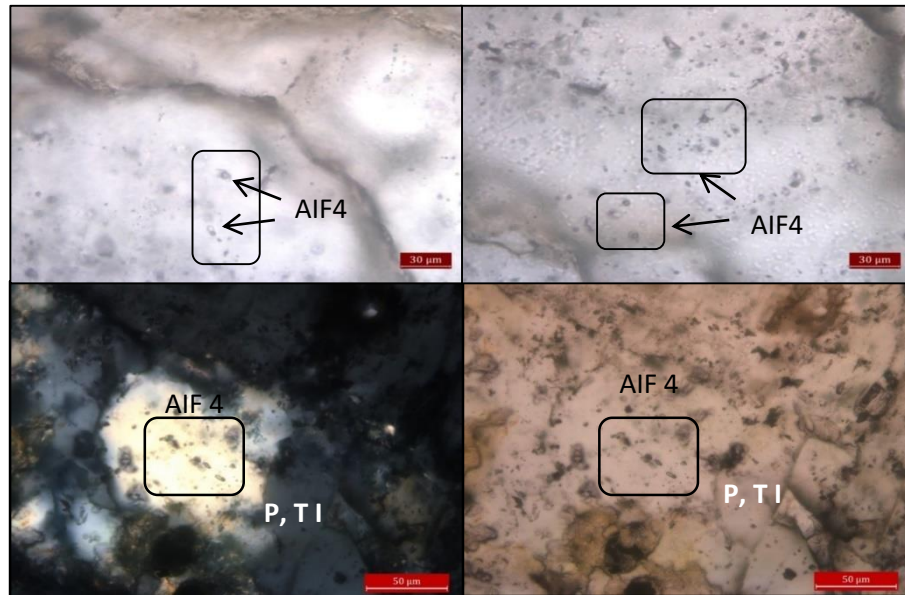
3. **Asociación de inclusiones fluidas 3 (AIF 3):** Se identifica debido al atrapamiento homogéneo de inclusiones fluidas primarias bifásicas tipo II con una relación L/V de 20/80 y están relacionadas con el Evento II de alteración-mineralización hidrotermal (Figura 46).

Figura 46: Petrografía de inclusiones fluidas, NII 40 X, sección delgada de la muestra GD-06-12. Imágenes donde se observa una asociación de inclusiones fluidas con atrapamiento homogéneo de inclusiones fluidas Primarias (P) Bifásicas Tipo II (AIF 3) que presentan relación L/V, 30/70.



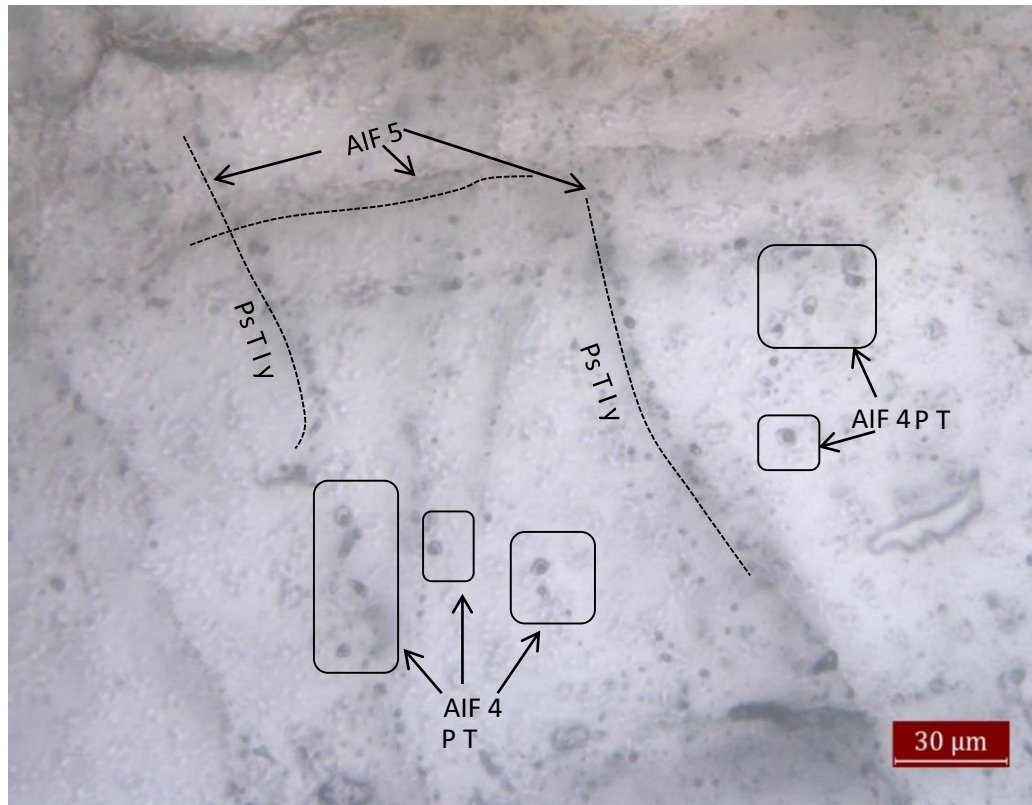
4. **Asociación de inclusiones fluidas 4 (AIF 4):** presenta inclusiones fluidas primarias bifásicas tipo I con un atrapamiento homogéneo y una relación L/V variable. (Figura 47).

Figura 47: Petrografía de inclusiones fluidas, NII 40 X, sección delgada de la muestra a. GD-06-12 y b. GD-08-16, donde se identifica la asociación de inclusiones primarias tipo I (AIF 4), relación L/V 70/30.



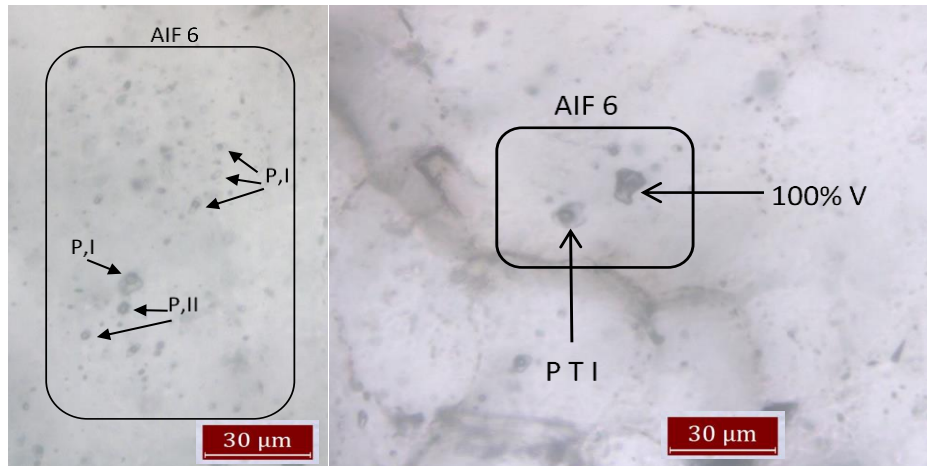
5. **Asociación de inclusiones fluidas 5 (AIF 5):** Caracterizada por un atrapamiento heterogéneo de inclusiones fluidas pseudosecundarias bifásicas tipo I y tipo II con una relación L/V variable, esta asociación se presenta en inclusiones fluidas del Evento II (Figura 48).

Figura 48: Petrografía de inclusiones fluidas, NII 40 X, sección delgada de la muestra GD-06-12. Imágenes donde se observa asociación AIF 5 la cual presenta un atrapamiento heterogéneo de inclusiones pseudosecundarias tipo I y tipo II. a. Se observan dos tipos de asociaciones AIF 5 con inclusiones tipo I ($L > V$, 70/30) y tipo II ($L < V$, 20/80) y AIF 4.



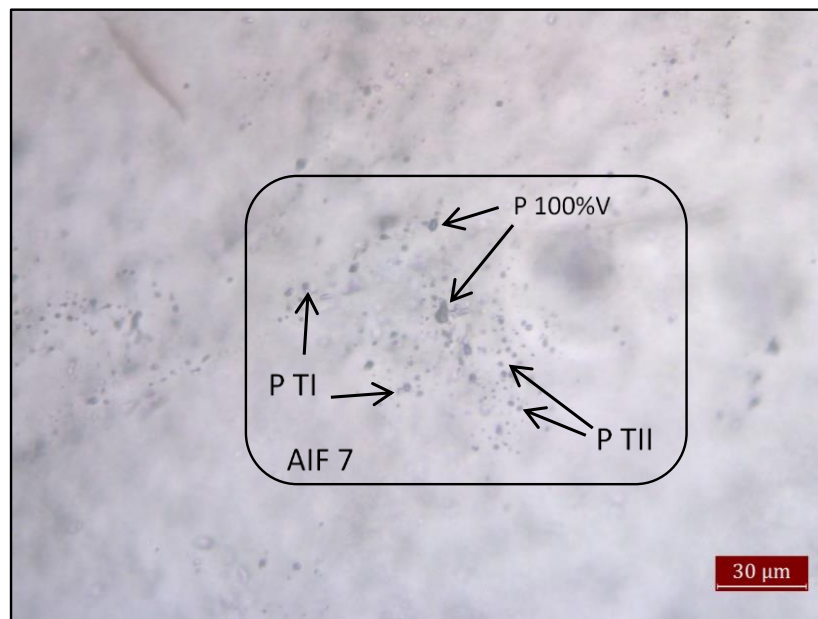
6. **Asociación de inclusiones fluidas 6 (AIF 6):** se identifica debido al atrapamiento heterogéneo de inclusiones fluidas primarias bifásicas tipo I con una relación L/V 80/20 y Monofásicas de 100% vapor. (Figura 49).

Figura. 49: Petrografía de inclusiones fluidas, Nil 40 X, sección delgada de la muestra GD-06-12. Imágenes donde se observa asociación AIF 6.



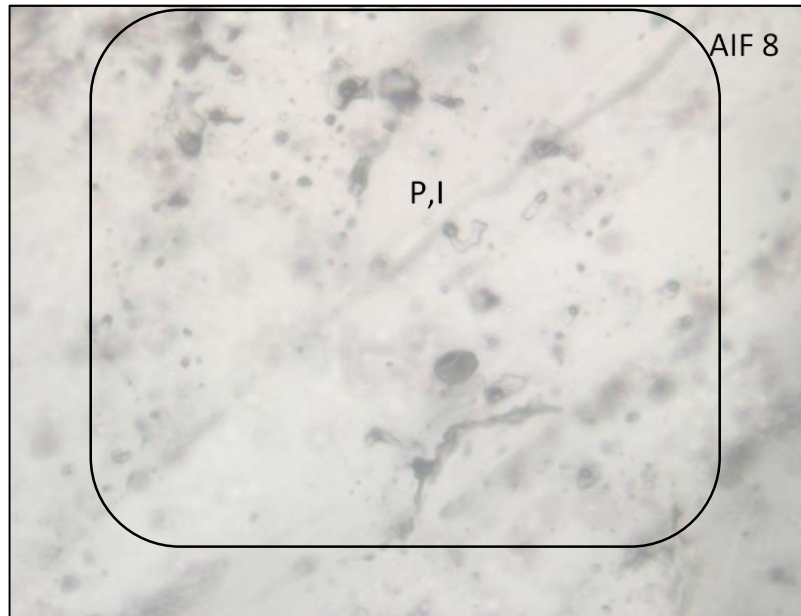
7. **Asociación de inclusiones fluidas 7 (AIF 7):** Se caracteriza por presentar un atrapamiento heterogéneo de inclusiones fluidas bifásicas primarias tipo I y tipo II y monofásicas primarias con 100% vapor. Las inclusiones primarias tipo I y tipo II presentan una relación L/V variable. (Figura 50).

Figura. 50: Petrografía de inclusiones fluidas, NII 40 X, sección delgada de la muestra GD-06-12. Imágenes donde se observa asociación AIF 7.



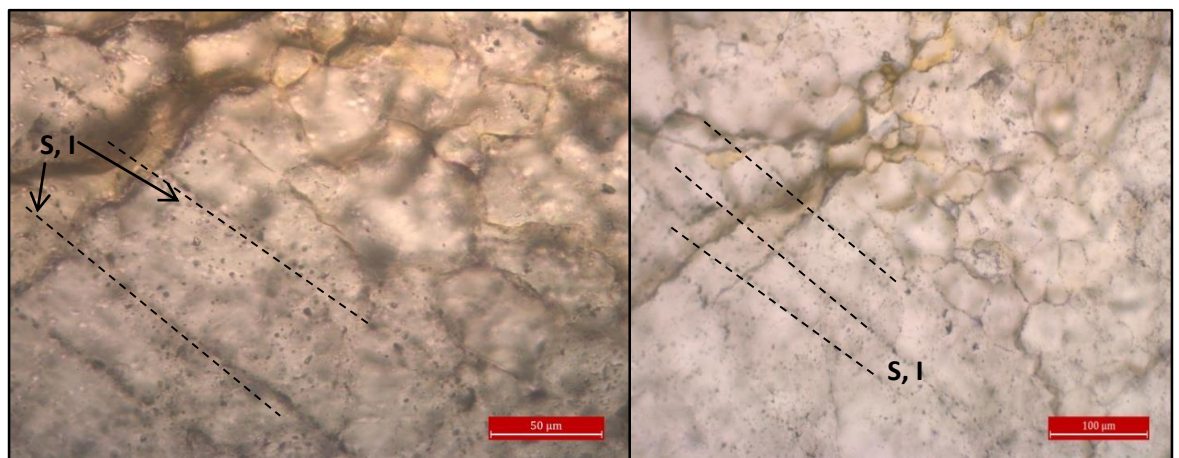
8. **Asociación de inclusiones fluidas 8 (AIF 8):** Se identifica por la presencia de inclusiones fluidas primarias, bifásicas, tipo I que se encuentran deformadas. (Figura 51).

Figura 51: Petrografía de inclusiones fluidas, NII 40 X, sección delgada de la muestra GD-06-12. Imágenes donde se observa asociación AIF 8.



9. **Asociación de inclusiones fluidas 9 (AIF 9):** Se caracteriza por la presencia de una asociación homogénea de inclusiones fluidas secundarias bifásicas Tipo I (L>V), que se encuentran siguiendo fracturas que cortan los cristales. (Figura 52).

Figura 52: Microfotografía (40x) en la que se observa la AIF 9. a. Muestra GD-06-12; b. Muestra GD-09-19.



7.5.1. Microtermometría de inclusiones fluidas en cristales de cuarzo: En este trabajo se realizaron análisis de microtermometría a inclusiones fluidas observadas en cuarzos de una vena hidrotermal asociada con pirita y la cual presenta un halo de alteración sericítica y está relacionada con el Evento II de alteración mineralización hidrotermal, esto con el fin de determinar la naturaleza y condiciones de los fluidos mineralizantes mediante estudios petrográficos y termométricos. Los datos obtenidos a partir de los análisis microtermométricos (T_e , T_m ice, T_h) y los cálculos de salinidad, densidad, presión y profundidad realizadas en base a las ecuaciones descritas en el capítulo 5 se muestran a continuación. (Tabla 6).

En base a los análisis de petrografía de inclusiones fluidas se identificaron 9 tipos de asociaciones descritas en los resultados; para los análisis de microtermometría solo se tuvieron en cuenta las asociaciones de inclusiones fluidas AIF 1 y AIF 4 debido a que algunas de las demás asociaciones presentaban inclusiones fluidas de pocas dimensiones, lo que hizo difícil la determinación de las temperaturas (T_e , T_m ice y T_h) y otras como (AIF 8) presentan cambios posteriores a su formación identificados por inclusiones fluidas deformadas, por lo cual no es conveniente realizar las mediciones en este tipo de inclusiones ya que los datos serán erróneos.

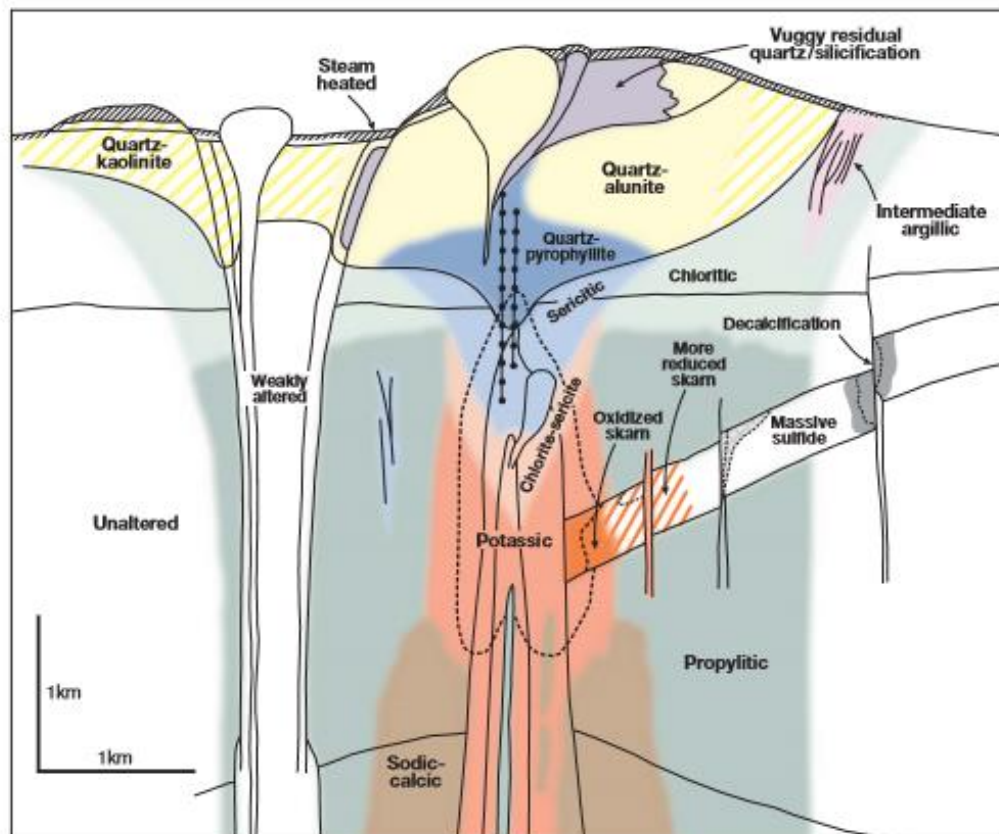
Tabla 6: Datos y resultados obtenidos a partir de análisis microtermométrico de inclusiones fluidas del Evento II de alteración-mineralización. Los datos de inclusiones fluidas resaltados no se tuvieron en cuenta a la hora de la interpretación ya que estos datos son erróneos debido a que son de inclusiones ricas en vapor de una asociación heterogénea.

Muestra	Tipo de inclusión fluida	Homogenización	T e [-°C]	T m ice [-°C]	Th [°C]	Atrapamiento	Proporción	Grado de relleno [F]	AIF	Salinidad % Wt	X NaCl	Densidad IF [g/cm3]	Ph [bar]	Profundidad [m]
GD-06-12	Ps Tipo I	L+V = L	25,18	19,77	187,00	Homogéneo	80/20	0,80	4a	22,19	0,081	1,05	13,17	127,99
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	34,54	16,82	341,38	Homogéneo	80/20	0,80	4c	20,06	0,072	0,87	172,25	2020,32
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	32,96	8,94	259,27	Heterogéneo	70/30	0,70	1	12,77	0,043	0,91	58,77	658,99
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	31,78	5,79	254,05		70/30	0,70		8,93	0,029	0,88	60,80	704,95
GD-06-12	P Tipo II	L+V = V	32,96	4,51	348,67		10 90	0,10		7,17	0,023	0,77	202,65	2685,53
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	24,79	8,45	253,95		70/30	0,70		12,21	0,041	0,91	60,80	681,71
GD-06-12	Ps Tipo I	L+V = L	28,73	7,26	246,37	Homogéneo	60/40	0,60	2	10,81	0,036	0,91	55,73	624,90
GD-06-12	Ps Tipo I	L+V = L	30,50	7,76	241,25	Heterogéneo	70/30	0,70	5	11,40	0,038	0,92	50,66	561,92
GD-06-12	Ps Tipo I	L+V = V	30,50	5,39	249,22		30/70	0,30		8,40	0,027	0,91	60,80	681,71
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	33,95	11,40	307,61	Homogéneo	60/40	0,60	4c	15,36	0,053	0,87	131,72	1544,95
GD-06-12	P Tipo II	L+V = V	22,53	7,07	360,78	Homogéneo	40/60	0,40	3	10,57	0,035	0,72	202,65	2872,02
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	25,28	11,40	226,97	Homogéneo	80/20	0,80	4a	15,36	0,053	0,97	40,53	426,36
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	26,17	13,57	203,54		90/10	0,90		17,39	0,061	1	27,36	279,16
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	27,94	11,70	217,52		90/10	0,90		15,65	0,054	0,97	35,46	373,07
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	28,53	11,89	275,91		90/10	0,90		15,84	0,055	0,91	81,06	908,95
GD-06-12	P Tipo II	L+V = V	20,36	9,23	331,73	Heterogéneo	40/60	0,40	1	13,10	0,044	0,8	182,39	2326,34
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	21,54	4,80	292,35		70/30	0,70		7,59	0,025	0,81	111,46	1404,10
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	24,49	10,51	299,73		80/20	0,80		14,47	0,050	0,87	121,59	1426,11
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	29,71	20,36	176,56	Homogéneo	90/10	0,90	4a	22,59	0,083	1,06	9,12	87,79
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	23,71	11,89	303,87	Homogéneo	80/20	0,80	4c	15,84	0,055	0,88	121,59	1409,90
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	29,91	4,51	226,09	Homogéneo	70/30	0,70	4a	7,17	0,023	0,9	40,53	459,52
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	25,09	11,60	310,66	Homogéneo	80/20	0,80	4c	15,56	0,054	0,86	131,72	1562,92
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	26,76	3,62	204,72	Homogéneo	80/20	0,80	4a	5,89	0,019	0,92	30,40	337,15
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	22,92	5,59	275,61	Homogéneo	80/20	0,80	4b	8,66	0,028	0,85	99,30	1192,06
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	26,07	9,63	222,44	Homogéneo	80/20	0,80	4a	13,53	0,046	0,95	49,65	533,29
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	23,81	4,61	213,78		80/20	0,80		7,31	0,024	0,92	33,44	370,87
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	25,18	7,26	264,09		80/20	0,80		10,81	0,036	0,88	70,93	822,44
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	23,81	4,11	278,86		70/30	0,70		6,61	0,021	0,83	91,19	1121,13
GD-06-12	P Tipo II	L+V = V	23,21	3,72	295,99	Heterogéneo	10 90	0,10	1	6,04	0,019	0,8	121,59	1550,89
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	22,23	4,80	290,87		70/30	0,70		7,59	0,025	0,81	111,46	1404,10
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	24,40	5,10	290,18		70/30	0,70		8,00	0,026	0,82	111,46	1386,98
GD-06-12	P Tipo I	L+V = L	20,85	4,21	335,18		60/40	0,60		6,75	0,022	0,72	202,65	2872,02
GD-08-16	P Tipo I	L+V = L	21,93	11,40	353,39	Heterogéneo	80/20	0,80	1	15,36	0,053	0,8	217,85	2778,68
GD-08-16	P Tipo I	L+V = L	20,56	12,19	246,07		80/20	0,80		16,13	0,056	0,89	52,69	604,09
GD-08-16	P Tipo II	L+V = V	21,93	6,18	354,97		40/60	0,40		9,44	0,031	0,8	233,05	2972,54
GD-08-16	P Tipo I	L+V = L	20,26	11,60	248,04		80/20	0,80		15,56	0,054	0,89	55,73	638,94
GD-08-16	P Tipo II	L+V = V	23,90	4,11	316,57	Heterogéneo	60/40	0,60	1	6,61	0,021	0,8	151,99	1938,62
GD-08-16	P Tipo I	L+V = L	24,69	8,15	344,53		70/30	0,70		11,87	0,040	0,77	212,78	2819,81
GD-08-16	P Tipo I	L+V = L	28,04	5,20	339,12		80/20	0,80		8,13	0,027	0,72	202,65	2872,02
GD-08-16	P Tipo I	L+V = L	27,94	11,30	291,66		Homogéneo	80/20		0,80	4b	15,27	0,053	0,89
GD-08-16	P Tipo I	L+V = L	26,46	5,69	316,96	Homogéneo	80/20	0,80	4c	8,80	0,029	0,78	151,99	1988,32
GD-08-16	P Tipo I	L+V = L	24,79	8,94	257,10	Homogéneo	80/20	0,80	4b	12,77	0,043	0,91	65,86	738,52
GD-08-16	P Tipo I	L+V = L	33,26	9,82	344,43	Homogéneo	70/30	0,70	4c	13,74	0,047	0,8	212,78	2714,06
GD-08-16	P Tipo I	L+V = L	33,75	9,63	281,22	Homogéneo	80/20	0,80	4b	13,53	0,046	0,9	91,19	1033,93
GD-08-16	P Tipo I	L+V = L	31,68	10,91	297,17		80/20	0,80		14,87	0,051	0,88	111,46	1292,41
GD-09-19	P Tipo I	L+V = L	26,86	20,75	334,69	Homogéneo	80/20	0,80	4c	22,85	0,084	0,91	212,78	2385,99

8 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En la zona de la Mina La Providencia se definieron cuatro Eventos de alteración-mineralización hidrotermal. El Evento I (alteración propilítica) y el Evento II (alteración sericítica) están relacionados con un ambiente porfirítico somero. El Evento III (alteración argílica avanzada Qz+Kln±Dck) y el Evento IV (alteración argílica avanzada Qz+Alu y silicificación) se asocian a un sistema epitermal, apoyados en la clasificación de Sillitoe (2010) para sistemas de pórfidos de Cu (Figura 53) y Simmons *et al.*, 2005 para sistemas epitermales.

Figura 53: Diagrama donde se observa el patrón de zonificación alteración-mineralización de los depósitos tipo pórfido de Cu.



Tomado de Sillitoe (2010).

Los Eventos de alteración-mineralización hidrotermal de este depósito evidencian una variación en los estados de sulfuración (Figura 54). El primer y segundo evento presentan asociaciones minerales indicadores de un estado de sulfuración baja (Qz + Py + Apy) ya que según Pirajno

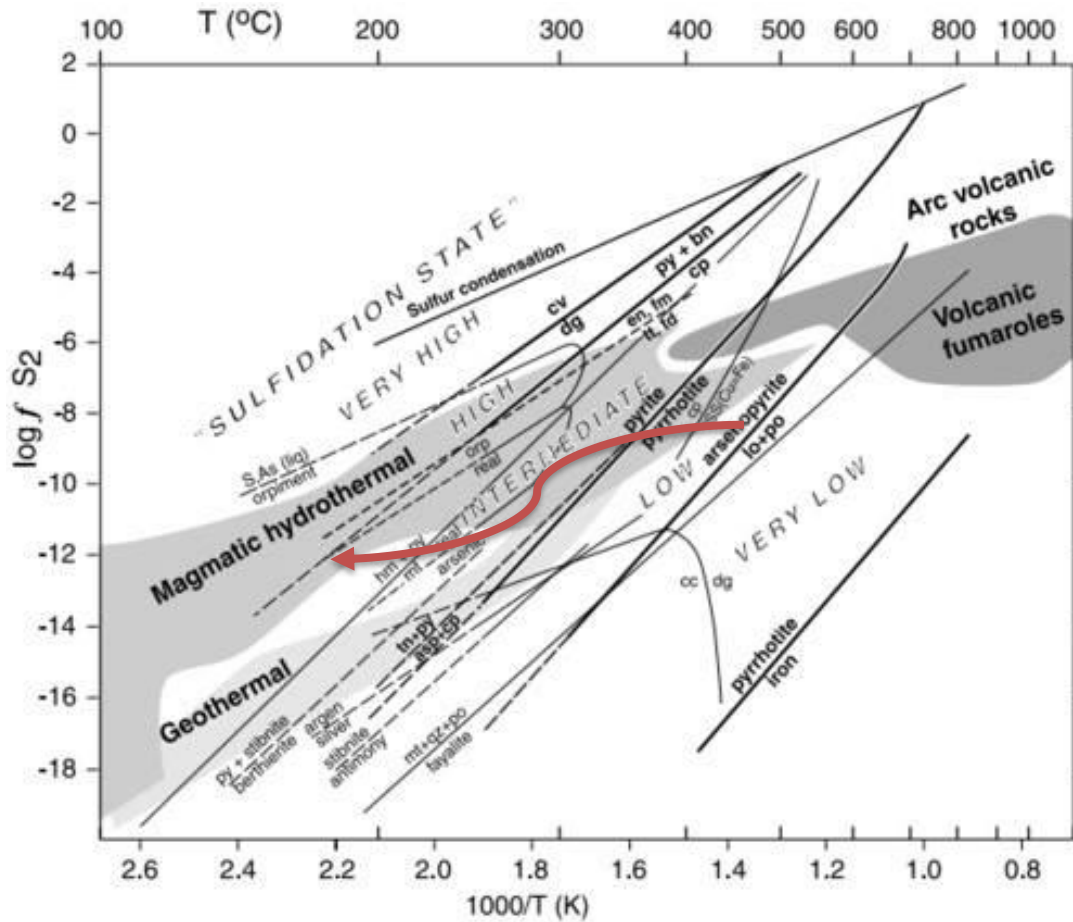
(2009) la arsenopirita se encuentra presente en depósitos de baja sulfuración, los cuales son generalmente reducidos y presentan un pH casi neutro y de acuerdo con John *et al.*, 1999 en Hedenquist *et al.*, 2000 suele encontrarse asociada con pirita y pirrotina en estos depósitos.

El tercer evento está asociado a un estado de sulfuración intermedia identificado por los contextos paragenéticos: Qz + Py + Cpy, Qz + Py + Sph pobre en Fe y Qz + Py + Gln + Hüb en venas con textura crustiforme. Lo cual concuerda con lo dicho por Simmons *et al.*, 2005 quien afirma que la calcopirita se puede encontrar en depósitos de sulfuración intermedia, así como las asociaciones de pirita + esfalerita pobre en Fe.

El cuarto evento evidencia un estado de alta sulfuración identificado por la presencia de venas de Alu + Qz + Py y venas de Alu + Sph pobre en Fe y por el último contexto paragenético Qz + Eng + Sph pobre en Fe + Au ± Py ± Teluros desarrollado en las oquedades producto de la sílice residual.

Según Simmons *et al.*, 2005, el oro nativo en depósitos epitermales se encuentra asociado con sulfuros de cobre-arsénico y cobre-antimonio, como enargita la cual indica un estado de alta sulfuración; otra asociación mineral menos común incluye calcopirita, covelita, esfalerita y teluros. Según Hedenquist *et al.*, (2000) las rocas con cuarzo de textura vuggy son las que típicamente hospedan la mineralización y de acuerdo con Simmons *et al.*, 2005 esta textura es el resultado de una intensa alteración ácida (pH<2) y es bastante común en los depósitos epitermales de alta sulfuración. De acuerdo con White and Hedenquist, 1995 la asociación cuarzo + Alunita indican ambientes epitermales de alta sulfuración con PH ácidos (1-3).

Figura 54: Diagrama donde se muestran los estados de sulfuración de magmas y su relación con minerales de sulfuración a 1 bar. La línea roja es la representación del rango de minerales dentro de la secuencia paragenética de la Mina La Providencia y la evolución del fluido hidrotermal. El fluido presenta condiciones de baja sulfuración en la primera etapa de mineralización, seguido de intermedia sulfuración y en las últimas etapas del sistema se presentan condiciones de alta sulfuración asociadas a la depositación de oro.

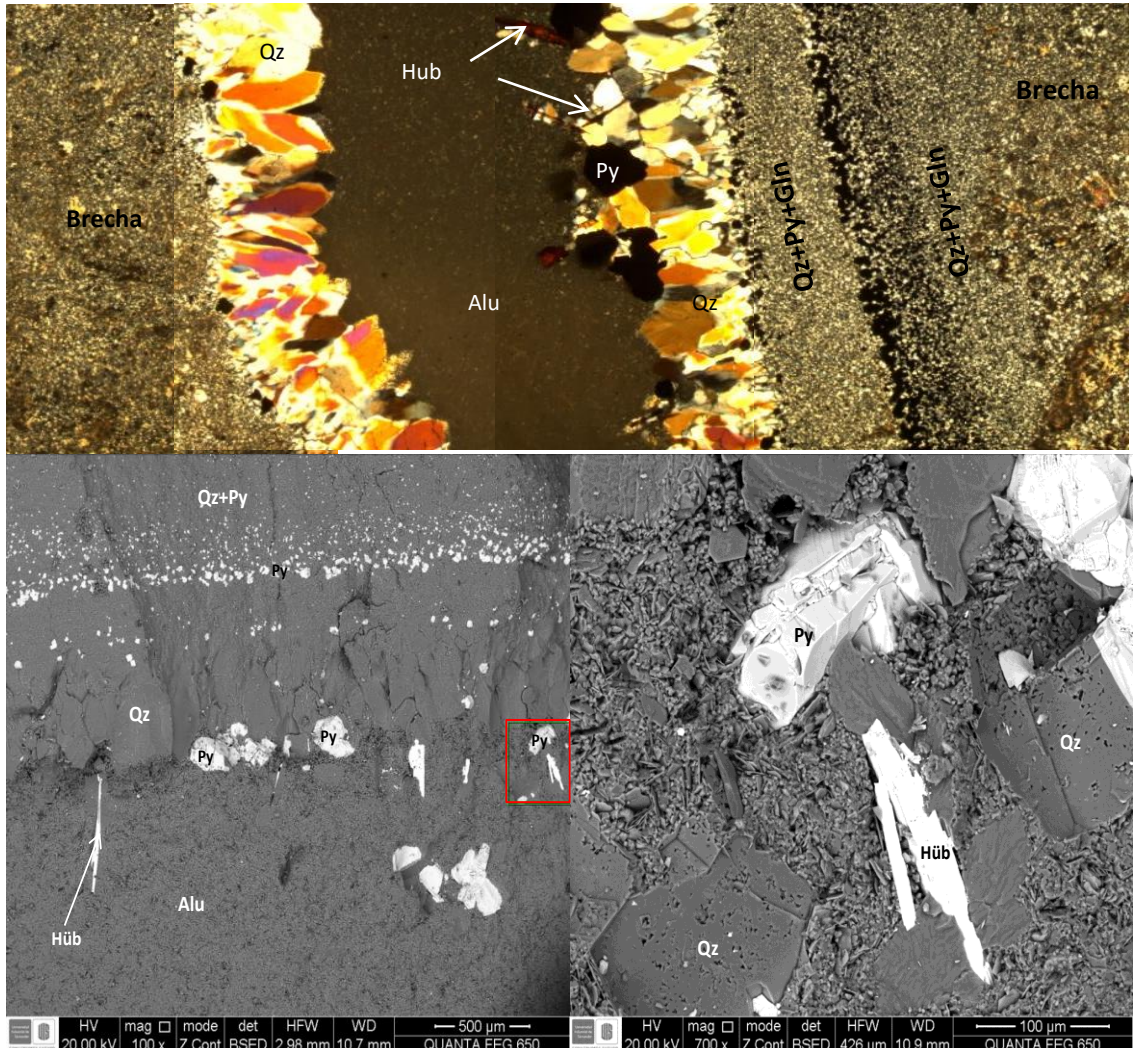


Tomada de Einaudi and Hedenquist, 2003.

El evento III está asociado con la presencia de Cuarzo+Caolinita la cual según Townley (2004), se presenta en rangos de pH entre 4 y 5 y puede co-existir con alunita en un rango transicional de pH entre 3 y 4. Dentro de este evento se desarrollan venas de textura crustiforme asociada a Py + Gln + Hüb. De acuerdo con Dong et al., 1995 y Simmons et al., 2005 esta textura se origina debido al rápido ascenso de fluidos, produciendo un descenso de la presión y pérdida de gases, posterior a esto se produce ebullición generando una elevación en el pH, enfriamiento y depositación de minerales mena y ganga.

Debido a lo mencionado anteriormente en cuanto a la elevación del pH, generado por los procesos a partir de los cuales se origina la textura crustiforme, es posible explicar la depositación de hübnerita la cual está asociada a esta textura (Figura 55), ya que según Horner (1979) la variedad de wolframita rica en Mn (hübnerita) necesita condiciones neutras (pH= 5 – 6) y temperaturas superiores a 200°C para su precipitación (Homer, 1976 en Buhl y Willgallis, 1985; Avispón, 1979 en Buhl y Willgallis, 1986).

Figura 55: a. Aspecto microscópico donde se observan cristales de hübnerita asociados con la textura crustiforme; b. Aspecto microscópico de los relictos de cuarzo, pirita y hübnerita dentro de una vena de Alu + Qz + Py producto de un evento posterior.



8.1 PETROGRAFÍA Y MICROTERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS

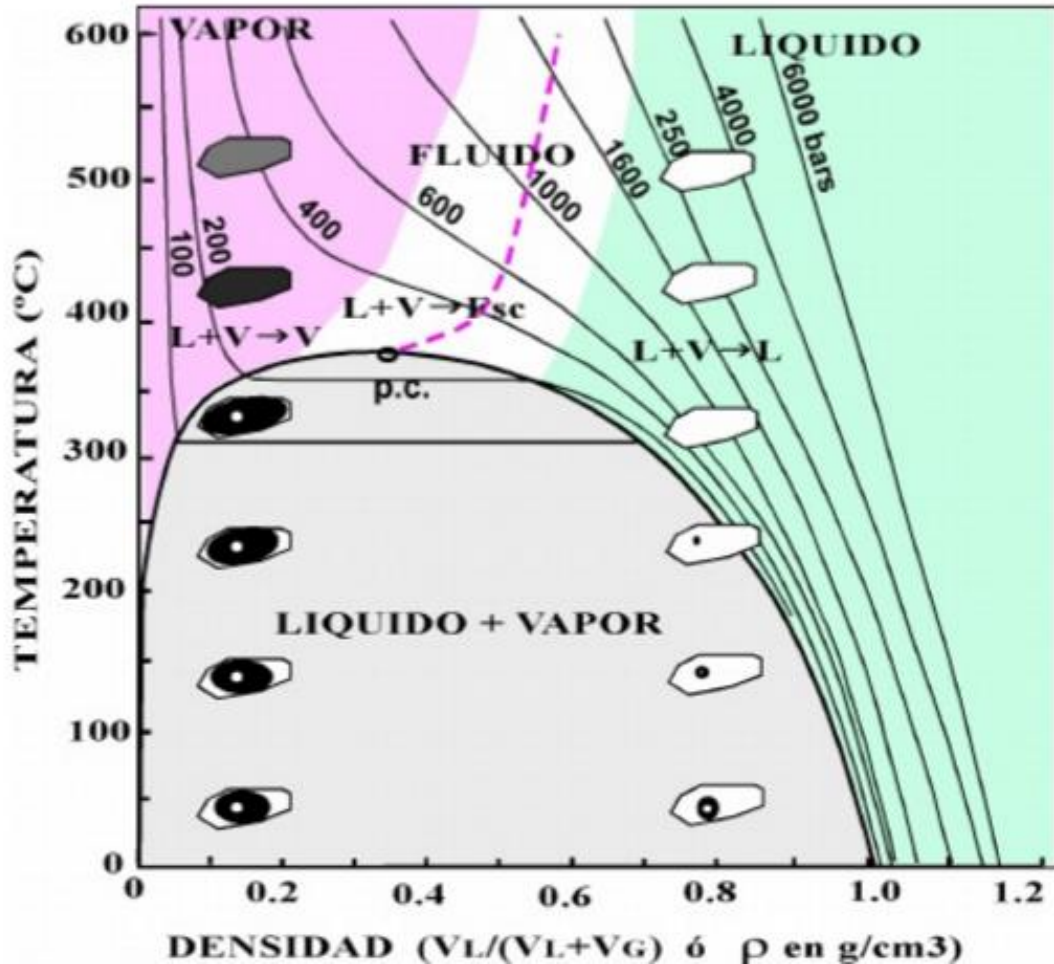
Los análisis de microtermometría de inclusiones fluidas en la Mina La Providencia fueron realizados en dos muestras pertenecientes a venas de cuarzo asociados a piritita y relacionados con el evento II (alteración sericitica).

Los análisis microtermométricos de las inclusiones fluidas de la asociación AIF 1 presentan variaciones en la medición de las temperaturas debido a que es una asociación de inclusiones fluidas heterogénea caracterizadas por la presencia de inclusiones fluidas bifásicas con relaciones L/V variables. Según Roedder, 1981 las inclusiones fluidas atrapadas en un sistema heterogéneo presentan proporciones de fases variables.

En la AIF 1 se identificaron inclusiones fluidas ricas en vapor, las cuales presentan densidades y salinidades bajas y temperaturas de homogenización más altas que las inclusiones fluidas ricas en líquido, que presentan salinidades y densidades más alta, esto concuerda con lo mencionado por Roedder, 1981 para inclusiones fluidas atrapadas en sistemas heterogéneos, donde ocurre el atrapamiento de inclusiones de alta densidad (ricas en líquido) y de baja densidad (ricas en Vapor), el atrapamiento de inclusiones fluidas ricas en vapor causa grandes errores positivos en la temperatura de homogenización, por esta razón los datos de inclusiones fluidas ricas en vapor de esta asociación (AIF 1) no son tenidos en cuenta para establecer las condiciones de temperatura, salinidad, densidad, presión y profundidad del fluido que generó estas inclusiones.

Según Roedder, 1981 un atrapamiento de inclusiones fluidas con una relación variable de L/V puede ser debido a ebullición, lo cual puede causar depositación de minerales mena, también a un atrapamiento de inclusiones fluidas en diferentes tiempos, bajo diferentes condiciones de presión y temperatura y por fuga de inclusiones o estrangulamiento. En las observación de las inclusiones fluidas de esta asociación se logró determinar que las inclusiones fluidas ricas en líquido homogenizaban a una fase líquida, mientras que las ricas en vapor homogenizaban a una fase vapor (Figura 56), por esta razón podría establecerse que esta asociación de inclusiones fluidas se formó en un evento de ebullición, ya que de acuerdo con Roedder, 1981, en un caso de ebullición las inclusiones fluidas ricas en vapor homogenizan a vapor por evaporación del líquido y las inclusiones fluidas ricas en liquido homogenizan por expansión del líquido y eliminan la burbuja de vapor.

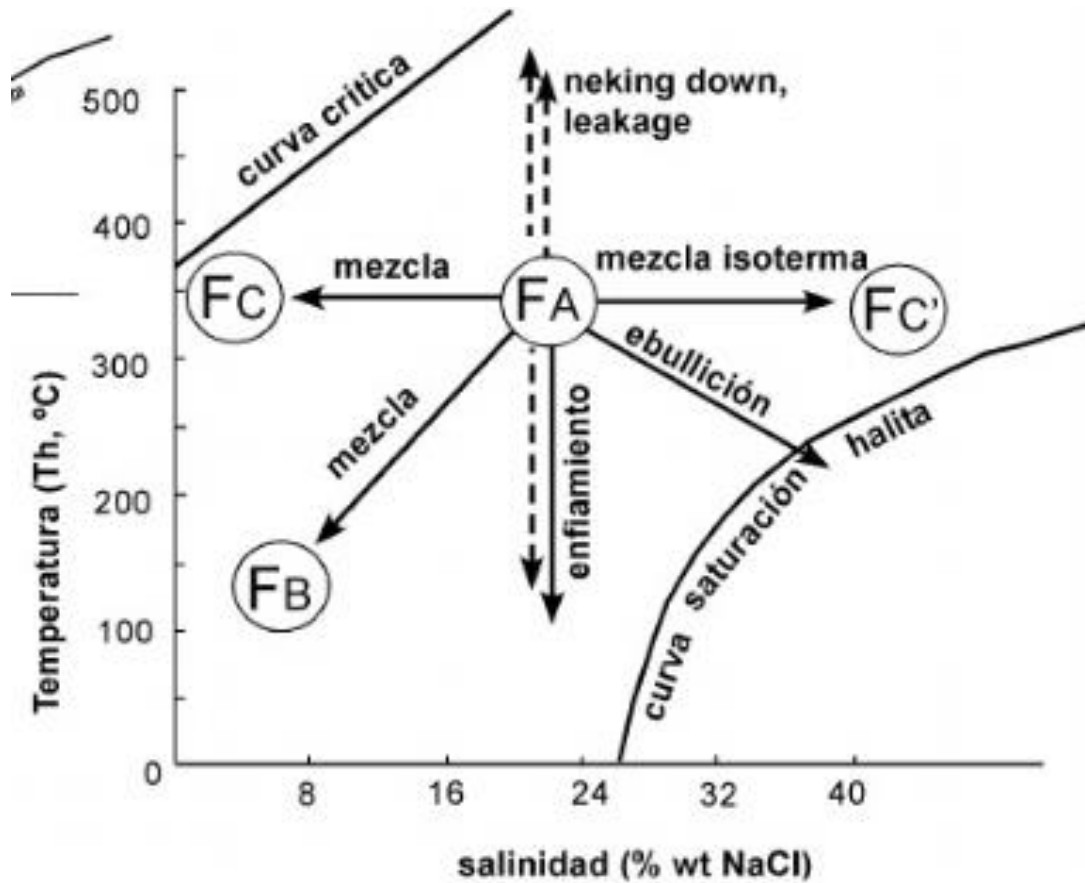
Figura 56: Diagrama Temperatura (°C) vs Densidad (g/cm³) del sistema H₂O en el que se muestran los tipos principales de homogenización de inclusiones según su densidad.



Tomado de Velasco (2004).

Según Wilkinson, 2001, los dos procesos que proporcionan las condiciones óptimas para la precipitación de minerales mena son la ebullición o efervescencia de sistemas ricos en volátiles y la mezcla de fluidos, los cuales pueden generar una dispersión en los datos de temperatura de homogenización y salinidad (Figura 57).

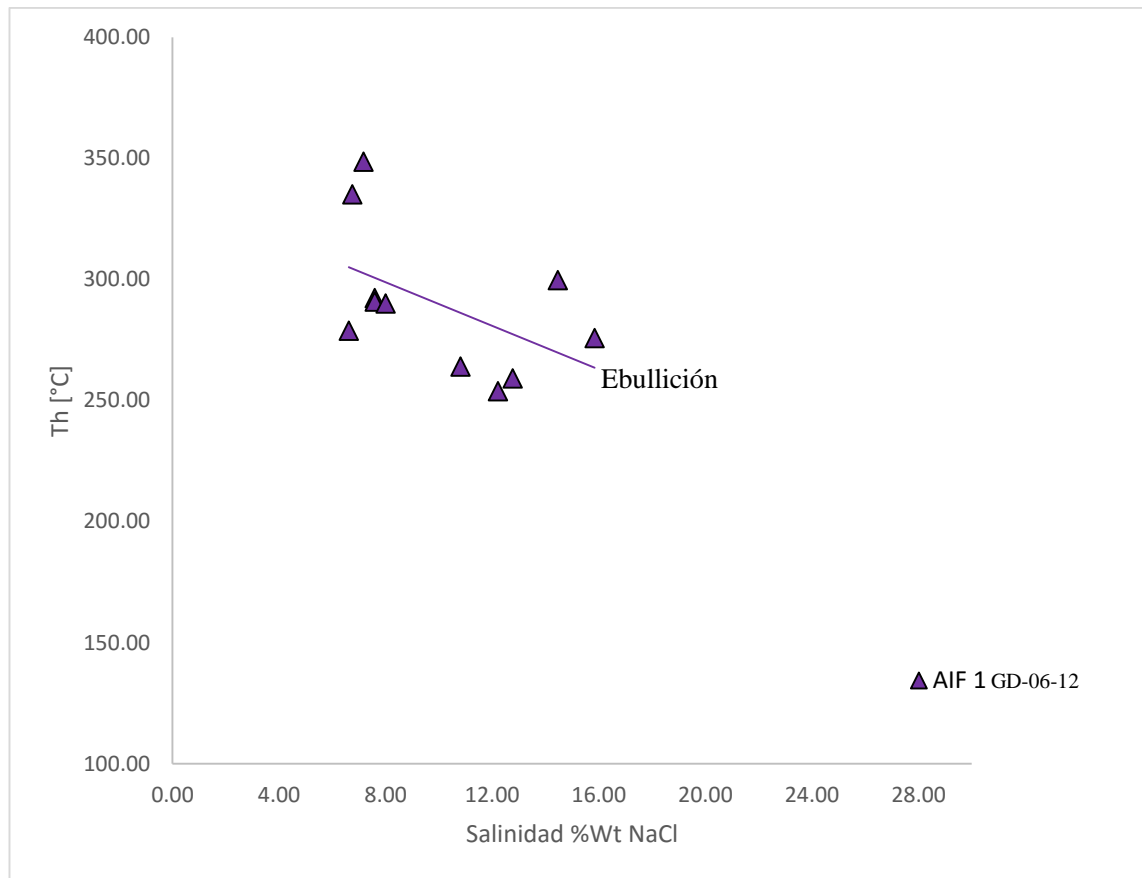
Figura 57: Diagrama esquemático que muestra los espacios de tendencia típicos de Th y salinidad debidos a varios procesos de evolución de fluidos.



Tomada de Velasco (2004).

De acuerdo al diagrama mostrado por Velasco (2004), se realizó una gráfica de Th vs Salinidad en la cual se plotearon los datos obtenidos para la asociación de inclusiones fluidas 1 (AIF 1) del evento II, los cuales muestran tendencia al campo de ebullición (Figura 58).

Figura 58: Grafica Th Vs Salinidad en la que se muestra la tendencia de las inclusiones fluidas de la AIF 1 al campo de ebullición, basado en el diagrama mostrado en la figura anterior.

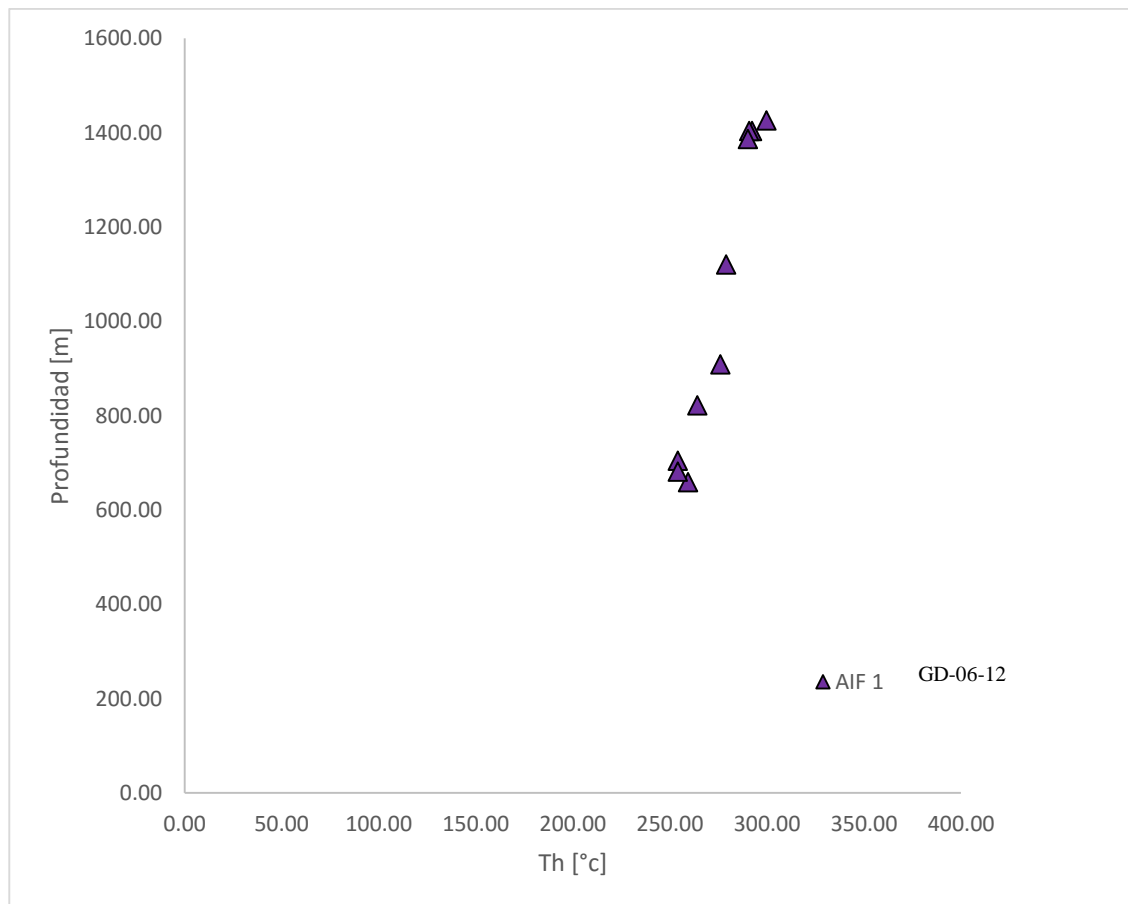


Con el fin de estimar de manera semicuantitativa la composición del fluido a partir del cual se formaron las inclusiones de esta asociación, se utiliza la temperatura eutéctica la cual, según Velasco, 2004 proporciona información sobre el sistema en el cual estamos. Generalmente la presencia de sales disueltas en un sistema H₂O genera un descenso en el punto de congelación (T_{m ice}) siendo su disminución proporcional al porcentaje de sales disueltas.

En base a los datos de temperatura eutéctica (T_e) de las inclusiones fluidas presentes en la AIF 1 del Evento II se determinó que el fluido que originó estas inclusiones pertenece a un sistema salino acuoso, aunque debido a que los rangos de temperatura eutéctica varían de -32 a -20,5°C para las inclusiones fluidas de la muestra GD-06-12 se hace difícil estimar específicamente el tipo de sistema salino acuoso presente, a partir de una comparación entre el promedio de las temperaturas eutécticas de las inclusiones y las temperaturas eutécticas experimentales para cada sistema se puede establecer que se trata de un sistema H₂O + NaCl + KCl, con salinidades

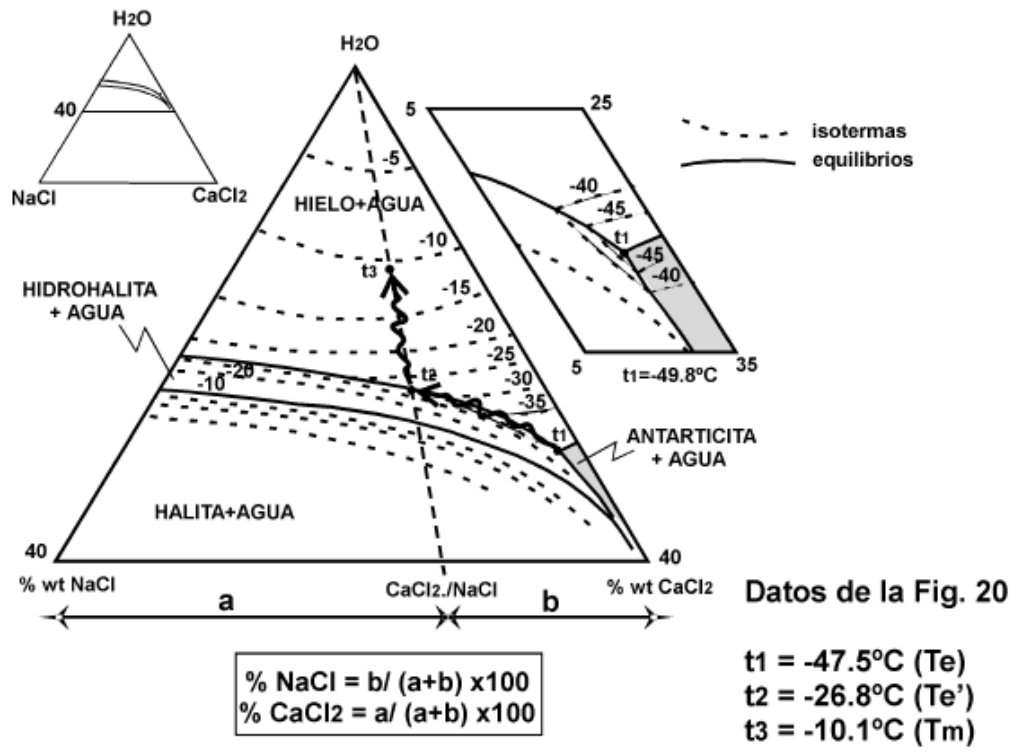
entre 4 y 16 % Wt NaCl equiv calculadas en base a los datos de Tm ice. Por otra parte, en base a los datos de temperatura de homogenización fue posible establecer que este fluido se generó a temperaturas entre 260 a 320°C, presiones entre 12, 5 a 13, 4 bares y profundidades 660 m a 1500 m (Figura 59).

Figura 59: Gráfica de Profundidad (m) vs Temperatura de homogenización (°C) para las muestras GD-06-12.



Para determinar las proporciones de sales disueltas en un sistema H₂O-NaCl-KCl se utiliza el diagrama ternario de la Figura 60, el cual según Roedder (1981) se usa solo para inclusiones que presentan minerales hijos visibles de NaCl – KCl, debido a que en las inclusiones fluidas observadas en esta asociación no se identificaron minerales hijos visibles, el diagrama mencionado anteriormente no fue utilizado.

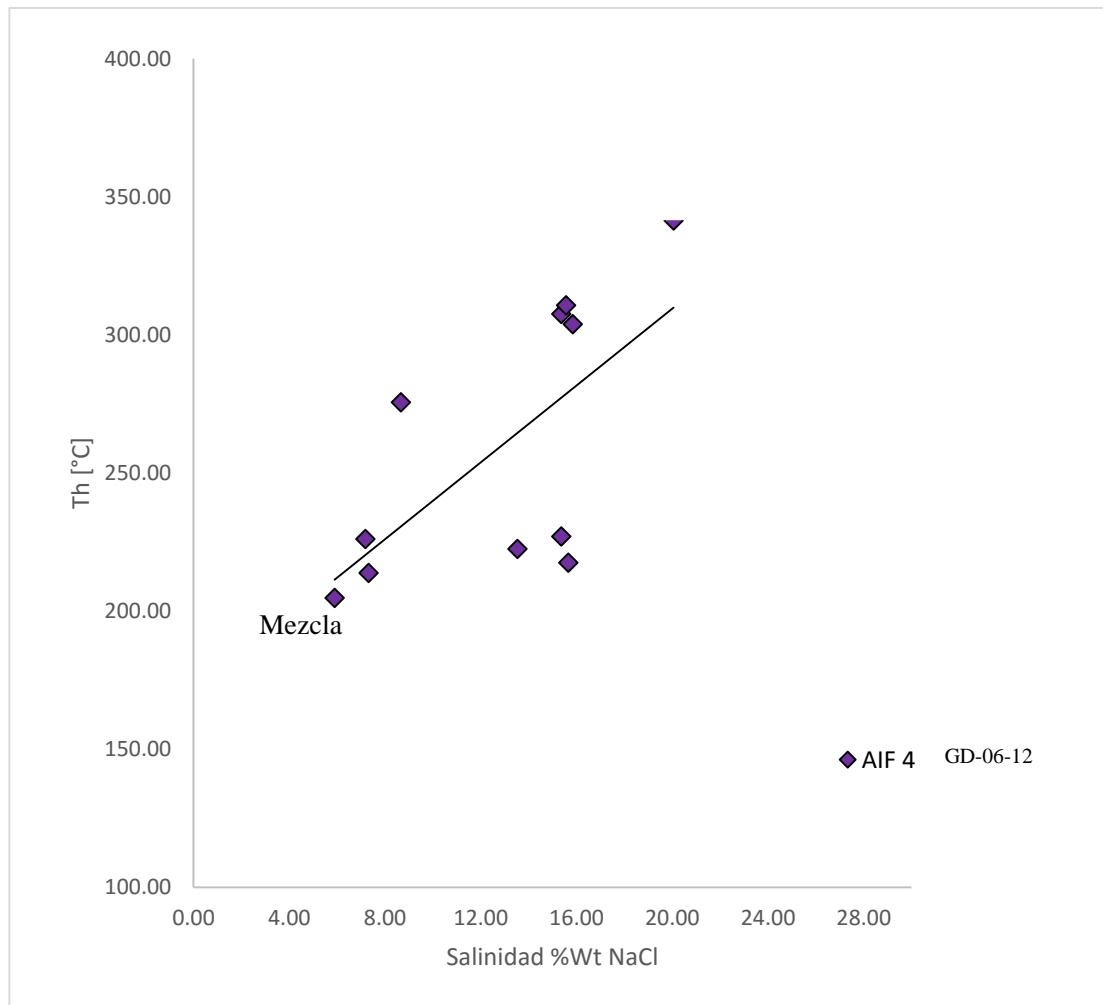
Figura 60: Diagrama ternario del sistema H₂O-NaCl-KCl utilizado para la determinación de la proporción de sales disueltas.



Tomado de Velasco, 2004.

También se realizaron análisis de microtermometría a inclusiones fluidas pertenecientes a la AIF 4 del Evento II las cuales son inclusiones fluidas bifásicas tipo I con atrapamiento homogéneo, los resultados de estas mediciones fueron ploteados en un diagrama de Th Vs salinidad, a partir del cual según el diagrama esquemático de Th Vs Salinidad de Velasco (2004) se estableció una tendencia hacia el campo de mezcla de fluidos (Figura 61).

Figura 61: Th Vs Salinidad en la que se muestra la tendencia de las inclusiones fluidas de la AIF 1, basado en el diagrama de Velasco (2004).



A partir de la gráfica anterior (Figura 61) se puede determinar que las inclusiones fluidas de la asociación AIF 4 del Evento II, presentan mayores variaciones en las temperaturas de homogenización entre 200 a 310°C y salinidad que varían de 5 a 15 Wt % NaCl. De acuerdo a los datos de temperatura eutéctica de las inclusiones fluidas de esta asociación se pudo determinar que se formaron en un sistema salino acuoso, aunque los tipos de sales presentes fueron difíciles de identificar debido a que se presentan grandes variaciones en las temperaturas eutécticas (-23 a -33 °C) lo que podría interpretarse como un sistema H₂O-NaCl-KCl con presencia de otras sales disueltas.

9 CONCLUSIONES

- La Mina La Providencia es un depósito mineral con estilos de mineralización porfirítico y epitermal, en donde los cuerpos mineralizados de mayor interés están representados en venas y brechas hidrotermales dado su alto contenido de metales preciosos. Este depósito se encuentra hospedado principalmente en rocas metamórficas (Gneis de Bucaramanga) y en menor medida en rocas ígneas (Grupo Plutónico de Santander).
- Se reconocieron cuatro eventos de alteración hidrotermal-mineralización a escala de depósito, donde los dos primeros presentan características asociadas a los sistemas porfiríticos. El Evento I (alteración propilítica) está relacionado con la presencia de clorita, epidota, calcita, cuarzo y pirita, la cual se encuentra diseminada en las rocas afectadas por esta alteración. El Evento II (alteración sericitica) en el cual se presentan venas de cuarzo-pirita y cuarzo-pirita-arsenopirita, los cuales son indicativos de un estado de baja sulfuración.
- Los dos últimos eventos de alteración hidrotermal-mineralización están relacionados con el estilo epitermal. El evento III (Zona distal de la alteración argílica avanzada) relacionado con la presencia de la asociación mineral $Qz+Kln±Dck±Alu$, venas de cuarzo-pirita-calcopirita, venas de cuarzo-pirita-esfalerita pobre en Fe y venas con textura crustiforme de cuarzo-pirita-galena-hübnerita las cuales están asociadas a un estado de sulfuración intermedia. El Evento IV (alteración Qz-Alu y silicificación) formado bajo condiciones de alta sulfuración debido a la presencia de venas de cuarzo-alunita-pirita, venas de alunita-esfalerita pobre en Fe y zonas con cuarzo-enargita-esfalerita-Au-pirita-teluros alojadas en las oquedades generadas por la de la sílice residual.
- Los procesos de alteración supérgena se encuentran afectando en diferente grado de intensidad la mineralogía de cada uno de los eventos de alteración hidrotermal-mineralización al igual que la mineralogía de las rocas encajantes, y son responsables de la formación de óxidos e hidróxidos de hierro, jarosita y calcantita.

- Los eventos de alteración hidrotermal-mineralización presentes en la mina La Providencia evidencian una variación en los estados de sulfuración del depósito. Baja sulfuración (Eventos I y II), intermedia sulfuración (Evento III) y alta sulfuración (Evento IV). La mineralización de oro en este depósito se asocia mayoritariamente al estado de alta sulfuración (Evento IV).
- Los análisis petrográficos y microtermométricos de la asociación de inclusiones fluidas 1 (AIF 1) en venas de cuarzo-pirita relacionadas con el Evento II (alteración sericítica) sugieren que éste está relacionado con fluidos acuoso-salinos (H₂O-NaCl-KCl) en ebullición, los cuales presentan temperaturas entre 260-320°C y salinidades que varían de 4 a 16% en peso NaCl y la asociación de inclusiones fluidas 4 (AIF 4) muestran una tendencia al campo de la mezcla de fluidos con variaciones de temperatura de 200 a 310°C y salinidad de 5 a 15 Wt % NaCl.

10 RECOMENDACIONES

Para un mejor entendimiento de la evolución del depósito se recomienda realizar:

- Estudios litogeoquímicos de los cuerpos intrusivos los cuales no fueron realizados en esta tesis.
- Estudios de isótopos estables a Alunita y Pirita, con el fin de determinar la proveniencia de los fluidos que dieron origen a la mineralización.
- Estudios de inclusiones fluidas en venas de cuarzo relacionadas con alteración argílica avanzada, la cual se encuentra asociada a la mineralización de oro.
- Dataciones Ar/Ar en Alunitas, para determinar la edad de la mineralización.
- Análisis TerraSpec, con el fin de identificar los diferentes tipos de arcillas presentes en las rocas alteradas.
- Estudios estructurales a escala regional y de depósito, con el fin de establecer si la mineralización está asociada a control estructural.
- Perforaciones dentro de la mina y a sus alrededores, con el fin de obtener perfiles y hacer un modelamiento del depósito.

BIBLIOGRAFIA

Amaya S.; 2012; Caracterización Petrográfica y Petrológica de las Migmatitas del Neis de Bucaramanga, en el Macizo de Santander, Departamentos de Norte de Santander y Santander.

Bissig T., Mantilla L.C., Craigh J.R.; 2013; Petrochemistry of igneous rocks of the California-Vetas mining district, Santander, Colombia: Implications for northern Andean tectonics and porphyry Cu (–Mo, Au) metallogeny.

Buhl J.C. and Willgallis A; 1985; On the hydrothermal synthesis of wolframite. *Chemical Geology*, 48 (1985) 93--102 Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam -- Printed in The Netherlands.

Buhl J. C. and Willgallis A.; 1986; The low-temperature crystallization of (Fe,Mn)WO₄ (wolframite), (Zn,Fe)WO₄ (sanmartinite) and (Zn,Mn)WO₄ solid solutions under hydrothermal conditions. *Chemical Geology*, 56 (1986) 271--279 Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam -- Printed in The Netherlands

Demoustier R. Castroviejo R. y Charlet J. M.; 1998; Geología clasificación textural del cuarzo epitermal (au-ag) de relleno filoniano del área volcánica de Cabo de Gata, Almeria. *Boletín geológico y minero*. vol. 109-5 y 6.

Dong G. Morrison G. and Jaireth S.; 1995; Quartz textures in epithermal veins, Queensland-classification, origin and implication.

González R., Lozano R. P. y Casquet M. C.; 2000; Efectos de la alteración hidrotermal en los minerales accesorios del granito de la Cabrera (Sistema Central Español). Estudio al microscopio electrónico de barrido (SEM + EDS). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*.

Götze J. and Möckel R.; 2012; Quartz: deposits, mineralogy and analytics. Springer geology.

Horner C.; 1979; Solubility and hydrolysis of FeWO₄ and MnWO₄ in the 25°--300°C range, and the zonation of wolframite. *Chemical Geology*, 27 (1979) / Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam -- Printed in The Netherlands.

Hossain S.; 2012; Controls on vein styles and vein internal textures in magmatic-hydrothermal system.

Jones A. P., Wall F. and Williams C. T.; 1996; Rare earth minerals: chemistry, origin and ore deposits.

Leguizamón R., Molano J. C. y Carrasco E.; 2009; Rasgos epitermales encontrados en las rocas ubicadas al SW de la Vereda Santa Lucia, departamento del Cauca, Colombia.

Malvicini L. y Llambias E.; 1963; Mineralogía y origen de los minerales de manganeso y sus asociados en Farellón Negro, Alto de La Blenda y Los Viscos, Hualfín, Catamarca. Revista de la asociación geológica argentina.

Mantilla L. C., Valencia V. A., Barra F., Pinto J., Colegial J.; 2009; Geocronología U-Pb de los cuerpos porfiríticos del Distrito Aurífero de Vetas-California (Dpto. de Santander, Colombia).

Mantilla L. C., Mendoza F., Bissig T., Hart J. R.; 2011; Nuevas evidencias sobre el magmatismo Miocénico en el Distrito Minero de Vetas-California (Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia). Boletín de Geología/Universidad Industrial de Santander. V. 33 (1): 43-58.

Mantilla L. C., Bissig T., Cottle J. M., Hart J.R.; 2012; Remains of early Ordovician mantle-derived magmatism in the Santander Massif (Colombian Eastern Cordillera)

Mantilla L. C., Bissig T., Valencia V., Hart J.R.; 2013; The magmatic history of the Vetas-California Mining district, Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia.

Moncada S., Mutchler A., Nieto T.I., Reynolds J.D., Rimstidt R.J., Bodnar; 2012; Mineral Textures and fluid inclusion petrography of epithermal Ag-Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration. Journal of Geochemical Exploration 114.

Pirajno F.; 2009; Hydrothermal processes and mineral systems. Geological Survey of Western Australia.

Reeder, Richard J.; 1981; Thermodynamics modeling of geological materials: minerals, fluids and, fluid inclusions (Reviews in mineralogy)

Rodríguez A. L.; 2014; Geology, Alteration, Mineralization and Hydrothermal Evolution of the La Bodega-La Mascota deposits, California-Vetas Mining District, Eastern Cordillera of Colombia, Northern Andes.

Royero J. M. y Clavijo J.; 2001; Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander.

Rubinstein N. y Gargiulo M. F.; 2005; Análisis textural de cuarzo hidrotermal del depósito el pantanito, provincia de Mendoza: nuevos aportes sobre su génesis: Rev. Asoc. Geol. argent. v.60 n.1 Buenos Aires.

Sakharkar Manjusha V., Sharma J., Ray R.K., Biswas AK.; 1997; Characterization of synthesized wolframite minerals and their leach residues. Hydrometallurgy 44 (1997) 65-69

Sillitoe R. H.; 2010; Porphyry copper systems. Economic geology, vol. 105, no. 1, pp. 3-41.

Simmons S.F., White, N.C., y John D.A.; 2005; Geologic characteristics of epithermal precious and base metal deposits: Economic geology 100th anniversary volume, p. 485-522.

Ureña Suárez C. L.; 2014; Metamorfismo, Exhumación y termocronología del Neis de Bucaramanga. (Macizo de Santander, Colombia).

Urueña Suarez C. y Zuluaga C. A.; 2001; Petrografía del Neis de Bucaramanga en cercanías a Cepitá, Berlín y Vetas – Santander.

Velasco F.; 2004; Introducción al estudio de las inclusiones fluidas. Departamento de Mineralogía y Petrología Universidad del País Vasco (España). XXIII CURSO LATINOAMERICANO DE METALOGENIA 17-28 agosto de 2004, Mendoza (Argentina).

Ward D.E., Goldsmith R., Jimeno A., Cruz J., Restrepo H., Gómez E.; 1973; Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona.

White Noel C. and Hedenquist Jeffrey W.; 1995; Los depósitos de oro epitermal: estilos, características y exploración,

Wilkinson J.J.; 2001; Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. T H Huxley School of Environment, Earth Sciences and Engineering, Royal School of Mines, Imperial College, London SW7 2BP, UK.