

**ALTERACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA MINERALIZACIÓN DEL ÁREA DE
INFLUENCIA DE LA MINA LA COQUETA, DISTRITO MINERO MALTERIA,
DEPARTAMENTO DE CALDAS**

GUSTAVO ADOLFO RAMÍREZ SALAMANCA

ARLIN BRIGHITH FONSECA MARTÍNEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS**

ESCUELA DE GEOLOGÍA

BUCARAMANGA

2016

**ALTERACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA MINERALIZACIÓN DEL ÁREA DE
INFLUENCIA DE LA MINA LA COQUETA, DISTRITO MINERO MALTERIA,
DEPARTAMENTO DE CALDAS**

GUSTAVO ADOLFO RAMÍREZ SALAMANCA

ARLIN BRIGHITH FONSECA MARTÍNEZ

**Trabajo de Grado para optar al título de
Geólogo**

Director

JULIÁN ANDRÉS LÓPEZ ISAZA

Msc. Geología

Codirector

CARLOS GARCIA RAMÍREZ

Geólogo, PhD.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS**

ESCUELA DE GEOLOGÍA

BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

A mi madre Luz por haberme apoyado en todo momento de mi vida, aconsejándome, motivándome e inculcándome los valores que me han permitido ser una persona de bien, pero más que nada por su amor.

A mi padre Eladio por sus ejemplos de dedicación y fuerza que me han enseñado siempre.

A mis tías las cuales me formaron, educaron y apoyaron en mis estudios de manera incondicional sin importar las circunstancias, a mis tíos por sus consejos y enseñanzas de vida

A mis amigos Milton, David, Oscar, Sandra, Carlos y Sergio por compartir momentos buenos y malos a lo largo de este capítulo de mi vida que se cierra y abre las puertas a uno mejor, Gracias por estar ahí.

A una persona en especial mi compañera Brighith Fonseca, sencillamente por ser como es y por existir, gracias por compartir tanto conmigo y ayudarme a mejorar cada día más.

Gustavo Adolfo Ramirez Salamanca

DEDICATORIA

Este gran logro lo dedico a mis padres Hernando Fonseca Bohórquez y Ana Silvia Martínez López, por su amor, apoyo incondicional, enseñanzas y por formar la persona que soy.

A mis hermanos Oscar Hernando y Ruben Dariop por su apoyo y por hacerme sonreír en los momentos más difíciles. A mi sobrina, Gabriela Fonseca Rueda, por darme tantas alegrías y enseñarme que cualquier cosa es posible.

A Julieth Angélica por brindarme esa gran amistad y por acompañarme por más de diez años en los malos y buenos momentos. A mi compañero Gustavo por su paciencia, perseverancia y por apoyarme en cada locura y aventura.

Y por supuesto, a esa cosa que algunos llaman Dios.

Arlin Brighith Fonseca Martínez

AGRADECIMIENTOS

Al geólogo Msc. Julián Andrés López Isaza por sus enseñanzas, consejos, colaboración y guía durante la realización del presente proyecto y por haber contribuido en nuestra formación profesional y personal.

Al grupo de investigación de geología básica y aplicada GIGBA, en especial a los docentes PhD. Carlos García Ramírez y PhD. Luis Carlos Mantilla por su asesoramiento y colaboración en el laboratorio de microscopia ubicado en la Universidad Industrial de Santander, parque tecnológico Guatiguara.

Al geólogo Carlos Augusto Quiroz por sus consejos y recomendaciones.

A todas las personas que nos impulsaron a seguir adelante con nuestra investigación e intensificaron nuestro deseo de aprender, especialmente a Sandra Lorena Flórez que con su sinceridad nos motivo.

A los geólogos de las minas La Coqueta y La Cascada por facilitarnos el ingreso a la mina.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
2 JUSTIFICACIÓN.....	19
3 OBJETIVOS.....	21
3.1 Objetivo general.....	21
3.2 Objetivos específicos.....	21
4 GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	22
4.1 Localización geográfica.....	22
4.2 Vías de Acceso.....	22
4.3 Fisiografía.....	22
5 METODOLOGÍA.....	24
5.1 Revisión bibliográfica	24
5.2 Trabajo de Campo.....	24
5.3 Descripción macroscópica	24
5.4 Estudio petrográfico.....	25
5.5 Petrografía de minerales opacos.....	25
5.6 Análisis Geoquímico	25
5.7 Análisis de Inclusiones fluidas	26
5.8 Análisis de resultados, interpretación y elaboración del informe final.....	26
6 ANTECEDENTES.....	27
7 MARCO GEOLÓGICO	29
8 RESULTADOS.....	34
8.1 Petrografía.....	34

8.2	Petrografía de minerales opacos	42
8.3	Alteraciones	51
8.4	Geoquímica	61
8.5	Inclusiones fluidas	66
9	DISCUSIÓN	72
10	CONCLUSIONES	82
11	RECOMENDACIONES	83
	BIBLIOGRAFÍA	84

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: LOCALIZACIÓN DE LA MINA LA COQUETA, DISTRITO MINERO MALTERIA, DEPARTAMENTO DE CALDAS.....	23
FIGURA 2: MAPA GEOLÓGICO DEL ÁREA DONDE SE ENCUENTRA LAS MINAS LA COQUETA Y LA CASCADA....	33
FIGURA 3: MUESTRA DE MANO J989766 Y SECCIÓN DELGADA, OBSERVANDO LAS DIFERENCIAS ENTRE LA ROCA CAJA Y LA ALTERACIÓN DISTAL.....	34
FIGURA 4: MICROFOTOGRAFÍAS EN NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS DE LA MILONITA GRANÍTICA DEL GUACAICA CON CUARZO CON AGREGADOS POLIGONALES JUNTO CON PLAGIOCLASA RODEADO DE MICAS EN LA MUESTRA J989525; (QZ: CUARZO, BT: BIOTITA, MS: MOSCOVITA).....	36
FIGURA 5: MICROFOTOGRAFÍAS EN NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS DE LA MILONITA GRANÍTICA DEL GUACAICA DE LA MUESTRA J989842 CON MICROCLINA, ORTOSA PERTÍTICA Y CUARZO CON MIGRACIÓN DE BORDE DE GRANO (QZ: CUARZO, MC: MICROCLINA, OR: ORTOCLASA PERTÍTICA).....	36
FIGURA 6: MICROFOTOGRAFÍAS EN NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS DE LA MILONITA GRANÍTICA DEL GUACAICA DE LA MUESTRA VETA-GR-1 CON CUARZO FRACTURADO Y SERICITA ENTRE LOS CUARZOS (QZ: CUARZO, SER: SERICITA, MC: MICROCLINA).	37
FIGURA 7: MICROFOTOGRAFÍAS EN NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS DE LA MILONITA GRANÍTICA DEL GUACAICA DE LA MUESTRA J989524 CON CUARZO CON TEXTURA EN PEINE RELLENANDO FRACTURAS Y EN CONTACTO CON MOSCOVITA DE ALTERACIÓN Y SERICITA (QZ: CUARZO, SER: SERICITA, MS II: MOSCOVITA DE ALTERACIÓN).....	37
FIGURA 8: MICROFOTOGRAFÍAS EN NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS DE LA MILONITA GRANÍTICA DEL GUACAICA DE LA MUESTRA J989842 (QZ: CUARZO, BT: BIOTITA, OPQ: MINERALES OPACOS, SER: SERICITA, MS II: MOSCOVITA DE ALTERACIÓN).....	38
FIGURA 9: MICROFOTOGRAFÍAS EN NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS DE LA MILONITA GRANÍTICA DEL GUACAICA DE LA MUESTRA GR-1 CON CARBONATO RELLENANDO ESPACIOS ENTRE CUARZOS (QZ: CUARZO, CB: CARBONATO, MS II: MOSCOVITA DE ALTERACIÓN).	39
FIGURA 10: MICROFOTOGRAFÍAS EN NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS DE LA TONALITA-GRANODIORITA MANIZALES DE LA MUESTRA J989766 CON CUARZO CON MIGRACIÓN DE BORDE DE GRANO, PLAGIOCLASA SONADA CON MODERADA SERICITIZACIÓN (QZ: CUARZO, BT: BIOTITA, PL: PLAGIOCLASA).	39
FIGURA 11: MICROFOTOGRAFÍAS EN NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS DE LA TONALITA-GRANODIORITA MANIZALES DE LA MUESTRA J989803 CON CUARZO CON TEXTURA MASIVA A LA IZQUIERDA Y EN PEINE CON SUTURAS DE OPACOS (QZ: CUARZO, OPQ: OPACOS).	40
FIGURA 12: MICROFOTOGRAFÍAS EN NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS DE LA TONALITA-GRANODIORITA DE MANIZALES DE LA MUESTRA J989766 CON PLAGIOCLASA CON SAUSURITIZACIÓN Y BIOTITA (QZ: CUARZO, PL: PLAGIOCLASA, BT: BIOTITA, EP: EPIDOTA).	40
FIGURA 13: MICROFOTOGRAFÍAS EN NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS DE LA TONALITA-GRANODIORITA DE MANIZALES DE LA MUESTRA J989804 CON BIOTITA ALTERÁNDOSE A CLORITA CON ALGUNAS INCLUSIONES DE OPACOS (QZ: CUARZO, CHL: CLORITA, OPQ: MINERALES OPACOS, SER: SERICITA).....	41
FIGURA 14: MICROFOTOGRAFÍAS EN NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS DE LA TONALITA-GRANODIORITA DE MANIZALES DE LA MUESTRA J989804 CON MICROCLINA AL TERÁNDOSE A SERICITA (MC: MICROCLINA, SER: SERICITA, QZ: CUARZO).....	41
FIGURA 15: MICROFOTOGRAFÍAS EN NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS DE LA TONALITA-GRANODIORITA DE MANIZALES DE LA MUESTRA J989766 CON UN ISLOTE DE HORBLENDA PRODUCTO	

DE LA ALTERACIÓN A CLORITA, PLAGIOCLASA CON MACLA POLISINTÉTICA Y CUARZO (QZ: CUARZO, PL: PLAGIOCLASA, CHL: CLORITA, OPQ: MINERALES OPACOS).....	42
FIGURA 16: ORO LIBRE ENTRE CRISTALES DE CUARZO CON TEXTURA EN PEINE (AU: ORO).....	44
FIGURA 17: FORMAS EN LAS QUE SE PRESENTA LA PIRITA: A. ASOCIADA A TENANTITA-TETRAEDRITA COMO INCLUSIÓN EN MOSCOVITA DE ALTERACIÓN Y B. COMO RELLENO DE VETILLA ASOCIADA A CALCOPIRITA Y ESFALERITA. (PY: PIRITA, TNT-TTR: TENANTITA-TETRAEDRITA, CCP: CALCOPIRITA, SP: ESFALERITA).....	45
FIGURA 18: CALCOPIRITA ASOCIADA A DIGENITA Y BORNITA CON TEXTURA SIMPLECTÍTICA (CCP: CALCOPIRITA, PY: PIRITA, BN: BORNITA, DG; DIGENITA).....	45
FIGURA 19: ASOCIACIÓN DE PIRITA, CALCOPIRITA, ESFALERITA, ARSENOPIRITA Y MARCASITA (PY: PIRITA, CCP: CALCOPIRITA, SP: ESFALERITA, APY: ARSENOPIRITA, MRC: MARCASITA).....	46
FIGURA 20: TEXTURA DE ESFALERITA DISEASE (CCP: CALCOPIRITA, SP: ESFALERITA, TNT-TTR: TENANTITA-TETRAEDRITA, PY: PIRITA).....	47
FIGURA 21: GALENA Y ESTIBINA EN CONTACTO Y ORO EN CRISTAL DE CUARZO (STB: ESTIBINA, GN: GALENA, CCP: CALCOPIRITA Y AU: ORO).....	48
FIGURA 22: MOLIBDENITA CON PLEGAMIENTOS Y PIRITA PARALELAS A LA FOLIACIÓN MILONÍTICA (PY: PIRITA, MOL: MOLIBDENITA).....	49
FIGURA 23: RELACIÓN DE CONTACTO ENTRE ESFALERITA Y TENANTITA-TETRAEDRITA (SP: ESFALERITA, TNT-TTR: TENANTITA-TETRAEDRITA).....	49
FIGURA 24: EXSOLUCIÓN ENTRE PIRITA Y PIRARGIRITA (PY: PIRITA, CCP: CALCOPIRITA, PYR: PIRARGIRITA).....	50
FIGURA 25: ROCA CAJA, ZONAS DE ALTERACIÓN DISTAL Y PROXIMAL, Y VETILLA ENCONTRADAS EN LA MILONITA GRANÍTICA DEL GUACAICA.....	52
FIGURA 26: ROCA CAJA, ZONAS DE ALTERACIÓN DISTAL Y PROXIMAL, Y VETILLA ENCONTRADAS EN LA TONALITA-GRANODIORITA DE MANIZALES.....	52
FIGURA 27: MICROFOTOGRAFÍAS EN NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS DE LA MILONITA GRANÍTICA DEL GUACAICA SIN ALTERAR, OBSERVÁNDOSE LAS DOS FOLIACIONES (QZ: CUARZO, BT: BIOTITA Y MS: MOSCOVITA).....	53
FIGURA 28: MICROFOTOGRAFÍAS EN NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS DE LA MILONITA GRANÍTICA DEL GUACAICA CON ALTERACIÓN DISTAL, MOSTRANDO EL CAMBIO DE BIOTITA A CLORITA Y EL AUMENTO EN EL CONTENIDO DE SERICITA (QZ: CUARZO, CHL: CLORITA, BT: BIOTITA, OPQ: MINERALES OPACOS).....	54
FIGURA 29: MICROFOTOGRAFÍAS EN NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS MOSTRANDO LA GRAN CANTIDAD DE MOSCOVITA DE ALTERACIÓN Y LA PRESENCIA DE CARBONATO EN LA ALTERACIÓN PROXIMAL (MS II: MOSCOVITA DE ALTERACIÓN, CB: CARBONATO Y QZ: CUARZO).....	55
FIGURA 30: VETILLA DE CUARZO CON SUTURA DE CARBONATOS Y PRESENCIA DE OPACOS (QZ CUARZO, SER: SERICITA, OPQ: MINERALES OPACOS, MS II: MOSCOVITA DE ALTERACIÓN).....	55
FIGURA 31: MICROFOTOGRAFÍAS EN NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS DE LA TONALITA-GRANODIORITA DE MANIZALES SIN ALTERAR, OBSERVÁNDOSE PLAGIOCLASA, BIOTITA, CUARZO Y OPACOS (QZ: CUARZO, BT: BIOTITA, PL: PLAGIOCLASA Y OPQ: MINERALES OPACOS).....	57
FIGURA 32: MICROFOTOGRAFÍAS EN NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS DE LA TONALITA-GRANODIORITA DE MANIZALES CON ALTERACIÓN DISTAL, MOSTRANDO EL CAMBIO DE BIOTITA A CLORITA Y EL AUMENTO EN EL CONTENIDO DE SERICITA (QZ: CUARZO, CHL: CLORITA, BT: BIOTITA, OR: ORTOSA Y SER: SERICITA).....	58
FIGURA 33: MICROFOTOGRAFÍAS DE NICOLES CRUZADOS Y NICOLES PARALELOS DE LA TONALITA-GRANODIORITA DE MANIZALES MOSTRANDO MOSCOVITA DE ALTERACIÓN PRODUCIDA A PARTIR DE LA	

CLORITA, AUMENTO EN EL CONTENIDO DE OPACOS Y SERICITA (OPQ: OPACOS, MS II: MOSCOVITA DE ALTERACIÓN Y CHL: CLORITA).....	59
FIGURA 34: VETILLA DE CARBONATO Y OPACOS EN LA TONALITA-GRANODIORITA DE MANIZALES (CB: CARBONATO, OPQ: OPACOS Y SER: SERICITA).....	60
FIGURA 35: TEST DE ALTERACIÓN PARA TODAS LAS MUESTRAS LOCALIZADAS EN LA MINA LA COQUETA.	61
FIGURA 36: DIAGRAMAS DE ISOCONAS MOSTRANDO ENRIQUECIMIENTO Y EMPOBRECIMIENTO DE ÓXIDOS MAYORES ENTRE LA ALTERACIÓN DISTAL Y LA ROCA CAJA A. MILONITA GRANÍTICA DEL GUACAICA TONALITA-GRANODIORITA DE MANIZALES.	65
FIGURA 37: DIAGRAMAS DE ISOCONAS MOSTRANDO ENRIQUECIMIENTO Y EMPOBRECIMIENTO DE ÓXIDOS MAYORES ENTRE LA ALTERACIÓN DISTAL Y LA ALTERACIÓN PROXIMAL DE LAS ROCA CAJA A. MILONITA GRANÍTICA DEL GUACAICA Y B. TONALITA-GRANODIORITA DE MANIZALES.	65
FIGURA 38: DIAGRAMA DE ISOCONAS MOSTRANDO ENRIQUECIMIENTO Y EMPOBRECIMIENTO DE ALGUNOS METALES ENTRE LA ALTERACIÓN PROXIMAL CON LA ROCA CAJA EN DONDE A. LA ROCA CAJA ES LA MILONITA GRANÍTICA DEL GUACAICA Y B. ES LA TONALITA-GRANODIORITA DE MANIZALES.	66
FIGURA 39: MICROFOTOGRAFÍAS DE INCLUSIONES HOSPEDADAS EN CUARZO DE MUESTRA A. J989802 Y B. MC-2-B.	68
FIGURA 40: CURVAS DE EBULLICIÓN PARA SOLUCIONES DE NaCl DE ACUERDO A LA RELACIÓN ENTRE LA TEMPERATURA DE HOMOGENIZACIÓN Y LA PROFUNDIDAD DE ENTRAMPAMIENTO.	71
FIGURA 41: A. DISTRIBUCIÓN DE LA ALTERACIÓN EN LA MINA LA COQUETA INDICANDO LA DISTRIBUCIÓN LATERAL DE LA ALTERACIÓN A PARTIR DE UNA ZONA DE BRECHA QUE HA SERVIDO COMO CANAL DE FLUIDO PARA ALBERGAR LA MINERALIZACIÓN (I: ROCA CAJA, II: ALTERACIÓN DISTAL, III: ALTERACIÓN PROXIMAL Y IV: BRECHA), COMPARADA CON B. SECCIÓN ESQUEMÁTICA QUE GENERALIZA LOS PATRONES DE ALTERACIÓN EN SISTEMAS DE BAJA SULFURACIÓN CON AUMENTO DE LA PROFUNDIDAD Y TÍPICA ZONACIÓN EN LA ALTERACIÓN, Y C. MODELO ESQUEMÁTICO DE EXTENSIÓN DE LA ALTERACIÓN EN UN DEPÓSITO TIPO ORO OROGÉNICO.	73
FIGURA 42: ESQUEMA RESUMIDO DE LA SECUENCIA DE PARAGÉNESIS DE ALTERACIÓN PARA DEPÓSITOS DE TIPO ORO OROGÉNICO EN AMBIENTES DE FACIES SUB-ESQUISTOS VERDES, LA PROXIMIDAD A LA MINERALIZACIÓN INCREMENTA HACIA LA DERECHA, EL COLOR NEGRO REPRESENTA CASO COMUNES MIENTRAS EL VERDE REPRESENTA OCURRENCIAS MENOS COMUNES.	76
FIGURA 43: A. ESQUEMA REPRESENTATIVO DE TIPO DE ESTRUCTURA PRESENTE EN AMBIENTES DE FACIES SUB ESQUISTOS VERDES Y B. FOTOGRAFÍA DE AFLORAMIENTO MOSTRANDO UNA BRECHA DE LA MINA LA COQUETA.	77
FIGURA 44: ESQUEMA REPRESENTATIVO DE AMBIENTES CORTICALES PARA DEPÓSITOS HIDROTERMALES DE ORO EN TÉRMINOS DE PROFUNDIDAD DE FORMACIÓN Y AMBIENTE ESTRUCTURAL EN UN LÍMITE DE PLACAS CONVERGENTES.	79

LISTA DE TABLAS

<i>TABLA 1: RESUMEN DE LOS MINERALES PRESENTES EN LAS MUESTRAS DE LAS QUE SE HICIERON SECCIONES DELGADAS.</i>	<i>34</i>
<i>TABLA 2: TABLA RESUMEN DE LOS MINERALES OPACOS ENCONTRADOS EN LAS MUESTRAS ANALIZADAS DE LA MINA LA COQUETA Y LA CASCADA.....</i>	<i>43</i>
<i>TABLA 3: RESUMEN DE LOS MINERALES PRESENTES EN LA ROCA CAJA, VETILLA Y LAS DIFERENTES ZONAS DE ALTERACIÓN DE LA MILONITA GRANÍTICA DEL GUACAICA.</i>	<i>56</i>
<i>TABLA 4: RESUMEN DE LOS MINERALES PRESENTES EN LA ROCA CAJA, VETILLA Y LAS DIFERENTES ZONAS DE ALTERACIÓN DE LA MILONITA GRANÍTICA DEL GUACAICA.</i>	<i>60</i>
<i>TABLA 5: ÓXIDOS MAYORES Y ALGUNOS ELEMENTOS TRAZA DE LAS MUESTRAS QUE SE USARON PARA REALIZAR DIAGRAMAS DE ISOCONAS, EN DONDE LAS MUESTRAS J989797 Y J989769 SON DE LA ROCA CAJA, J989804 Y J989525 DE LA ROCA CON ALTERACIÓN DISTAL Y J989803 Y J89525 SON DE LA ROCA CON ALTERACIÓN PROXIMAL.</i>	<i>63</i>
<i>TABLA 6: DATOS DE TERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS DE LA COQUETA).</i>	<i>69</i>
<i>TABLA 7: DATOS OBTENIDOS A PARTIR DEL SOFTWARE BULK, DONDE TE: TEMPERATURA EUTÉCTICA, TfHIELO: TEMPERATURA FINAL DE FUSIÓN DEL HIELO, TH: TEMPERATURA DE HOMOGENIZACIÓN.</i>	<i>70</i>
<i>TABLA 8: TABLA COMPARATIVA DE LOS DEPÓSITOS EPITERMALES DE BAJA SULFURACIÓN Y ORO OROGÉNICO CON LA MINA LA COQUETA.</i>	<i>80</i>

RESUMEN

TITULO:

ALTERACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA MINERALIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA MINA LA COQUETA, DISTRITO MINERO MALTERIA, DEPARTAMENTO DE CALDAS*

AUTORES:

ARLIN BRIGHITH FONSECA MARTÍNEZ
GUSTAVO ADOLFO RAMÍREZ SALAMANCA**

PALABRAS CLAVE:

MINERALIZACIÓN, ALTERACIÓN, MINERAL MENA, MINERAL GANGA, ASOCIACIÓN MINERAL, INCLUSIONES FLUIDAS.

La Cordillera Central es un lugar propicio para encontrar diferentes tipos de depósitos de metales debido a los eventos que dieron lugar a su formación. En su flanco Occidental a 8 kilómetros aproximadamente de la Ciudad de Manizales se encuentra ubicado el Distrito Minero de Malteria, en donde actualmente hay extracción de oro en las minas La Coqueta, La Cascada, Palmitas y La Ríos, y cuya mineralización se encuentra asociada a venas y vetillas controladas estructuralmente con halos de alteración.

En el área de influencia de la mina la Coqueta la mineralización se encuentra hospedada principalmente en vetas que cortan de forma discordante a la Milonita Granítica del Guacaica, y en menor proporción en la Tonalita–Granodiorita de Manizales, que debido a la presencia de esfuerzos transpresivos, generan fallas que sirvieron como canales para el paso de fluidos hidrotermales que transportaron metales de interés económico (plata y oro), y elementos con los que se formaron minerales de mena como pirita, calcopirita, tenantita-tetraedrita, esfalerita, galena, molibdenita, marcasita, y arsenopirita, acompañados de minerales ganga como cuarzo y carbonatos en menor proporción. Adicionalmente, el paso del fluido hidrotermal generó reacciones en los minerales de la roca caja como feldespatos, micas y anfíboles, produciendo cambios de coloración en la roca, y dando lugar a la movilización de elementos químicos como sílice, azufre, plomo, arsénico, antimonio, calcio, sodio y magnesio.

De acuerdo a los análisis realizados en el área de estudio y trabajos previos en la zona se realiza una comparación con dos modelos de depósitos (epitermal de baja sulfuración y oro orogénico), analizando que lo observado no concuerda en su totalidad con ninguno de los depósitos mencionados anteriormente.

*Trabajo de grado modalidad investigación

**Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Julián Andrés López Isaza, MSc. Co-director: Carlos Alberto García Ramírez, PhD

ABSTRACT

TITLE:

ALTERATION AND FEATURES OF THE MINERALIZATION AT THE AREA OF INFLUENCE OF THE COQUETA MINE, MALTERIA MINING DISTRICT, CALDAS DEPARTMENT*

AUTHORS:

ARLIN BRIGHITH FONSECA MARTINEZ
GUSTAVO ADOLFO RAMÍREZ SALAMANCA **

KEYWORDS:

MINERALIZATION, ALTERATION, ORE MINERAL, GANGUE MINERAL, MINERAL ASSEMBLAGE, FLUID INCLUSIONS

The Central Cordillera is a favorable place to locate different kinds of deposits of metals due to the events that resulted in their formation. To 8 kilometers approximately to the west of Manizales city are placed the Malteria Mining District in where nowadays there are extraction of gold in the La Coqueta mine, the La Cascada mine, the Palmitas mine and the La Rios mine, whose mineralization is associated to veinlets that are structurally controlled with halos of alteration

In the field of influence of the La Coqueta mine the mineralization is hosted in veins that cutting discordantly the Milonita Granítica del Guacaica, and in less dimension the Tonalita-Granodiorita de Manizales, these lithologies are located in a zone that was under transspresional stresses, causing faulting that served like channels for the passing of hydrothermal fluids that transported metals of economic interest like silver and gold, and elements with which were created ore minerals like pyrite, chalcopyrite, tennantite-tetrahedrite, sphalerite, galena, molybdenite, marcasite and arsenopyrite accompanied by gangue minerals like quartz and a lesser proportion carbonates. Further the pass of hydrothermal fluids produced reaction with the minerals of the host rock like feldspar and micas and amphiboles generating changes in colour in the host rock and it resulted in the mobilization of chemical elements like silica, sulfur, lead, arsenic, antimony, calcium, sodium and magnesium.

According to the analyzes performed in the study area and previous works in the zone of interest is made a comparison with two models of deposits (epithermal low sulphidation and orogenic gold deposits) analyzing that the features observed does not match in totality with any of these deposits

*Degree work investigation modality

**Faculty of Physical – Chemical Engineering. Scholl of Geology. Director: Julián Andrés López Isaza, MSc. Co-director: Carlos Alberto García Ramírez, PhD

INTRODUCCIÓN

La investigación de recursos naturales renovables y no renovables son fundamentales para el desarrollo de la economía del país, y su correcto uso y extracción depende del conocimiento sobre la génesis y concentración del mineral de interés. Debido a esto es importante el estudio de las alteraciones y mineralizaciones que se encuentran en algunas áreas, como la mina La Coqueta ubicada en el Distrito Minero Malteria, cuya mineralización ha sido descrita como vetiforme (López, 1971), clasificada como un tipo de depósito epitermal tipo adularia-sericita (Herrera *et al.*1993) y epitermal de baja sulfuración (Alvarán, 2006). Sin embargo con el fin de explicar la presencia de rasgos que difieren con los depósitos mencionados anteriormente se realiza el presente trabajo mediante el análisis petrográfico, metalográfico, geoquímico y de microtermometría de inclusiones fluidas, determinando asociaciones minerales de las zonas de alteración que se forman a partir de la venas mineralizadas y su diferenciación con la roca caja sin alteración. Finalmente se realiza una discusión sobre las características con las cuales son afines o que difieren los análisis realizados.

Con base en los resultados planteados en el presente estudio se propone una guía para futuros trabajos en estas zonas y sus alrededores o lugares que presentan características similares a las observadas en la mina La Coqueta y su área de influencia, con el objetivo de entender las características de las minas y su afinidad con depósitos mundiales.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Distrito Minero Malteria, Departamento de Caldas, ha sido estudiado por diversos autores que han identificado alteraciones, mineralizaciones, paragénesis minerales, entre otras, y basándose en esto han clasificado el depósito mineral de tipo epitermal de baja temperatura o depósito de oro vetiforme (López, 1971; Alvarán, 2006). Sin embargo aún quedan dudas relacionadas al origen y la evolución de las estructuras, alteraciones hidrotermales y mineralizaciones presentes en cada una de las minas del distrito.

De acuerdo con lo anterior se realizan las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuál es el papel que tiene la litología de la roca caja en el desarrollo de las alteraciones hidrotermales y las mineralizaciones?, ¿Las alteraciones hidrotermales presentan alguna distribución desde la vena (canal de flujo) hacia la roca caja?, ¿Existe zonación de las asociaciones minerales de alteración hidrotermal con relación a su distribución desde la vena? ¿Cuál fue la temperatura de entrapamiento del fluido que generó la mineralización?

Para resolver algunas de las anteriores preguntas de investigación, es necesario realizar un estudio detallado de las mineralizaciones en las diferentes minas que están en la zona. El presente estudio tiene como fin ayudar a entender los procesos de mineralización identificando y caracterizando las mineralizaciones presentes en las venas de acuerdo a su distribución desde el canal de flujo de la solución mineralizante, las alteraciones e inclusiones fluidas, a partir del análisis petrográfico, metalográfico, geoquímico y microtermométrico de inclusiones fluidas de muestras de las zonas mineralizadas y alteradas presentes en las minas La Coqueta (principalmente) y La Cascada.

2 JUSTIFICACIÓN

La exploración y explotación de recursos naturales están directamente relacionadas con el desarrollo económico y social del país. La minería es la actividad que se encarga de la extracción de estos recursos y está ligada al potencial geológico minero presente en cada región, el cual la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2006) valora desde el punto de vista de los siguientes factores: ambientes de formación, conocimiento del subsuelo, nivel de información y recurso minero. Con base en esta valoración, Colombia conoce sus reservas de carbón y níquel, pero no las de oro y esmeraldas (UPME, 2006), teniendo una desventaja competitiva frente a otros países de Latinoamérica como Perú y Brasil, ya que cuentan con un mayor conocimiento de sus recursos.

Para el 2006 Colombia reporta un total de 177 municipios con un alto potencial aurífero en el país, sin embargo muchos de estos están siendo explotados por pequeña o mediana minería que en algunos casos no cuenta con la capacidad económica para proyectar trabajos futuros con base en la definición de bloques de reservas racionalmente evaluados (UPME, 2006). Un ejemplo de esto se encuentra en el municipio de Villamaria, Caldas, en el que está el Distrito Minero de Malteria que ha sido valorado como un prospecto de alto potencial aurífero en el país siendo explotado por medio de socavones o túneles de pequeña envergadura.

Las minas La Coqueta y La Cascada están ubicadas dentro de este prospecto para Colombia, sin embargo a pesar de su importancia, pocos trabajos de investigación se han adelantado para entender su metalogénesis y evolución. Con el presente trabajo se busca aportar al conocimiento metalogénico de ésta zona, ayudando a esclarecer algunas dudas relacionadas con la descripción, caracterización y formación de las alteraciones y mineralizaciones presentes en dicha mina, aumentando el conocimiento geológico del Distrito Minero de Malteria

y ayudando al entendimiento de los procesos que dieron lugar a las mineralizaciones auríferas que se encuentran actualmente en ésta zona.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Caracterizar mineralógicamente la alteración y venas presentes en la zona de influencia de la mina La Coqueta.

3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la mineralización de mena y ganga de las venas, y sus relaciones texturales presentes en la zona de influencia de la mina La Coqueta
- Caracterizar las alteraciones hidrotermales en la zona de influencia de la mina La Coqueta, para cada una de las litologías que atraviesan las venas en este sector.
- Determinar la distribución de las alteraciones desde la vena hacia la roca caja, y diferenciar las zonaciones mineralógica y texturalmente
- Analizar los elementos que se movilizaron realizando una comparación entre la roca caja y las zonas de alteración, y definir las características del fluido mediante el análisis de inclusiones fluidas realizadas previamente.
- Asociar las características de las alteraciones y mineralogía presentes a un modelo de depósito particular.

4 GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1 Localización geográfica

La zona de estudio está localizada en el flanco Occidental de la Cordillera Central, al Este de la ciudad de Manizales, Departamento de Caldas (Figura 1).

4.2 Vías de Acceso

La mina La Coqueta se encuentra a aproximadamente 8 Km. de la ciudad de Manizales, siguiendo la carretera Manizales-Bogotá. La principal vía de acceso a la zona es desde Manizales hacia Malteria, tomando el desvío por la fábrica Projel y continuando 2 Km hacia el NE.

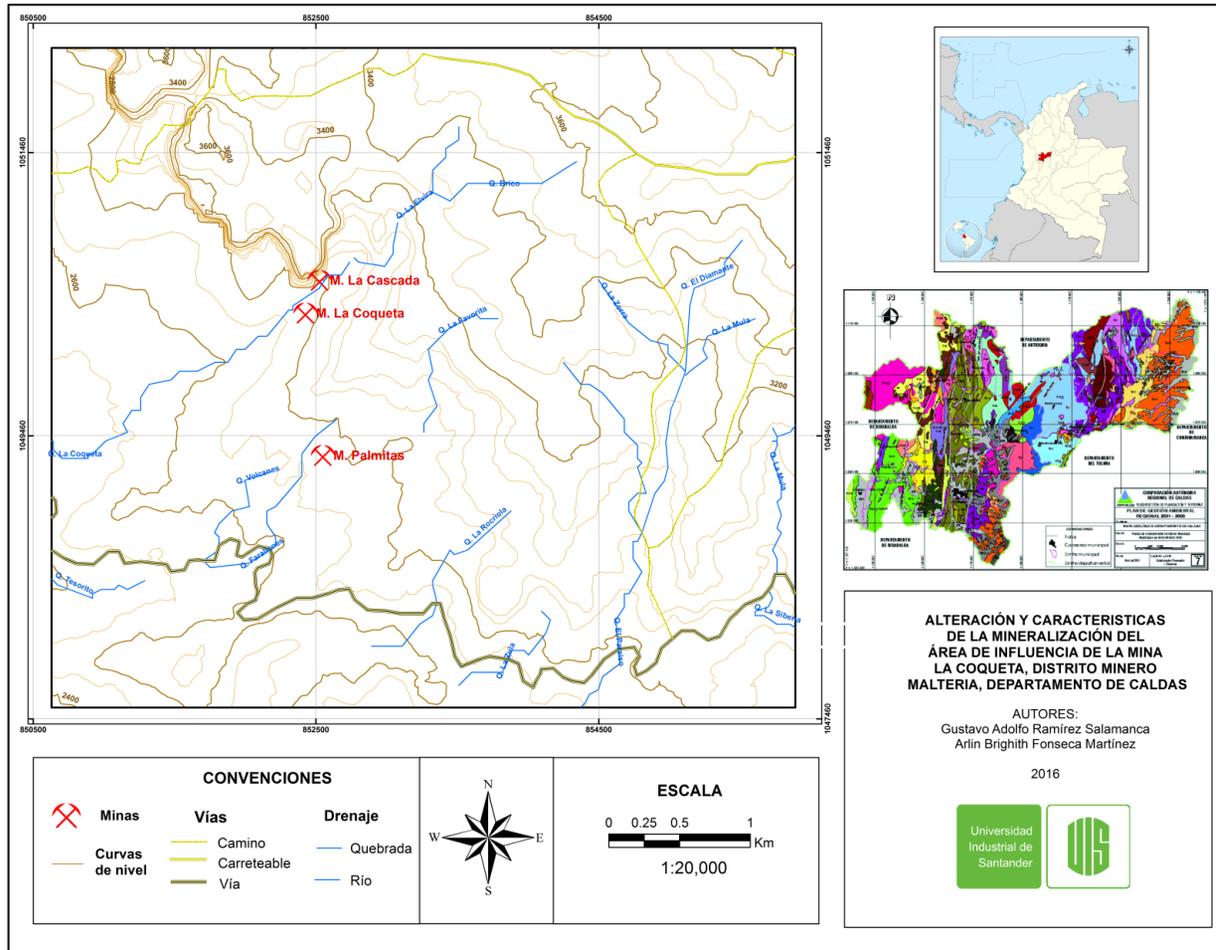
4.3 Fisiografía

El área de estudio está situada entre los 2500 y 3500 m de altitud, con una temperatura promedio de 8.1°C y una precipitación anual de 1736 mm aproximadamente (CORPOCALDAS, 2005).

La Topografía es caracterizada por fuertes pendientes, laderas irregulares y cimas redondeadas en donde la litología corresponde a rocas ígneas y metamórficas de alta competencia principalmente.

La zona se encuentra sobre la quebrada La Coqueta, que junto con las quebradas Manizales, Elvira, Volcanes y Farallones presentan una orientación NE-SW que es controlada por foliaciones metamórficas y estructuras regionales. Adicionalmente estas quebradas desembocan en el río Chinchina, cuya vertiente es el río Cauca.

Figura 1: Localización de la Mina La Coqueta, Distrito Minero Maltería, Departamento de Caldas



Tomado y modificado de CORPOCALDAS (2007)

5 METODOLOGÍA

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos anteriormente, este trabajo de investigación se ha dividido en 8 fases:

5.1 Revisión bibliográfica

Consistió en la recopilación, selección y análisis de la literatura disponible necesaria para la realización del presente trabajo, ya sea relacionada con la mineralización presente en el Distrito Minero de Malteria, haciendo énfasis en la mina La Coqueta, geología del área o con conceptos de texturas, estructuras, mineralogía, geoquímica e inclusiones fluidas encontradas en proyectos de investigación como artículos, planchas geológicas, proyectos de grado, memorias explicativas, memorias de congresos, libros, entre otros.

5.2 Trabajo de Campo

Esta fase se realizó en dos minas, inicialmente en La Coqueta obteniendo 20 muestras donde se observaban los cambios mineralógicos y texturas desde la roca caja hasta las vetas o vetillas encontradas en las guías de las cuales se realizaron 7 secciones delgadas y 4 doblemente pulidas. Posteriormente, se realizó un muestreo en la mina La Cascada, ubicada a 291 m aproximadamente de la mina La Coqueta, obteniendo 6 muestras, de las cuales se realizaron 7 secciones delgadas pulidas y 3 doblemente pulidas.

5.3 Descripción macroscópica

Consistió en la observación de alteraciones (diferenciación de zonas), morfología de venas, composición mineralógica y cambios texturales que presentan las muestras con el fin de caracterizar detalladamente los cambios que ocurrieron en las muestras con la acción de la alteración. Los cortes realizados para las secciones delgadas fueron hechos con base al cambio textural y mineralógico que se encontraba, con el fin de realizar una descripción detallada de las diferentes zonas que se pueden encontrar en la mineralización presente en la mina La

Coqueta. Las muestras colectadas de la mina La Cascada fueron descritas de igual manera y se emplean para realizar una comparación de la mineralización con la mina La Coqueta.

5.4 Estudio petrográfico

Esta fase consistió en la realización de secciones delgadas y el análisis de estas en un microscopio *Leica DM750P*, ubicado en el parque tecnológico Guatiguara de la Universidad Industrial de Santander. Se identificaron los diferentes minerales que se encontraban en cada una de las muestras y en cada una de las zonas de alteración utilizando las abreviaturas de Whitney & Evans (2010). Adicionalmente se realizó un conteo mineralógico de 500 a 900 puntos barriendo toda la sección y un conteo mineralógico de cada zona de alteración presente en cada sección.

5.5 Petrografía de minerales opacos

A partir de secciones pulidas y doblemente pulidas se identificaron los minerales opacos, las texturas de mena y sus relaciones texturales con los minerales adyacentes con el microscopio *Nikon Modelo Opthiphot 100* utilizando las abreviaturas de Whitney & Evans (2010), adicionalmente se realizó un conteo de opacos con el fin de determinar las diferencias porcentuales de éstos minerales.

5.6 Análisis Geoquímico

Esta fase comprendió el envío de 20 muestras al laboratorio ALS en donde se obtuvo la información en porcentaje en peso de los óxidos mayores, partes por millón (ppm) de los elementos de tierras raras, y partes por billón (ppb) de oro y plata, en donde posteriormente se realizó un análisis de la movilidad de óxidos mayores en las zonas de alteración con el software GCDkit v 4.00.

5.7 Análisis de Inclusiones fluidas

El estudio de inclusiones fluidas (IF) se realiza en secciones doblemente pulidas donde se identifican las asociaciones de Inclusiones fluidas, posteriormente se seleccionan aquellas asociaciones de interés para el análisis de microtermometría. Para el presente trabajo se realiza un análisis de los datos obtenidos por Alvarán (2006) de temperatura de homogenización (T_h), temperatura de primera fusión del hielo (T_{pf}), temperatura final de fusión del hielo (T_{Fhielo}) con los cuales mediante el software BULK(06/02) creado por Bakker (2003) se obtiene la salinidad, densidad y la presión de vapor para la temperatura de homogenización, tomando el sistema como H₂O-NaCl debido a la clasificación de tipos de IF según Nash & Theodore (1971), teniendo un modelo puramente empírico con gases disueltos y empleando las ecuaciones de Potter *et al.*(1978).

5.8 Análisis de resultados, interpretación y elaboración del informe final

Esta fase comprendió el análisis de la información recolectada en cada una de las anteriores fases, donde se realizó una interpretación de los datos obtenidos y se elaboró un documento técnico.

6 ANTECEDENTES

Las mineralizaciones presentes en el Distrito Minero Maltería, fueron clasificadas por López (1971) como un complejo filoniano localizado al borde Oriental del municipio de Manizales, el cual se caracteriza por presentar filones de cuarzo con espesores de 0,40 metros a 1,80 metros y por contener cantidades significativas de metales preciosos relacionados con los sulfuros presentes, los efectos del fracturamiento y la alteración hidrotermal restringida a 20 ó 30 cms de los respaldos de los filones dejando el resto de la roca caja prácticamente fresca. Adicionalmente, describe que son comunes las fisuras de rellenos con cuarzo bandeado y es notoria la zona de alteración hidrotermal en la roca encajante con presencia de illita, adularia ocasional, clorita, epidota y calcita. Estas mineralizaciones están relacionadas a cuerpos granodioríticos, metamórficas del Complejo Cajamarca (González & Londoño, 2002) y rocas miloníticas de composición monzogranítica con variaciones a granodiorita (Cuéllar *et al.* 2003; Aguirre & López, 2003; Alvarán, 2006; López *et al.* 2007; Fonseca *et al.* 2015). Según López (1971), la mineralización rellena fracturas de tensión con rumbo NE-E producidas por esfuerzos posteriores a la intrusión del Stock de Manizales (Tonalita – Granodiorita de Manizales en el sentido de López & Aguirre, 2005), donde el rumbo y buzamiento de los filones no se ve afectado por la tectónica post-mineralización. La paragénesis de los filones y la escasa alteración hidrotermal sugieren que son depósitos epitermales de baja temperatura, sin embargo, la intrusión de cuerpos hipoabisales porfídicos producen también mineralizaciones filonianas en el área, principalmente hacia los contactos con rocas encajantes o en el borde del cuerpo hipoabisal (López, 1971).

Pulido (1985), resalta que las mineralizaciones están presentes en rocas metamórficas del Complejo Cajamarca y stock subvolcánicos de composición ácida a intermedia, para el área de Palmitas, Cascada y La Coqueta, y estas presentan oro en filones y en vetillas descartándose así un prospecto de oro diseminado. Sin embargo, Alvarán (2006) realiza un trabajo con un enfoque más

detallado de las características texturales y mineralógicas, reportando que la mineralización en la zona de la mina La Coqueta solo se presenta en una roca metamórfica deformada de manera dúctil, definida por Cuéllar *et. al.* (2003) como Milonita Granítica del Guacaica, y con base en los análisis realizados clasifica los depósitos auríferos presentes en el Distrito Minero de Malteria como epitermales tipo adularia-sericita que se da como producto directo del magma formado a profundidades moderadas y bajas temperaturas según la clasificación de Park (1964).

De igual manera, Quiceno & Osorio (2011), realizan un estudio de petrografía, metalografía e inclusiones fluidas de la mineralización vetiforme presente en la mina Palmitas ubicada en el mismo distrito, clasificando el área de esta mina como un depósito epitermal de baja sulfuración. Por otra parte, Navarrete (2011) menciona que la presencia de esfalerita, calcopirita, marcasita, pirita y arsenopirita se ajusta al modelo de depósitos epitermales de baja sulfuración propuesto por Sillitoe & Hedenquist (2003), identificando zonas de ebullición por medio de asociaciones de cuarzo-adularia y reportando alteración sericitica, propilitica, potásica de baja temperatura en la mina La Rios.

7 MARCO GEOLÓGICO

El Distrito Minero Malteria se encuentra ubicado en el flanco Occidental de la Cordillera Central, al Este de la ciudad de Manizales, y hace parte de la provincia metalogénica Continental Central (López *et al.*2013), la cual definen como un conjunto alóctono, conformado por bloques de corteza siálica y simática de edades Neoproterozoico y Paleozoico. Así mismo, definen un potencial para depósitos tipo IOCG, hidrotermales vetiformes de oro (orogénico?), epitermales de alta y baja sulfuración, oro relacionado a intrusivos, MVT, depósitos hidrotermales de esmeraldas, pórfidos de Cu-Mo, Au-Cu y Au, y VMS.

Dentro del distrito las mineralizaciones se encuentran hospedadas en rocas del Complejo Cajamarca, Milonita Granítica del Guacaica y la Tonalita Granodiorita de Manizales, estas se encuentran cubiertas por depósitos aluviales, volcanosedimentarios y piroclásticos del Complejo Volcánico Ruiz (López 1971; Cuéllar *et al.* 2003; Aguirre & López, 2003; López& Aguirre, 2005).

A continuación se presenta una descripción general de estas litologías.

Complejo Cajamarca: Esta unidad es descrita por González (1989), como un conjunto de rocas metamórficas presentes en la Cordillera Central compuesta por esquistos verdes, anfibolitas, esquistos grafiticos, filitas cuarzosas, esquistos cuarzosos néisicos, diabasas y calizas cristalinas. De acuerdo a González (2001) los tipos de roca que afloran en el área de estudio son: esquistos cuarzo-sericíticos, con presencia de grafito en cantidades variables impartiendo un color gris a negro característico, por lo cual se denominan esquistos negros y se encuentran compuestos por cuarzo, sericita, grafito, clorita y, como accesorios micas, apatito, turmalina y opacos. Esquisto actinolíticos-cloríticos, conocidos como esquistos verdes por su color característico, con tonos claros y oscuros y corresponden a rocas macizas a esquistosas con foliación definida por la orientación paralela a subparalela del anfíbol fibroso y clorita con bandeamiento

composicional. Esta unidad se encuentra limitada al Oriente por la Milonita Granítica del Guacaica por la acción de la Falla Mangabonita (Aguirre & López, 2003).

Milonita Granítica del Guacaica: Definida por Cuéllar *et al.* (2003) y López *et al.* (2007) como un cuerpo granítico de forma lenticular, facies heterogéneamente variables desde granodiorita a adamellita y monzogranito, con deformación de estado sólido de moderada a baja temperatura ampliamente extendida (López *et al.*, 2007; Fonseca *et al.*, 2015), predominantemente peraluminica y de naturaleza calco-alcalina (Yazo, 1991). Mineralógicamente ésta compuesta por cuarzo, plagioclasa, biotita parda, feldespato potásico y moscovita. Esta unidad se encuentra en contacto al Oeste con rocas del Complejo Cajamarca y al Este con la Tonalita Granodiorita de Manizales (definida anteriormente como Stock de Manizales), el contacto con este cuerpo no es determinado debido a que este cuerpo se emplaza concordantemente con la foliación de la milonita, sin embargo, por inconsistencias como la existencia de xenolitos de la Milonita Granítica del Guacaica en bloques de la Tonalita Granodiorita de Manizales, y la presencia de Cornubianitas en la cercanía al Stock y cuyo protólito corresponde a rocas de Milonita Granítica del Guacaica; se asume que es un contacto intrusivo (Aguirre & López, 2003; López *et al.*, 2007).

Tonalita-Granodiorita de Manizales (sensu Aguirre & López, 2003). Denominada como Stock cuarzodiorítico al Oriente de Manizales (López, 1971), Stock de Manizales (Mosquera, 1978), Granodiorita de Manizales, (González & Londoño, 2002) y Tonalita – Granodiorita de Manizales (López & Aguirre, 2005; Plazas *et al.*, 2013; López *et al.*, 2015). Corresponde a un cuerpo ígneo intrusivo masivo holocristalino, con textura fanerítica, leucocrático, hipidiomórfico equigranular de color moteado sal pimienta, con índice de color entre 5.5 y 26.7, tamaño de cristales de fino a medio, y compuesto mineralógicamente por plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico como minerales esenciales, biotita y

horblenda como minerales accesorios mayores, y epidota, apatito, clorita, y opacos como minerales menores, y edades K/Ar en biotita de 57 ± 2 Ma. y 56 ± 3 Ma (McCourt, 1984). Así mismo Aguirre & López (2003) y López & Aguirre (2005) evidencian una zonación composicional y mineralógica la cual divide en tres facies ígneas: Tonalita Biotítica con Horblenda, Tonalita Biotítica y Granodiorita Biotítica, donde la Fase Tonalita Botítica con Horblenda aflora en el sector del Distrito Minero Malteria (Aguirre & López, 2003; López & Aguirre, 2005).

Depósitos piroclásticos. Corresponden a depósitos piroclásticos de caída, son producto de la actividad cuaternaria de los volcanes del Complejo Ruiz–Tolima, las capas piroclásticas están compuestas por cenizas, lapilli pumítico correspondientes a depósitos pilinianos de caída; y, ocasionalmente, bombas volcánicas. La fuente principal de estos depósitos son los volcanes Ruiz y Tolima. (González, 2001). Esta litología se encuentra cortando de manera discordante las litologías anteriormente expuestas.

Como se menciona anteriormente, la zona donde se encuentra la mina La Coqueta se encuentra controlada estructuralmente, teniendo fallas inversas y de rumbo (ver Figura 2). A continuación se presentan las fallas de mayor importancia y que presentan mayor influencia en las estructuras que se encuentran en la mina:

Falla Manga Bonita: Definida por Aguirre & López (2003), como la falla que marca el contacto entre los esquistos negros del Complejo Cajamarca y la Milonita Granítica del Guacaica, su tendencia es NNE, su carácter es inverso, tiene una longitud de 25 Km y se encuentra asociada al Sistema de Fallas de Palestina.

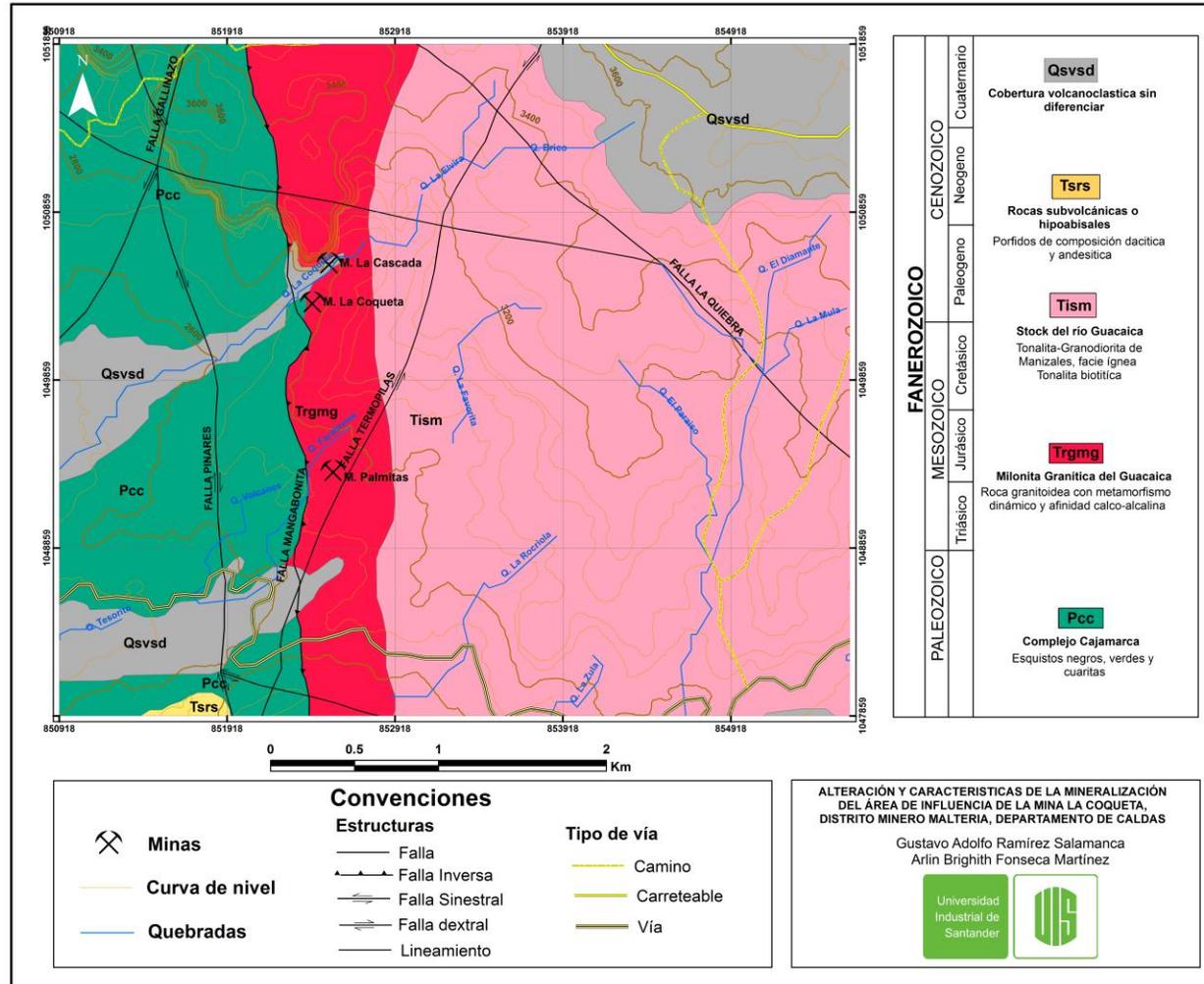
Falla Termopilas: Definida por Aguirre & López (2003), como una falla de carácter local con una longitud de 19 Km al occidente de la vereda Termopilas, presenta una componente Sinistral inversa, tendencia NNE, y afecta las litologías de la Milonita Granítica del Guacaica, la Tonalita-Granodiorita de Manizales y los

Esquistos negros del Complejo Cajamarca. Ésta falla es asociada al Sistema de Fallas de Palestina.

Falla Quiebra: Definida por Aguirre & López (2003) como una falla local ubicada al Norte del Distrito Minero de Malteria y presenta una tendencia N45°W con una extensión aproximada de 8 Km, identificándose por las anomalías en la tendencia estructural de las rocas asociadas con la Milonita Granítica del Guacaica. Esta falla afecta rocas de la Tonalita – Granodiorita de Manizales, la Milonita Granítica del Guacaica y del Complejo Cajamarca. Esta falla es posterior a las fallas mencionadas anteriormente.

Falla N80-85W: Definida por Mejia & Orozco (1998) como una falla de carácter local ubicada en el sector del Distrito Minero Malteria que presenta indicios geomorfológicos como cambios altimétricos pronunciados, silletas y hombreras, y evidencias geológicas como replegamientos en la roca dúctil y desarrollo de discontinuidades en la roca más rígida.

Figura 2: mapa geológico del área donde se encuentra las Minas La Coqueta y la Cascada.



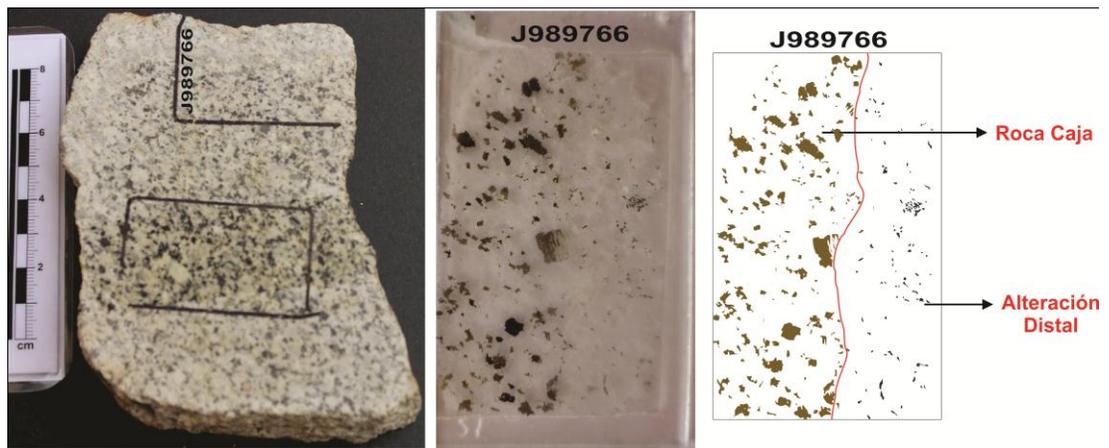
Tomado y modificado de Aguirre & López (2003)

8 RESULTADOS

8.1 Petrografía

Para realizar el análisis petrográfico se describieron 7 secciones delgadas, 4 secciones doblemente pulidas de la mina La Coqueta y 6 secciones delgadas y 3 secciones doblemente pulidas de la mina La Cascada, que fueron seleccionadas de acuerdo a su importancia, es decir, que evidencian los cambios mineralógicos que se presentan desde la roca caja hasta la vetilla, generando halos de alteración que permiten la diferenciación entre la zona de alteración distal y proximal (ver Figura 3).

Figura 3: Muestra de mano J989766 y sección delgada, observando las diferencias entre la roca caja y la alteración distal.



Las secciones GR-1, VETA-GR-1, J989524, J989525, J989842 tienen como roca caja la Milonita Granítica del Guacaica y las secciones J989766, J989802, J989803, J989804 es la Tonalita-Granodiorita de Manizales. Adicionalmente, las muestras MC-3, MC-6, MC-2-A y MC-2-B tienen como roca caja la milonita y las MC-4-1 y MC-4-2 es la tonalita y son de la mina La Cascada.

A continuación se presenta una tabla resumen del análisis mineralógico de las secciones delgadas, para mayor detalle ver el Anexo 1.

Tabla 1: Resumen de los minerales presentes en las muestras de las que se hicieron secciones delgadas.

Muestra	Localización	Zonas presentes	Qz	Pl	Bt	Or	Mc	Hbl	Ser	Chl	Ms	Ms II	Cb	Ep	Opq	Qz Relleno	Opq Vetillas	Cb Vetilla
J989524	Mina la Coqueta	Alteración proximal -vetilla	43%	-	-	<1%	<1%	-	27%	-	-	20%	-	-	<1%	4%	4%	-
J989525	Mina la Coqueta	Roca caja - Alteración distal	43%	12%	13%	<1%	1%	-	18%	8%	1%	1%	-	-	3%	-	-	-
J989766	Mina la Coqueta	Roca caja - Alteración distal	27%	26%	8%	-	-	1%	26%	4%	1%	4%	-	1%	2%	-	-	-
J989802	Mina la Coqueta	Alteración proximal - Vetilla	13%	-	1%	-	-	-	11%	-	-	4%	-	-	-	52%	19%	-
J989803	Mina la Coqueta	Alteración Proximal - Vetilla	39%	-	-	-	<1%	-	31%	-	2%	2%	-	-	2%	22%	2%	-
J989804	Mina la Coqueta	Roca caja - Alteración distal	35%	23%	7%	3%	-	2%	16%	11%	-	<1%	1%	-	1%	-	-	-
J989842	Mina la Coqueta	Roca caja - Alteración distal	60%	<1%	6%	14%	9%	-	6%	2%	2%	-	-	-	1%	-	-	-
GR-1	Mina la Coqueta	Roca caja - Alteración distal	46%	<1%	<1%	10%	5%	-	23%	2%	4%	7%	<1%	-	<1%	2%	-	-
Veta GR-1	Mina la Coqueta	Alteración proximal - vetilla	45%	-	-	3%	3%	-	34%	-	8%	8%	-	-	4%	3%	-	-
MC-1	Mina la Cascada	Veta	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<1%	-	<1%	44%	-	55%
MC-2-A	Mina la Cascada	Alteración proximal - Vetilla	50%	-	-	-	-	-	30%	-	1%	9%	-	-	4%	6%	-	-
MC-2-B	Mina la Cascada	Alteración proximal - Vetillas	6%	-	-	-	-	-	3%	-	-	3%	-	-	<1%	63%	25%	-
MC-3	Mina la Cascada	Roca caja - Alteración distal - Alteración Proximal - Vetilla	36%	8%	13%	<1%	-	-	23%	5%	-	3%	1%	-	2%	9%	<1%	<1%
MC-4-1	Mina la Cascada	Roca caja - Alteración distal - Alteración Proximal - Vetilla	32%	8%	5%	1%	-	-	26%	4%	3	2%	2%	-	3%	3%	-	11%
MC-4-2	Mina la Cascada	Roca caja - Alteración distal - Alteración Proximal - Vetilla	40%	9%	4%	1%	-	-	29%	3%	-	4%	-	<1%	5%	<1%	-	7%
MC-6	Mina la Cascada	Alteración proximal - Vetilla	39%	-	-	1%	-	-	30%	-	8%	8%	-	-	3%	6%	4%	1%

Roca caja: Milonita Granítica del Guacaica

Presenta foliación marcada por la orientación de micas y está compuesta por cuarzo, plagioclasa, biotita, moscovita y feldespatos. El cuarzo se presenta de dos maneras, el primero pertenece a la roca caja y se observa como agregados poligonales (ver Figura 4) con migración de borde de grano (ver Figura 5), desarrollo de subgranos y en algunas zonas se encuentran fracturados (ver Figura 6), la segunda manera pertenece al evento de alteración hidrotermal, este se presenta como cristales subhedrales a euhedrales rellenando fracturas, presentan diferentes tamaños y muestra textura en peine producida como consecuencia de la depositación de soluciones hidrotermales en espacios abiertos presentando un crecimiento libre de cristales perpendicular a las paredes de la veta (Malvicin & Saulneir, 1979) (ver Figura 7) y textura masiva.

Figura 4: Microfotografías en nicoles cruzados y nicoles paralelos de la Milonita Granítica del Guacaica con cuarzo con agregados poligonales junto con plagioclasa rodeado de micas en la muestra J989525; (Qz: cuarzo, Bt: biotita, Ms: moscovita).

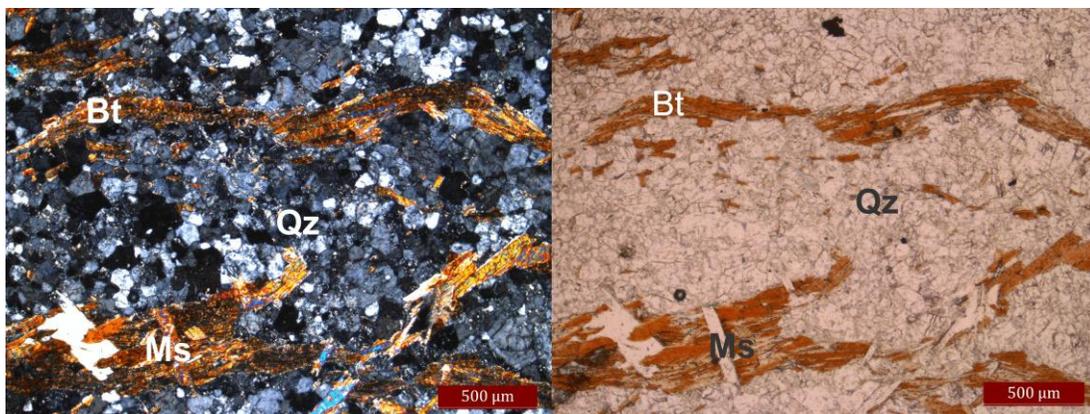


Figura 5: Microfotografías en nicoles cruzados y nicoles paralelos de la Milonita Granítica del Guacaica de la muestra J989842 con Microclina, ortosa pertítica y cuarzo con migración de borde de grano (Qz: cuarzo, Mc: microclina, Or: Ortoclasa pertítica).

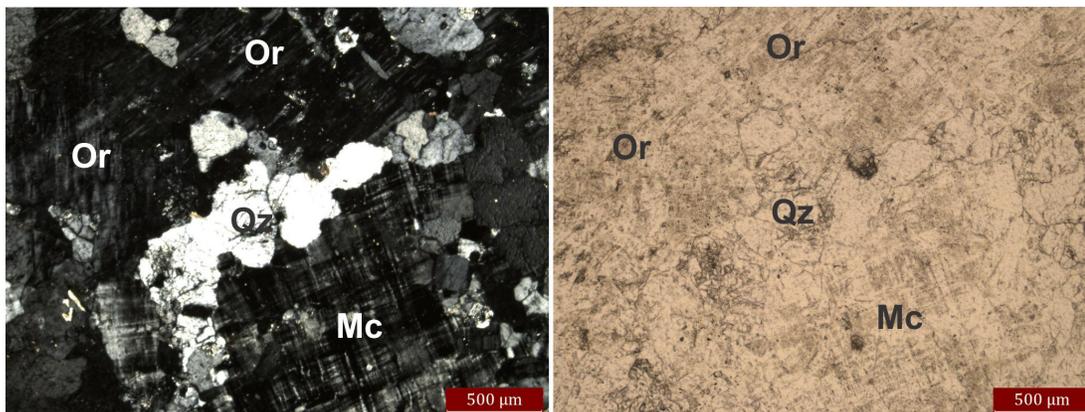


Figura 6: Microfotografías en nicols cruzados y nicols paralelos de la Milonita Granítica del Guacaica de la muestra VETA-GR-1 con cuarzo fracturado y sericita entre los cuarzos (Qz: cuarzo, Ser: sericita, Mc: microclina).

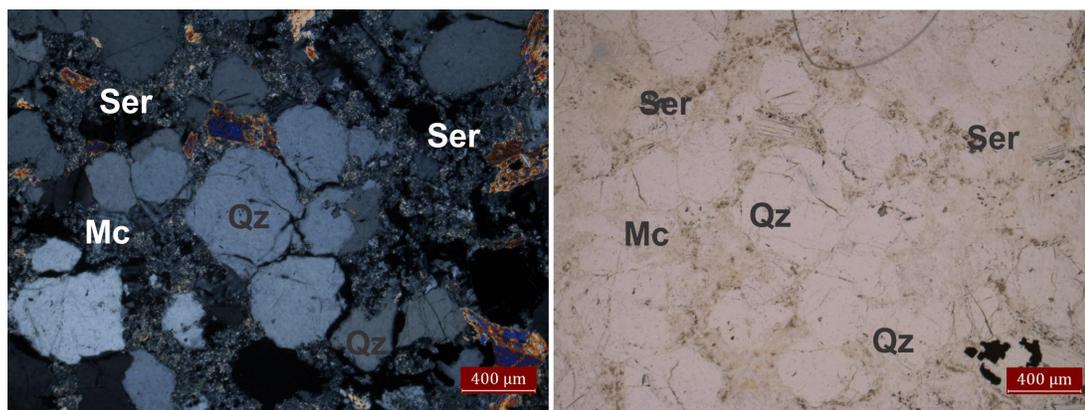
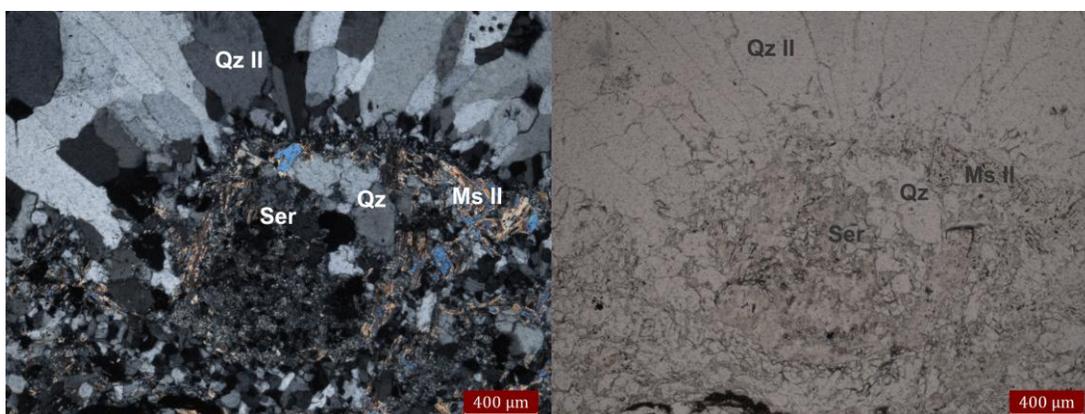
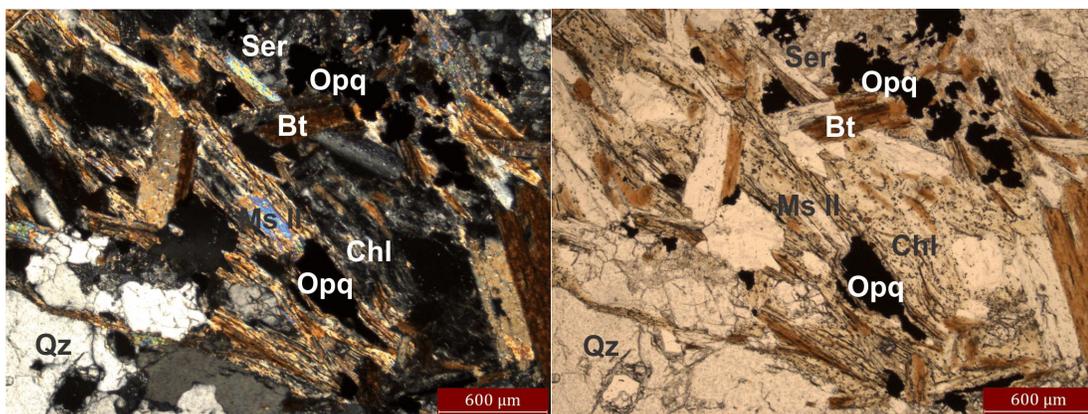


Figura 7: Microfotografías en nicols cruzados y nicols paralelos de la Milonita Granítica del Guacaica de la muestra J989524 con cuarzo con textura en peine rellenando fracturas y en contacto con moscovita de alteración y sericita (Qz: cuarzo, Ser: sericita, Ms II: moscovita de alteración).



La plagioclasa se observa con bordes lobulados, macla polisintética o mecánica, y se encuentra con modera a alta sericitización de acuerdo su grado de alteración, esta última se observa como agregados microcristalinos con altos colores de interferencia (ver Figura 7). La biotita presenta color café y se encuentra como agregados laminares con textura decusada como individuos alargados que marcan la foliación de la milonita y rodean porfidoblastos de cuarzo, y localmente está alterando a clorita y/o moscovita de alteración. El porcentaje de estas últimas varía según el grado de alteración (ver figura 8). La moscovita se encuentra asociada a biotita y se observan como agregados laminares con textura decusada que marcan la dirección de orientación preferencial (ver Figura 8).

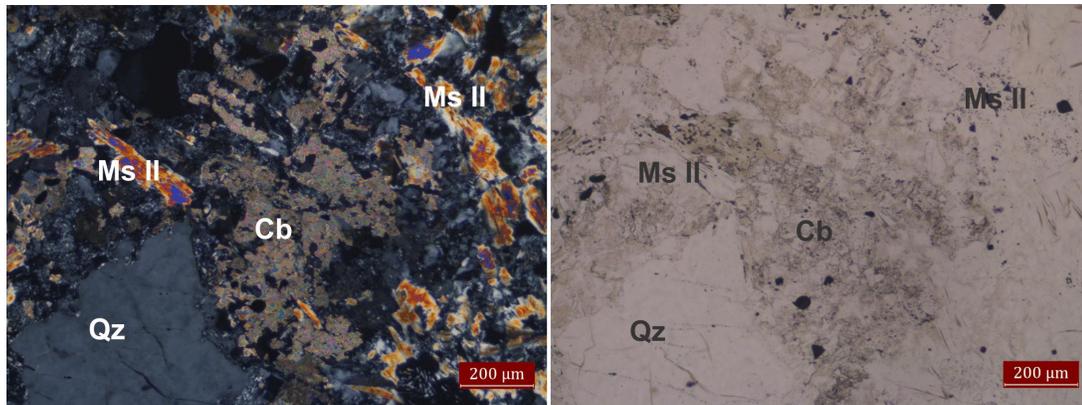
Figura 8: Microfotografías en nicoles cruzados y nicoles paralelos de la Milonita Granítica del Guacaica de la muestra J989842 (Qz: cuarzo, Bt: biotita, Opq: minerales opacos, Ser: sericita, Ms II: moscovita de alteración).



Los feldespatos potásicos se encuentran como cristales anhedrales a subhedrales con algunas inclusiones de cuarzo, macla en enrejado (microclina) o textura pertítica (ortosa) (ver Figura 5) y se encuentran alterándose moderadamente a sericita localmente.

Adicionalmente, como minerales accesorio se observan carbonatos (ver Figura 9) como relleno de espacios entre cristales de cuarzo y según el grado de alteración se observan opacos, especialmente rellenando fracturas y asociados al cuarzo en peine mencionado anteriormente.

Figura 9: Microfotografías en nicoles cruzados y nicoles paralelos de la Milonita Granítica del Guacaica de la muestra GR-1 con carbonato relleno espacios entre cuarzos (Qz: cuarzo, Cb: carbonato, Ms II: moscovita de alteración).



Roca caja: Tonalita-Granodiorita de Manizales

Presenta una textura holocristalina inequigranular compuesta por cuarzo, plagioclasa, biotita, moscovita, feldespato y horblenda esquelética localmente. El cuarzo se presenta de dos tipos, el primero corresponde a la formación de la roca caja y se observa como cristales subhedrales a anhedrales con migración de borde de grano y algunas veces fracturado (ver Figura 10), el segundo se presenta como producto de relleno de espacios vacíos mostrando texturas en peine y masiva (ver Figura 11).

Figura 10: Microfotografías en nicoles cruzados y nicoles paralelos de la Tonalita-Granodiorita Manizales de la muestra J989766 con cuarzo con migración de borde de grano, plagioclasa sonada con moderada sericitización (Qz: cuarzo, Bt: biotita, Pl: plagioclasa).

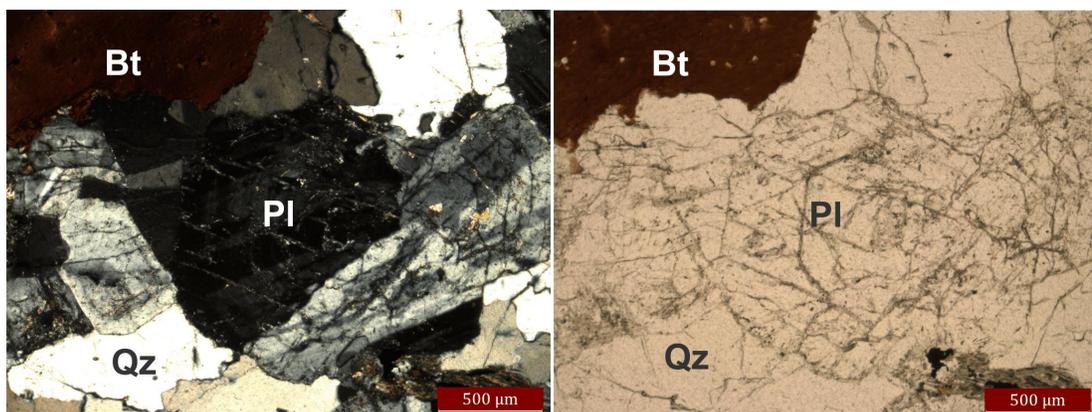
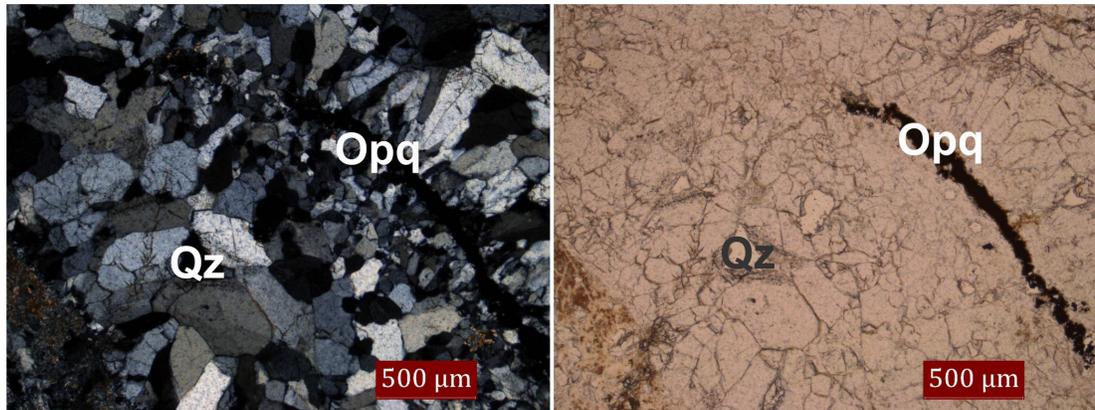
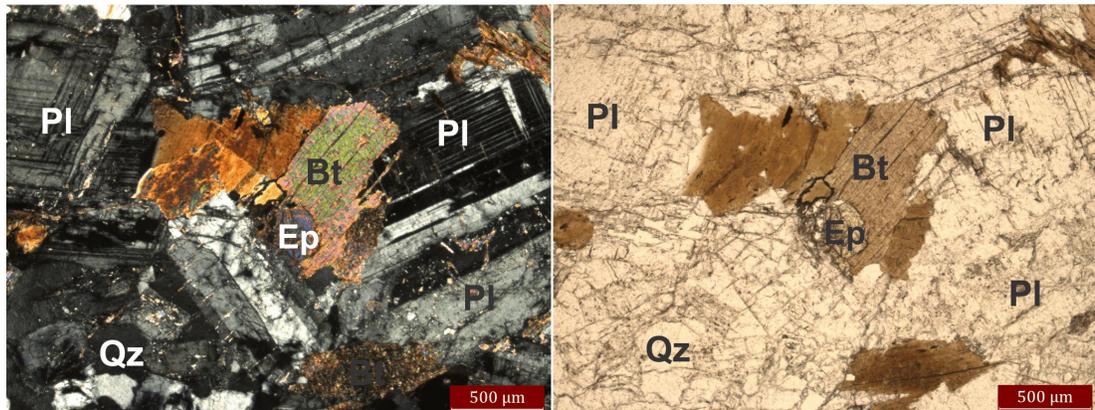


Figura 11: Microfotografías en nicols cruzados y nicols paralelos de la Tonalita-Granodiorita Manizales de la muestra J989803 con cuarzo con textura masiva a la izquierda y en peine con suturas de opacos (Qz: cuarzo, Opq: opacos).



La plagioclasa se presenta como cristales anhedrales a subhedrales con macla polisintética (ver Figura 12), carlsband y zonaciones concéntricas, dependiendo de su alteración varía el grado de sericitización y en algunas zonas se encuentra alterándose a epidota (ver Figura 12).

Figura 12: Microfotografías en nicols cruzados y nicols paralelos de la Tonalita-Granodiorita de Manizales de la muestra J989766 con plagioclasa con sausriritización y biotita (Qz: cuarzo, Pl: plagioclasa, Bt: biotita, Ep: epidota).



La biotita se encuentra como agregados laminares con fractura dentada y en algunas zonas alterándose a clorita y moscovita de alteración y presenta inclusiones de cuarzo y opacos (ver Figura 13). La moscovita se encuentra como agregados laminares pertenecientes a la roca caja, a medida que aumenta el

grado de alteración se presentan bordes mas irregulares en los agregados. Los feldspatos se encuentran como cristales subhedrales, algunos con macla de tartán (ver Figura 14) otros con textura perítica y son reemplazados por sericita según la zona de alteración.

Figura 13: Microfotografías en nicoles cruzados y nicoles paralelos de la Tonalita-Granodiorita de Manizales de la muestra J989804 con biotita alterándose a clorita con algunas inclusiones de opacos (Qz: cuarzo, Chl: clorita, Opq: minerales opacos, Ser: sericita).

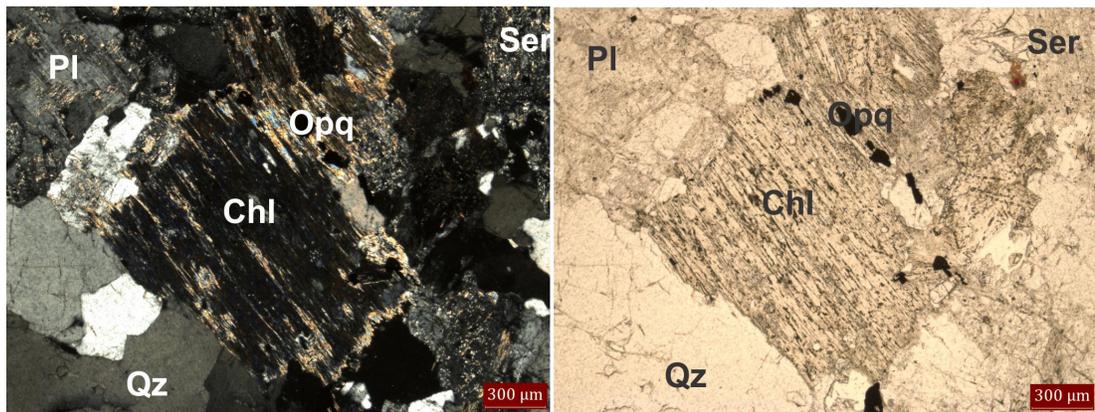
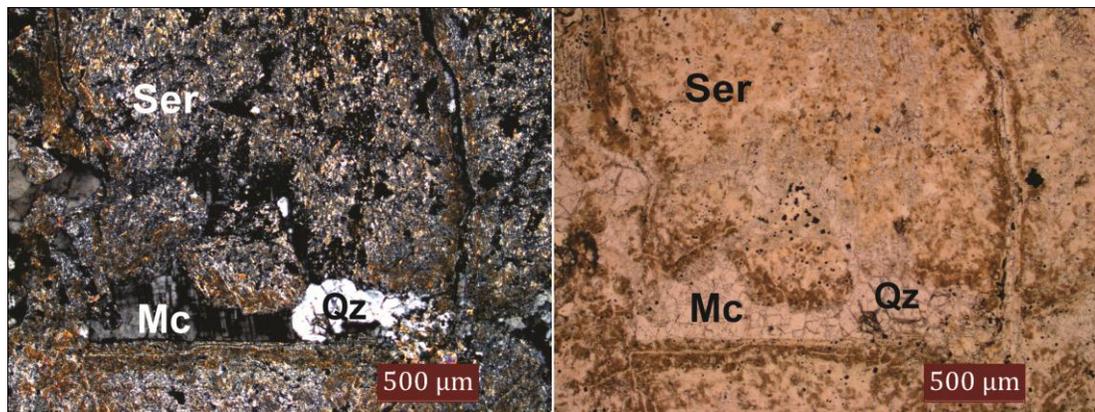


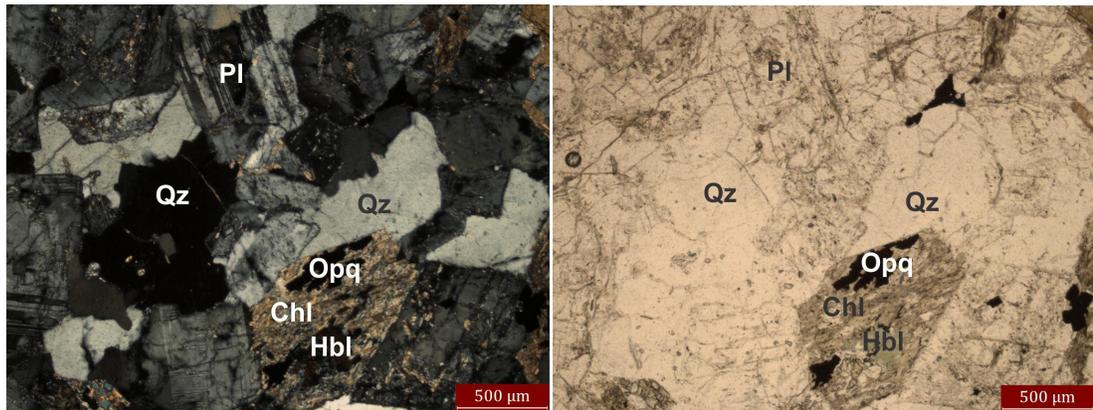
Figura 14: Microfotografías en nicoles cruzados y nicoles paralelos de la Tonalita-Granodiorita de Manizales de la muestra J989804 con microclina alterándose a sericita (Mc: microclina, Ser: sericita, Qz: cuarzo)



La horblenda se presenta con textura esquelética localmente y los minerales que la han reemplazado, clorita o biotita, conservan la geometría de los cristales (ver Figura 15). Adicionalmente se encuentra carbonatos en medio de los cristales de cuarzo o como relleno de suturas en las vetillas.

En comparación con las muestras tomadas en la mina La Cascada, su mineralogía no cambia (ver Tabla 1) al igual que los porcentajes de los minerales. Cabe resaltar que éstas dos minas se encuentran a una distancia de 291 metros aproximadamente.

Figura 15: Microfotografías en nicoles cruzados y nicoles paralelos de la Tonalita-Granodiorita de Manizales de la muestra J989766 con un islote de hornblenda producto de la alteración a clorita, plagioclasa con macla polisintética y cuarzo (Qz: cuarzo, Pl: plagioclasa, Chl: clorita, Opq: minerales opacos).



8.2 Petrografía de minerales opacos

Los minerales de mena presentes en la mina la Coqueta son principalmente pirita, calcopirita, tenantita-tetraedrita, esfalerita, pirargirita y marcasita, y en menor proporción oro siendo precipitado en las fracturas, entre contactos de cuarzo, sericita y moscovita de alteración en las zonas de alteración y en las vetillas entre el cuarzo con textura en peine (ver Figura 16). Sin embargo Alvarán (2006) reportó estibina, molibdenita y arsenopirita, los cuales se asocian a vetillas. Cabe resaltar que estos últimos minerales si fueron encontrados en las muestras analizadas de la mina La Cascada, encontrándose principalmente en las vetillas.

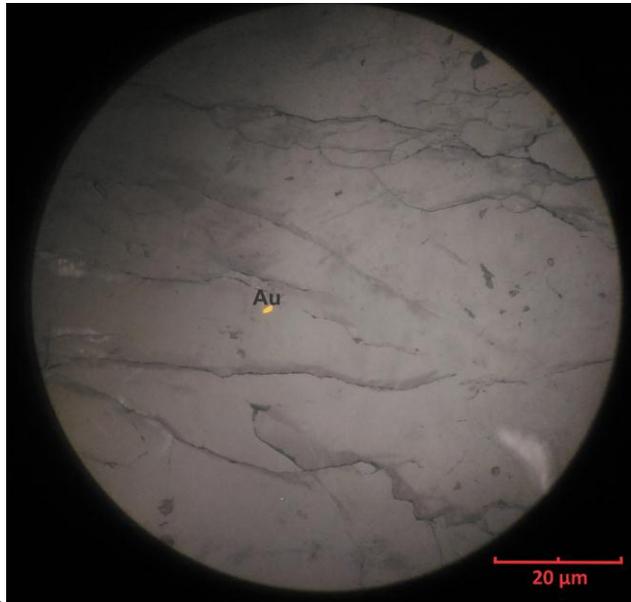
Se presenta una tabla resumen de los minerales de mena y sus respectivos porcentajes encontrados en cada una de las muestras (ver Tabla 2).

Tabla 2: Tabla resumen de los minerales opacos encontrados en las muestras analizadas

de la
mina La
Coqueta
y La
Cascad
a

Muestra	GR-1	Veta GR-1	J989524	J989802	MC-2-B	MC-4-2	MC-6
Py	34%	27%	24%	43%	0.82%	60%	34%
Ccp	5%	19%	21%	40%	0.41%	18%	28%
Tnt-Ttr	18%	13%	13%	3%	0.02%	8%	6%
Sp	7%	5%	4%	0.61%	0.07%	5%	1%
Dg	2%	1%	3%	0.50%	0.04%	0.60%	0.82%
Bn	4%	1%	4%	0.61%	0.08%	0.20%	0.90%
Cv	-	0.19%	2%	0.22%	0.05%	-	0.70%
Pyr	1%	2%	1%	10%	-	-	-
Mrc	-	0.32%	-	-	0.06%	0.10%	0.50%
Apy	-	-	-	-	0.19%	1.50%	4%
Gn	-	-	-	-	0.06%	0.40%	1%
Mol	-	-	-	-	1.20%	-	-
Au	0.07%	0.11%	-	-	0.10%	-	0.06%
Gth	-	-	-	2%	-	-	-
Py II	19%	20%	14%	-	0.30%	2%	8%
CcpII	10%	11%	14%		0.20%	2%	10%
Sp II	0.15%	-	-	-	0.10%	-	-
Apy II	-	-	-	-	0.037	1.60%	-
Stb	-	-	-	-	64%	-	-
Gn II	-	-	-	-	17%	-	-
Stb II	-	-	-	-	11%	-	-
Mol II	-	-	-	-	-	-	-4%

Figura 16: Oro libre entre cristales de cuarzo con textura en peine (Au: oro)



La pirita es el mineral más abundante en las zonas de alteración alcanzando un porcentaje de hasta 43% de los opacos y en algunas vetillas con un porcentaje de hasta 14%. En la roca alterada se observa como cristales subhedrales a euhedrales con formas cúbicas formando agregados asociados a calcopirita y esfalerita, también se presenta como agregados alargados dentro de la moscovita de alteración siguiendo la dirección de foliación y se asocia a la tenantita-tetraedrita (ver Figura 17). En las vetillas se presenta como cristales euhedrales de mayor tamaño en comparación a los que se encuentran en las zonas de alteración, formando agregados alargados que rellenan la sutura de los cuarzos con textura en peine asociándose a la calcopirita de la vetilla. El buen desarrollo de las caras de los minerales de mena y la presencia de minerales de ganga contexturas en peine, coloforme y crustiforme son evidencia de texturas primarias en donde hay relleno de espacios vacíos (Craig & Vaughan, 1994).

La calcopirita se encuentra de dos maneras, en las zonas de alteración como cristales subhedrales asociada a pirita y esfalerita, y en las vetillas se presenta de forma euhedral con zonaciones evidenciadas por el cambio de color (ver Figura 17). En algunos lugares se está alterando a bornita, covelita y digenita formando en algunas ocasiones texturas mirmequiticas (ver Figura 18), estas texturas simplectíticas de reemplazamiento evidencian la pérdida de cobre (Ramdhor, 1969).

Figura 17: Formas en las que se presenta la pirita: **a.** asociada a tenantita-tetraedrita como inclusión en moscovita de alteración y **b.** como relleno de vetilla asociada a calcopirita y esfalerita. (Py: pirita, Tnt-Ttr: tenantita-tetraedrita, Ccp: calcopirita, Sp: esfalerita)

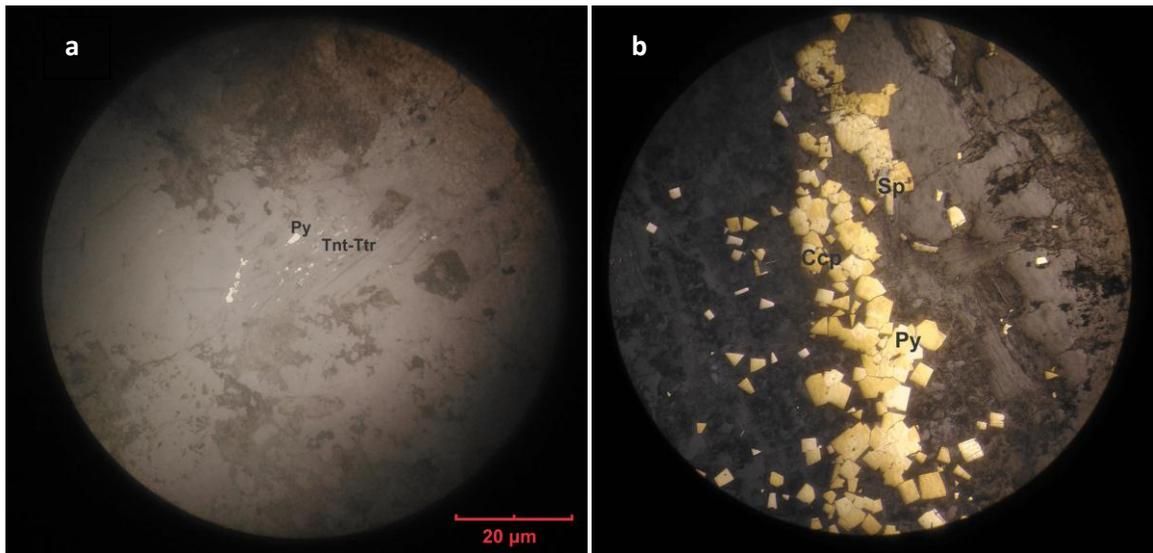
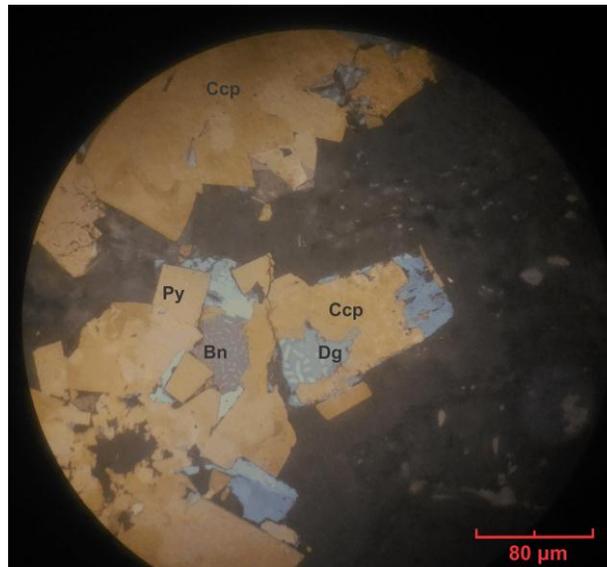
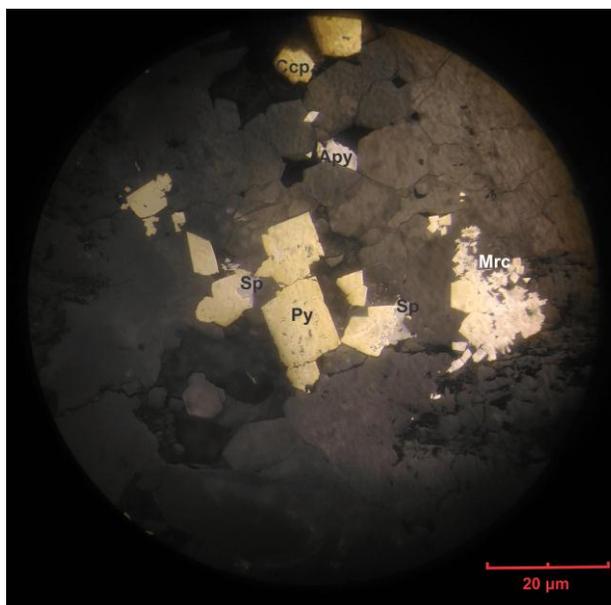


Figura 18: Calcopirita asociada a digenita y bornita con textura simplectítica (Ccp: calcopirita, Py: pirita, Bn: bornita, Dg; digenita).



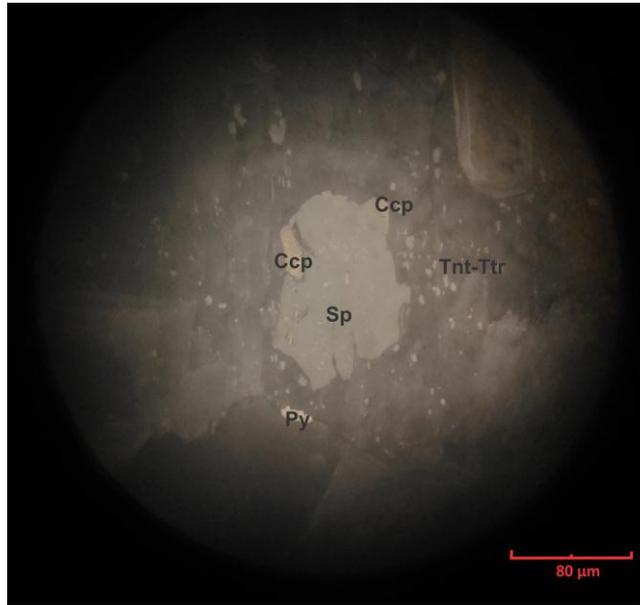
La arsenopirita se encuentra como cristales blancos a blancos amarillentos con formas rombohédricas, generalmente forman agregados con marcasita (ver Figura 19); éste mineral es muy abundante en venas de oro y en algunas venas ricas en plata, plomo y zinc (Ramdhor, 1969). La marcasita se presenta como cristales euédricos tabulares de color blanco amarillento asociada con arsenopirita, y cuarzo. El desarrollo de los cristales euédricos de este mineral en venas metalíferas ocurren en últimas cristalizaciones, a veces de soluciones ascendentes pero no a profundidad (Ramdhor, 1969).

Figura 19: Asociación de pirita, calcopirita, esfalerita, arsenopirita y marcasita (py: pirita, Ccp: calcopirita, Sp: esfalerita, Apy: arsenopirita, Mrc: marcasita)



La esfalerita se presenta como cristales subhedrales a anhedrales de color gris, se asocia a pirita y calcopirita y en algunas zonas se presenta con textura *disease* (ver Figura 20); que se observa como calcopirita dispuesta aleatoriamente o según la orientación cristalográfica de la esfalerita y se describe como una exsolución por el enfriamiento de la mena posterior a su emplazamiento (Craig & Vaughan, 1994). Adicionalmente se encuentra su variedad acaramelada; que tiene menor contenido en hierro (Ramdhor, 1969), siendo traslucido y teniendo pequeñas inclusiones amarillas sin continuidad en todo el cristal, esta variedad se encuentra principalmente en la zona de alteración y está asociada a pirita, cuarzo y moscovita de alteración. La galena se encuentra como cristales subhedrales a anhedrales asociado a los bordes de la pirita o en su interior, generalmente no presentan pits y se identificaban por su baja dureza y su color gris acero. Este mineral se encuentra principalmente asociado a depósitos hidrotermales de todo tipo, formas y formación (Ramdohr, 1969)

Figura 20: Textura de esfalerita disease (Ccp: calcopirita, Sp: esfalerita, Tnt-Ttr: tenantita-tetraedrita, Py: pirita)



La estibina se encuentra rellenando los espacios vacíos dejados por el crecimiento del cuarzo con textura en peine, hacen un relleno completo tomando la geometría del espacio vacío, presentando formas anhedrales junto con la galena, se reconoce principalmente por su macla observada en nicoles cruzados (ver Figura 21).

La molibdenita se presenta de dos maneras, en la roca alterada como cristales alargados orientados de acuerdo a la orientación de las micas asociándose a la tenantita-tetraedrita, y en las vetillas formando cristales alargados subhedrales de color gris claro y con algunos plegamientos en su interior (ver Figura 22).

Figura 21: Galena y estibina en contacto y oro en cristal de cuarzo (Stb: estibina, Gn: galena, Ccp: calcopirita y Au: oro).

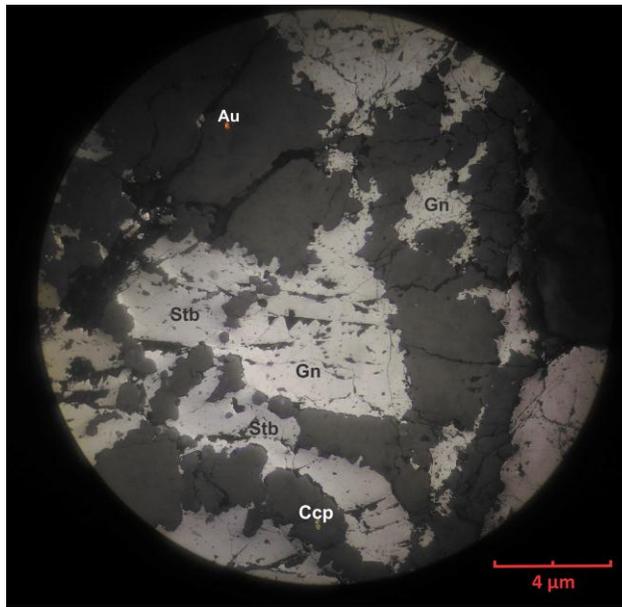


Figura 22: Molibdenita con plegamientos y pirita paralelas a la foliación milonítica (Py: pirita, Mol: molibdenita)

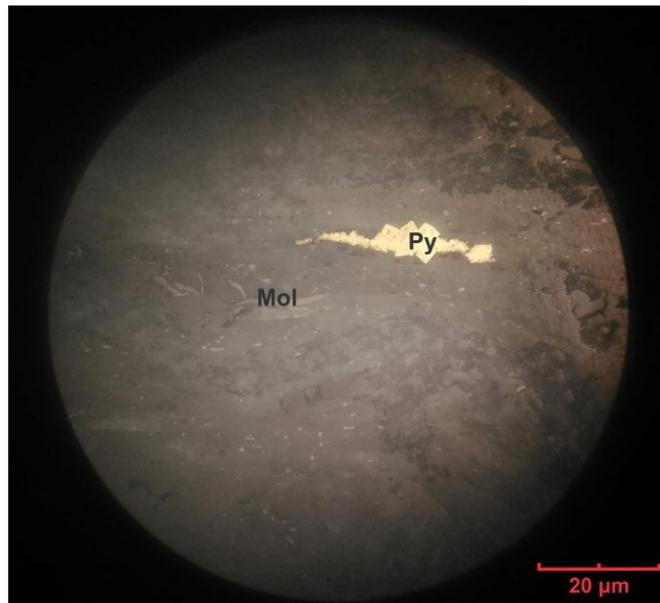


Figura 23: Relación de contacto entre esfalerita y tenantita-tetraedrita (Sp: esfalerita. Tnt-Ttr: tenantita-tetraerita).

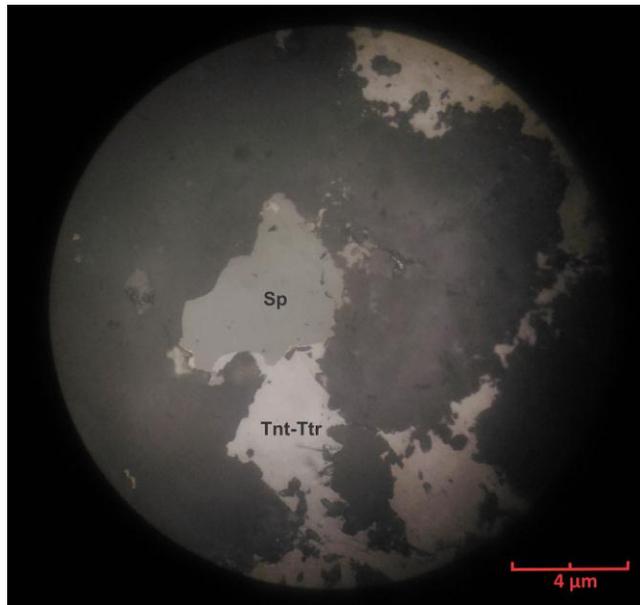
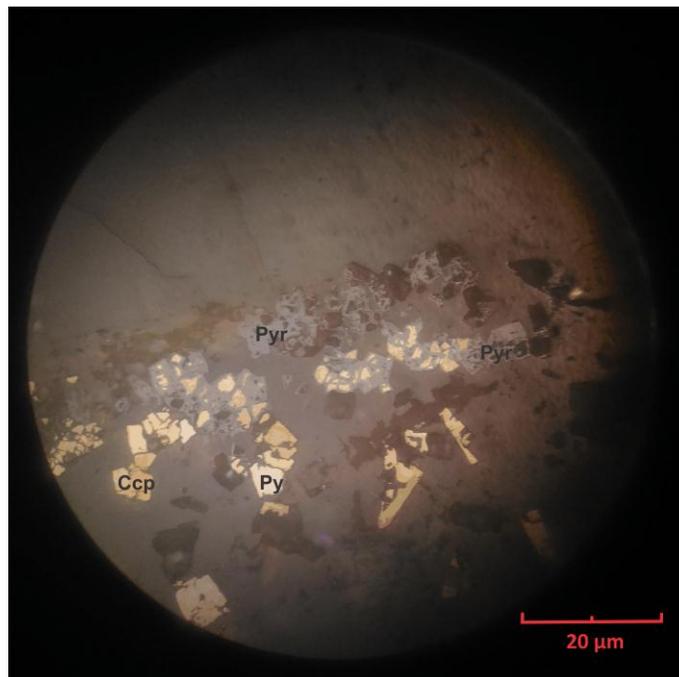


Figura 24: Exsolución entre pirita y pirargirita (py: pirita, Ccp: calcopirita, pyr: pirargirita)



La tenantita-tetraedrita se presenta como cristales anhedrales alargados o de formas redondeadas, como inclusiones dentro de la moscovita (ver Figura 23) encontrado en las muestras alteradas.

La pirargirita se encuentra como cristales subhedrales a anhedrales asociadas a la moscovita y cuarzo, se caracteriza por su moderado pleocroísmo pasando de color gris a blanco grisáceo y sus tintes azules en nicoles cruzados, presenta exsoluciones de pirita y calcopirita (ver Figura 24).

El oro se encuentra entre los cristales de cuarzo en peine en las vetillas y en las zonas de alteración, se presenta entre cristales de cuarzo, moscovita y agregados de sericita (ver Figuras 16 y 21).

8.3 Alteraciones

La alteración se define como un proceso complejo que envuelve cambios mineralógicos, químicos y texturales que resultan en la interacción de fluidos acuosos calientes con la roca bajo determinadas condiciones físico químicas. (Pirajno, 2009). De acuerdo a esta interacción se producen cambios químicos y físicos, los primeros se evidencian en los cambios de asociación mineral que se producen desde la roca fresca sin alteración hasta la vetilla. Los cambios físicos se determinan principalmente si la alteración es penetrativa cuando es el reemplazamiento de todo o la mayoría de los minerales formadores de roca borrando la estructura de la roca original, selectivamente penetrativa cuando solo reemplaza algunos minerales y conserva levemente la estructura y no penetrativa cuando no reemplaza ningún mineral (Pirajno, 2009; Thompson & Thompson, 1996). Adicionalmente los cambios físicos se observan con variación de coloración producido por la alteración, por ejemplo, el blanqueamiento es definido como el cambio de color a medida que aumenta el grado de alteración (Eilu *et al.*1999).

La mineralización presente en la mina La Coqueta está caracterizada por la presencia de vetas y/o vetillas que desarrolla halos de alteración, por tanto en el presente trabajo se determinaron dos zonas de alteración: distal y proximal, adicional a la roca caja y vetilla observadas a escala mesoscópica (muestra de

mano) y microscópica (sección delgada) de acuerdo a su cercanía con la vetilla (ver Figuras 25 y 26).

Figura 25: Roca caja, zonas de alteración distal y proximal, y vetilla encontradas en la Milonita Granítica del Guacaica.

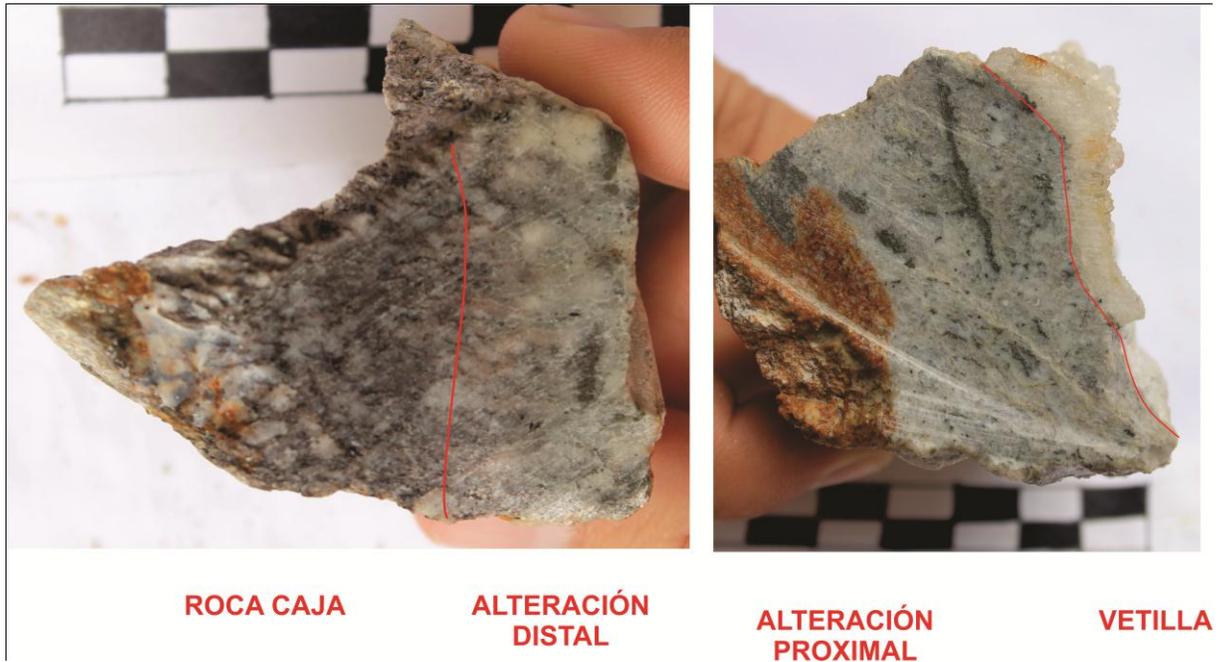


Figura 26: Roca caja, zonas de alteración distal y proximal, y vetilla encontradas en la Tonalita-Granodiorita de Manizales.

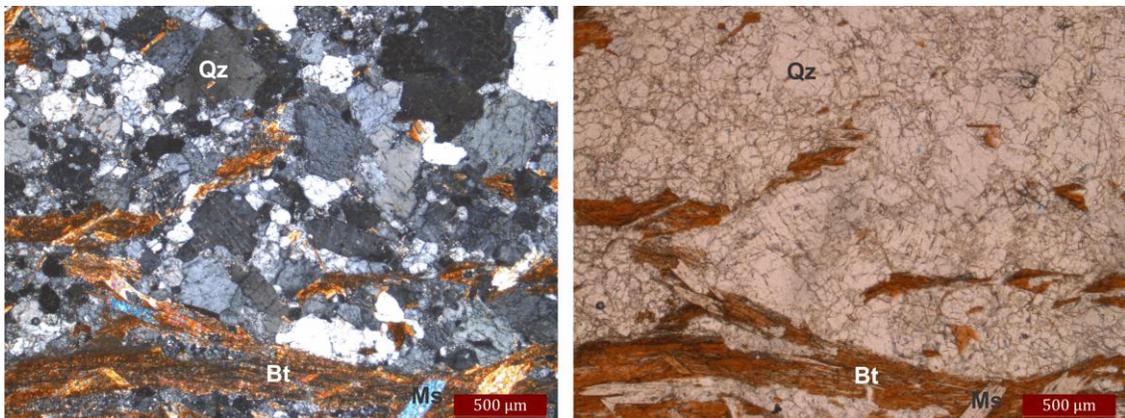


Milonita Granítica del Guacaica

Roca caja

La Milonita Granítica del Guacaica es una roca con deformación de estado sólido presentando dos foliaciones definidas por la orientación de micas rodeando porfiroblastos de cuarzo y feldespatos (Cuéllar, 2003; Aguirre & López, 2003; López *et al.*, 2007; Fonseca *et al.*, 2015), y su color es gris a café. Está compuesta por cuarzo (46-61%), biotita (7-28%), plagioclasa (1-23%), microclina (1-9%), ortosa (1-17%), moscovita (1%-5%) y como minerales traza se encuentran tenantita-tetraedrita y pirita como inclusiones en biotita. El límite con la alteración distal está marcado por el reemplazamiento de plagioclasa por sericita y por biotita a clorita, con la aparición de calcopirita y el aumento en el porcentaje de pirita y tenantita-tetraedrita (ver Figura 27 y Tabla 3).

Figura 27: Microfotografías en nicoles cruzados y nicoles paralelos de la Milonita Granítica del Guacaica sin alterar, observándose las dos foliaciones (Qz: cuarzo, Bt: biotita y Ms: moscovita).

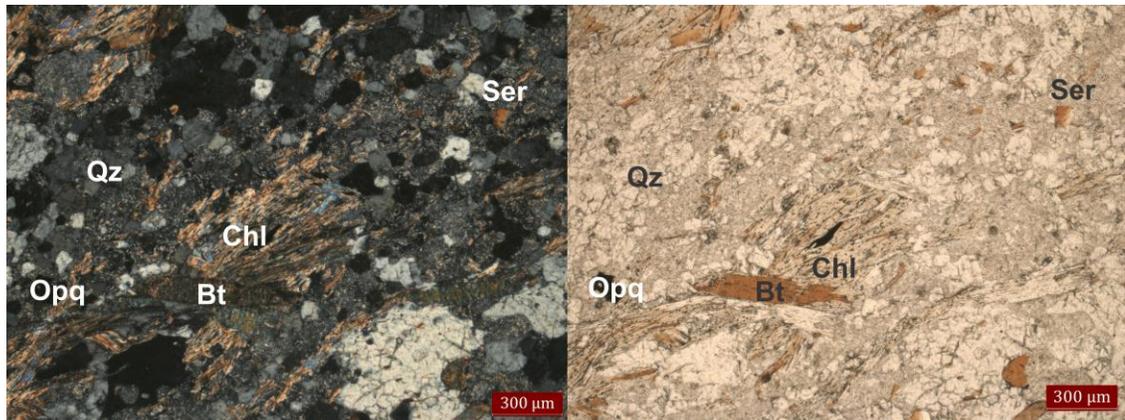


Alteración distal

La alteración distal es selectivamente penetrativa, ya que en algunos lugares la biotita conserva su orientación y presenta moderado blanqueamiento (ver Figura 26). Los cambios mineralógicos observados son la presencia de sericita (12-42%) como producto de la alteración de plagioclasa y el feldespato potásico y estas

últimas son reducidas de 0 a 2% encontrándose relictos, clorita (8-20%) producto de la alteración de la biotita que es reducida de 3 a 6% (ver Figura 28 y Tabla 3). Se observa un aumento de minerales opacos que en la roca caja es <1% mientras que en ésta zona es de 6% y la aparición de carbonatos. Las asociaciones minerales de ésta zona son: Ser+Chl±Ms Il±Py±Tnt-Ttr, Qz+Ser+Chl±Py±Ccp, Ser±Cb.

Figura 28: Microfotografías en nicoles cruzados y nicoles paralelos de la Milonita Granítica del Guacaica con alteración distal, mostrando el cambio de biotita a clorita y el aumento en el contenido de sericita (Qz: cuarzo, Chl: clorita, Bt: biotita, Opq: minerales opacos)



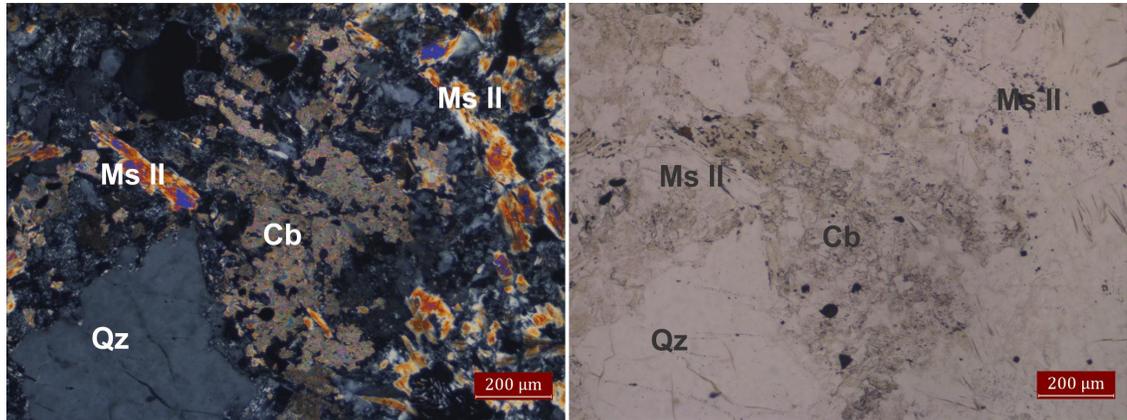
Alteración proximal

La alteración proximal es penetrativa, siendo observada sin foliación ni texturas de la roca fresca y el blanqueamiento es fuerte comparado con la roca fresca. Los cambios mineralógicos observados en esta zona son la disminución de clorita (0-1%) alterándose a moscovita de alteración cuyo porcentaje aumenta (9-21%), aumento de sericita (18-46%), desaparición completa de plagioclasa, aumento de carbonatos (0-3%) y aumento de porcentaje de opacos (4-8%), representado por pirita, calcopirita y tenantita-tetraedrita, y aparición de esfalerita, pirargirita, arsenopirita, marcasita, molibdenita, galena y oro (ver Tabla 3).

Su límite con la vetilla está marcado por la textura del cuarzo en peine que en algunas ocasiones presenta sutura de opacos o carbonatos (ver Figura 29). Las

asociaciones minerales de la zona son: Ms II±Tnt-Ttr±Py±Sp±Mol, Qz+Ser±Py±Ccp±Sp, Qz+Py±Gn, Ms II+Ser±Py±Cb, Qz+Ser±Apy±Mrc, Qz+Ser±Au.

Figura 29: Microfotografías en nicoles cruzados y nicoles paralelos mostrando la gran cantidad de moscovita de alteración y la presencia de carbonato en la alteración proximal (Ms II: moscovita de alteración, Cb: carbonato y Qz: cuarzo)



Vena

Se caracteriza por cortar la roca caja de forma discordante, observando crecimientos sintaxiales de cuarzo con textura en peine (85-93%), observando una sutura de carbonatos (3-4%) y/o opacos (1-7%) (ver Figura 30). Los opacos corresponden a pirita, calcopirita, esfalerita, arsenopirita, marcasita, galena, estibina y molibdenita. Adicionalmente, se pueden encontrar vetillas compuestas por pirita y calcopirita.

Las asociaciones minerales de la vetilla son: Qz+Py+Ccp±Sp±Gn±Au?, Qz+Stb+Gn±Au, Qz+Stb+Mol, Qz+Py+Apy+Mrc±Au?, Qz+Cb+Py+Ccp±Sp.

Figura 30: Vetilla de cuarzo con sutura de carbonatos y presencia de opacos (Qz cuarzo, Ser: sericita, Opq: minerales opacos, Ms II: moscovita de alteración)

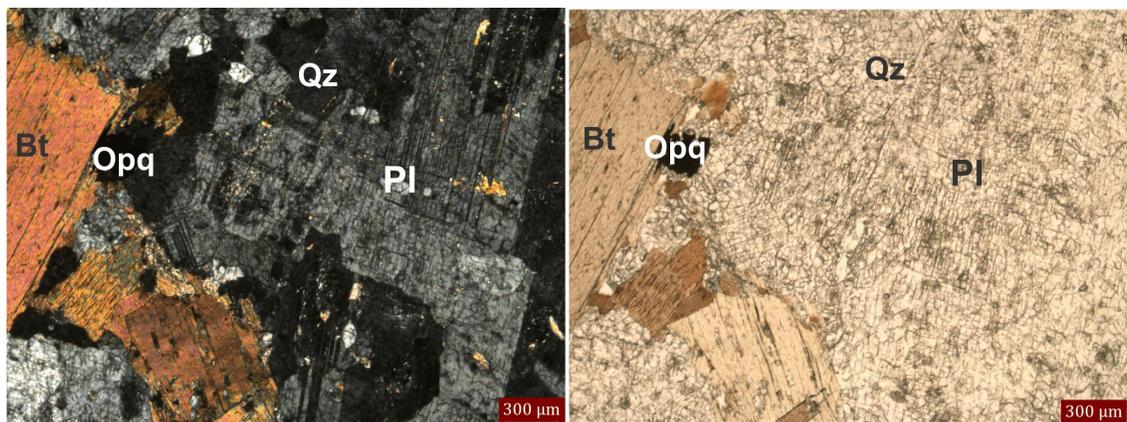
Tonalita-Granodiorita de Manizales

Roca caja

Roca ígnea con textura fanerítica hipidiomorfica con cristales euhedrales subhedrales, compuesta por plagioclasa (27-50%), cuarzo (29-44%), biotita (14-16%), hornblenda (2-4%), feldespato alcalino con textura perítica (1-3%), como consecuencia de la sausrización se encuentra epidota (<2%) como inclusión en la plagioclasa y presenta opacos (<1%) de manera diseminada, como inclusiones en biotitas se observa piritita y tenantita-tetraedrita y en zonas donde la plagioclasa comienza a alterarse a sericita se encuentra piritita, calcopiritita y esfalerita ocasionalmente (ver Figura 31)

El límite con la zona de alteración distal se observa por la aparición de sericita producto de alteración de feldespatos, clorita producto de alteración de biotita y hornblenda, la aparición de moscovita de alteración producto de alteración de la biotita, aumento de minerales opacos como piritita, calcopiritita, esfalerita y tenantita-tetraedrita, y la aparición de carbonato (ver Tabla 4).

Figura 31: Microfotografías en nicoles cruzados y nicoles paralelos de la Tonalita-Granodiorita de Manizales sin alterar, observándose plagioclasa, biotita, cuarzo y opacos (Qz: cuarzo, Bt: biotita, Pl: plagioclasa y Opq: minerales opacos).

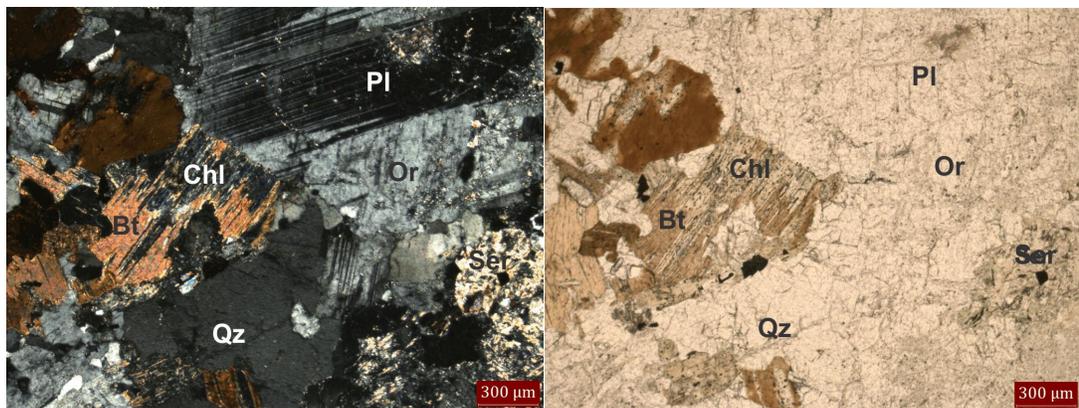


Alteración distal

La alteración distal es penetrativa con un blanqueamiento medio debido a la disminución de biotita (<4%) por la formación de clorita (6-20%), además se produce una disminución en el contenido de plagioclasa (5-10%) y ortosa petítica (<1%) debido al reemplazamiento de sericita (31-44%), presencia de moscovita (<2%) y moscovita de alteración(1-2%), aparición de carbonato rellenando espacios vacíos (<2%) y aumento en los opacos (2-4%) representados por piritita, calcopiritita, tenantita-tetraedrita y esfalerita (ver Figura 32 y Tabla 4).

Su límite con la alteración proximal es observado por el aumento de carbonatos, moscovita de alteración y opacos. Las asociaciones minerales de la zona son: Qz+Ser+Chl+Py+Ccp+Sp, Qz+Chl+Py+Ccp+Sp, Ser±Cb±Py.

Figura 32: Microfotografías en nicoles cruzados y nicoles paralelos de la Tonalita-Granodiorita de Manizales con alteración distal, mostrando el cambio de biotita a clorita y el aumento en el contenido de sericita (Qz: cuarzo, Chl: clorita, Bt: biotita, Or: ortosa y Ser: sericita)

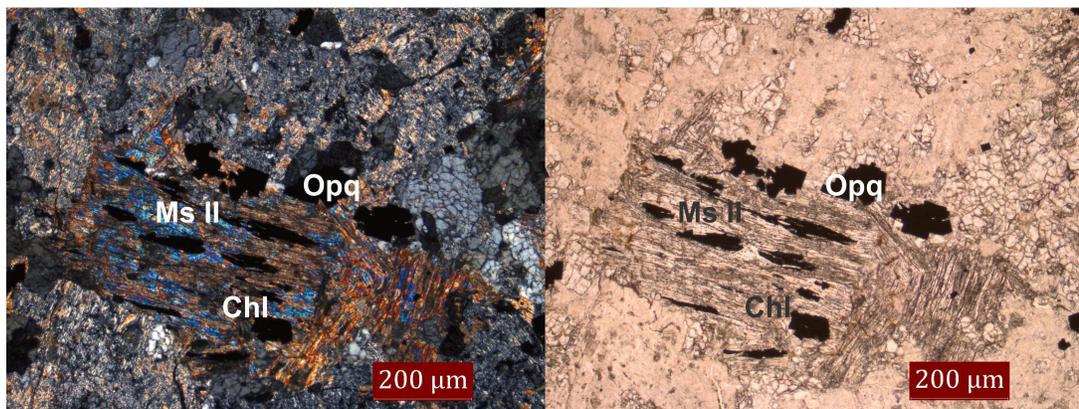


Alteración proximal

La alteración proximal es penetrativa con una alteración completa de los minerales formadores de roca a excepción del cuarzo, el blanqueamiento es fuerte comparado con la roca fresca. Los cambios mineralógicos observados en esta zona son la disminución de clorita (<1%) alterándose a moscovita de alteración cuyo porcentaje aumenta (3-14%), desaparición completa de la plagioclasa y

aumento de carbonatos (<5%), el porcentaje de sericita es conservado en comparación a la alteración distal (26-41%) y hay un moderado aumento en los opacos (3-27%) observando aumento de pirita, calcopirita, esfalerita y tenantita-tetrahedrita, y la aparición de pirargirita, arsenopirita, galena y oro (ver Figura 33 y Tabla 4). Su límite con la vetilla está marcado por la textura del cuarzo en peine que en algunas ocasiones presenta sutura de opacos o carbonatos. Las asociaciones minerales de la zona son: Qz+Ser+Py+Ccp+Sp; Qz+Py+Ccp+Sp, Ms II+Tnt-Ttr+Py; Qz+Py+Pyr; Qz+Apy; Qz+Py+Ccp+Gn; Qz±Au.

Figura 33: Microfotografías de nicoles cruzados y nicoles paralelos de la Tonalita-Granodiorita de Manizales mostrando moscovita de alteración producida a partir de la clorita, aumento en el contenido de opacos y sericita (Opq: opacos, Ms II: moscovita de alteración y Chl: clorita)



Vena

Se caracteriza por cortar la roca caja de manera discordante, observando crecimientos sintaxiales de cuarzo con textura en peine y masivo (85-93%), presentando una sutura carbonatos (3-4%) u opacos (1-7%) representados por pirita, calcopirita, arsenopirita, marcasita y pirargirita. Adicionalmente se puede encontrar vetillas compuestas principalmente por carbonatos con presencia de pirita rodeada por arsenopirita y marcasita y otras compuestas principalmente por pirita y calcopirita (ver figura 34). Las asociaciones minerales son: Qz+Py+Ccp; Cb+Py+Ccp±Apy±Mrc; Qz+Py+Ccp+Pyr+Sp.

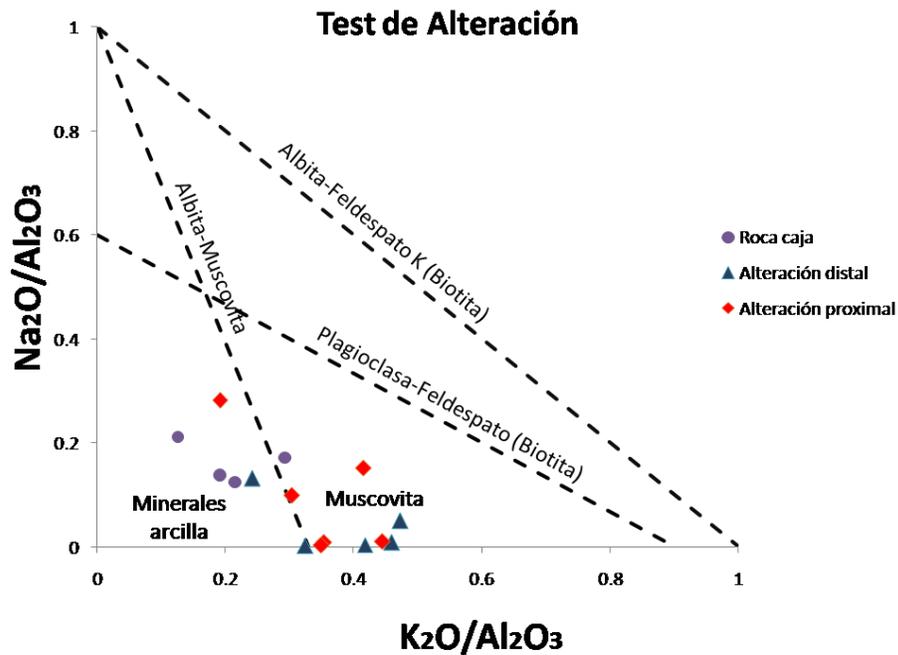
8.4 Geoquímica

Las asociaciones formadas durante alteración hidrotermal reflejan la composición geoquímica de los fluidos formadores de la mineralización. Durante la reacción entre fluidos hidrotermales mineralizados y la roca caja, algunos elementos son concentrados en localizaciones específicas para formar depósitos hidrotermales (Zhu *et al.* 2011).

De acuerdo al diagrama realizado por Davis & Whetehead (2010) para la tendencia de las proporciones molares de álcalis/alúmina en granitoides alterados, la mayoría de las rocas caja se plotearon en la zona de minerales arcilla debido a la alta presencia de micas y feldespatos que causa que la proporción de sodio/alumina y potasio/alumina sea muy pequeña (ver Figura 35). Adicionalmente, el feldespato potásico se encuentra en menor que la plagioclasa y las micas. Las muestras que presentan alteración distal y/o proximal se encuentran principalmente en la zona de la moscovita, observando que en comparación con la roca caja la proporción molar de potasio/alumina aumenta y la de sodio/alumina disminuye llegando casi a cero en algunas muestras, ésta disminución puede ser debido a la disolución de la plagioclasa que se está transformando a sericita (Van der Weijden & Van der Weijden, 1995) y el aumento de potasio puede ser debido a la disminución de otros componentes que producen que la proporción de los componentes restantes aumenten, o también podría deberse a que el fluido causante de la alteración lleve potasio, sin embargo, esta última es cuestionable, ya que el potasio disminuye levemente en la alteración proximal en comparación con la distal.

Cabe resaltar que éste diagrama presenta mayor importancia para los sistemas porfiríticos en donde se define que la roca fresca debe estar en el área cerca a las líneas de albita-feldespato potásico y plagioclasa-feldespato potásico.

Figura 35: Test de alteración para todas las muestras localizadas en la mina La Coqueta.



El enriquecimiento y empobrecimiento de los elementos mayores en cada una de las alteraciones de la Tonalita-Granodiorita de Manizales y la Milonita Granítica del Guacaica es similar debido a que la composición química de cada litología es parecida, éste enriquecimiento y empobrecimiento fue observado mediante diagramas de isoconas (Grant 1986; Grant, 2005) a partir de muestras representativas de cada alteración dependiendo de la roca caja (ver Tabla 5). Sin embargo se observan algunas diferencias debido a la abundancia o ausencia de algunos minerales en la roca caja o en determinadas zonas de alteración (ver Figuras 36, 37 y 38).

La sílice presenta un mayor enriquecimiento principalmente en la alteración proximal (ver Figuras 36 y 37) debido a su mayor contacto con la veta causando que haya relleno de sílice en espacio vacíos y a la presencia de diminutas vetillas que se producen cercanas a la veta. El alúmina tiene un empobrecimiento en la alteración proximal debido al aumento de sílice en ésta zona. El potasio presenta enriquecimiento en la alteración distal en los dos tipos de litología y en la alteración proximal hay una disminución debido al aumento de sílice.

Tabla 5: Óxidos mayores y algunos elementos traza de las muestras que se usaron para realizar diagramas de isoconas, en donde las muestras J989797 y J989769 son de la roca caja, J989804 y J989525 de la roca con alteración distal y J989803 y J989524 son de la roca con alteración proximal.

Elementos (%wt/ppm)	Tonalita - Granodiorita de Manizales			Milonita granítica del Guacaica		
	J989797	J989804	J989803	J989769	J989525	J989524
SiO ₂	66.2	62.1	72.9	70.6	69.8	83.8
Al ₂ O ₃	16.35	16.05	12.72	13.85	14.2	7.14
Fe ₂ O ₃	4.19	4.54	3.75	2.63	2.97	2.84
CaO	4.5	2.52	0.11	1.73	0.37	0.03
MgO	1.75	1.9	0.64	1.06	0.66	0.25
Na ₂ O	3.47	2.01	0.04	2.38	0.12	0.06
K ₂ O	2.06	3.47	4.45	4.07	6.52	2.53
Cr ₂ O ₃	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0.01	0.01
TiO ₂	0.47	0.52	0.045	0.39	0.53	0.036
MnO	0.1	0.09	0.04	0.07	0.02	0.01
P ₂ O ₅	0.17	0.21	0.11	0.07	0.26	0.02
SrO	0.07	0.04	<0,01	0.02	<0,01	<0,01
BaO	0.14	0.13	0.08	0.1	0.06	0.05
C	<0,01	0.06	0.04	0.01	<0,01	0.01
S	<0,01	0.78	1.51	0.43	1.76	1.81
LOI	0.8	3.48	3.33	1.21	3.39	2.69
Total	100.27	97.9	99.765	98.62	100.67	101.286
Sr	195	39.5	20	606	391	31.2
As	112	>250	>250	4.1	77.2	>250
Sn	4	4	2	2	1	1
Bi	0.16	0.48	0.24	0.03	0.04	0.03
Sb	2.3	15.3	11.5	0.16	2.28	6.96
Cu	7	87	25	4	2	5
Ag	<0,5	5.6	7.8	0.8	1	5.8
Au	0.045	0.76	0.996	<0,005	0.041	1.165
Cd	1.1	<0,5	0.6	<0,5	0.6	<0,5
Co	5	8	5	5	7	4
Pb	22	16	16	16	21	26
Zn	120	80	35	71	85	30

Ni	6	14	8	2	1	1
Mo	<1	<1	<1	<1	<1	<1

El hierro en las dos litologías no tiene gran variación en las alteraciones debido a que el hierro liberado en la biotita es incorporado en la clorita y la pirita. El calcio y el sodio tienen un empobrecimiento en las dos alteraciones por la disminución y desaparición de la plagioclasa en cada una de las zonas. El magnesio presenta un empobrecimiento en las alteraciones debido a la disminución y desaparición de biotita y clorita en cada una de las zonas.

El azufre (S) presenta un aumento en las zonas de alteración con respecto a la roca caja en ambas litologías, indicando que este S puede haber sido aportado por el fluido mineralizante y concordando con la mineralogía presente en estas zonas en donde los sulfuros aumentan considerablemente su proporción, este elemento no se tuvo en cuenta para realizar los diagramas de isoconas debido a que sus cambios son muy altos y causan poca representatividad de los demás elementos, por lo tanto su aumento puede ser evidenciado en la Tabla 5 y el Anexo.

Para los siguientes elementos: Sr, As, Sn, Bi, Sb, Cu, Ag, Au, Cd, Co, Pb, Zn, Ni y Mo, se realiza una tabla en la que se pueden observar los valores presentes en cada una de las muestras representativas de cada zona para las diferentes litologías, con base en eso se graficó un diagrama de isoconas para mostrar su enriquecimiento y empobrecimiento de estos elementos entre la roca fresca y la que tiene mayor alteración, sin embargo por el gran aumento de Au y As, y el empobrecimiento tan fuerte del Sr se excluyen del diagrama para no afectar la escala de los demás elementos con menor contenido. Según la Tabla 5 y los diagrama de isoconas (ver Figura 38) los elementos que se enriquece en la roca son As, Au, Cu, Ag con la alteración para ambas litologías, el Pb se comporta de manera constante en la Milonita Granítica del Guacaica, pero en la tonalita aumenta levánteme, el Bi, Cd y Mo se mantienen constantes tanto en la roca fresca como alterada y se empobrecen en Sr, Zn, Sn y Ni para ambas litologías. El

enriquecimiento de los elementos puede ser debido al paso del fluido mineralizante, en donde los elementos como el Zn, Pb, Cu, Ag, Sb, As y Au se enriquecen en mayor proporción en la veta que en la alteración (ver Anexo 2).

Figura 36: Diagramas de isoconas mostrando enriquecimiento y empobrecimiento de óxidos mayores entre la alteración distal y la roca caja **a.** Milonita Granítica del Guacaica **Tonalita-Granodiorita de Manizales.**

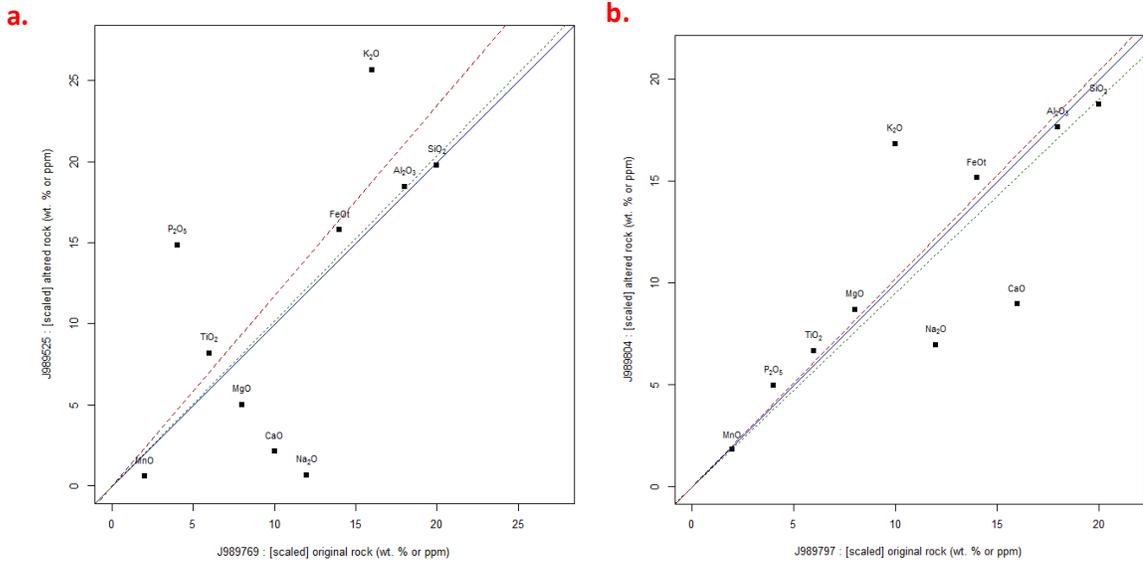


Figura 37: Diagramas de isoconas mostrando enriquecimiento y empobrecimiento de óxidos mayores entre la alteración distal y la alteración proximal de las roca caja **a.** Milonita Granítica del Guacaica y **b.** Tonalita-Granodiorita de Manizales.

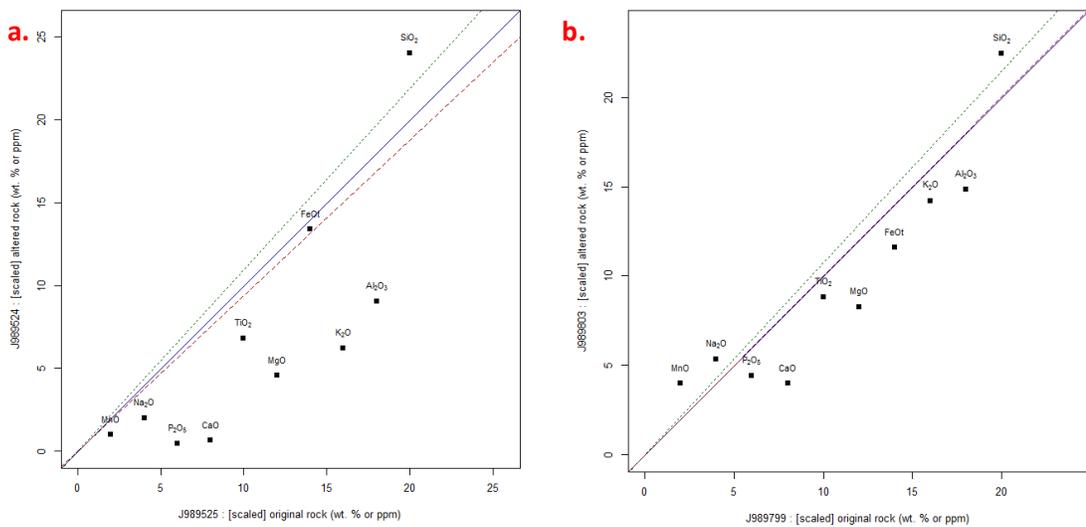
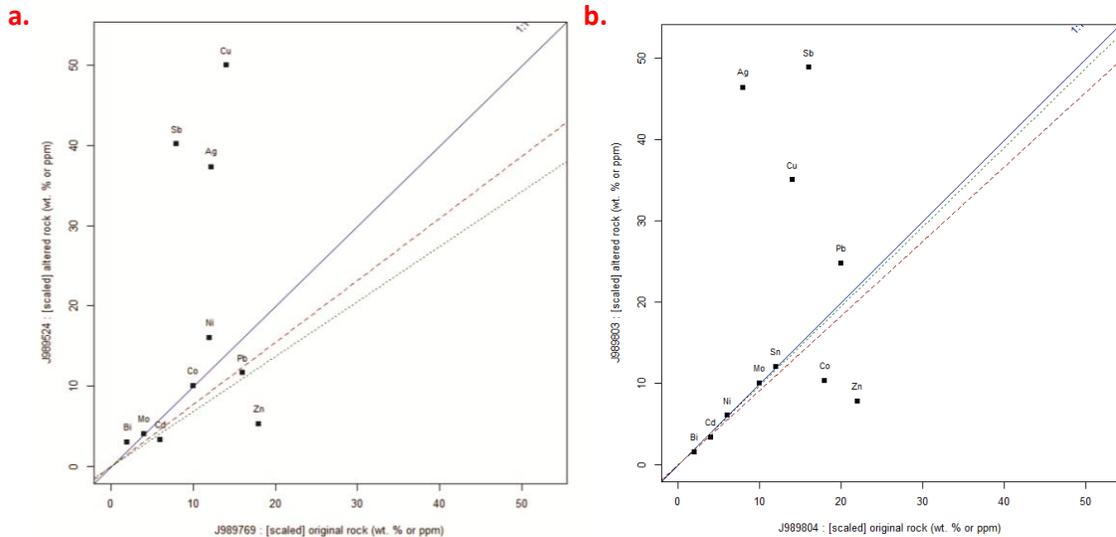


Figura 38: Diagrama de isoconas mostrando enriquecimiento y empobrecimiento de algunos metales entre la alteración proximal con la roca caja en donde **a.** la roca caja es la Milonita Granítica del Guacaica y **b.** es la Tonalita-Granodiorita de Manizales.



8.5 Inclusiones fluidas

Cuando los cristales crecen en presencia de una fase fluida, algo de este fluido puede quedar atrapado como imperfecciones durante el crecimiento del cristal para formar inclusiones fluidas (Samson *et al.* 2003). Su importancia radica en que estas brindan una cuantificación de temperatura, presión, densidad y composición del fluido que existió en el pasado (Roedder, 2002)

Según la relación entre el tiempo de formación de la inclusión con el mineral hospedante se ha realizado una clasificación usando un método petrográfico, en donde las inclusiones primarias son formadas durante el crecimiento del cristal hospedante y son observadas paralelas a los bordes del cristal principalmente, las inclusiones secundarias formadas después del crecimiento del cristal observándose a lo largo de fracturas, e inclusiones pseudosecundarias formada cuando hay fracturamiento durante el crecimiento del cristal hospedante y son observadas como inclusiones siguiendo planos que no presentan continuidad en el

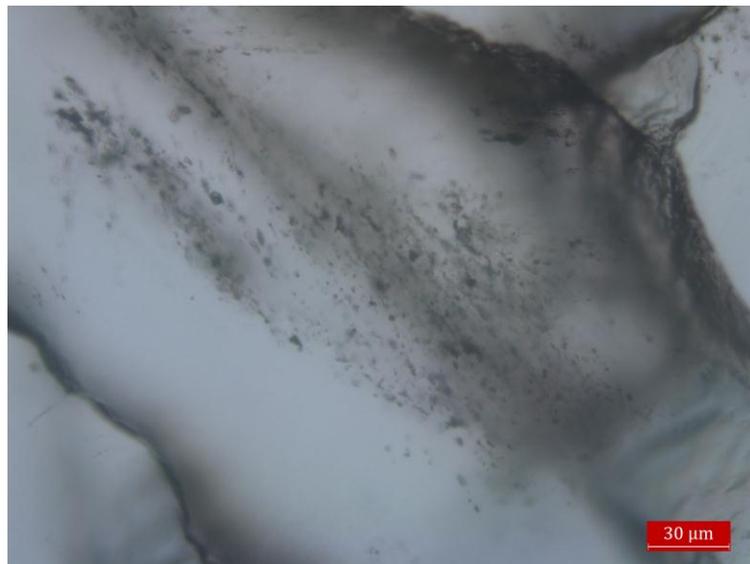
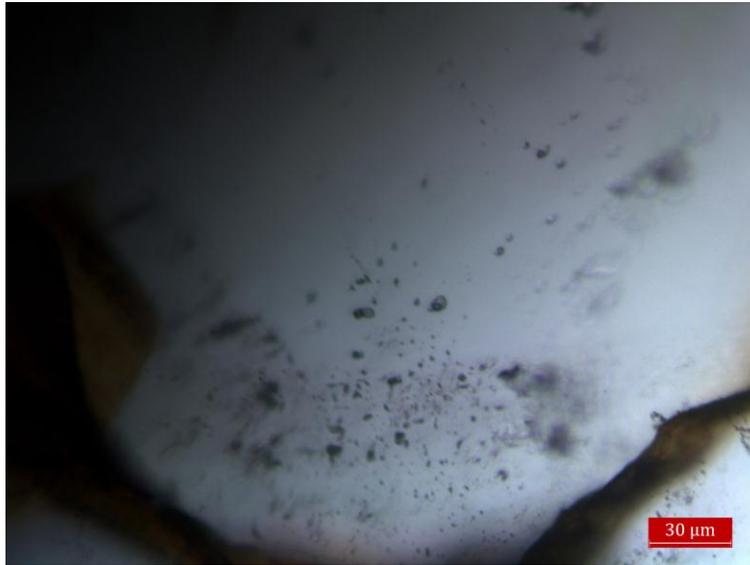
cristal (Samson *et al.* 2003; Goldstein & Reynolds, 1994). Sin embargo, determinar la clasificación temporal de una inclusión es difícil, por tanto se realiza un análisis de un grupo de inclusiones que fueron todas atrapadas al mismo tiempo, definida por Goldstein & Reynolds (1994) como asociaciones de inclusiones fluidas. Los parámetros empleados para el análisis de inclusiones fluidas son definidos a partir del enfriamiento y calentamiento de las inclusiones, obteniendo la temperatura de homogenización definida como la temperatura a la cual la inclusión fluida pasa de un estado de multifases (heterogéneo) a una fase homogénea (líquido, vapor o super crítico), la temperatura eutéctica que es la mínima temperatura de estabilidad de un líquido en un sistema específico (Van den Kerkhof & Sosa, 2012; Roedder, 2002).

Las inclusiones fluidas pueden ocurrir en muchos minerales, sin embargo, los minerales translúcidos y de colores claros son de mayor importancia, especialmente el cuarzo por su abundancia en diferentes depósitos minerales, su ausencia de clivaje y su habilidad de fácil recristalización (Van den Kerkhof & Hein, 2001).

El análisis petrográfico para inclusiones fluidas que se realizó para el presente trabajo dio como resultado la presencia de inclusiones con un tamaño menor a 10 micrómetros, estas eran primarias, bifásicas (líquidos+vapor) y de geometría regular en cristales de cuarzo hidrotermal (ver Figura 39), sin embargo no se realizó microtermometría debido a la no disponibilidad del equipo se toma el análisis de microtermometría de las inclusiones realizadas por Alvarán (2006) en cuarzo con el fin de replantear y analizar las salinidades y determinar las presiones de homogenización y densidades a partir del software BULK (06/02) y generar una discusión relacionada con éstos resultados. Estas inclusiones son primarias y bifásicas (líquido+vapor) a temperatura ambiente. Teniendo en cuenta las imágenes presentadas, son de tipo I y II según la clasificación de Nash & Theodore (1971), las primeras se caracterizan por presentar inclusiones líquidas con una pequeña burbuja de vapor sin presencia de minerales hijo, formadas a partir de un fluido subsaturado en sales <26% NaCl eq. rico en H₂O líquida y las

segundas son líquidas con una gran burbuja de vapor, sin minerales hijos asociadas a fluidos ricos en vapor en volátiles. Cabe resaltar, que las inclusiones realizada previamente homogenizan a la fase líquido.

Figura 39: Microfotografías de inclusiones hospedadas en cuarzo de muestra **a.** J989802 y **b.** MC-2-B.



A continuación se presenta una tabla con las temperaturas tomadas por Alvarán (2006):

Tabla 6: Datos de termometría de inclusiones fluidas de La Coqueta).

Muestra	Mineral	Morfología	Clasificación Genética	V/L	V/L%	Fases	Movilidad	Tamaño (µm)	T _{pf}	T _{Fhh}	T _{Fhielo}	Th(F)
Ver 2-1-1	Cuarzo	Alargada	Primaria	1/3,5	29%	2 (L+V)	No	24	-32,1	-17,4	-11,7	277,5
Ver 2-1-2	Cuarzo	Irregular	Primaria	1/3,5	29%	2 (L+V)	No	52,8	-38,7	-14,4	-5	311,9
Ver 2-1-3	Cuarzo	Irregular	Primaria	1/4,5	22%	2 (L+V)	No	28,8	-64,7	-40,7	-15,6	300
Ver 2-1-4	Cuarzo	Irregular	Primaria	1/1,5	67%	2 (L+V)	No	24	-63,3	-37,3	-5,7	306,9
PH 4-1	Cuarzo	Irregular	Primaria	1/3,5	29%	2 (L+V)	No	19,2	-68,4	-47,6	-2,7	285,7
PH 4-2	Cuarzo	Irregular	Primaria	1/3	33%	2 (L+V)	No	21,6	-39,3	-23,2	-3,6	303,1
Ver 2d5-1	Cuarzo	Irregular	Primaria	1/5	20%	2 (L+V)	No	31,2	-74,5	-51,9	-18,5	222,8
Ver 2d5-2	Cuarzo	Irregular	Primaria	1/7	14%	2 (L+V)	No	130	-47,6	-29,8	-11,3	330,9
Ver 2d5-3	Cuarzo	Irregular	Primaria	1/4,5	22%	2 (L+V)	No	60	-29,3	-12,2	-8,2	335,6

Tomadas de Alvarán (2006)

V/L: Relación Vapor / Líquido

T_{pf}: Temperatura de primera fusión del hielo

T_{Fhielo}: Temperatura de fusión final del hielo

T_{Fhh}: Temperatura de fusión de la Hidrohalita

Th(F): Temperatura de homogenización a la fase líquido, vapor o super crítico

De acuerdo con los datos de temperaturas de homogenización, temperaturas eutécticas y temperaturas de fusión del hielo tenidos en cuenta por BULK (06/02) se obtuvo los datos de densidad, presión de vapor y salinidad del fluido, presentados en la siguiente tabla.

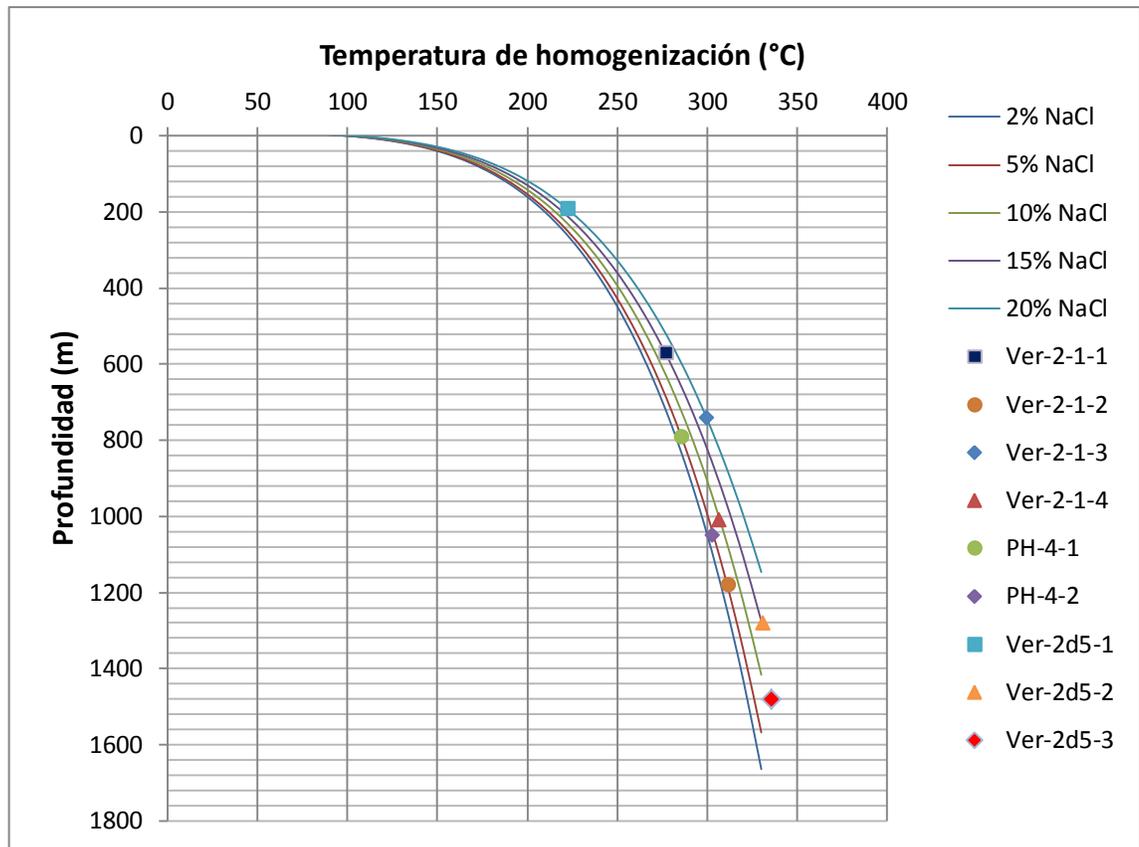
Tabla 7: Datos obtenidos a partir del software BULK, donde T_e : temperatura eutéctica, T_{fhielo} : temperatura final de fusión del hielo, T_h : temperatura de homogenización.

Muestra	$T_e=T_{fhielo}(^{\circ}C)$	$T_h (^{\circ}C)$	Salinidad (%NaClEq.)	Densidad (g/cc)	Presión de vapor (bar)	Profundidad (m)
Ver-2-1-1	-11,7	277,5	15,747175	0,914231	57,635996	570
Ver-2-1-2	-5	311,9	7,860800	0,783342	96,678276	1180
Ver-2-1-3	-15,6	300	19,322697	0,918923	81,5821	740
Ver-2-1-4	-5,7	306,9	8,809399	0,804489	90,120407	1010
PH-4-1	-2,7	285,7	4,496662	0,782729	65,696946	790
PH-4-2	-3,6	303,1	5,860837	0,770556	85,345785	1050
Ver-2d5-1	-18,5	222,8	21,604321	1,001878	20,781028	190
Ver-2d5-2	-11,3	330,9	15,343203	0,849649	124,578428	1280
Ver-2d5-3	-8,2	335,6	11,943013	0,801093	132,23966	1480

Con relación a los datos obtenidos, el fluido mineralizante presenta salinidades muy variadas que van desde 4.49 a 21.60% NaCl eq., su densidad está entre 0.7 y 1 g/cc y las presiones de vapor entre 20 y 132 bares aproximadamente.

Usando los datos de temperatura de homogenización y salinidad es posible calcular la profundidad de entrapamiento empleando la grafica propuesta por Hass (1971) para sistemas hidrotermales (ver Figura 39), que han sufrido procesos de ebullición con movimiento de agua y volátiles hacia arriba, por reacción con la roca caja y mezcla de aguas de diferente composición. De acuerdo a este diagrama las profundidades van desde 190 hasta 1480 metros (ver tabla 7).

Figura 40: Curvas de ebullición para soluciones de NaCl de acuerdo a la relación entre la temperatura de homogenización y la profundidad de entrapamiento.



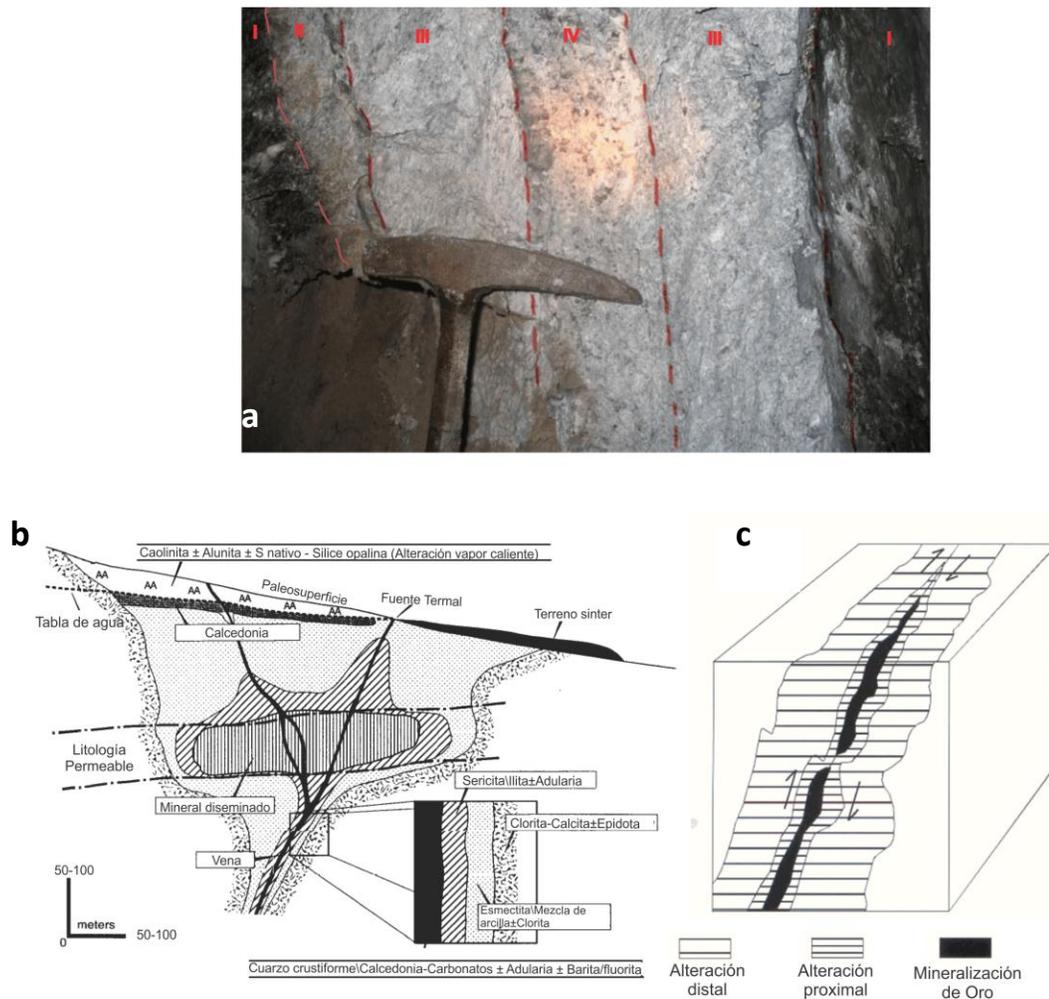
9 DISCUSIÓN

De acuerdo con Herrera *et al.* (1993) las litologías que presentan mineralización son el Gneis Cuarzo Biotítico (Milonita Granítica del Guacaica) y en menor proporción los esquistos negros del Complejo Cajamarca hacia la boca mina del túnel. Por otra parte, Alvarán (2006), plantea que la única litología que presenta mineralización es la Milonita Granítica del Guacaica (Gneis Cuarzo-Biotítico) y que lo que describe Herrera *et al.* (1993) como Complejo Cajamarca es una variación textural de la milonita que presenta un aspecto similar. Sin embargo, las descripciones de muestras de mano y la petrografía realizada en el presente trabajo la Tonalita-Granodiorita de Manizales también se encuentra afectada por el vetilleo, presentando halos de alteración similares a los de la Milonita Granítica del Guacaica debido a su composición similar. La presencia de esta litología con la mineralización es debido al avance que ha tenido el túnel hacia el Este permitiendo exponer esta litología y su mineralización. Cabe resaltar que en los análisis petrográficos llevados a cabo se encontró clorita y carbonato en las zonas de alteración cuyo reporte no había sido realizado anteriormente y no había presencia de calcedonia.

De acuerdo con las asociaciones mineralógicas y evidencias de campo Herrera *et al.* (1993) clasificó la mina como un depósito epitermal tipo adularia-sericita y posteriormente Alvarán (2006) mediante metalografía, inclusiones fluidas y análisis de arcillas, plantea un depósito tipo epitermal de baja sulfuración concordando con lo mencionado anteriormente. Sin embargo, las zonas de alteración y las vetillas presentes en la mina La Coqueta y La Cascada presentan diferentes espesores y se puede encontrar toda la alteración y las vetillas limitadas por la roca caja en menos de un metro (ver Figura 40), difiriendo con lo propuesto por Hedenquist *et al.* (2000) para depósitos epitermales de baja sulfuración en donde los halos de alteración hacia la zona de mena incluye arcilla cuya extensión areal puede ser de dos órdenes de magnitud más grandes que el depósito mineral. Cabe resaltar que Groves *et al.* (1998) plantea que los depósitos de oro orogénico exhiben una fuerte

zonación lateral de las fases de alteración desde asociaciones proximales a distales a escalas métricas que varían con la profundidad (ver Figura 40 y Tabla 8) y que para Eilu *et al.* (1999) las asociaciones minerales y los espesores de las zonas de alteración varía con el tipo de roca caja y el nivel cortical en el que se encuentra la alteración hidrotermal.

Figura 41: **a.** Distribución de la alteración en la mina la Coqueta indicando la distribución lateral de la alteración a partir de una zona de brecha que ha servido como canal de fluido para albergar la mineralización (I: roca caja, II: alteración distal, III: alteración proximal y IV: brecha), comparada con **b.** Sección esquemática que generaliza los patrones de alteración en sistemas de baja sulfuración con aumento de la profundidad y típica zonación en la alteración, y **c.** Modelo esquemático de extensión de la alteración en un depósito tipo oro orogénico.



Tomado y modificado de Alvarán (2006), Hedenquist *et al.* (2000), Eilu *et al.* (1999).

En la alteración encontrada se observa una diferenciación de acuerdo al blanqueamiento de la roca caja y a la aparición y desaparición de minerales como clorita, biotita, plagioclasa, sericita, pirita, calcopirita, esfalerita, tenantita-tetraedrita, galena y estibina. Estas asociaciones coinciden con lo mencionado por Eilu *et al.* (1999), quién realiza una compilación de diferentes depósitos con diferentes tipos de roca caja, obteniendo la zonación de la figura 41 para las facies sub-esquistos verdes. Como se puede observar este autor plantea tres zonas, mientras que el presente estudio solo se diferencian dos zonas de alteración debido a que la tonalidad de la Milonita Granítica del Guacaica y la Tonalita-Granodiorita de Manizales hace que sea difícil diferenciar una zona intermedia. Adicionalmente, en las minas se observaron tipos de estructuras propuestas por Eilu *et al.* (1999) para la facies mencionada anteriormente (ver Figura 42).

En depósitos epitermales de baja sulfuración se establece que adyacente a las venas se forma alteración argílica y a profundidad y periferia se observa alteración propilítica (Pantelev, 1996), sin embargo en el diagrama del test de alteración realizado, en las zonas más cercanas a las venas se obtuvo alteración fílica y en menor proporción alteración argílica.

Los minerales mena encontrados (pirita, calcopirita, esfalerita, esfalerita acaramelada, tenantita-tetraedrita, galena, estibina, arsenopirita, molibdenita y marcasita) no coinciden exactamente con lo propuesto para depósitos epitermales de baja sulfuración, ya que la asociación mineral para éstos depósitos es típicamente pirita, pirargirita, arsenopirita y esfalerita rica en Fe, mientras que los depósitos de intermedia sulfuración presentan una asociación de pirita, tenantita-tetraedrita, calcopirita y esfalerita pobre en hierro (Hedenquist *et al.* 2000). Por tanto, si las minas de interés pertenecen al sistema epitermal, su asociación de mena coincide con el tipo intermedia sulfuración, no obstante estos últimos suelen guardar afinidad con los depósitos de alta sulfuración (Sillitoe & Hedenquist, 2003) y hasta ahora no se ha encontrado mineralizaciones con características de depósitos de alta sulfuración en áreas cerca de la mina La Coqueta. Por otro lado,

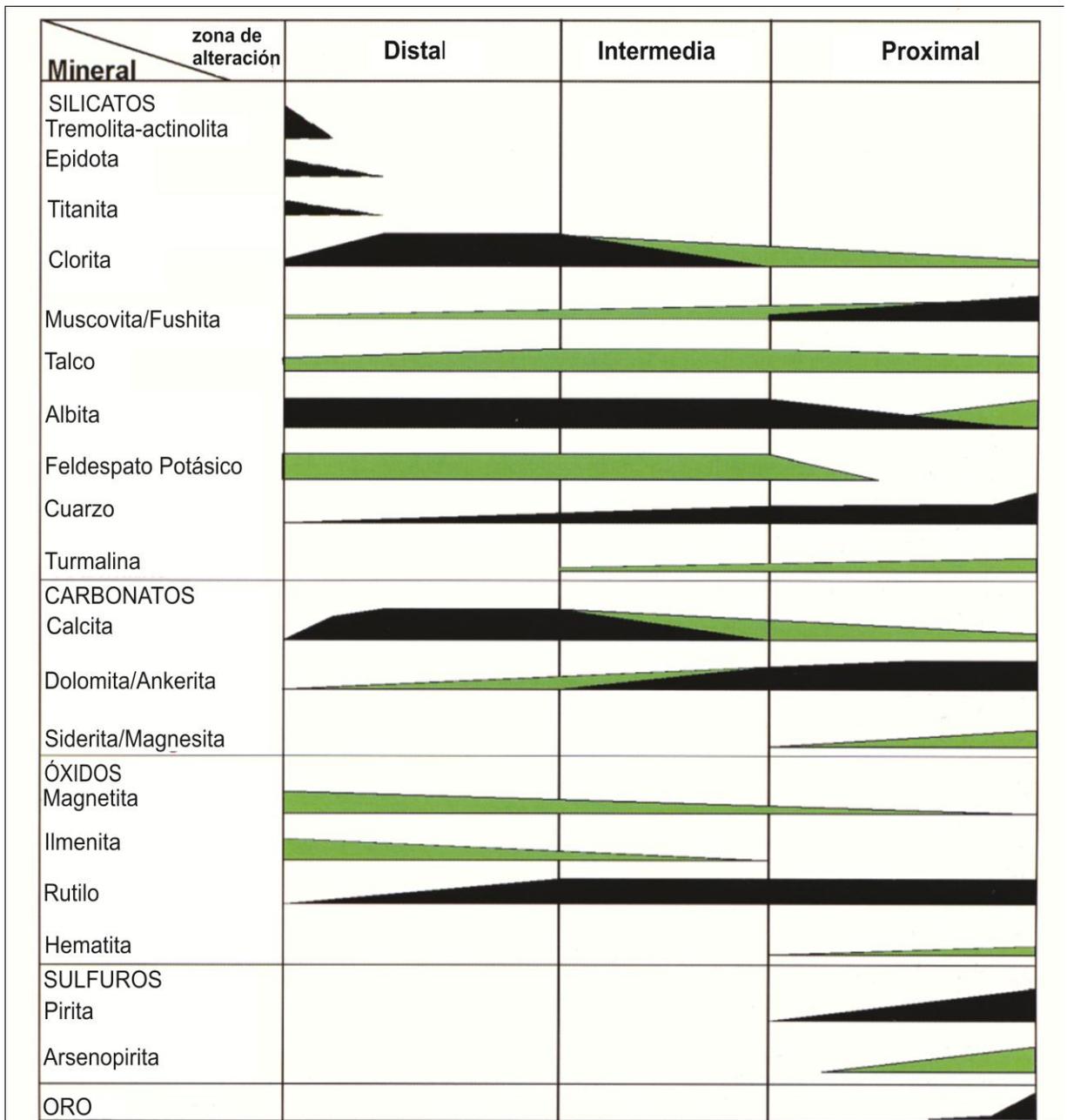
en depósitos tipo oro orogénico facies sub-esquistos verdes, las venas mineralizadas son rellenas por cuarzo con variables cantidades de carbonatos, típicamente ankerita y/o dolomita, albita, pirita y algunas traza de schelita, turmalina, apatito, pirrotita, arsenopirita, gersdorfitita, calcopirita, esfalerita, tetraedrita, galena, molibdenita, oro, electrum, telurios, seleniuros, estibinita y minerales de bismuto (Eilu *et al.*, 1999), sin embargo puede haber variación de estos minerales debido al grado de metamorfismo o la roca caja, por ejemplo la estibina puede ser más característica en depósitos en facies sub-esquistos verdes (Hagemann, 1992; Goldfarb *et al.* 1997).

Los elementos adicionados al sistema a través del fluido hidrotermal fueron potasio, sílice, azufre, plata, antimonio, arsénico y cobre, según Groves *et al.* (1998) la alteración de la roca caja en depósitos de oro orogénico en facies sub-esquistos verdes involucra la adición significativa de CO₂, azufre, potasio, agua, sílice, \pm sodio y LILE, mientras que Pantelev (1996) plantea que los depósitos epitermales de baja sulfuración puede presentar elevados valores de oro, plata, zinc, plomo, cobre y arsénico, y localmente antimonio, bario, fluor y telurio, lo que quiere decir que los elementos en los que se encuentra enriquecido la mina La Coqueta concuerdan más con lo reportado para depósitos de baja sulfuración, a excepción del zinc, bario y fluor. Adicionalmente, la relación oro/plata en la mina La Coqueta de las muestras analizadas es de 0.13, sin embargo, se han reportado para la mina La Coqueta y La Cascada valores superiores de 500 g/t de Au en zonas de bonanza o “*ore shoots*” (comunicación oral del geólogo Hector). Por tanto, con relación a las muestra analizadas concuerda con lo reportado para depósitos epitermales en donde ésta relación es de 0.1 (Einaudi *et al.* 2003) y difieren con lo reportado para depósitos oro orogénico en donde la relación es entre 1 y 10 (Groves *et al.* 1998).

Cabe resaltar que Barnes *et al.* (1997) propone que los elementos movilizados pueden ser transportados por complejos sulfurados, como HS y H₂S. Debido a la presencia de adularia, sericita, clorita y carbonatos el pH tiende a neutro y según

Camprubi & Albinson (2006) la especie $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ es muy estable bajo este pH, lo que indica cantidades de oro significativas en cuanto a su capacidad de originar depósitos económicos.

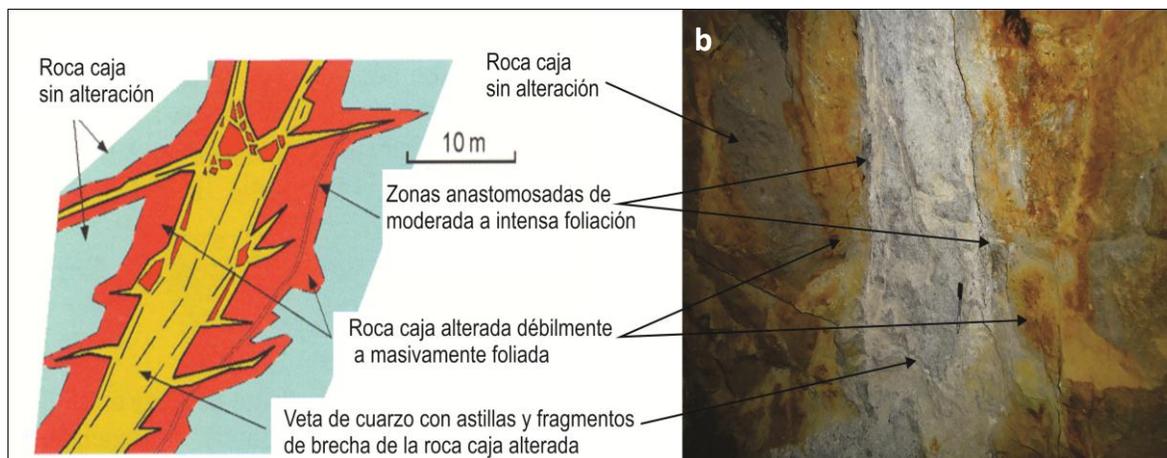
Figura 42: Esquema resumido de la secuencia de paragénesis de alteración para depósitos de tipo oro orogénico en ambientes de facies sub-esquistos verdes, la proximidad a la mineralización incrementa hacia la derecha, el color negro representa caso comunes mientras el verde representa ocurrencias menos comunes.



Tomada y modificado de Eilu et al. (1999)

Figura 43: a. Esquema representativo de tipo de estructura presente en ambientes de facies sub esquistos verdes y **b.** fotografía de afloramiento mostrando una brecha de la mina La Coqueta.

a

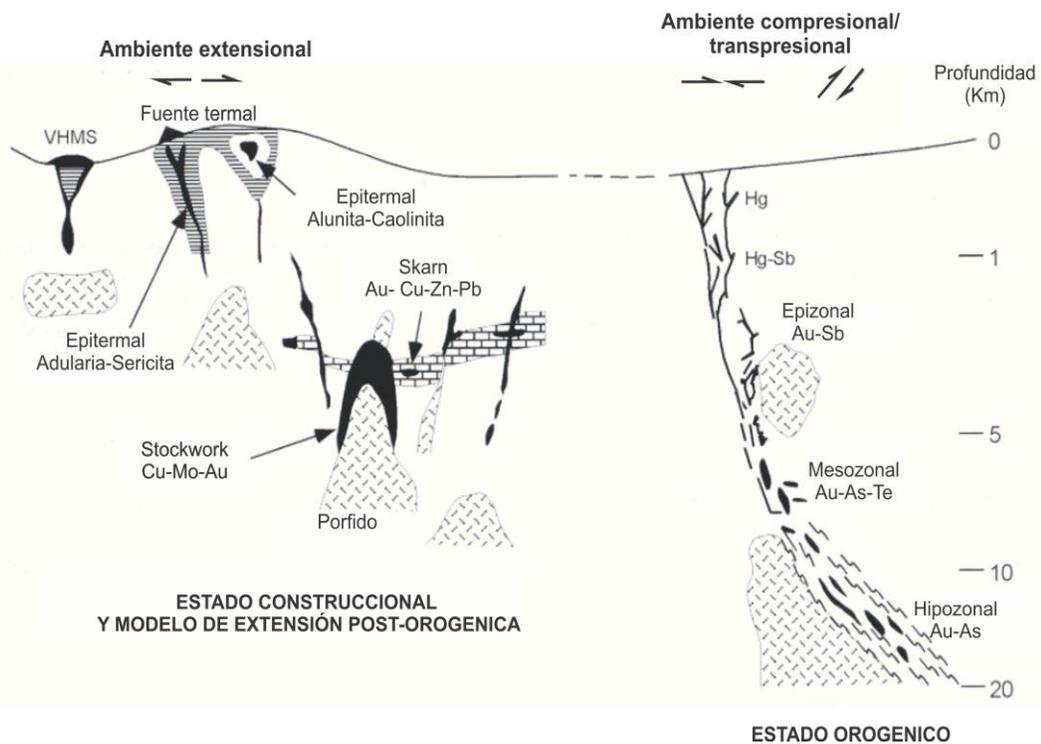


Tomado y modificado de Eilu et al. (1999).

De acuerdo con los datos de inclusiones tomadas de Alvarán (2006), las temperaturas de homogenización y las salinidad de los fluidos mineralizantes van desde 222 a 335°C y 4.5 a 21.6 %NaCl eq. respectivamente. Según los datos compilados por Groves *et al.* (1998) las temperaturas para depósitos orogénicos están desde 200 a 700°C y de 100 a 300° para epitermales evidenciando que los datos abarcan el rango de los dos tipos de depósitos. Adicionalmente, las salinidades presentan gran variación, en algunos casos sobrepasan el sistema de depósitos de oro orogénico que abarcan rangos 3 a 10%NaCl eq., mientras que los depósitos tipo epitermal abarcan rangos entre mayor o igual a 1 y 20% NaCl eq. Por otro lado, Wilkinson (2001) menciona que la variación de la salinidad puede ser producida por ebullición o efervescencia, pero un significativo aumento de salinidad solo ocurre por ebullición continua restringida a fracturas, además las variaciones significantes de salinidad son más probablemente controladas por la mezcla de fluidos, excepto donde puede ser demostrada la disolución de evaporitas. Las presiones de vapor dieron entre 20 y 132 bares aproximadamente, estas presiones indican la presión en el sistema al momento de formarse la inclusión fluida, con relación a los datos mostrados éstas son muy variables, posiblemente, debido a la ruptura de la roca caja (brechificación) que generó espacios que fueron rellenos por la infiltración del fluido con posterior disminución de ésta favoreciendo la precipitación de minerales (Sibson, 1987).

El área donde están las minas La Coqueta y La Cascada se encuentra dominado por fallas inversas y de rumbo, indicando un ambiente tectónico transpresivo, concordando con lo propuesto para depósitos de oro orogénico que es caracterizado por presentarse en terrenos metamórficos de todas las edades formado en procesos de deformación en márgenes de placas convergentes, orogenias (Groves, 1998; Eilu *et al.* 1999) (ver Figura 43 y Tabla 8). Por otro lado, los depósitos epitermales de baja sulfuración son asociados con vulcanismo bimodal en un amplio espectro de ambientes tectónicos extensionales, incluyendo intrarcos, trasarcos y rifts post-colisionales (Hedenquist *et al.* 2000; Sillitoe & Hedenquist, 2003; Einaudi *et al.* 2003).

Figura 44: Esquema representativo de ambientes corticales para depósitos hidrotermales de oro en términos de profundidad de formación y ambiente estructural en un límite de placas convergentes.



Tomado y modificado de Eilu *et al.* 1999.

Cabe resaltar que en los estudios realizados en las minas cercanas, Palmitas y La Rios (Quinceno & Osorio, 2011; Navarrete, 2011), se reporta la presencia de

alteración potásica, fílica y argílica. La alteración potásica se dice que es de baja temperatura debido a la presencia de adularia cuya asociación con cuarzo-oro indica zonas de ebullición (Quiceno & Osorio, 2011; Navarrete, 2011), no obstante, Dong & Morrison (1995) aseguran que la sola presencia de adularia en un depósito epitermal de baja sulfuración no asegura automáticamente que se haya producido ebullición. La alteración fílica o sericítica es definida por la asociación de sericita-cuarzo-moscovita dando rangos de pH de 5 a 6 y temperaturas sobre los 200-250° y la alteración argílica es reconocida por su color y tacto arcilloso (Quiceno & Osorio, 2011; Navarrete, 2011). Sin embargo, en el presente trabajo se describen dos asociaciones minerales de alteración para sus respectivas zonas ubicadas espacialmente con relación a la vetilla como zona distal y proximal, la zona distal se encuentra caracterizada por una asociación de cuarzo-clorita-sericita-moscovita de alteración y la zona proximal por la asociación de cuarzo-sericita-moscovita de alteración-pirita, las cuales se relacionan a la alteración fílica y se comprueba con el test de alteración realizado.

Tabla 8: Tabla comparativa de los depósitos epitermales de baja sulfuración y oro orogénico con la mina La Coqueta.

	Epitermal de baja sulfuración	Oro orogénico	Área de influencia e la mina La Coqueta
<i>Ambiente Tectónico</i>	Ambientes tectónicos extensionales, incluyendo intrarco y trasarco	Esfuerzos compresionales a transpresionales en márgenes de placas convergentes	Zona de transpresión
<i>Roca caja</i>	Rocas volcánicas, predomina la composición andesítica de afinidad calco-alcalina principalmente	Terrenos metamórficos deformados de todas las edades	Granitoide deformado dinámicamente y tonalita-granodiorita, adyacentes a rocas metamórficas cuarzo-sericíticas con grafico (mina La Cascada).

<i>Minerales ganga</i>	Cuarzo, amatista, calcedonia, carbonatos (pseudomorfos de la calcita), adularia, sericita, barita, fluorita.	Cuarzo, carbonatos, albita, mica blanca, clorita, schelita y turmalina	Cuarzo, moscovita de alteración, sericita, clorita, carbonatos
<i>Minerales de mena</i>	Pirita, pirargirita, arsenopirita y esfalerita rica en hierro	Pirita, pirrotita, arsenopirita	Pirita, calcopirita, esfalerita, esfalerita acaramelada, tenantita-tetraedrita, marcasita, arsenopirita, galena y estibina.
<i>Texturas de mena</i>	Estructuras de espacios abiertos, crustiforme, coliforme, peine y brechamiento	Estructuras de relleno de espacios vacíos y brechamiento.	Estructura en peine, brechamiento
<i>Relación Au/Ag</i>	Aproximadamente 0.1	Entre 1 y 10	0.1 en las zonas empobrecidas, Au mucho mayor en las zonas de bonanza
<i>Extensión de la alteración</i>	300 metros verticalmente, pero puede variar. En la periferia lateralmente extensivo.	Entre 1 y 2 km en la vertical, y en la periferia se observa a escala de metros	No determinada, aunque en la periferia de las vetas es centimétrica a métrica
<i>Minerales clave en la alteración</i>	Sericita, adularia, clorita, calcita, epidota, esmectita. Alteración argílica y propilítica	Calcita, dolomita, ankerita, clorita, sericita, fusita.	Clorita, sericita, moscovita de alteración, carbonato. Alteración fílica y argílica

Tomado de Pantelev, 1996; Hedenquist, 2000; Sillitoe & Hedenquist, 2003; Groves et al. 1998; Eilu et al. 1999; Goldfarb et al. 1997.

10 CONCLUSIONES

La mineralización presente en el área de influencia de la mina la Coqueta afecta de manera discordante a la Milonita Granítica del Guacaica de edad Permo-Triásica y la Tonalita-Granodiorita de Manizales de edad Cretácico superior a Paleoceno, cuya afinidad es Calcoalcalina presentando zonas de alteración similares para ambas litologías, en donde las asociaciones mineralógicas están compuestas por cuarzo-sericita-clorita-moscovita de alteración-pirita-tenantita-tetraedrita en las zonas más cercanas a la roca caja (alteración distal), cuarzo-sericita-moscovita de alteración-carbonatos-pirita-calcopirita-tenantita-tetraedrita-esfalerita acaramelada y ocasionalmente oro en la zona más cercana a la vena (alteración proximal) y cuarzo-pirita-calcopirita-esfalerita-galena-arsenopirita-marcasita-pirargirita-oro en la vetilla. Cabe anotar que en la mina La Cascada se afectan las unidades correspondientes a esquistos cuarzo-sericíticos con grafito del Complejo Cajamarca.

Al realizar el análisis geoquímico de diferentes zonas de alteración, roca sin alterar y vetilla se evidencia que el fluido mineralizante transporta elementos como plomo, arsénico, antimonio, azufre, oro, plata, cobre y sílice, estos están siendo transportados por complejos sulfurados debido a su afinidad química. Adicionalmente la presencia de minerales como clorita, pirita, sericita adularia y carbonatos indican un pH neutro.

De acuerdo a las características estructurales, mineralógicas y geoquímicas, el área de influencia de la mina La Coqueta no presenta en su totalidad las tendencias descritas en los modelos teóricamente establecidos para depósitos epitermales de baja sulfuración y tipo oro orogénico, por tanto se plantea un modelo donde la mezcla de fluidos meteóricos, metamórficos y magmáticos ascendieron a través de las fracturas y fallas existentes y/o generadas en el momento del paso del fluido. Cabe señalar que los eventos de acreción y deformación en el occidente de Colombia pudieron haber dado lugar a la generación de diferentes fluidos y estructuras propicios para la formación de depósitos de interés económico como el que está presente en el distrito minero de Maltería.

11 RECOMENDACIONES

Realizar un mapeo de túnel y estructuras de todas las minas que se encuentran en el distrito minero de Malteria, en donde se haga un muestreo sistemático de las zonas mineralizadas y sus respectivas zonas de alteración, esto con el fin de determinar principales tendencias de la mineralización.

Hacer análisis de isotopos de oxígeno en vetas mineralizadas para determinar la proveniencia de los fluidos que produjeron la mineralización y determinar la existencia de mezcla de fluidos propuesta en el presente trabajo.

Desarrollar perforaciones profundas en puntos estratégicos con la finalidad de determinar las características y continuidad de la mineralización y alteración presentes.

Adelantar estudios de geocronología para determinar la edad de la mineralización con el objetivo de asociar éstos datos con algún evento geológico en Colombia que sirva como guía de exploración para sectores con evolución geológica y características similares.

BIBLIOGRAFÍA

AGUIRRE, R., LÓPEZ, J.A. 2003. Cartografía geológica y petrografía del Stock de Manizales y su relación con sus rocas encajantes. Manizales, Colombia. Trabajo de grado (Geólogo) Universidad de Caldas. Programa de geología.

ALVARÁN, M. 2006. Consideraciones metalogenéticas del depósito aurífero “La Coqueta”. Distrito Minero Manizales Villamaria. Bogotá, Colombia. Tesis de maestría (Master en Geociencias). Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Geociencias.

BAKKER, R. 2003. Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. Chemical geology, v. 194, pp. 3-23.

BARNES, H. 1997. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. Third edition. John Wiley & Sons, Inc.

CAMPRUBI, A., ALBINSON, T. 2006. Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. Boletín de la sociedad geológica mexicana, volumen conmemorativo del centenario, revisión de algunos tipologías de depósitos minerales de México, tomo LVIII, N. 1, pp. 27-81.

CORPOCALDAS. 2005. Estudio sobre el estado actual de los páramos del departamento de Caldas. Colombia. 300p.

CRAIG, J.R., y VAUGHAN, D.J. 1994. Ore microscopy and ore petrography. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, 445p.

CUÉLLAR, M., SÁNCHEZ, C.A. y VALENCIA, M. 2003. Caracterización petrográfica y deformativa de las rocas aflorantes en los alrededores de la falla

San Jerónimo, al Este del Municipio de Manizales. Manizales, Colombia. Trabajo de grado (Geólogo) Universidad de Caldas. Programa de geología.

DAVIS, J.F, WHETEHEAD, R.E. 2010. Alkali/Alumina molar ratio trend in altered granitoid rocks hosting porphyry and related deposit. *Exploration and mining geology*, v. 19, pp. 13-22.

DONG, G., MORRISON, G. 1995. Adularia in epithermal veins, Queensland: morphology, structural state and origin. *Mineralium deposita*, v. 30, pp. 11-19.

EILU, P.K., CHARTER, I.M., GROVES, D.I., ALLARDYCE, W.J. 1999. Atlas of alteration assemblages, styles and zoning in orogenic lode-gold deposits in a variety of host rock and metamorphic setting.

EINAUDI, M., HEDENQUIST, J., INAN, E. 2003. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: transitions from porphyry to epithermal environments. Society of economic geologists and geochemical society, special publication 10.

FONSECA, A.B., LÓPEZ, J.A., ZULUAGA, C.A., RAMÍREZ, G.A., CUÉLLAR, M.A. 2015. Relaciones texturales y mecanismos de deformación de la Milonita Granítica del Guacaica. XV Congreso Colombiano de Geología, pp. 1124.

GOLDFARB, R., MILLER, M., LEACH, D., SNEE, L. 1997. Gold deposits in metamorphic rocks of Alaska. *Economic Geology monograph* 9.

GOLDSTEIN, R., REYNOLDS, J. 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. Society for sedimentary geology, short course 31.

GONZÁLEZ, H. 1989. Análisis de la nomenclatura estratigráfica de las rocas metamórficas (Litodema A), al Este del límite Oriental de la zona de la Falla de Romeral, Cordillera Central, Colombia. Ingeominas, Informe interno.

GONZÁLEZ, H. 2001. Geología de las planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruiz. Bogotá, Colombia.

GONZÁLEZ, H., LONDOÑO, A. 2002. Catálogo de las unidades litoestratigráficas de Colombia: Granodiorita de Manizales (K2E1mgc) Cordillera Central Departamento de caldas. Bogotá: Ingeominas.

GRANT, J.A. 1986. The isocon diagram-A simple solution to Gresen's equation for metasomatic alteration. *Economic geology*, v. 81, pp. 1976-1982.

GRANT, J.A. 2005. Isocon analysis: a review of the method and applications. *Physics and chemistry of the earth*, v. 30, pp. 997-1004.

GROVES, D., GOLDFARB, R., GEBRE-MARIAM, M., HAGEMANN, S., ROBERT, F. 1998. Orogenic gold deposit: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit. *Ore geology* 13, pp. 7-27.

HAGEMANN, S. 1992. The Wiluna lode-gold deposit. Western Australia: a case study of a high crustal level Archean lode-gold system. Tesis Ph.D. University of western Australia.

HASS, J. 1971. The effect of salinity on the maximum thermal gradient of hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Economic geology*, v. 66, pp. 940-946.

HEDENQUIST, J., ARRIBAS, A., GONZALEZ-URIEN, E. 2000. Exploration for epithermal gold deposit. *SEG reviews*, v. 13, pp. 245-277.

HERRERA, J.J, NARVAEZ, D.F, PINEDA, R, VILLA, J.E. 1993. Rehabilitación de la minería aurífera de filón en el distrito minero Manizales-Villamaria, Sector Malteria. Manizales. Universidad de Caldas

LÓPEZ, J.H. 1971 Ocurrencias minerales del departamento de Caldas. Bogotá, Colombia. Ingeominas.

LÓPEZ, J.A, AGUIRRE, R. 2005. Tonalita Granodiorita de Manizales: revisión léxico estratigráfica formal de la nomenclatura litoestratigráfica de la Granodiorita de Manizales (Stock de Manizales. Bogotá, Colombia. Memorias X Congreso colombiano de Geología.

LÓPEZ, J.A., CUÉLLAR, M.A., AGUIRRE, R., VALENCIA, M., SÁNCHEZ, C.A. 2007. Evidencias petrográficas y de campo de una intrusión sintectónica en la Cordillera Central de Colombia: el caso de la Milonita Granítica del Guacaica. XI Congreso Colombiano de Geología.

LÓPEZ, J.A, VELANDIA, F., ROSELLO, E.A., CUÉLLAR, M. 2013. Dominios litotectónicos, evolución geológica y el potencial metalogénico de Colombia. Bogotá, Colombia. Memorias XIV congreso colombiano de Geología.

LÓPEZ, J.A., ZULUAGA, C.A., MONTENEGRO, C.A., CUÉLLAR, M.A. 2015. Evidencias de mezcla e hibridación de magmas en la Tonalita – Granodiorita de Manizales, Caldas. XV Congreso Colombiano de Geología, pp. 411.

MALVICINI, L., SAULNIER, M.E. 1979. Texturas de depósitos minerales. Asociación argentina de mineralogía, petrología y sedimentología serie didáctica N°3.

MEJIA, A. E., OROZCO, G. E. 1998. Impacto geomecánico de la actividad minera del oro sobre el macizo rocoso, Distrito Minero Manizales-Villamaria, sector Maltería, Caldas. Trabajo de grado (geólogo). Universidad de Caldas.

McCOURT, W. J. 1984. New geological and geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by multiple accretion. *Journal of Geological Society of London*, v. 141.

MOSQUERA, D. 1978. Geología del cuadrángulo K-8, Informe preliminar. Ministerio de mina y energía.

NASH, J., THEODORE, T. Ore fluids in the porphyry copper deposit at Copper Canyon Nevada. *Economic geology*, v. 66, pp. 385-399.

NAVARRETE, D. 2011. Caracterización geológico-minera, cartografía subterránea y propuesta de planeamiento minero para la mina La Rios, Distrito Minero Manizales-Villamaría. Trabajo de grado (Geólogo) Universidad de Caldas. Programa de geología.

PANTELEV, A. 1996. Epithermal Au-Ag: low sulfidation, Selected British Columbia survey. Model of ore deposits.

PIRAJNO, F. 2009. Hydrothermal processes and mineral systems. Springer Science. 1273p.

PLAZAS, J.M., ZULUAGA, C.A., LÓPEZ, J.A. 2013. Condiciones de emplazamiento, mineralogía y geoquímica de la Tonalita – Granodiorita de Manizales. XIV Congreso de Geología.

POTTER, R.W., CLYNNE, M.A., BROWN, D.L. 1978. Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions. *Economic geology*, v. 73, pp. 284-185

PULIDO, O. 1985 Reconocimiento regional para mineralizaciones de oro diseminado en tres zonas de los departamentos de Caldas, Quindío y Tolima. Bogotá, Ingeominas. Informe 1947.

QUINCENO, J., OSORIO, L. 2011. Caracterización microtermométrico, metalográfica y petrográfica de la mineralización vetiforme presente en la mina Palmitas, Distrito minero Manizales-Villamaria. Trabajo de grado (Geólogo) Universidad de Caldas. Programa de geología.

RAMDOHR, P. 1969. The ore minerals and their intergrowths. 3rd edition. Oxford: pergamon press, 1179p.

ROEDDER, E. 2002. Fluid inclusions glossary. Encyclopedia of physical science and technology. Third edition, v. 6.

SAMSON, I., ALDERSON, A., MARSHAL, D. 2003. Fluid inclusions analysis and interpretation. Mineralogical association of Canada. Short course, series volume 32.

SIBSON, R. 1987. Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal systems. Geology, v. 15, pp. 701-704.

SILLITOE, R. & HEDENQUIST, J. 2003. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and Epithermal precious metal deposits. Society of Economic Geologists special publication 10, pp. 315-343.

THOMPSON, A.J., y THOMPSON, J.F. 1996. Atlas of alteration: a field and petrographic guide to hydrothermal alteration minerals. Geological Assn of Canada, 119p.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. 2006 Actualización de la evaluación de competitividad del sector minero colombiano y análisis de percepción empresarial. Bogotá, Colombia. Informe Final, 249p.

VAN DEN KERKHOFF, A., HEIN, U. 2001. Fluid inclusion petrography. LITHOS, v. 55, pp. 27-47.

VAN DEN KERKHOFF, A., SOSA, G. 2012. Fluid inclusion – Petrography and genetic interpretation of fluid inclusions. Application of cathodoluminescence techniques. Curso de post-grado. Universidad de Buenos Aires

VAN DER WEIJDEN, C.H., VAN DER WEIJDEN, R.D. 1995. Mobility of major, minor and some redox-sensitive trace element and rare-earth elements during weathering of four granitoides in central Portugal. Chemical Geology, v. 125, pp. 149-167.

WHITNEY, D.L., EVANS, B.W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, v. 95, pp. 185-187.

WILKINSON, J. 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposit. LITHOS, v. 55, pp. 229-272.

YAZO, V., J.C. 1991. Estudio petrológico del Intrusivo Gnéisico al Este de Manizales y su relación con el Stock de Manizales. Tesis (Geólogo). Universidad de Caldas. Facultad de Geología y Minas

ZHU, Y., AN, F., TAN, J. 2011. Geochemistry of hydrothermal gold deposits: a review. Geoscience frontiers, pp. 367-374.