

**ESTUDIO DE LAS ALTERACIONES HIDROTERMALES ASOCIADAS A
SISTEMAS DE FALLAS DE DIRECCIÓN NORESTE EN EL BATOLITO DE
MOGOTES (SECTOR MOGOTES-ALTO DE LOS CACAOS; MACIZO DE
SANTANDER)**

JORGE ARMANDO GAMBOA HERRERA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2016

**ESTUDIO DE LAS ALTERACIONES HIDROTERMALES ASOCIADAS A
SISTEMAS DE FALLAS DE DIRECCIÓN NORESTE EN EL BATOLITO DE
MOGOTES (SECTOR MOGOTES-ALTO DE LOS CACAOS; MACIZO DE
SANTANDER)**

JORGE ARMANDO GAMBOA HERRERA

Trabajo de Grado para optar al título de Geólogo

Director

LUIS CARLOS MANTILLA FIGUEROA

PhD en Petrología y Geoquímica

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2016

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Geología por ser entes educativos que promueven el conocimiento.

Al director de este proyecto; el profesor Luis Carlos Mantilla Figueroa, por brindar el conocimiento y amistad en este agradable camino para el aprendizaje de esta interesante ciencia; la geología.

A los estudiantes y compañeros de campo II que contribuyeron con el desarrollo de este trabajo, especialmente a: Angie Ochoa, Lizeth Sanabria, Natalia Fajardo, Silvia Pinzón, Andrés Mejía, Efraín Angarita y Luis Felipe Cruz; a cada uno de ellos mis más sinceras gracias.

Al Laboratorio de Microscopia Electrónica del Parque Tecnológico Guatiguará (UIS), especialmente al profesor Carlos Alberto Ríos por facilitar su acceso.

Al laboratorio de Rayos-X del Parque Tecnológico Guatiguará adscrito a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander, en especial, al director del laboratorio, el profesor Ph.D, José Antonio Henao Martínez.

Al laboratorio de corte y preparación de secciones delgadas de la Universidad Industrial de Santander, en especial a Luis Eduardo Garrido (Lucho) por acompañarme en este proceso y por brindarme su amistad.

A Andrea Ayala y Diego Ardila por trabajar conmigo como si fuéramos un solo grupo para avanzar juntos en este proyecto, a Diego por su importante compañía en campo.

A las personas del municipio de Mogotes que nos acogieron muy amablemente, en especial a don Leonel y don Moisés por acompañarnos y brindarnos su conocimiento de la zona en la breve pero concisa salida de campo, sin ellos no se hubiera encontrado los afloramientos estudiados en este trabajo.

Por ultimo quisiera agradecer a los profesores y amigos, que de una u otra forma ayudaron para forjar con sus dudas y opiniones este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	18
1.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2. GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO	19
2.1 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	19
2.2 FISIOGRAFÍA	20
2.3 DRENAJE	21
2.4 CLIMA Y VEGETACIÓN	21
3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO	22
3.1 FASE DE LABORATORIO	22
4. ANTECEDENTES	27
4.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL: EL MACIZO DE SANTANDER	27
4.2 MARCO GEOLÓGICO LOCAL: EL BATOLITO DE MOGOTES	31
5. RESULTADOS	33
5.1 FASE DE CAMPO	33
5.1.1 Litologías aflorantes en la zona de estudio	33
5.1.2 Bandas de alteración hidrotermal	34
5.2 MICROSCOPIA ÓPTICA: ESTUDIO PETROGRÁFICO Y MINERALÓGICO	38

5.2.1 Etapa Ignea-Ortomagmatica	38
5.2.2 Etapa Ignea Pegmatítica y Formación de Rocas Filonianas	41
5.2.3 Etapa Ignea Sub-Volcanica	42
5.2.4 Etapa Alteración Hidrotermal Sub-Epitermal	44
5.2.5 Etapa Alteración Epitermal	50
5.2.6 Etapa Alteracion Supergena	51
5.3 MICROSCOPIA OPTICA: ESTUDIO DE INCLUSIONES FLUIDAS	52
5.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)	53
5.4.1 Alteracion Qtz+Ser	53
5.4.2 Minerales de tierras raras	57
5.5 DIFRACCION DE RAYOS X	64
5.5.1 Alteracion Hidrotermal Qtz+Ser	64
5.5.2 Evento de epidotización	65
5.5.3 Vetas DE Qtz+Py	65
5.5.4 Ensayo al fuego	66
6. MODELO GENÉTICO DE LAS BANDAS DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL	68
7. CONCLUSIONES	73
8. RECOMENDACIONES	74
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	75
BIBLIOGRAFIA	78
ANEXOS	80

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización de la zona de estudio	20
Figura 2. A- Microscopio de luz transmitida Nikon eclipse e200 50/Pol con cámara y pantalla incorporada: digital sight ds-sm y digital sight ds-l1. B-Microscopio leica, modelo DM750P.	24
Figura 3. Metodología para el estudio de microscopia electrónica de barrido: A- Impregnación de muestras con carbono. B- Alto vacío para mejorar la resolución de los resultados. C- Introducción de las muestras al microscopio de barrido. D- Recolección e interpretación de las imágenes arrojadas por el SEM.	25
Figura 4. Distribución de los principales cuerpos magmáticos de granitoides en los andes colombianos. En letras de color rojo se resalta el Grupo Plutónico de Santander y el Batolito de Mogotes.	28
Figura 5. Reconstrucción a los 209-194 M.a. mostrando el arco magmático registrado en el noroccidente de Sur América. Flechas negras indican la dirección de la subducción.	30
Figura 6. Relaciones de campo donde se muestra el monzogranito siendo cortado por diques riolíticos y estos dos a su vez cortados por diques básicos. Fotografía tomada fuera del área de estudio.	34
Figura 7. A- Estación BM_07, se observa un afloramiento de alteración hidrotermal en medio de la quebrada “El Macanal” la cual es controlada estructuralmente por un sistema de fallas NW. B- Venas de un material de color verde oscuro que corta la roca ya alterada evidenciando así la variedad de fluidos hidrotermales que han intervenido en la zona. C- Se observa la morfología de bandas deformadas con zonas estrechas y zonas de brecha con mayor expansión. Fotografías tomadas por el autor.	36

Figura 8. Esquema geológico de la zona de estudio.	37
Figura 9. Pertitas en lamelas y en parches, A y B- Aspecto típico de la cuarzomonzonita del BM, Se observa la textura fanerítica de la roca, con cristales euhedrales a subhedrales. También es posible ver las lamelas de exsolución presentes en los feldespatos potásicos y el reemplazamiento de plagioclasas a sericitas asociados al evento de alteración Qtz+Ser. C y D-Pertita (Plg con textura sieve).	40
Figura 10. A y B. Microfotografía en nicoles cruzados y paralelos respectivamente mostrando la textura micrográfica (muy posiblemente por procesos de enfriamientos adiabáticos).	42
Figura 11. A Y B. microfotografía en nicoles cruzados y paralelos respectivamente mostrando el contacto recto y neto entre la Riolita y el Monzogranito evidenciando un leve borde de enfriamiento caracterizado por la presencia de granos más finos al contacto del monzogranito.	44
Figura 12. A Y B. microfotografía en nicoles cruzados y paralelos respectivamente, mostrando el aspecto típico del evento de epidotización, formadas muy posiblemente a consecuencia de alteraciones hidrotermales deutéricas.	45
Figura 13. A Y B. microfotografía en nicoles cruzados y paralelos respectivamente mostrando la alteración clorítica donde se observa el reemplazamiento total y parcial de los cristales de biotitas a clorita. En la parte inferior de la microfotografía se observa el evento de alteración Qtz+Ser, en este caso se caracteriza por procesos de reemplazamiento a través de las maclas.	46
Figura 14. A y B- microfotografía en nicoles cruzados y paralelos respectivamente, muestra las vetillas de Clc y las vetillas Qtz+Chl. C y D- microfotografía en nicoles cruzados y paralelos respectivamente, mostrando la paragénesis Chl+Ep+Qtz+Ser+Clc.	48
Figura 15. A y B- microfotografía en nicoles cruzados y paralelos respectivamente, mostrando la deposición directa de la alteración Qtz+Ser sobre	

una brecha hidrotermal, indicando la relación singenética del brechamiento y el escape del fluido. C y D. microfotografía en nicoles cruzados y paralelos respectivamente, mostrando la alteración Qtz+Ser generada por el remplazamiento de Plagioclasa, estas alteraciones son posteriores a los eventos de alteración Qtz+Ser debida a procesos de precipitación directa.	50
Figura 16. A y B. microfotografía en nicoles cruzados y paralelos respectivamente, mostrando las vetillas de Qtz cortadas por una pequeña y delgada zona cataclástica. C y D. microfotografía en nicoles cruzados y paralelos respectivamente mostrando precipitación de sulfuros en los espacios presentes en la roca.	51
Figura 17. Microfotografía tomada a 40X, mostrando el aspecto típico de las inclusiones fluidas, al centro de la imagen se observan pequeñas inclusiones fluidas posiblemente monofásicas.	53
Figura 18. Secuencia de fotografías de la muestra utilizada para el estudio de la alteración Qtz+Ser a través del SEM. A- Fotografía del afloramiento de la banda de alteración, de donde se extrajo la muestra examinada, en líneas punteadas blancas se delimitan las bandas de alteración. B- fotografía de la muestra de mano de la alteración, extraída del cuadro rojo en la figura A. C- Fotografía tomada a través de un estereomicroscopio binocular donde se observa el fragmento analizado.	54
Figura 19. A- Cristal de cuarzo neoforado, obsérvese su morfología irregular. B- difractograma realizado por el EDS mostrando alto contenido en sílice y oxígeno, verificando así la composición del cuarzo.	55
Figura 20. A. Relicto de Plagioclasa mostrando bordes corroídos, en la matriz se observan sericita y cuarzo neoforado. B- Aluminosilicato con potasio y hierro en su estructura, corresponde a una sericita con impureza de hierro. C- Difractograma indicando la presencia de una Plagioclasa sódica muy posiblemente relicto del evento ígneo.	56

- Figura 21. A- Relicto de un Cristal de Zircón perteneciente muy posiblemente a la fase ígnea de cristalización del monzogranito. B- Difractograma certificando la presencia del Zircón. 57
- Figura 22. A- Aspecto del afloramiento de la estación BM-06, en líneas punteadas blancas se observan las bandas de alteración sericitica de donde encontró la presencia de tierras raras. B- microfotografía de la sección BM-06-04 donde se resalta en un cuadrado rojo, la zona donde se manifiestan los minerales con tierras raras en forma de parches. C- Sección BM-06-05, donde se resalta en un círculo rojo, la zona donde se manifiestan los minerales con tierras raras rellenando fracturas. 57
- Figura 23. Fases minerales con contenidos en tierras raras, obsérvese su disposición rellenando fracturas del monzogranito. 59
- Figura 24. Flúor apatitos con contenido en tierras raras, paragenéticamente asociados a óxidos de titanio. A- Se observa en paragénesis el mineral óxidos de titanio y Flúor apatitos. B- Masa compuesta principalmente de cuarzo. C- óxidos de titanio con un contenido de Nb en su estructura. D- Flúor apatito (Monacita tipo Kuralita?) con gran cantidad de tierras raras La, Ce, Nd, Pr, Sm y Gd. 61
- Figura 25. A- Disposición de los minerales B- Aluminosilicatos cálcico y sódico rico en tierras raras principalmente en Y, Nb, Ti, Ce y U (Loparita? O Alanita (Y)?). C- aluminio silicato cálcico rico en Nb, U, Y y Ti (alanita) y D- Fosfato y silicato con calcio y sodio rico en Nb, Ti, Ta, Ce, U. D- apatito. E- Plagioclasa sódica (andesina?). 62
- Figura 26. A- microfotografía mostrando la disposición de los minerales analizados. B- óxido de titanio rico en tierras raras, sobretodo el Nb y Y. C- Fergusonita. 63
- Figura 27. Resultados de la difracción realizada a la alteración Qtz+Ser (muestra BM-07-01). 64
- Figura 28. Resultados de la difracción del evento de epidotización (muestra BM-05-06). 65

Figura 29. Resultados de la difracción del halo presente en las vetillas Qtz+Py (muestra BM-08-01).	66
Figura 30. Vetillas Qtz+Py.	66
Figura 31. Tabla paragenética de la zona de estudio.	71

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Estudio Petrográfico

Anexo B. Resultados de difracción de Rayos X

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

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE LAS ALTERACIONES HIDROTERMALES ASOCIADAS A SISTEMAS DE FALLAS DE DIRECCIÓN NORESTE EN EL BATOLITO DE MOGOTES (SECTOR MOGOTES-ALTO DE LOS CACAOS; MACIZO DE SANTANDER)*

AUTOR: GAMBOA HERRERA, Jorge Armando**

PALABRAS CLAVE: Macizo de Santander, Batolito de Mogotes, Alteraciones hidrotermales, Elementos de tierras raras.

DESCRIPCIÓN:

Restringidas a fallas con dirección nor-oeste, y estos igualmente vinculados a sistemas de fallas regionales de dirección nor-este, se manifiestan sobre el Batolito de Mogotes (Vereda Las Flores-Alto de los Cacaos) bandas verdes de alteración hidrotermal hipógenas. Con el fin de reconocer sus contextos paragenéticos, aportar información sobre los paleofluidos hidrotermales que actuaron en el Batolito de Mogotes y de reconocer sus posibles implicaciones metalogénicas, se realizó mediante microscopía óptica de luz transmitida, microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis cualitativos de difracción de rayos X un estudio petrográfico y mineralógico detallado, encontrando sobre estas bandas la presencia de cinco (5) eventos de alteración hidrotermal; un primer evento de epidotización; un segundo evento de cloritización, estos dos primeros posiblemente asociados a procesos de alteraciones deutéricas; un tercer evento de Chl+Ep+Qtz+Ser acompañado de vetillas de Qtz+Chl y vetillas de Chl; un cuarto evento de Qtz+Ser; y un quinto y último evento de silicificación y piritización; además el Batolito de Mogotes registra eventos de caolinización y oxidación asociados a procesos de alteración supergena.

Asimismo sobre las franjas de alteración se encuentra la presencia de tierras raras, principalmente Ti, Nb y Y, las cuales se manifiestan en Fosfatos (Monacitas, Xenotimas?), Epidotas (Allanita?), Óxidos de titanio y Niobatos (Fergusonita?), que se disponen en forma de parches y como relleno de fracturas, indicando probablemente un evento hidrotermal de carácter alcalino. Por último, en la zona de estudio también se halla la presencia de vetillas de Qtz+Py con contenidos de Au y Ag.

* Trabajo de Grado

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

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE HYDROTHERMAL ALTERATION BANDS ASSOCIATED WITH NORTHEAST FAULT SYSTEMS IN THE MOGOTES BATHOLITH (MOGOTES-ALTO DE LOS CACAOS; SANTANDER MASSIF)*.

AUTHOR: GAMBOA HERRERA, Jorge Armando**

KEYWORDS: Santander Massif, Batholith Mogotes, hydrothermal alterations, Rare earth elements.

DESCRIPTION:

In the Mogotes Batholith (Vereda Las Flores-Alto de los Cacaos) are manifested hypogenetic hydrothermal alteration bands associated to northwest fault systems, and these likewise associated to northeast regional fault systems. With the objective of recognition the paragenetic contexts, provide information about the hydrothermal paleofluidos who have acted in the Mogotes Batholith and recognition of the possible metallogenic implications, have been studied the hydrothermal alteration bands using optical transmitted light microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and qualitative analysis of X-ray.

In the alteration bands have been found five (5) events of hydrothermal alteration; A first event of epidotization; a second event of chloritization, these are possibly associated to deuteritic alteration; a third event of Chl+Ep+Qtz+Ser associated with Qtz+Chl and Chl veinlets; a fourth event of Qtz+Ser, and a last event of silicification and pyritization. The Mogotes Batholith also records kaolinization and oxidation events, associated with supergene alteration processes.

Likewise, the alteration bands contains rare earth elements, mainly Ti, Nb y Y. These are manifested in phosphates (Monazite, Xenotime?), Epidotes (Allanite?), Titanium oxides and Niobates (Fergusonite?), these minerals are arranged in patches or are filling veinlets, this mineralogy is due possible a alkaline hydrothermal event. Finally, in the study area are manifest Qtz+Py veinlets with Au and Ag contents who is associated to a more acid fluid.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Geology. Universidad Industrial de Santander. Director: Luis Carlos Mantilla Figueroa, PhD.

INTRODUCCIÓN

Este documento es el resultado de un trabajo de proyecto de pregrado “modalidad investigación”, realizado en área del Municipio de Mogotes (Macizo de Santander, Cordillera Oriental de Colombia), gracias al auspicio de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander y su Grupo de Investigación en Geología básica y aplicada (GIGBA; antes MINPETGEO).

El objetivo de éste trabajo se centró en la caracterización mineralógica y paragenética de unas franjas (con espesores centimétricos y localmente métricos, a visu), relacionadas preliminarmente con procesos epigenéticos de alteración hidrotermal, los cuales debieron afectar al Batolito de Mogotes, con posterioridad a su formación durante el intervalo Triásico Tardío-Jurásico Temprano.

El estudio de las franjas de alteración hidrotermal antes referidas, es fundamental para identificar eventos paleohidrotermales en el Macizo de Santander, para establecer su significado genético y para reconocer sus posibles implicaciones metalogénicas. Su estudio, se realizó apoyados en análisis macroscópicos y microscópicos de las muestras colectadas previamente durante unas jornadas de campo.

Se espera que éste trabajo inspire nuevos estudios en el Macizo de Santander sobre los procesos paleo-hidrotermales que se reconocen especialmente en aquellas áreas geográficamente coincidentes con la curvatura de la Cordillera Oriental de Colombia. Asimismo, se espera que los nuevos datos reportados en el presente estudio, sirvan de base a investigaciones posteriores, tendientes a establecer la posible relación entre paleo-eventos de escape de fluidos hidrotermales y el desarrollo de la deformación asociada a la orogenia Andina.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Estudio de las alteraciones hidrotermales asociadas a sistemas de falla de dirección noreste en el Batolito de Mogotes, (Sector Mogotes – Alto de los Cacaos; Macizo de Santander).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una compilación y análisis de la información geológica disponible sobre el área de estudio, para fines de contextualizar desde el punto de vista geológico el área de la presente investigación.
- Reconocer a escala macroscópica, la distribución espacial de las bandas con alteración hidrotermal presentes en el sector Las Flores-Alto de los Cacaos (Municipio de Mogotes), con el fin de establecer la relación temporal entre éstas y las unidades litológicas y estructuras tectónicas identificadas en el área de estudio.
- Realizar un análisis mineralógico-petrográfico de las bandas con alteración hidrotermal, para fines de reconocer su(s) contexto(s) paragenético(s).
- Proponer a la luz de los nuevos datos, un modelo de formación de estas bandas de alteración hidrotermal.

2. GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

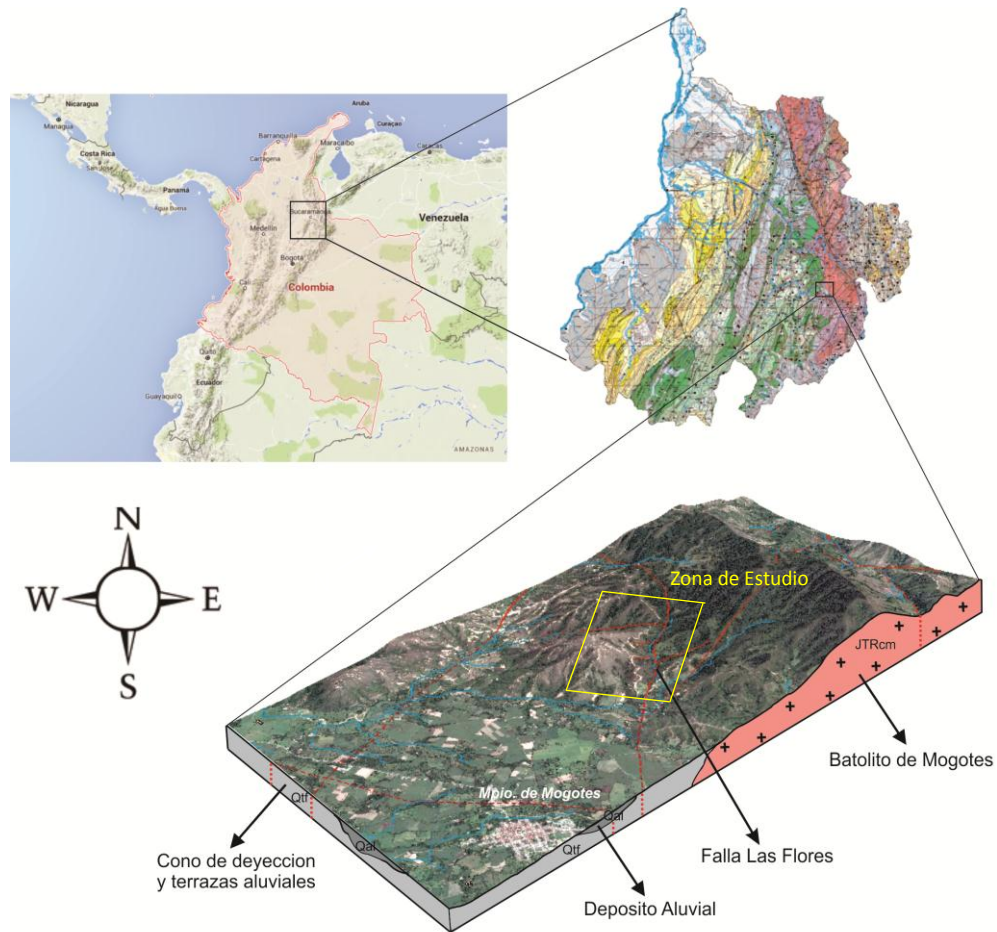
El área de estudio (Figura 1) se localiza sobre la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos, en el departamento de Santander, sobre la vereda Las Flores (Municipio de Mogotes), aproximadamente 3Km hacia el NE del municipio de Mogotes. La zona se encuentra limitada por las siguientes coordenadas de la plancha 136-III-C, según la proyección Gauss con origen X: 1.000.000 y Y: 1.000.000, ubicado en Bogotá D.C

N= 1'210.000 E= 1'124.000

N= 1'207.000 E=1'1270.000

Para llegar al sector estudiado solo existe una vía de acceso, la cual es la primera vía alterna que se encuentra por la margen derecha de la carretera intermunicipal Mogotes –San Gil. La carretera tiene alrededor de 4 Km hasta llegar a la vereda Las Flores, donde finaliza.

Figura 1. Localización de la zona de estudio



Fuente: Imagen modificada de Google Maps, Google Earth e INGEOMINAS, (1999).

2.2 FISIOGRAFÍA

El paisaje es caracterizado por zonas elevadas de relieve montañoso de características fluvio erosional y estructural-erosional donde se observan colinas, escarpes, barrancos de alta pendiente, cañadas y pequeños conos coluviales. En las zonas bajas, el relieve montañoso contrasta con paisajes llanos conformados por valles aluviales, estos con presencia de drenajes rectos debido a que se encuentran estructuralmente controlados.

En la zona emergen altos topográficos como el Alto de las Flores, Alto de Gaital y Alto de los Cacaos, teniendo de esta forma variaciones topográficas que fluctúan entre los 1600 msnm en las zonas llanas de los depósitos cuaternarios, y los 2000 msnm en los altos (anteriormente mencionados) desarrollados sobre cuerpos de rocas ígneas.

Los procesos erosivos más comunes que se presentan son desarrollados debido a causas de flujo de agua, siendo así las cárcavas, surcos y zanjones las estructuras geomorfológicas más observadas en el área.

2.3 DRENAJE

En la zona los drenajes se encuentran controlados estructuralmente, encontrando así drenajes de tipo sub paralelos y de copa de vino. La quebrada El Macanal es el drenaje más importante en la zona de estudio debido a que sobre ella se encuentran los afloramientos trabajados, este drenaje fluye en dirección NW-SE desembocando en la quebrada las flores de dirección NE-SW (también controlada estructuralmente). Los drenajes de dirección NE-SW terminan por desembocar en el Rio Mogoticos.

2.4 CLIMA Y VEGETACIÓN

La característica climática del área es la de una temperatura que oscila entre los 18°C en épocas de lluvia y 28°C en épocas de verano, la temperatura media es de 18.6°C, el clima es seco-semiárido y templado de montaña, con vegetación en su mayoría conformada por arbustos y aboles frondosos de talla mediana.

3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Para el logro de los objetivos antes referidos, se siguió una metodología convencional, compuesta por las siguientes fases: Oficina (búsqueda y análisis de la información existente), Campo (toma de muestras y datos de campo), Laboratorio, Interpretación de datos y, elaboración del documento técnico final (trabajo de tesis de pregrado). Debido a la importancia en la obtención de nuevos datos, a continuación se documenta de manera más amplia, lo relacionado con la fase 'Laboratorio'.

3.1 FASE DE LABORATORIO

En esta fase se realizó el estudio macro-microscopio de las rocas y los minerales asociados a las bandas de alteración. Primero se realizó un estudio de estereomicroscopía, luego se llevó a cabo el estudio de microscopía óptica (estudio mineralógico-petrográfico y estudio de las inclusiones fluidas), posteriormente se realizó el estudio de microscopía electrónica de barrido (SEM) y para concluir se utilizó toda la información encontrada para realizar un modelo geológico de las bandas de alteración.

Debido a que las inclusiones fluidas encontradas en los rellenos hidrotermales son extremadamente pequeñas, el estudio de microtermometría fue omitido ya que se obtendrían resultados difícilmente correlacionables.

- **ESTEREOMICROSCOPIA**

Durante esta fase se llevó a cabo el estudio preliminar mineralógico y textural de las muestras recolectadas en el periodo de campo. Esta etapa se realizó mediante un estereomicroscopio binocular marca NIKON N1-150 modelo C-PS presente en los laboratorios de la Escuela de Geología en la Universidad Industrial de Santander.

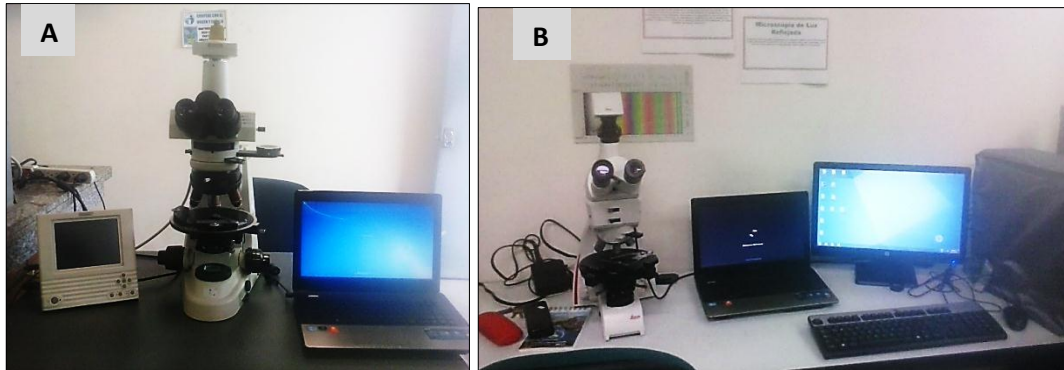
- **MICROSCOPIA DE LUZ TRASMITIDA**

Las secciones pulidas y secciones doblemente pulidas que se estudiaron en el presente trabajo fueron realizadas en el laboratorio de secciones delgadas TECLAP G&P s.a.s, ubicado en la ciudad de Bogotá y en el laboratorio de preparación de secciones delgadas de la Universidad Industrial de Santander.

Las secciones fueron analizadas en los microscopios ópticos marca Leica y Nikon (Figura 2), respectivamente presentes en el Laboratorio de microscopía óptica de Escuela de Geología en la Universidad Industrial de Santander y en el Laboratorio de Microscopia Óptica adjudicado al Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada (GIGBA) presente en el Parque Tecnológico Guatiguará (UIS). Las microfotografías utilizadas en el presente trabajo fueron tomadas del Microscopio leica.

En esta etapa se realizaron los estudios de petrografía-mineralogía, y petrografía de inclusiones fluidas.

Figura 2. A- Microscopio de luz transmitida Nikon eclipse e200 50/Pol con cámara y pantalla incorporada: digital sight ds-sm y digital sight ds-l1. B- Microscopio leica, modelo DM750P.

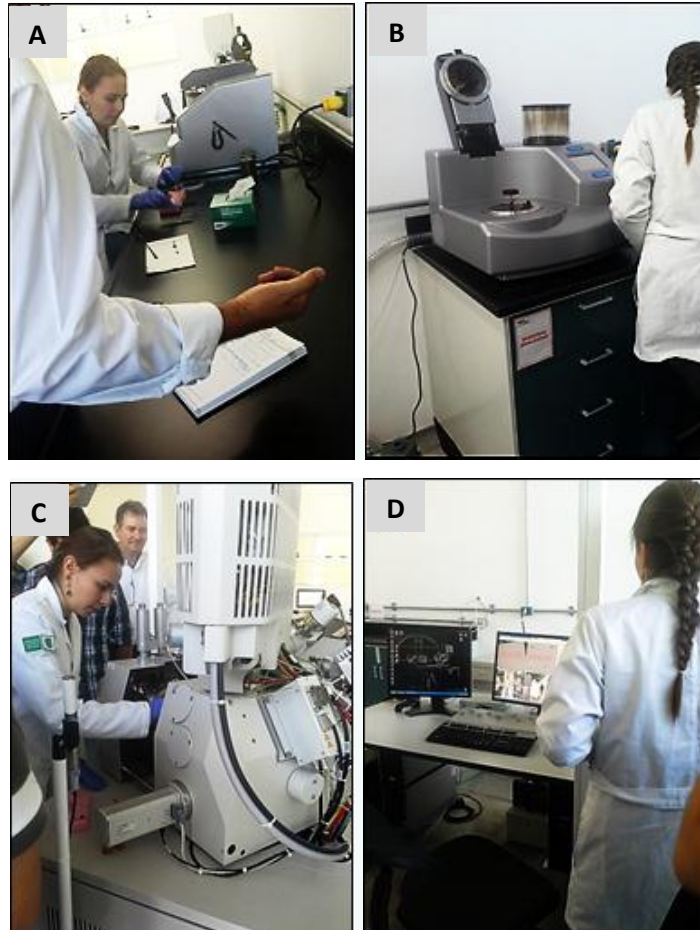


- **MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)**

Los análisis de microscopía electrónica fueron realizados en el Laboratorio de Microscopía Electrónica del Parque Tecnológico Guatiguará (UIS) en un Microscopio electrónico de barrido FEI Quanta 650 FEG ambiental (ESEM) con un Detector EDAX APOLO X (resolución de 126.1 eV (en. Mn K α)) para análisis EDS. La metodología para el análisis es explicada en la Figura 15.

Las muestras analizadas fueron; fragmentos de roca con un tamaño alrededor de 3 a 5mm y secciones delgadas sin cubreobjetos. Antes de ser introducidas al microscopio, estas muestras son recubiertas con oro o con grafito dependiendo del material que es examinado, el equipo utilizado para recubrir es un Metalizador/Evaporador de carbón QUORUM Q150R ES con bomba rotatoria.

Figura 3. Metodología para el estudio de microscopia electrónica de barrido:
A- Impregnación de muestras con carbono. **B-** Alto vacío para mejorar la resolución de los resultados. **C-** Introducción de las muestras al microscopio de barrido. **D-** Recolección e interpretación de las imágenes arrojadas por el SEM.



- **DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

Fueron analizadas las muestras BM-07-01 y BM-08-01. Para realizar el estudio de difracción de rayos x, se trituró y pulverizó la muestra, posteriormente fue enviada al laboratorio de rayos x del Parque Tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander, en donde las muestras fueron montadas directamente en un porta muestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal, el equipo empleado fue un Difractómetro de Rayos-X de muestras

policristalinas marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci y los análisis se realizaron mediante las siguientes condiciones:

Voltaje: 40 (kV)

Corriente: 30 (mA)

Rendija de Divergencia: 0,6 mm

Rendijas Soller Primario: 2,5°

Muestreo: 0,01526°2theta

Rango de Medición: 3,5°-70°2Theta

Radiación: CuK α

Filtro: Níquel

Uso de Anti-dispersor de Aire: Si

Detector: Lineal LynxEye

Tipo de barrido: A pasos

Tiempo de muestreo: 0,4 segundos

El análisis cualitativo de las fases presentes en las muestras se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos del International Centre for Diffraction Data (ICDD).

- **ENSAYO AL FUEGO**

El Método de Ensayo al Fuego consiste en producir una fusión de la muestra usando reactivos y fundentes adecuados para obtener dos fases líquidas: una escoria constituida principalmente por silicatos complejos y una fase metálica constituida por plomo que colecta los metales de interés (Au y Ag); Posteriormente es separada la fase metálica y de esta es eliminado el plomo, para concluir el ensayo, la fase metálica sin plomo es sometida a análisis químico o determinación gravimétrica, con el fin de hallar los porcentajes de Au y Ag.

4. ANTECEDENTES

Para lograr fines de contextualizar geológicamente la investigación aquí desarrollada, a continuación se presenta un breve resumen sobre el marco geológico regional y local del área de estudio.

4.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL: EL MACIZO DE SANTANDER

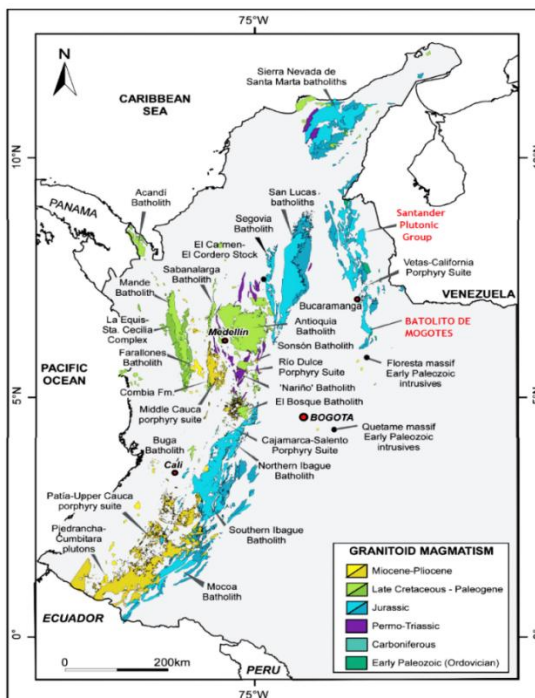
El Macizo de Santander está ubicado al noreste de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos, este cuerpo ha registrado eventos de metamorfismo regional, fracturamiento e intrusiones, y es generalmente considerado como un bloque alóctono acrecionado a la margen de Gondwana durante el ordovícico y el carbonífero (Van der Lelij *et al.*, 2015).

Como basamento del Macizo de Santander se encuentra el Neis de Bucaramanga, que representa la unidad de roca más antigua (Proterozoico) y de más alto grado de metamorfismo en el macizo, la cual fue afectada primeramente por el evento de metamorfismo regional producto de la Orogenia Putumayense ó Grenvilliana. Posteriormente en el macizo se registran los Esquistos del Silgara y los Esquistos de Chicamocha, los cuales fueron afectados a finales del cámbrico e inicios del ordovícico por el evento de metamorfismo regional Fammatiniano Principal descrito por (Mantilla, 2016), coetáneamente a este evento de metamorfismo, el macizo sufre la intrusión del Orteneis de Berlín (Ward et al., 1973). Ya para el Ordovícico se formó el protolito de la unidad llamada Filitas de San Pedro que sufre un nuevo y último evento de metamorfismo regional, llamado Evento Fammatiniano Menor en el Silúrico (Mantilla, 2016). Suprayaciendo estratigráficamente las unidades mencionadas, se exponen las Metasedimentitas

de bajo grado, las cuales se han agrupado en unidades informales como las Metasedimentitas de Guaca, Formación la Virgen, Floresta Metamorfoseada, Formación Mogotes entre otras (García *et al.*, 2005; Mantilla *et al.*, 2016), estos cuerpos en algunos sectores presentan metamorfismo y en otros no, por lo tanto se interpreta que posteriormente a estas unidades, el Macizo de Santander no sufre eventos de metamorfismo regional, pero si experimenta procesos locales de metamorfismo dinámico-térmico.

En Colombia es posible reconocer cinco episodios de actividad plutónica, estos son: evento A: Triásico (c. 240-210Ma), evento B: Jurásico (c. 200-140Ma), evento C: Cretácico (c. 125-70Ma) y dos eventos D Terciarios (c. 60-30 y 30-0 Ma), descritos en Aspend *et al.*, (1985), aunque para Cediell (2011), se reportan seis eventos magmáticos (Figura 2).

Figura 4. Distribución de los principales cuerpos magmáticos de granitoides en los andes colombianos. En letras de color rojo se resalta el Grupo Plutónico de Santander y el Batolito de Mogotes.



Fuente: Tomado de Leal-Mejía *et al.*, (2011).

Para el caso del Macizo de Santander según Mantilla *et al* (2009) se reconocen mínimamente seis pulsos magmáticos, descartando aquellos anteriores a los eventos metamórficos regionales, y cuyas litologías metamórficas resultantes, hacen parte actualmente de la composición de las Formaciones Neis de Bucaramanga, Silgara y Ortogneis, estos seis pulsos son:

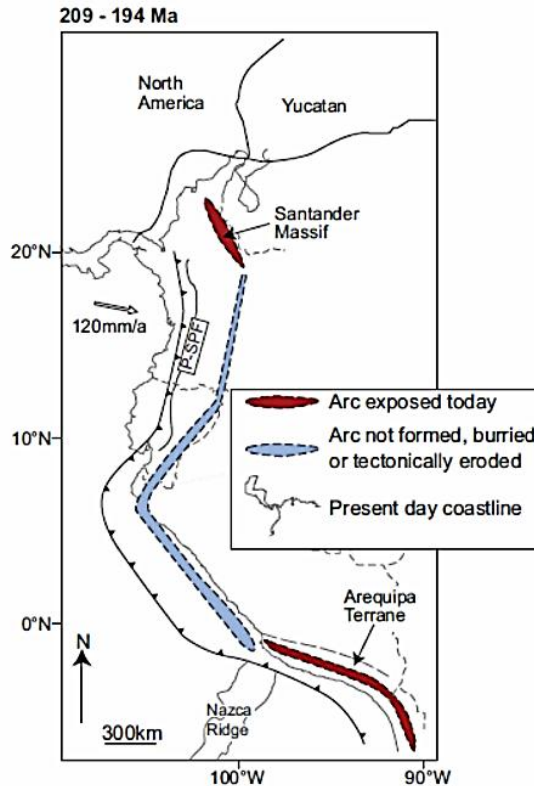
1) Un evento magmático relacionado con inyecciones de fundidos graníticos, responsables de la formación de plutones y pegmatitas, como aquellos asociados al Granito de Durania al cual se le asigna una edad K-Ar en torno a 461 ± 10 Ma, a partir del estudio de una moscovita presente en una pegmatita (Ward *et al* 1973).

2) Un evento magmático granítico, responsable de la Formación de la Monzonita de Onzaga, con una edad reportada en torno a 394 ± 23 Ma, según Boinet *et al* (1985).

3) Una cantidad importante de cuerpos calco alcalinos metaluminosos, tipo I (Cediel *et al.*, 2011) fueron generados en un ambiente de arco continental (Aspend *et al.*, 1987, Goldsmith *et al.*, 1971, Dörr *et al.*, 1995, Mantilla *et al.*, 2013, Spikings, 2015) en el triásico-Jurásico (figura 5). Esta misma actividad ígnea está registrada en la Sierra Nevada de Santa Marta, el Macizo de Santander, y en los Batolitos de Segovia, Norosí, Sonsón, Ibagué, Mocoa, Abitagua, y Zamora. (Cediel *et al.*, 2011).

Este evento magmático fue el responsable de la formación del Batolito de Mogotes y otros cuerpos ígneos, tales como los Batolitos de Páramo Rico, Santa Bárbara, Pescadero, Río negro, entre otros, agrupados dentro del denominado Grupo Plutónico de Santander. Las edades según Aspend *et al.*, (1987) obtenidas mediante dataciones K-Ar en biotitas registra para: el Batolito de Mogotes arroja una edad de 192 ± 6 Ma., El Batolito de Santa Bárbara 194 ± 7 Ma., 192 ± 7 Ma., el Batolito de La Corcova 196 ± 7 Ma., el Batolito de Río negro 175 ± 15 Ma.

Figura 5. Reconstrucción a los 209-194 M.a. mostrando el arco magmático registrado en el noroccidente de Sur América. Flechas negras indican la dirección de la subducción.



Fuente: Tomado de Van der Lelij et al., (2015).

4) Un evento magmático responsable de la formación posiblemente simultánea de diques riolíticos y de diabasas (magmatismo bimodal?), al parecer del Cretácico Inferior, tomando como referencia algunas dataciones K-Ar en sanidinas obtenidas a partir de diques porfiríticas del sector de Ocaña (127 ± 3 Ma) (Ward *et al.*, 1973).

5) Un evento magmático de posible edad Finicretácico – Eoterciario (Mantilla *et al.*, 2009).

6) Un Pulso magmático de edad Mioceno Tardío, 8.4 ± 0.2 y 9.0 ± 0.2 Ma (Tortoniano) responsable de la formación de cuerpos ígneos en ambientes muy someros de la corteza. (Mantilla *et al.*, 2009).

A grandes rasgos, la geología del Macizo de Santander se puede resumir por los siguientes eventos evolutivos: (1) la presencia de neises precámbricos en el macizo, (2) rocas sedimentarias del precámbrico superior a paleozoico inferior que fueron intruidas y metamorfoseadas durante el ordovícico, y (3) las mayores intrusiones batolíticas ocurrieron en el triásico tardío y jurásico temprano, seguidos de pequeñas intrusiones durante el jurásico y cretácico temprano (Goldsmith *et al.*, 1971).

4.2 MARCO GEOLÓGICO LOCAL: EL BATOLITO DE MOGOTES

El primer reporte que se tiene sobre el Batolito de Mogotes lo realiza Ward en el año de 1973, quien en su trabajo comenta: “El Batolito de Mogotes está constituido por una cuarzomonzonita biotítica equigranular con variaciones a granodiorita equigranular a granular”. A continuación se muestra la descripción realizada por Ward sobre la variedad litológica presente en el Batolito de Mogotes:

La cuarzomonzonita del Batolito de Mogotes es rosada naranja, gris rosácea o blanca rosácea, equigranular a subporfírica. La roca típica es leucocrática y contiene cantidades casi iguales de Oligoclasa, Fld K, Qtz y presenta menos del 3% de Bt. Las variedades menos biotíticas contienen más feldespato de potasio que Plagioclasa. En sección delgada, la textura de la cuarzomonzonita, es hipidiomorfa y ligeramente inequigranular. Se compone de oligoclasa, Fld K, Qtz, Bt con inclusiones de Apatito, los accesorios son: apatito, Oxido de Fe, Zircón y Alanita. Clorita, epidota y sericita son comúnmente secundarios. La esfena está presente solo en rocas relativamente ricas en biotita que alcanzan la composición

de la granodiorita. Algunas variedades de grano fino son blancas y aplíticas en textura, contienen Albita y oligoclasa sódica y la textura micrográfica o micropegmatítica es común. Las variedades porfiríticas difieren solo en que tienen fenocristales de micropertita (Ward *et al.*, 1973).

La granodiorita es gris a gris rosácea, de grano medio a grueso, con escasos fenocristales de ortoclasa rosada naranja y granos más pequeños de cuarzo gris, Plagioclasa blanca y biotita. Los minerales accesorios son la biotita, el óxido de hierro, el esfeno, la Alanita, el zircón y el apatito; la epidota y clorita son generalmente secundarias. La oligoclasa y la andesina son más abundantes que el feldespatos de potasio. Los maficos constituyen del 5 al 10% de la roca. La biotita verde marrón, típicamente, posee numerosas inclusiones de apatito. El contacto de la granodiorita con la cuarzomonzonita no es claro y puede ser gradacional (Ward *et al.*, 1973).

Diques félsicos y maficos atraviesan las rocas ígneas batolíticas, pero algunos no son mostrados en los mapas geológicos ya que la mayoría son demasiado pequeños y se han omitido. Los diques félsicos, especialmente los de pórfido Rioliticos y delenita son notorios en el Batolito de Mogotes y en la cuarzomonzonita de Santa Bárbara. Los diques maficos son de grano fino y de composición andesíticas, microscópicamente muestran textura porfiríticas con fenocristales de andesina subhedral y hornblenda euhedral en una matriz diabásica de Plagioclasa y hornblenda, los accesorios son esfeno, apatito, biotita y óxidos de hierro, los productos de alteración incluyen clorita, epidota y calcita (Ward *et al.*, 1973).

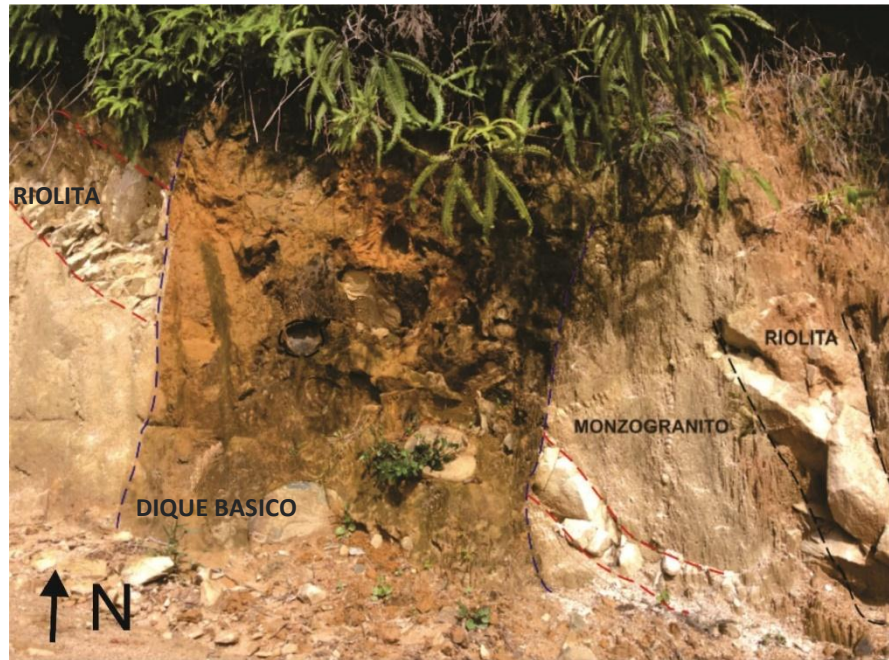
5. RESULTADOS

5.1 FASE DE CAMPO

5.1.1 Litologías aflorantes en la zona de estudio La principal litología aflorante en el área de estudio, corresponde a las rocas plutónicas (de textura fanerítica-equigranular) del Batolito de Mogotes. Desde el punto de vista de su clasificación modal, estas rocas ígneas se proyectan en el campo de los Monzogranitos, los cuales se componen principalmente de Feldespato Potásico, Plagioclasa (Andesina), Cuarzo y Biotitas. Asociados a estos cuerpos se encuentran rocas filonianas, caracterizadas por diques de Pegmatitas Graníticas, compuestas fundamentalmente por cristales de Feldespato Potásico y Cuarzo, también diques de aplita de texturas micrográficas y compuestos por cuarzo, feldespato potásico y plagioclasas, finalmente se reconocen diques de Riolitas, de textura afanítica y esencialmente compuestos por Cuarzo, Plagioclasa, Sanidina y Biotita. En la Figura 6 se aprecia claramente las relaciones de campo entre el cuerpo de Monzogranito, los diques de Riolita y los diques básicos.

Dado que en la zona de estudio las dimensiones de los diques de pegmatitas, aplitas y riolitas varían de 15 cm a 60 cm de espesor, no es posible representarlos en el mapa geológico (Figura 8). También es necesario mencionar que no se identifican rocas de tipo granodiorita ni diques de carácter básico, las cuales fueron definidas como litologías ígneas epigenéticas según los antecedentes descritos del Batolito de Mogotes.

Figura 6. Relaciones de campo donde se muestra el monzogranito siendo cortado por diques riolíticos y estos dos a su vez cortados por diques basicos. Fotografía tomada fuera del area de estudio.



5.1.2 Bandas de alteración hidrotermal Las bandas principalmente poseen tonalidades verde Olívia (Figura 7a) debido a la mineralogía de alteración que las componen, la cual principalmente es Sericita, Clorita, Cuarzo y Epidota, por lo tanto la presencia de estas franjas en el Batolito de Mogotes implican la circulación de paleofluidos hidrotermales a través fallas y fracturas.

Las bandas observadas en el área de estudio, presentan la misma disposición espacial de las fallas con dirección $N23^{\circ}W$, las cuales a su vez son asociadas a un sistema de fallas regional $N20^{\circ}E$, las bandas (o franjas, como también se ha referido a lo largo de este documento), varían entre un (1) metro y tres (3) metros.

Hacia el oriente del municipio de Mogotes, a tres kilómetros del municipio de San Joaquín, sobre el corte de carretera en la vía Mogotes-San Joaquín, se observan

bandas plegadas con un espesor entre 30cm y 2mt, estas presentan zonas de expansión (Figura 7c).

Gran parte del área de estudio presenta afloramientos con alto grado de intemperismo, lo cual limita la tarea de documentar la información que las muestras puedan generar; por esto, cabe resaltar que los afloramientos trabajados son excavaciones antrópicas realizadas por los lugareños, allí se encuentra la roca fresca y se identifican las bandas de alteración, con un aspecto compacto y sólido, con alto diaclasamiento, brechamiento tectónico (brechas tectono-hidrotermales?) y distintos tipos de vetillas compuestas de Qtz, Qtz-Chl y Chl (Figura 7b).

Aunque la alta intensidad y pervasividad de la alteración se restringe a las fallas por donde migraron los paleofluidos, cabe mencionar que algunos llegaron a migrar e interactuar con la roca caja generando leves sericitizaciones y cloritizaciones.

Figura 7. A- Estación BM_07, se observa un afloramiento de alteración hidrotermal en medio de la quebrada “El Macanal” la cual es controlada estructuralmente por un sistema de fallas NW. B- Venas de un material de color verde oscuro que corta la roca ya alterada evidenciando así la variedad de fluidos hidrotermales que han intervenido en la zona. C- Se observa la morfología de bandas deformadas con zonas estrechas y zonas de brecha con mayor expansión. Fotografías tomadas por el autor.

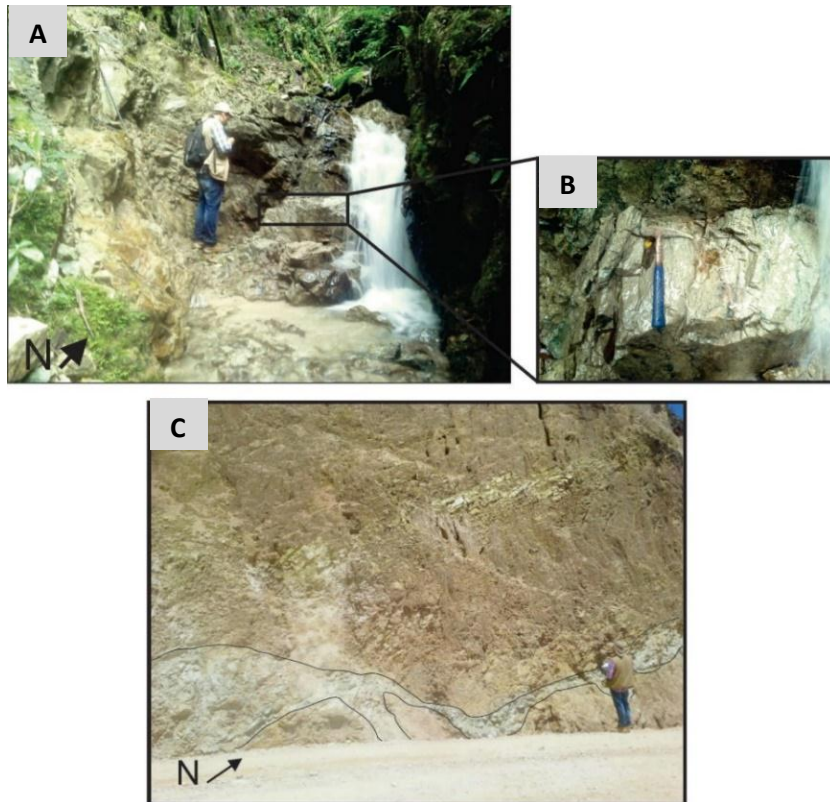
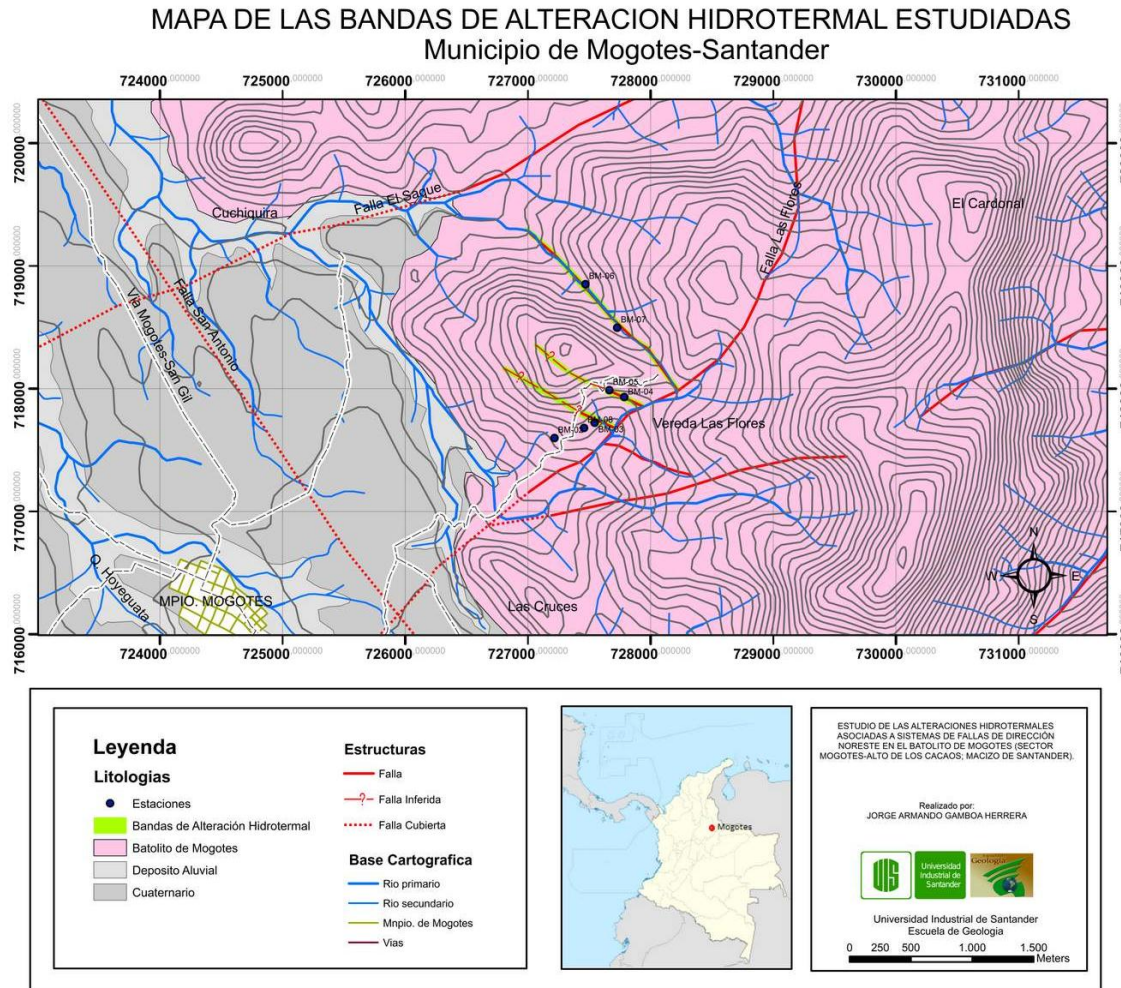


Figura 8. Esquema geológico de la zona de estudio.



5.2 MICROSCOPIA ÓPTICA: ESTUDIO PETROGRÁFICO Y MINERALÓGICO

El estudio mineralógico-petrográfico de las diferentes paragénesis mineralógicas en las bandas de alteración, es mostrada a continuación en un orden cronológico propuesto por el autor, describiendo en detalle los distintos eventos de alteración hidrotermal.

Inicialmente se describe una etapa ígnea, compuesta por los eventos de formación de rocas asociadas a la fase ortomagmática: monzogranito, pegmatitas graníticas y diques de aplita; luego se expone la fase sub-volcánica definida por la presencia de las Riolitas; seguidamente se caracterizan desde un punto de vista mineralógico las alteraciones hidrotermales.

En aras de facilitar la descripción de la mineralogía asociada a las franjas de alteración hidrotermal, a continuación se señalan las abreviaciones aquí utilizadas, las cuales fueron tomadas de Kretz (1983).

(Qtz: Cuarzo, Fld K: Feldespato Potásico, Chl: Clorita, Ep: Epidota, Bt: Biotita, Rt: Rutilo, Zrn: Zircón, Ser: Sericita, Pl: Plagioclasa)

5.2.1 Etapa Ignea-Ortomagmatica

A. Evento Monzogranítico [Qtz+Fld K+Plg+Bt+Ep+Rut+Zr]

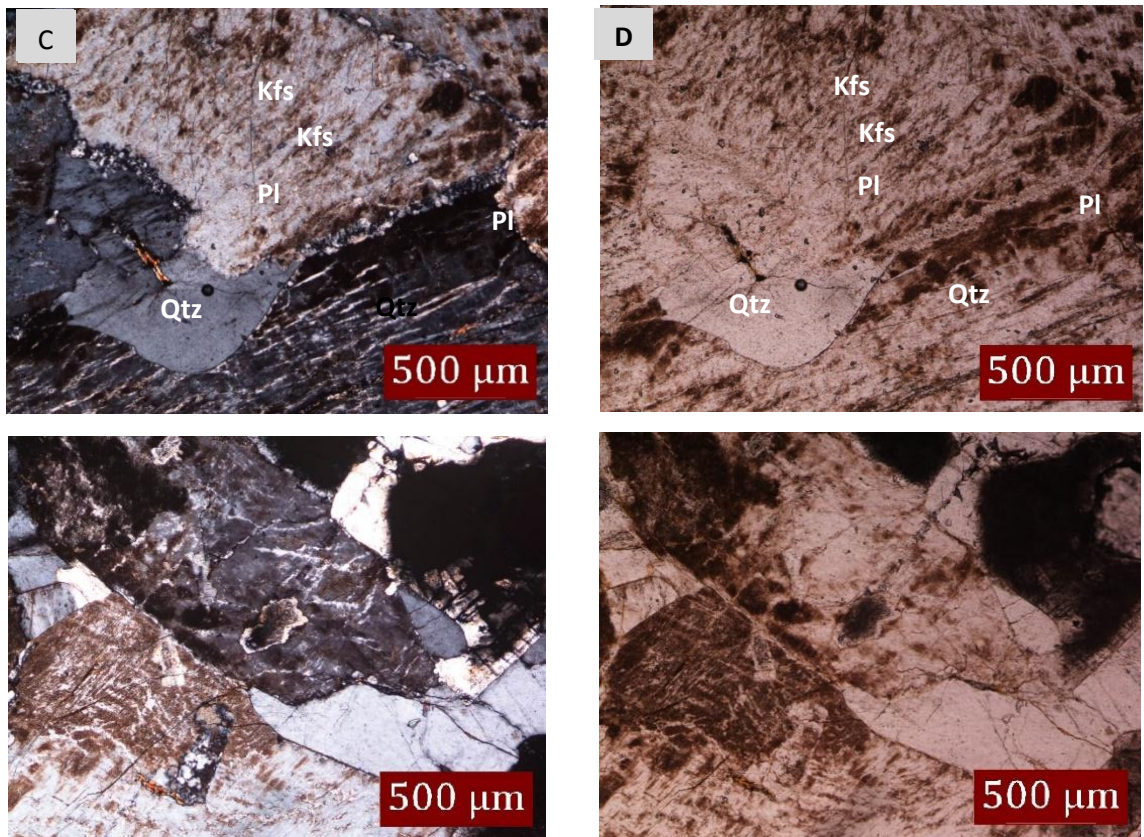
Es definido por la génesis de una roca holocristalina, con textura fanerítica, tamaño de grano grueso (5-30mm) y equigranular, los minerales primarios presentes son: Cuarzo, Feldespato Potásico (con lamelas de exsolución tipo pertita), Plagioclasa y Biotitas, también se encuentran minerales accesorios como el Rutilo y el Zircón, según Streckeisen (1979) se clasifica composicionalmente como un monzogranito cerca al límite con el sienogranito.

Composición mineralógica del monzogranito:

- **Cuarzo 35%:** Individuos incoloros, euhedrales a subhedrales, con tamaño de grano variable entre 2mm y 4mm, en contactos netos y algunos cristales fracturados.
- **Feldespato potásico 35%:** Cristales euhedrales a subhedrales, con tamaño de grano variable de 1,5mm a 3 mm, en algunos casos se observa la macla de Carlsbad, comúnmente presentan lamelas de exsolución tipo pertita y de exsoluciones de plagioclasas subhedrales a anhedrales con textura sieve (tamiz). Generalmente se encuentra alterado a caolín (muy posiblemente a consecuencia de procesos supérgenos).
- **Plagioclasa 10%:** (Andesina) Cristales euhedrales a subhedrales, de forma tabular, con tamaño de grano variable de 0,75mm a 2,5mm, presenta maclado polisintético, no presenta zonación, en las zonas alejadas de las bandas de alteración algunas plagioclasas presentan una leve alteración a sericita indicando que el fluido ha circulado hasta esas zonas.
- **Biotita 5%:** se presenta como individuos euhedrales y en algunos casos agregados de cristales euhedrales, de forma tabular, con tamaño de grano variable de 0,5mm a 1mm, con leve pleocroísmo y típicamente se encuentra reemplazada por clorita.
- **Opacos 2%:** Cristales euhedrales, con contactos rectos y netos, con tamaño de grano variable 0,25mm a 01mm y generalmente presenta estados de oxidación hacia los bordes.

- **Rutilo 1%:** Cristales anhedrales a subhedrales, en nicoles paralelos se observa de color naranja, con alto relieve, típicamente fracturado y con tamaño de grano 0,50 mm.

Figura 9. Pertitas en lamelas y en parches, A y B- Aspecto típico de la cuarzomonzonita del BM, Se observa la textura fanerítica de la roca, con cristales euhedrales a subhedrales. También es posible ver las lamelas de exsolución presentes en los feldespatos potásicos y el reemplazamiento de plagioclasas a sericitas asociados al evento de alteración Qtz+Ser. C y D- Pertita (Plg con textura sieve).



5.2.2 Etapa Ignea Pegmatítica y Formación de Rocas Filonianas

A. Evento de Pegmatita Granítica [Qtz+Fld K]

Se caracteriza por la generación de pegmatitas graníticas compuestas únicamente por cristales de Cuarzo y Feldespato potásico, no se observa la presencia de micas. A nivel de afloramiento se reconoce su disposición en diques.

Composición mineralógica de la Pegmatita:

- **Cuarzo:** Individuos incoloros, euhedrales, de habito prismático, con tamaños de grano variables entre 5cm y 7cm, algunos granos de cuarzo registran el evento hidrotermal en su estructura mediante rellenos de fracturas.
- **Feldespato Potásico:** Individuos euhedrales, de habito tabular, de color rosa, con tamaños de grano variable entre 3cm y 7cm, con contactos rectos y netos.

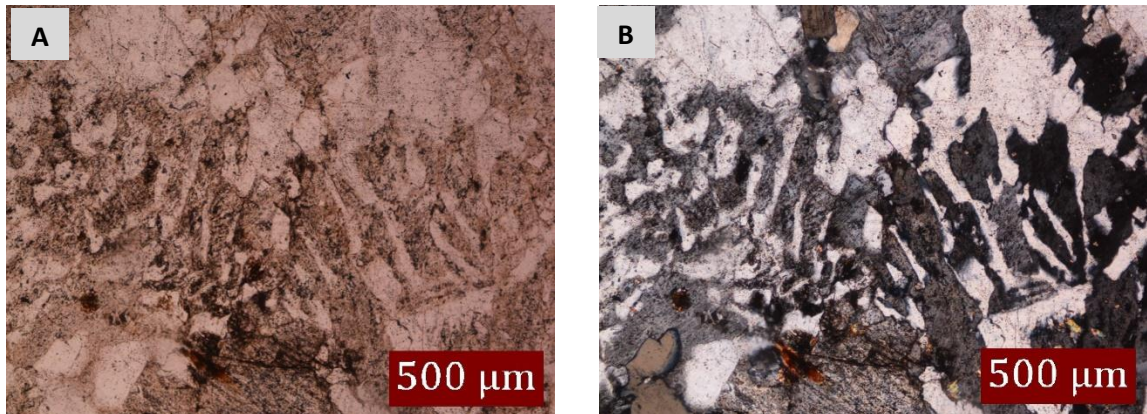
B. Evento de Aplita [Qtz+Plg+Fld K]

Este cuerpo se caracteriza por estar compuesto por cristales subhedrales de Feldespato potásico, Plagioclasa y Cuarzo, no presenta Biotita, se pueden describir como micro-leucogranitos, el tamaño de los cristales es de grano fino, predomina la textura micrográfica, la cual genera crecimiento de cuarzo en feldespato potásico (ortoclasa).

- **Feldespato Potásico (ortoclasa):** Cristales subhedrales, comúnmente presentan cristalizaciones de cuarzo anhedral sobre su estructura.
- **Plagioclasa:** Cristales subhedrales, con tamaños de grano variables entre 0,75mm y 2,5mm, presenta maclado polisintético y no presenta zonación.

- **Cuarzo:** Individuos incoloros, euhedrales a subhedrales, con tamaños de grano variables entre 2m y 4mm y de contacto neto.

Figura 10. A y B. Microfotografía en nicoles cruzados y paralelos respectivamente mostrando la textura micrográfica (muy posiblemente por procesos de enfriamientos adiabáticos).



5.2.3 Etapa Ignea Sub-Volcanica

A. Evento magmático relacionado con la formación de diques Rioliticos [Qtz+Plg+Fld K+Bt]

Cuerpo ígneo intrusivo, composicionalmente se caracteriza como una Riolita con textura afanítica microcristalina (0,5mm - 10µm), compuesta por cristales anhedrales a subhedrales, de fábrica equigranular, los minerales primarios presentes son: Cuarzo, Plagioclasa, Feldespato potásico (Sanidina), Biotitas y minerales opacos; como minerales secundarios tenemos: Clorita (producto de la alteración de las Biotitas) y Óxidos de hierro (oxidación de los minerales opacos).

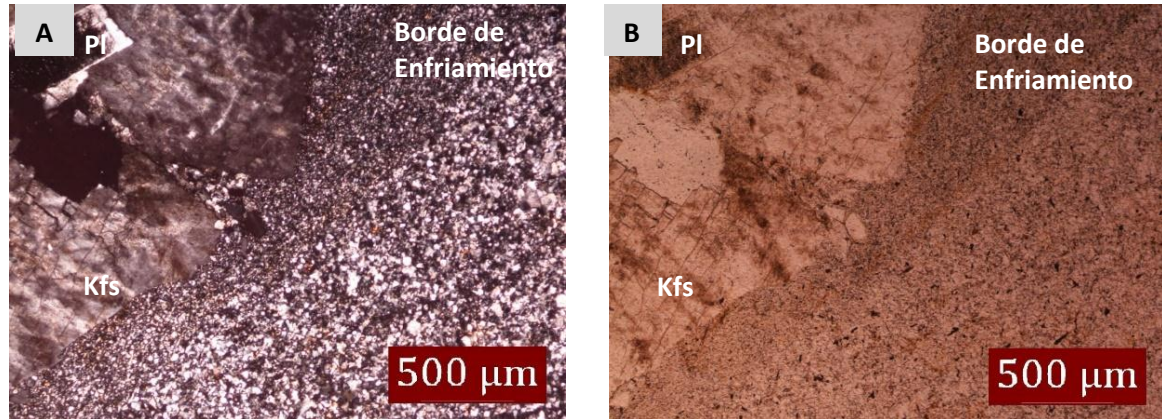
En la Riolita se encuentran xenolitos compuestos por biotitas (parcialmente cloritizada), plagioclasas (alteradas a sericita), opacos y feldespato potásico, estos son evidencia de que el monzogranito es un evento anterior a la Riolita.

El contacto con el Monzogranito es neto y recto, además presenta un borde de enfriamiento, implicando un ascenso rápido del flujo riolítico cuando el monzogranito estaba con el mayor grado de cristalización (más frío).

Composición mineralógica de la Riolita:

- **Cuarzo 25%:** Cristales anhedrales, de tamaños que varían de 0,02mm a 0,15mm.
- **Plagioclasa 53%:** Cristales subhedrales-anhedrales, tabulares, de tamaño variable entre 0,15cm a 0,02mm.
- **Feldespató Potásico 15%:** Cristales anhedrales a subhedrales, de tamaños que varían de 0,15mm a 0,02 mm.
- **Biotita 5%:** Cristales euhedrales tabulares de tamaños variable entre 0,01mm y 0,06mm, se encuentran parcial o completamente alterados a clorita.
- **Opacos 2%:** Cristales de tamaños variables entre 0,01 mm a 0,05 mm, se encuentran oxidándose a hematita.

Figura 11. A Y B. microfotografía en nicoles cruzados y paralelos respectivamente mostrando el contacto recto y neto entre la Riolita y el Monzogranito evidenciando un leve borde de enfriamiento caracterizado por la presencia de granos más finos al contacto del monzogranito.



5.2.4 Etapa Alteración Hidrotermal Sub-Epitermal

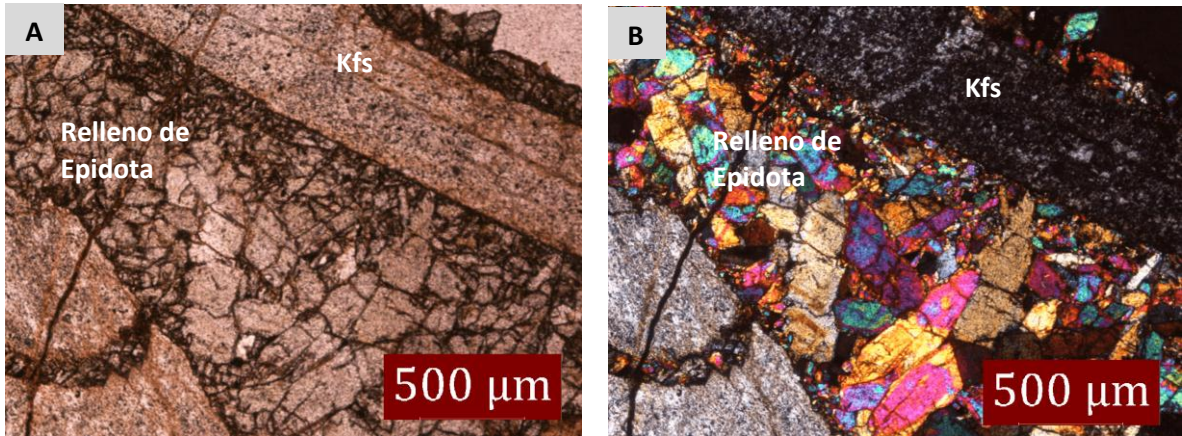
A. Evento de Epidotización [Ep]

Hasta el momento este evento únicamente es reportado en las pegmatitas graníticas presentes en las bandas de alteración hidrotermal, donde se observa la textura de brecha, generando clastos angulosos de Cuarzo y Feldespato Potásico (minerales de la pegmatita) con una matriz compuesta por cristales de Epidota.

De lo anterior se puede deducir un ingreso de fluido rico de epidota en la pegmatita granítica, cuando ésta se encontraba en estado sólido. Cabe mencionar que éste fluido cristaliza dejando un borde de enfriamiento, mostrando hacia el contacto una disminución del tamaño de los cristales muy marcada. La composición mineralógica es definida únicamente por:

- **Epidota:** Individuos incoloros de hábito prismático y granular, euhedrales, de tamaños que varían entre 0,5 y 2cm, de geometría bien definida, con contactos rectos y netos.

Figura 12. A Y B. microfotografía en niculos cruzados y paralelos respectivamente, mostrando el aspecto típico del evento de epidotización, formadas muy posiblemente a consecuencia de alteraciones hidrotermales deutéricas.

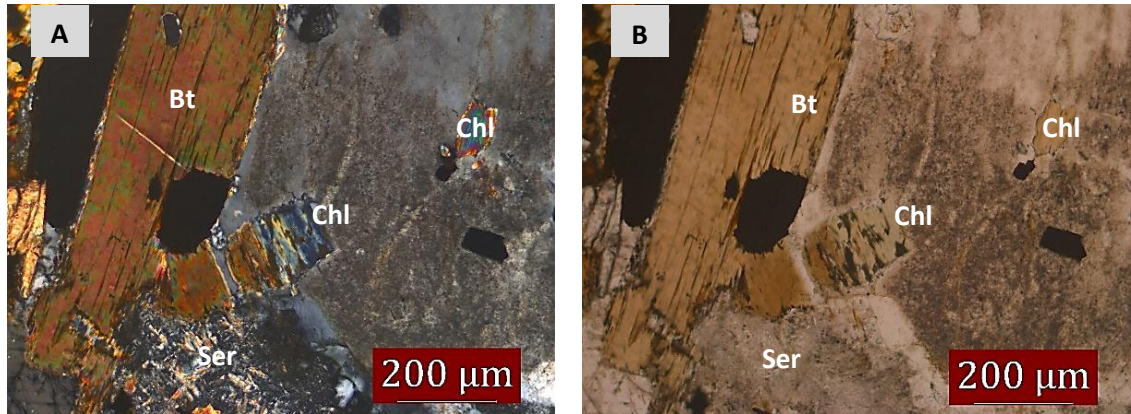


B. Evento de Cloritización [Chl]

Éste se genera mediante el proceso gradual de reemplazamiento mineral de clorita a partir de biotitas. La paragénesis de esta alteración solo está compuesta por clorita.

Clorita: mineral de alteración formado a partir de la Biotita, se presenta como Individuos pleocroicos de color verde, con birrefringencia azul anómalo, los cristales son euhedrales, de forma tabular alargada, con un plano de exfoliación en una dirección, y con presencia de la textura sagenítica (presencia de opacos en la estructura de la clorita).

Figura 13. A Y B. microfotografía en niculos cruzados y paralelos respectivamente mostrando la alteración clorítica donde se observa el reemplazamiento total y parcial de los cristales de biotitas a clorita. En la parte inferior de la microfotografía se observa el evento de alteración Qtz+Ser, en este caso se caracteriza por procesos de reemplazamiento a través de las maclas.



C. Evento de alteración Chl+Ep+Qtz+Ser+Clc

Esta alteración es generada por procesos de interacción fluido-roca, donde la paragénesis es Chl+Ep+Qtz+Ser+Clc, y asociada a la alteración se encuentran vetillas tipo Qtz+Chl y vetillas de Clc.

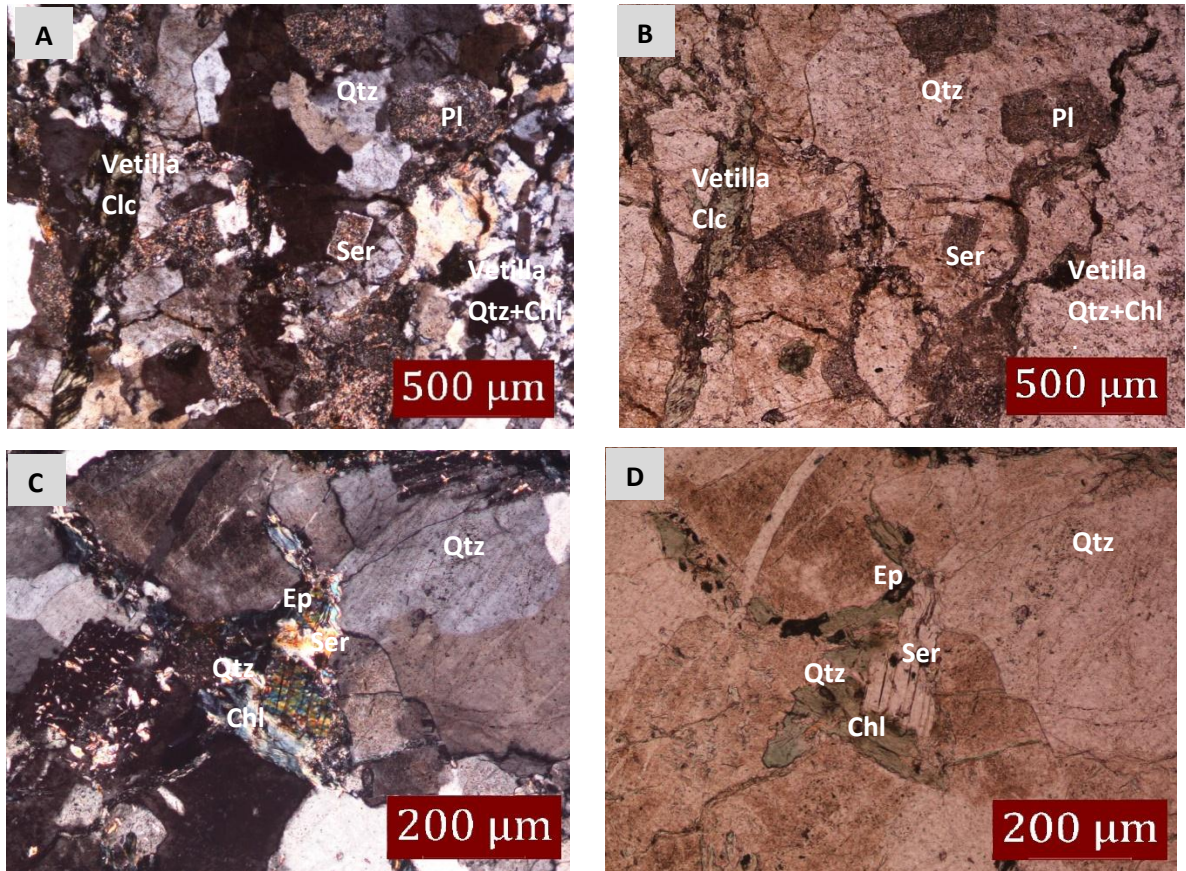
Las vetillas de Qtz+Chl son compuestas por agregados policristalinos de cuarzos con extinción ondulosa y cloritas radiales, presentan una textura de crecimiento de venas bajo condiciones dinámicas, poseen bordes de contacto sinuosos y un espesor de aproximadamente 3mm. Las vetillas de Clc presentan un espesor de 1mm, son rectas, con contactos netos y únicamente están compuestas por cristales de clinocloro. El evento de alteración Chl+Ep+Qtz+Ser+Clc se caracteriza por la siguiente composición mineralógica:

- **Clorita:** Individuos de color verde pálido, presenta leve pleocroísmo, cristales euhedrales a subhedrales, hábitos tabulares, con tamaño variable entre 0,1mm a 0,4 mm. A diferencia de la Clorita mencionada en el anterior evento, esta no

presenta textura saignée y no se genera por remplazamiento a partir de Biotita.

- **Clinocloro:** Individuos de color verde pálido, presenta leve pleocroísmo, cristales radiales, típicamente como relleno de las vetillas, con tamaño variable entre 0,1mm a 0,4 mm.
- **Epidota:** Individuos minerales incoloros, de relieve alto, cristales subhedrales a anhedrales, prismáticos y de tamaños que varían entre 0,1mm a 0,2 mm.
- **Cuarzo:** Cristales incoloros, subhedrales a anhedrales, generalmente de tamaños variable entre 0,1mm a 0,3mm.
- **Sericita:** Cristales incoloros, subhedrales a euhedrales, de habito tabular, de tamaños variable de 0,1mm a 0,4mm.

Figura 14. A y B- microfotografía en nicoles cruzados y paralelos respectivamente, muestra las vetillas de Clc y las vetillas Qtz+Chl. C y D- microfotografía en nicoles cruzados y paralelos respectivamente, mostrando la paragénesis Chl+Ep+Qtz+Ser+Clc.



D. Evento de alteración Qtz+Ser

Este evento está conformado por dos episodios de alteración Qtz+Ser, uno por precipitación directa en las brechas y otro por remplazamiento, existe una relación entre ambos episodios de alteración, ya que el fluido migra de la zona de la brecha (donde precipita) y hacia el exterior de la roca (donde altera las plagioclasas).

Descripción de episodios:

Evento de alteración Qtz+Ser desarrollada por precipitación directa en brecha tectónica:

Caracterizado por la paragénesis Qtz+Ser, principalmente es generado a partir de procesos de deposición directa en los espacios existentes en la roca como brechas, fracturas y zonas cataclásticas, este desarrolla principalmente la coloración verde pálido a las bandas de alteración observadas en los afloramientos. Según las relaciones petrográficas encontradas se puede afirmar que este evento es singenético al evento de metamorfismo dinámico, el cual genera las estructuras por donde estos fluidos escapan.

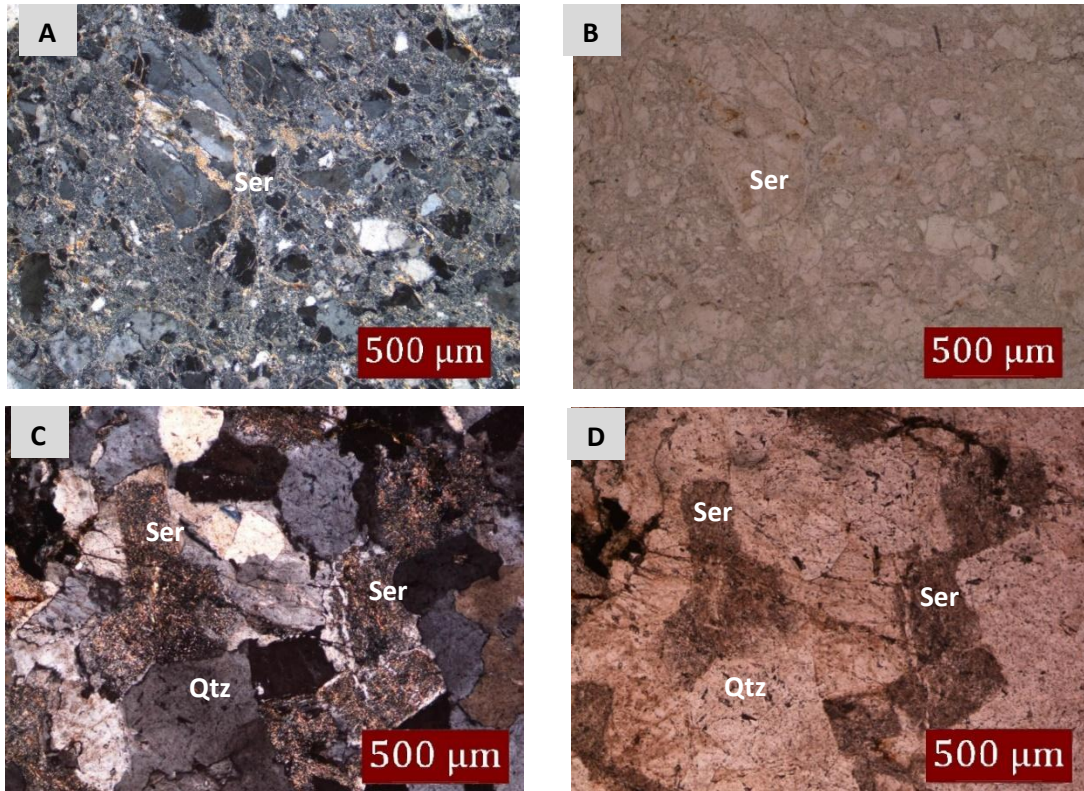
Evento de alteración Qtz+Ser desarrollada por procesos de remplazamiento:

Se caracteriza por la paragénesis cuarzo neoformado y sericita formadas a partir de reemplazamiento de cristales de plagioclasas, también se observa la profusión de esta alteración a través del maclado y de algunas micro fracturas.

Dado que las características mineralógicas entre los procesos de deposición directa y reemplazamiento mineral no varían, la composición mineralógica del evento de alteración Qtz+Ser es:

- **Cuarzo:** Individuos neo formados incoloros, de cristales anhedrales, de pequeño tamaño 0,01-0,02mm.
- **Sericita:** Cristales sin pleocroísmo, incoloros, de relieve bajo y birrefringencia de segundo orden (0,016), de tamaños variable entre 0,01mm a 0,04 mm y raramente cristales de 0,05mm, se encuentra asociado al cuarzo neoformado. Se identifica alterando las plagioclasas de forma aleatoria y en algunos casos entre las maclas.

Figura 15. A y B- microfotografía en nicols cruzados y paralelos respectivamente, mostrando la deposición directa de la alteración Qtz+Ser sobre una brecha hidrotermal, indicando la relación singenética del brechamiento y el escape del fluido. C y D. microfotografía en nicols cruzados y paralelos respectivamente, mostrando la alteración Qtz+Ser generada por el remplazamiento de Plagioclasa, estas alteraciones son posteriores a los eventos de alteración Qtz+Ser debida a procesos de precipitación directa.



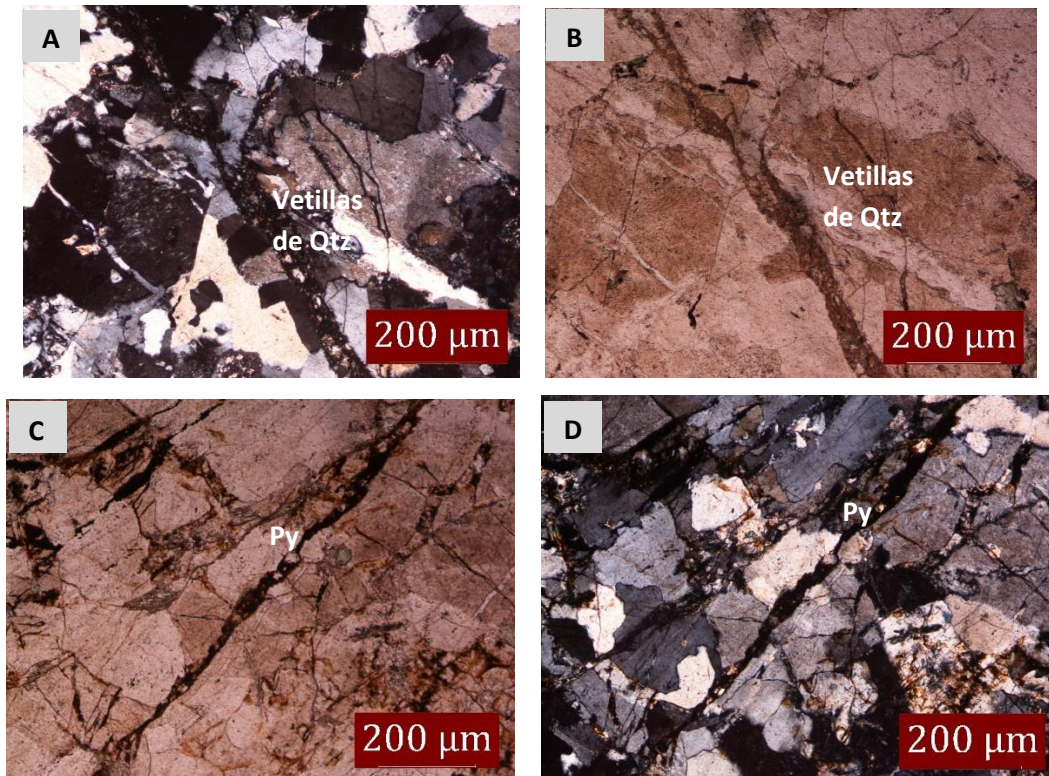
5.2.5 Etapa Alteración Epitermal

A. Evento de silicificación y piritización

Se registran dos etapas, una de silicificación generando vetillas de cuarzo y otra etapa de piritización la cual registra el paso de un fluido precipitando pirita. Ambas etapas pueden asociarse a una alteración de tipo argílica, la cual se confirma con la difracción de rayos X; Al contrastar las características químicas neutras de los

fluidos hidrotermales relacionadas a la etapa sub epidermal con este evento de carácter ácido, se puede sugerir un evento de telescoping sobre la historia de alteraciones que se tiene hasta el momento.

Figura 16. A y B. microfotografía en nicoles cruzados y paralelos respectivamente, mostrando las vetillas de Qtz cortadas por una pequeña y delgada zona cataclástica. C y D. microfotografía en nicoles cruzados y paralelos respectivamente mostrando precipitación de sulfuros en los espacios presentes en la roca.



5.2.6 Etapa Alteracion Supergena

A. Evento de oxidación y caolinización

En cuanto a las alteraciones supergenas que ha sufrido la roca es posible observar procesos de caolinización, donde se promueve la formación aleatoria de caolín en los cristales de Feldespato Potásico (Ortoclasa y Sanidina). También se

puede observar procesos de oxidación, evidenciado por oxidación de minerales opacos.

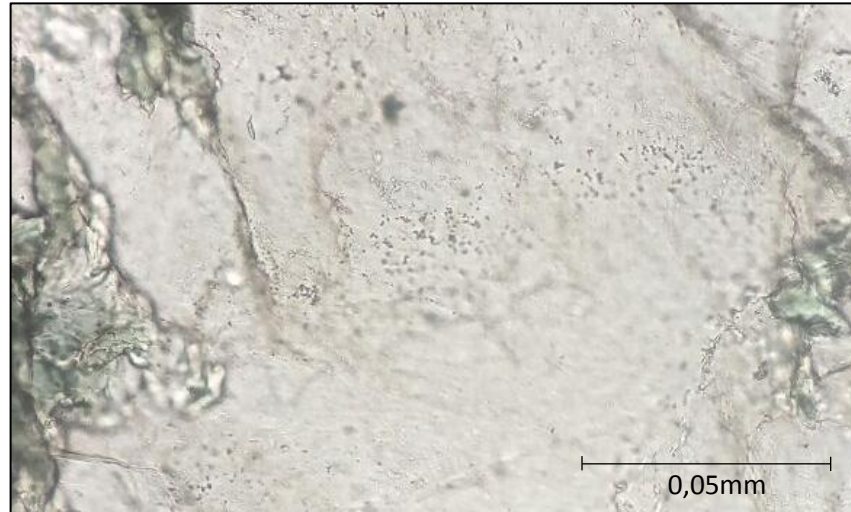
5.3 MICROSCOPIA OPTICA: ESTUDIO DE INCLUSIONES FLUIDAS

Al momento de analizar los rellenos hidrotermales presentes en las bandas verdes de alteración se llega a apreciar que no es posible realizar un estudio petrográfico sobre las inclusiones fluidas, debido a que las IF encontradas son muy pequeñas, menores a 4 μ m (Figura 17), imposibilitando la clasificación y caracterización de estas.

Igualmente, por la razón mencionada en el anterior párrafo, el análisis micro termométrico de las inclusiones fluidas no se realiza debido a que se obtendrían datos que no se pueden asociar a ningún evento, adquiriendo así datos aleatorios, no adecuados para generar un modelo de formación.

Aun así en este trabajo sirve para confirmar la presencia escasa y pequeñas inclusiones fluidas en las vetillas presentes en las bandas de alteración.

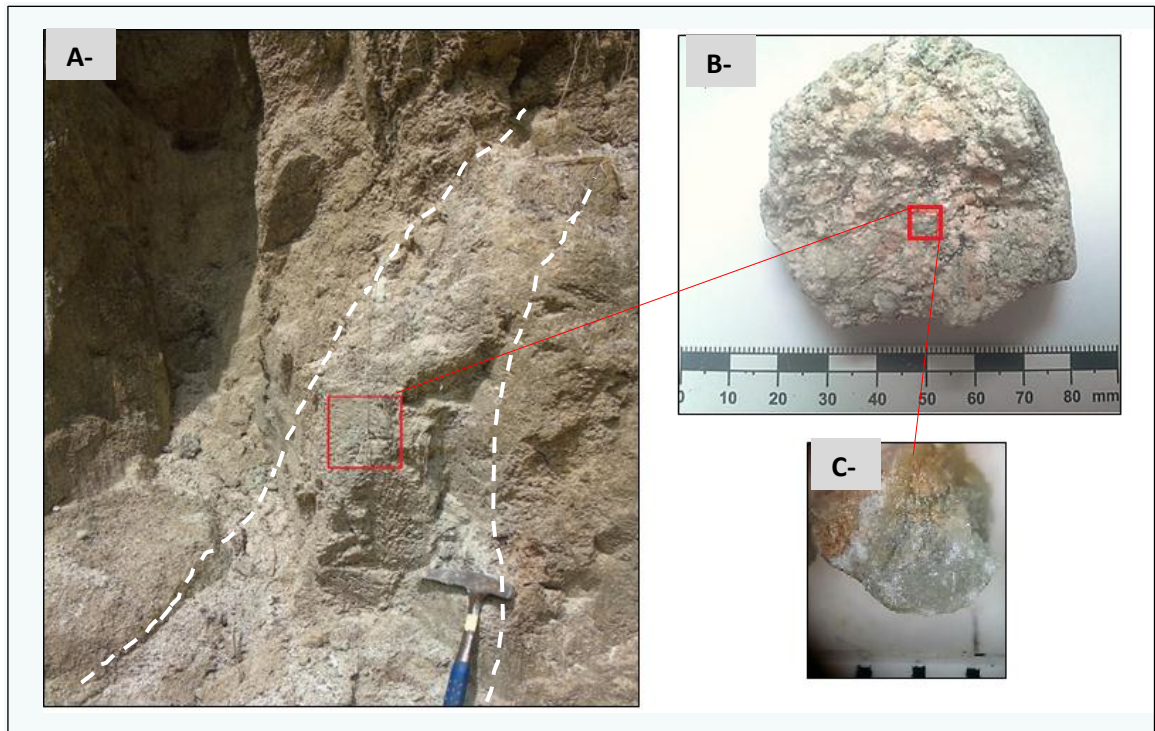
Figura 17. Microfotografía tomada a 40X, mostrando el aspecto típico de las inclusiones fluidas, al centro de la imagen se observan pequeñas inclusiones fluidas posiblemente monofásicas.



5.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

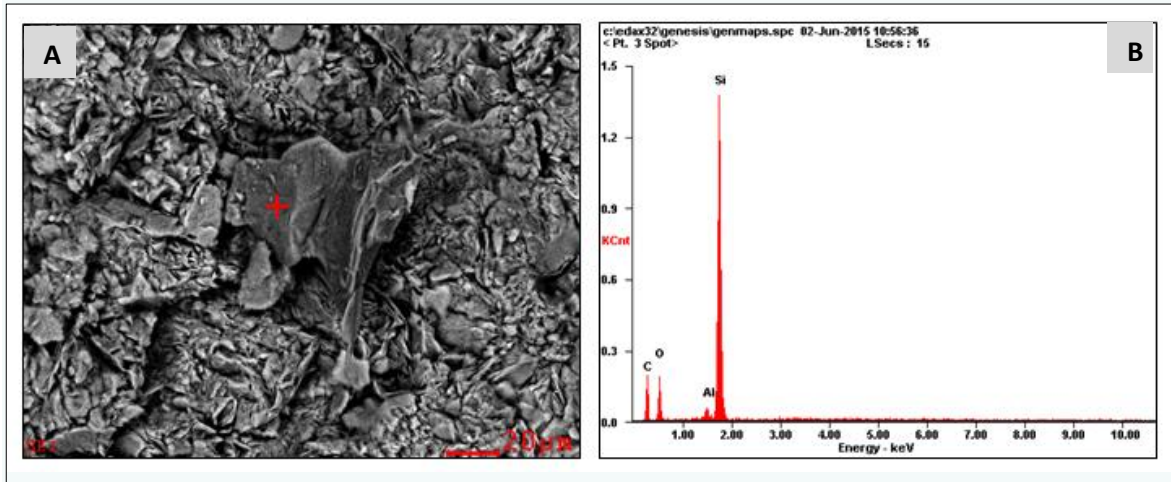
5.4.1 Alteracion Qtz+Ser En este apartado se analiza un fragmento de la alteración cuarzo+sericita localizado en la estación BM-05, con el fin de corroborar su mineralogía y conocer sus características texturales (figura 18).

Figura 18. Secuencia de fotografías de la muestra utilizada para el estudio de la alteración Qtz+Ser a través del SEM. A- Fotografía del afloramiento de la banda de alteración, de donde se extrajo la muestra examinada, en líneas punteadas blancas se delimitan las bandas de alteración. B- fotografía de la muestra de mano de la alteración, extraída del cuadro rojo en la figura A. C- Fotografía tomada a través de un estereomicroscopio binocular donde se observa el fragmento analizado.



Con el análisis de microscopía electrónica se corrobora la presencia de los minerales que conforman la paragénesis Qtz+Ser. En primera instancia se identifica cuarzo de aspecto amorfo, como indicador de cristal de cuarzo neoforado (Figura 19), demostrando así la circulación de soluciones hidrotermales transportando sílice, entre otros solutos.

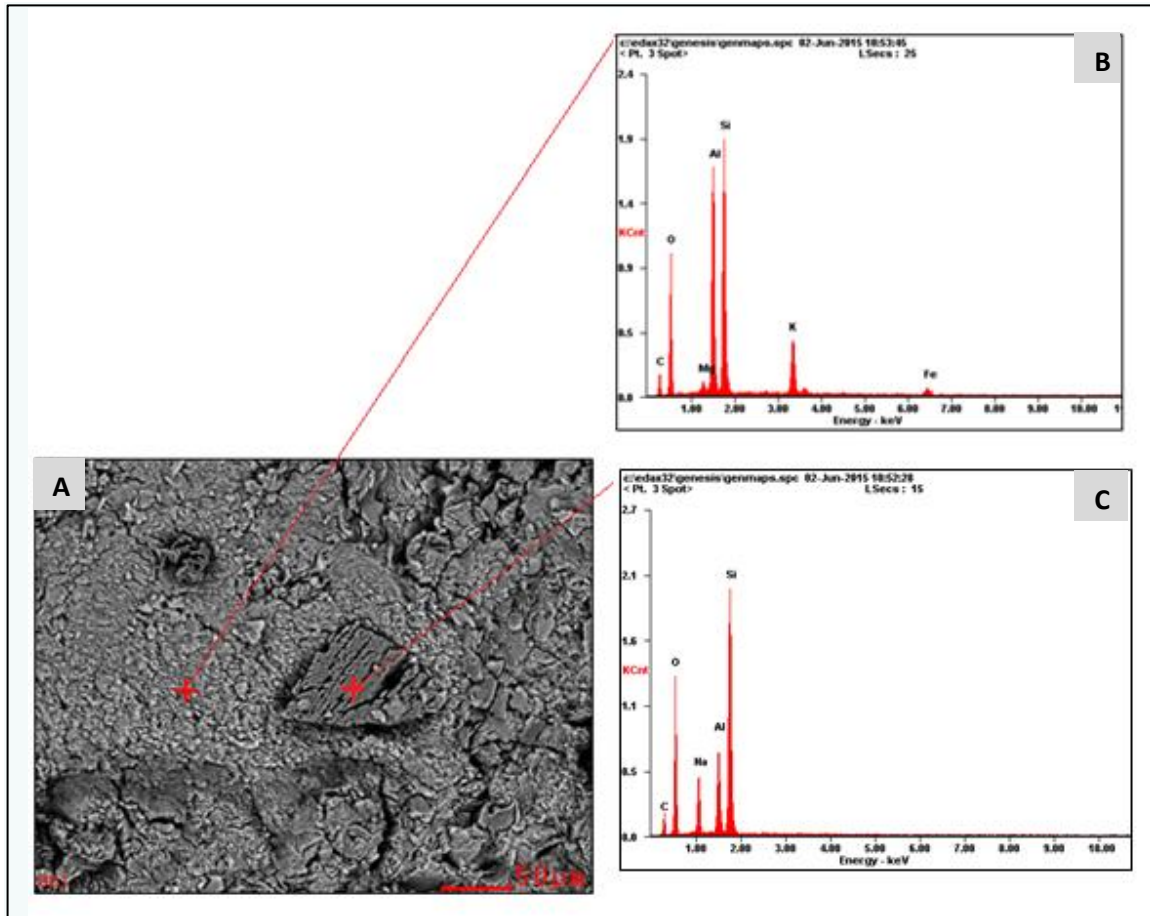
Figura 19. A- Cristal de cuarzo neoformado, obsérvese su morfología irregular. B- difractograma realizado por el EDS mostrando alto contenido en sílice y oxígeno, verificando así la composición del cuarzo.



Por medio del EDS se evidencia la composición química del mineral arcilloso que se hace parte de la matriz en la figura 20; este pertenece a un aluminosilicato y según las características químicas corresponde a una sericita con un pequeño contenido de hierro (Figura 3A y 3B), se tiene así la paragénesis de la alteración cuarzo neoformado y sericita.

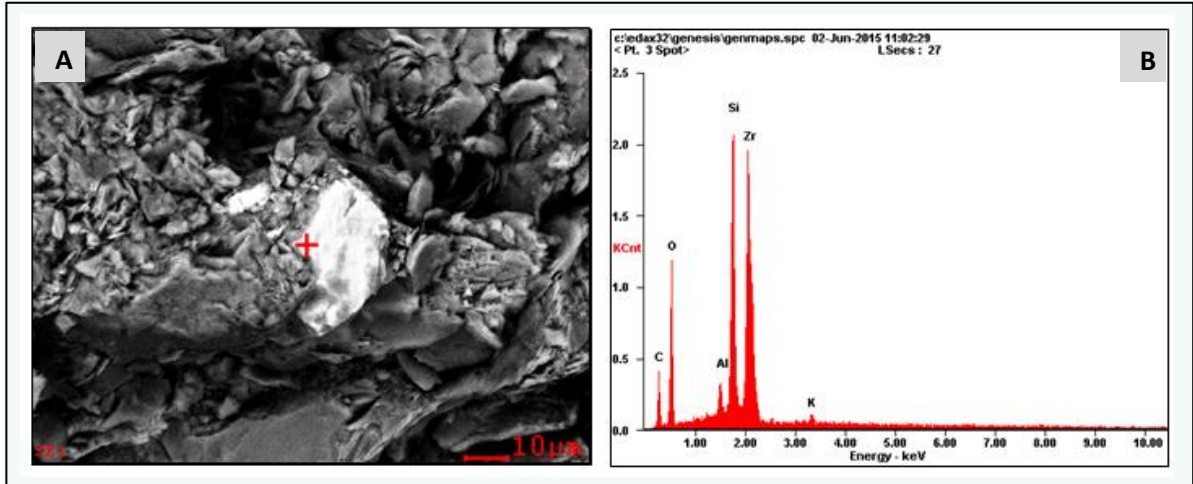
Se identifica un relicto de cristal de Plagioclasa sódica con textura (de alteración) corroída, indicando el paso de un fluido hidrotermal por la roca (Figura 3A y 3C).

Figura 20. A. Relicto de Plagioclasa mostrando bordes corroídos, en la matriz se observan sericita y cuarzo neoformado. B- Aluminosilicato con potasio y hierro en su estructura, corresponde a una sericita con impureza de hierro. C- Difractograma indicando la presencia de una Plagioclasa sódica muy posiblemente relicto del evento ígneo.



Además se encuentran relictos de zircones ígneos (Figura 21), lo cual corrobora que la roca parental, antes de sufrir el evento de alteración hidrotermal era exclusivamente una roca de origen ígnea.

Figura 21. A- Relicto de un Cristal de Zircón perteneciente muy posiblemente a la fase ígnea de cristalización del monzogranito. B- Difractograma certificando la presencia del Zircón.

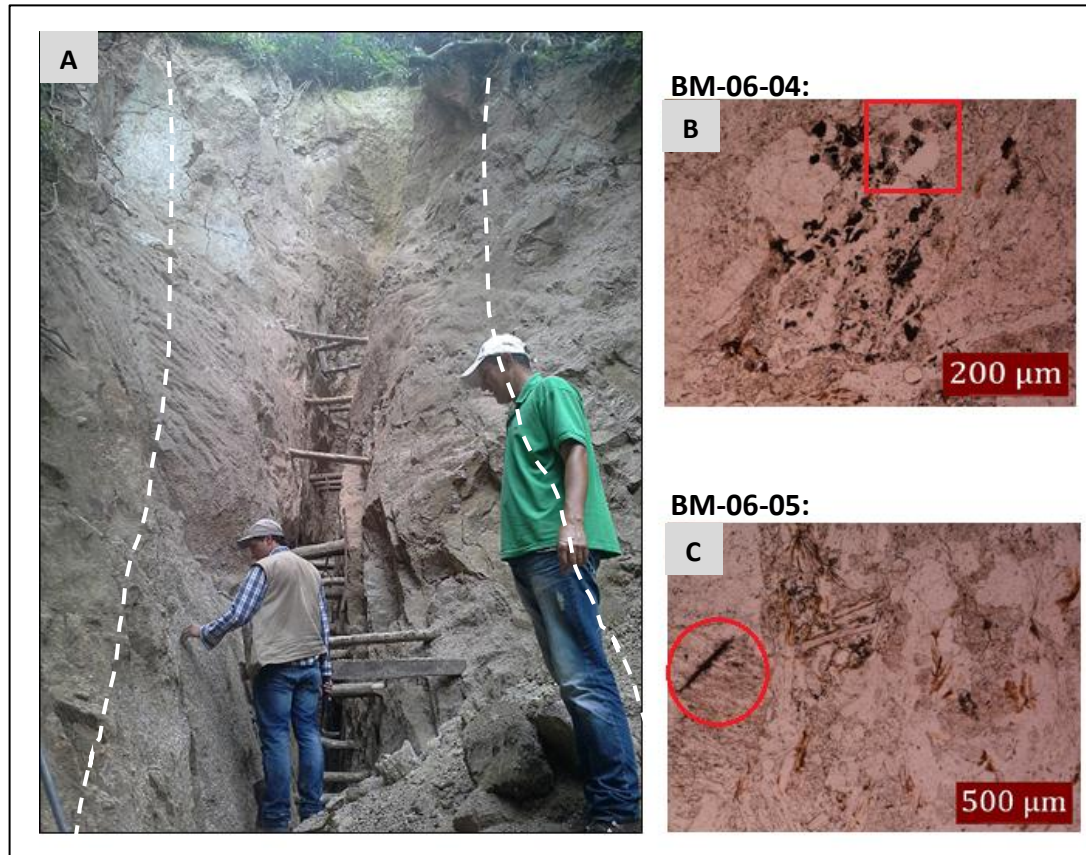


Del análisis realizado empleando el SEM sobre la porción de muestra obtenida a partir de la alteración cuarzo sericita, se encontró que la pieza estudiada presenta minerales primarios (asociados al evento ígneo) como; plagioclasas, las cuales son de carácter sódicas y se encuentran alteradas, y también se encontraron zircones, estos dos minerales indica que el protolito de la roca es de origen netamente ígneo y por relaciones de campo se asume que hace parte de las cuarzomonzonita que afloran en el BM. Sobre esta roca se ha encontrado la presencia de la alteración hidrotermal Qtz+Ser, donde la tonalidad verde de la sericita podría estar relacionada a las impurezas de hierro en su estructura.

5.4.2 Minerales de tierras raras Se analiza la superficie limpia de dos láminas delgadas sin cubreobjetos, la cuales se realizan a partir de la estación BM-06, en estas dos secciones se encontró la presencia de minerales con contenido de Y, Nb, Ti y otras trazas de tierras raras. A continuación en la Figura 22 se muestra el lugar de ocurrencia de estos minerales.

Figura 22. A- Aspecto del afloramiento de la estación BM-06, en líneas punteadas blancas se observan las bandas de alteración sericitica de donde

encontró la presencia de tierras raras. B- microfotografía de la sección BM-06-04 donde se resalta en un cuadrado rojo, la zona donde se manifiestan los minerales con tierras raras en forma de parches. C- Sección BM-06-05, donde se resalta en un círculo rojo, la zona donde se manifiestan los minerales con tierras raras rellenando fracturas.

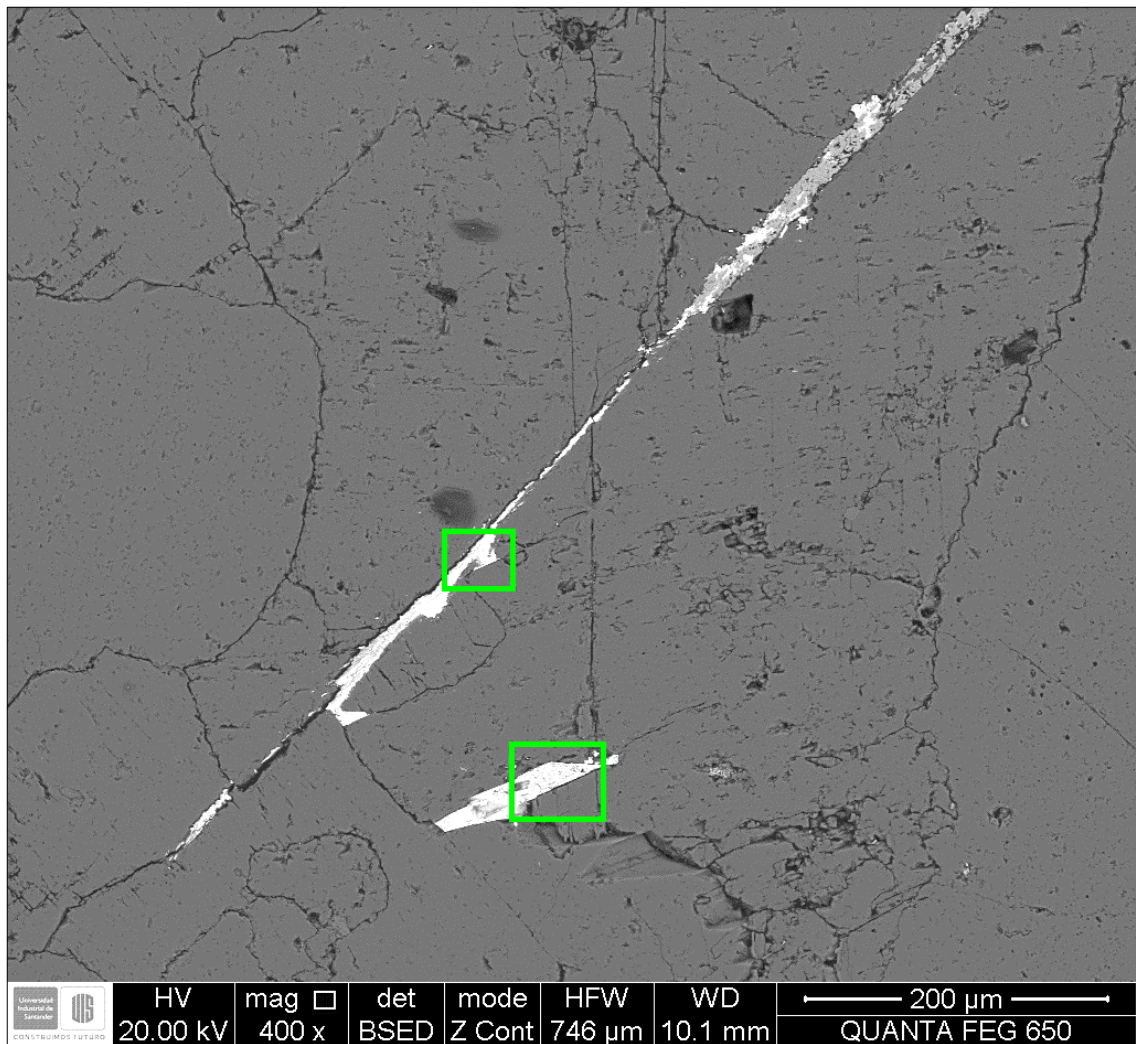


Esencialmente el estudio por medio del SEM revela la presencia de un nuevo evento, posiblemente relacionado a las fases terminales de la cristalización del batolito, manifestado por la presencia de óxidos de titanio, Fosfatos, zircones, aluminosilicatos de hierro y calcio (Epidotas) y Niobatos.

Este nuevo evento presenta cantidades anómalas de elementos de tierras raras los cuales principalmente se movilizan en los fosfatos, (Monacita-Ce, Xenotima), epidotas (Alanita) y Niobatos (Ferguzonita?). El Nb, Y y Ti son los elementos que más caracterizan los minerales anteriormente mencionados, pero también se

reconocen Ce, Pr, Sm, Eu, Gd, Dy, Er y Yb, lo que indica que tenemos un fluido que presenta una mezcla, tanto de tierras raras ligeras (tierras de cerio) como de tierras raras pesadas (tierras de ltrio). También es posible observar la presencia de picos propios de elementos tales como Ta, U, Th. Estos elementos de tierras raras se disponen rellenando fracturas presentes en el monzogranito como se ve en la Figura 23.

Figura 23. Fases minerales con contenidos en tierras raras, obsérvese su disposición rellenando fracturas del monzogranito.



Óxidos de Titanio:

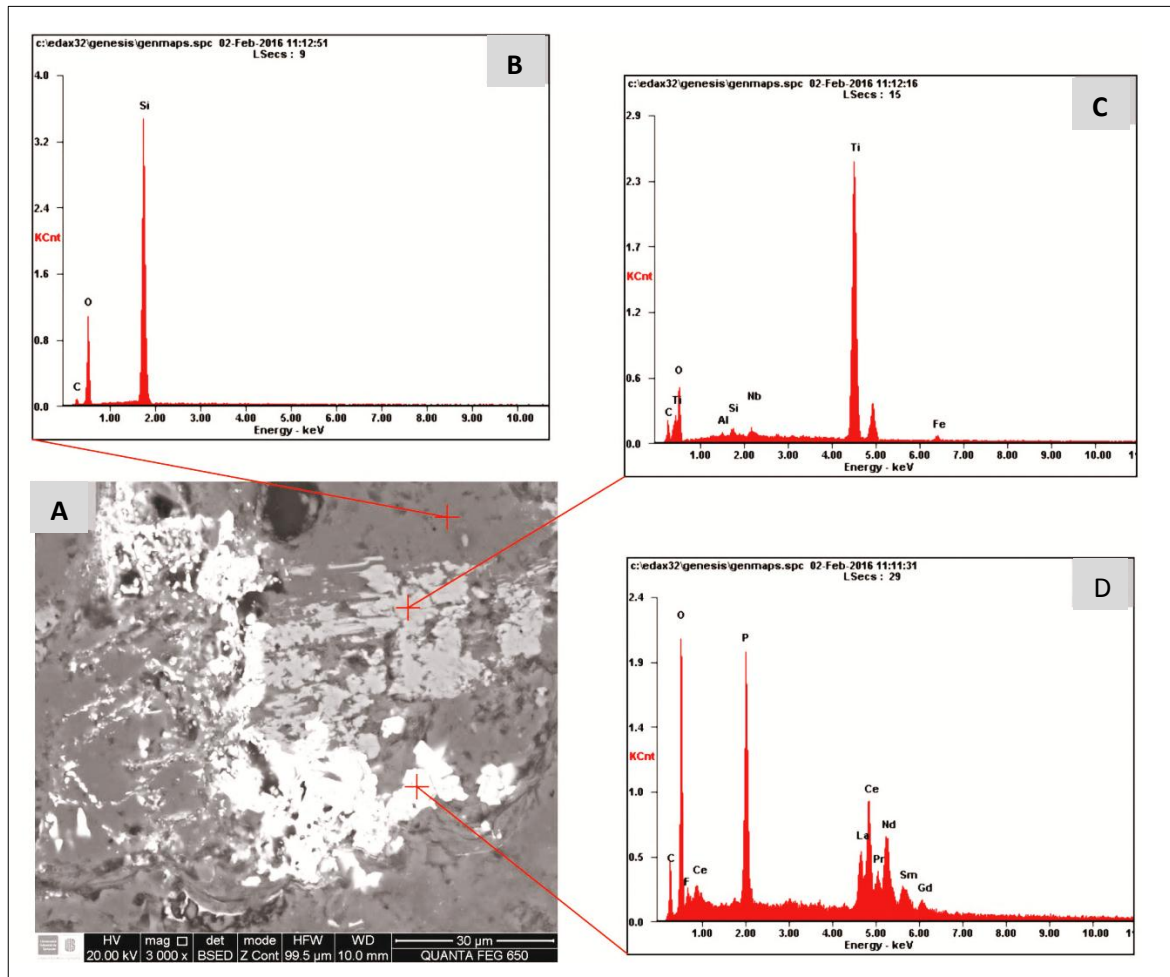
La ilmenita (FeTiO_3) se encuentra en paragénesis con los cristales de flúor-apatitos (monacitas), según el análisis cuantitativo del EDS presenta bajos contenidos de Nb (2,09 % peso), no posee una morfología definida y así mismo se dispone rellenando las fracturas del monzogranito (Figura 24).

Fosfatos (Monacita, Kuralita, Xenotima):

Ya que las tierras raras se encuentran en la estructura de fosfatos, epidotas y niobatos, en la figura 24 se muestra la aparición de fosfatos con tierras raras, este fosfato es posiblemente de tipo kuralita (variedad de monacita rica en Cerio) y presenta cantidades de tierras raras ligeras (La, Ce, Pr, Nd, Sm y Gd). También se observa la presencia de Xenotima $[(\text{Y})\text{PO}_4]$ y de Monacita $[(\text{Ce,La,Di})\text{PO}_4]$.

Los fosfatos que se generan no necesariamente contienen tierras raras, en algunos casos se encuentran flúor-apatitos ricos en calcio en vez de tierras raras, por lo tanto se puede hablar que en el sistema hay una movilización posiblemente de calcio y fósforo por parte del fluido.

Figura 24. Flúor apatitos con contenido en tierras raras, paragenéticamente asociados a óxidos de titanio. A- Se observa en paragénesis el mineral óxidos de titanio y Flúor apatitos. B- Masa compuesta principalmente de cuarzo. C- óxidos de titanio con un contenido de Nb en su estructura. D- Flúor apatito (Monacita tipo Kuralita?) con gran cantidad de tierras raras La, Ce, Nd, Pr, Sm y Gd.

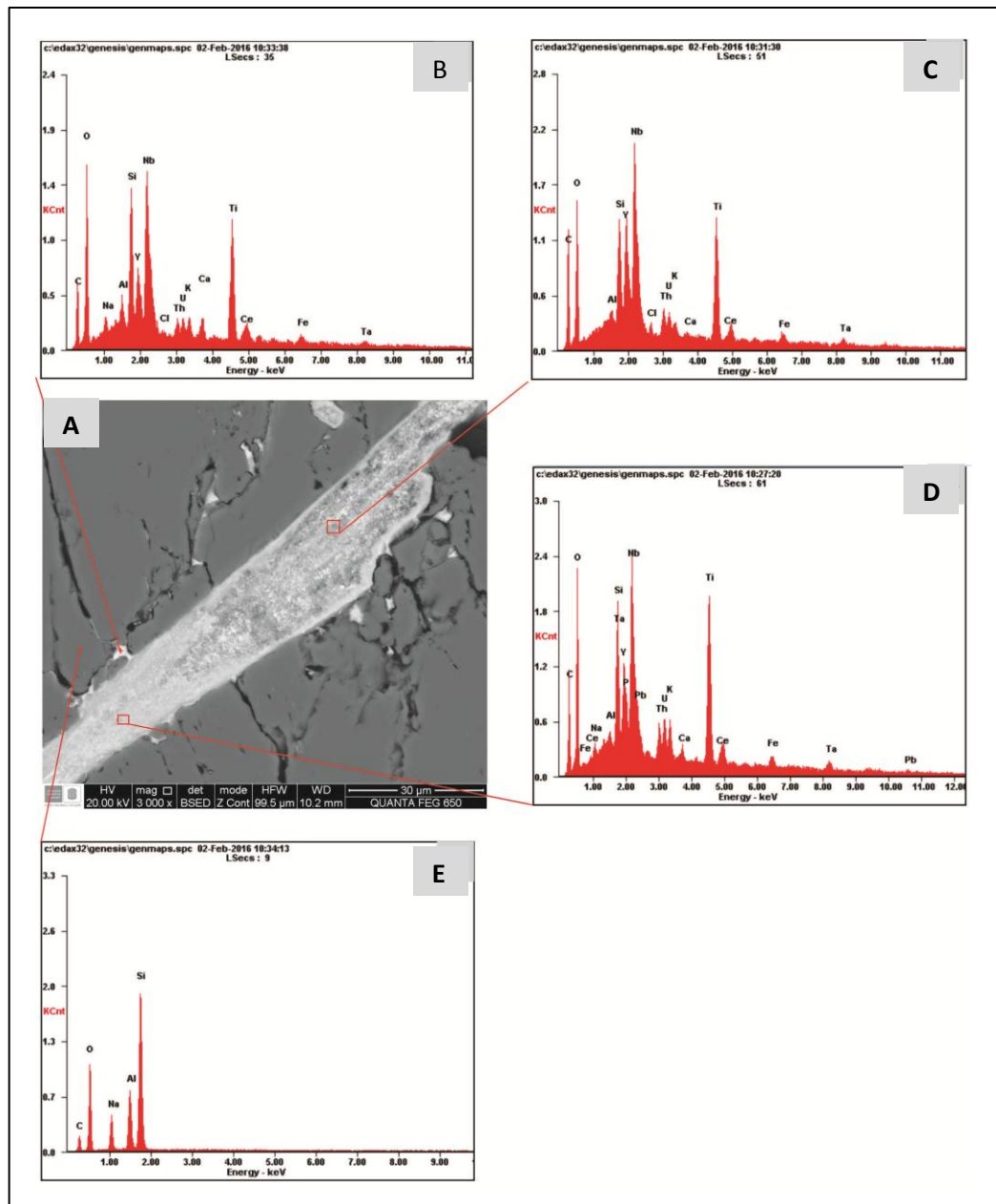


Epidotas? (Alanita?):

Gracias a los análisis de EDS realizados por el SEM, se encontró la presencia de aluminio silicatos de calcio y sodio que presentan trazas de REE, es probable que esta química arrojada por el EDS pertenezca a una Epidota tipo Allanita principalmente con contenido de Itrio $[CaYFe^{2+}Al_2(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)]$, la

disposición espacial de esta fase mineralógica se aprecia rellenando fracturas y en paragénesis con Monacitas de Cerio.

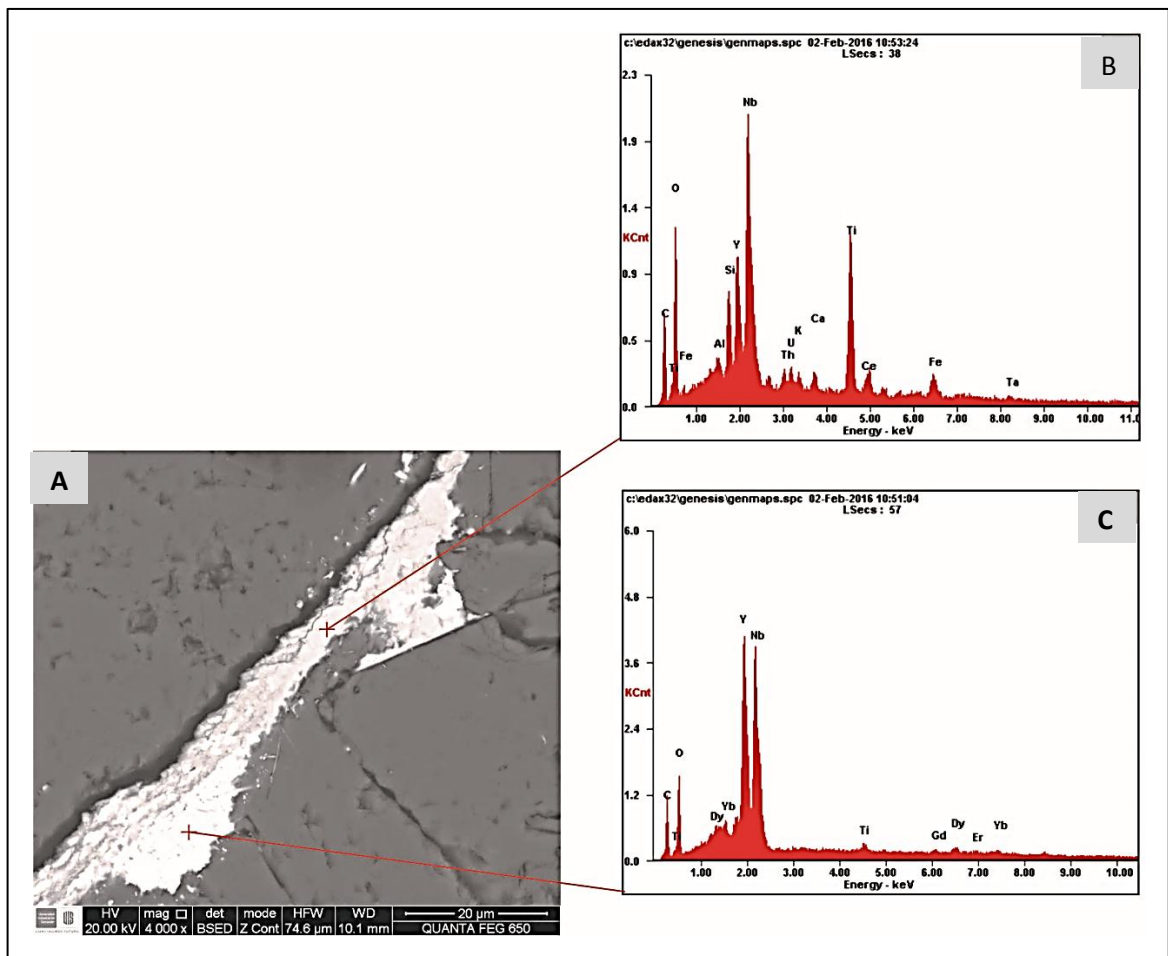
Figura 25. A-Disposición de los minerales B- Aluminosilicatos cálcico y sódico rico en tierras raras principalmente en Y, Nb , Ti, Ce y U (Loparita? O Alanita (Y)?) . C- aluminio silicato cálcico rico en Nb, U, Y y Ti (alanita)y D- Fosfato y silicato con calcio y sodio rico en Nb, Ti, Ta, Ce, U. D- apatito. E- Plagioclasa sódica (andesina?).



Niobatos (Fergusonita?):

Se encuentra un niobato de itrio, posiblemente Fergusonita [YNbO₄], en paragénesis con las allanitas, dentro de su estructura mineral contiene minerales de tierras raras Gd, Dy, Er y Yb.

Figura 26. A- microfotografía mostrando la disposición de los minerales analizados. **B-**óxido de titanio rico en tierras raras, sobretodo el Nb y Y. **C-** Fergusonita.



El nuevo evento reporta principalmente una paragénesis de Alanitas, Monacitas, Óxidos de titanio y Niobatos con contenidos de Nb-Y-Ti y otras trazas de REE, los cuales posiblemente fueron transportados por un fluido de carácter alcalino (?).

Cabe resaltar que este evento presenta una mezcla de tierras raras ligera y tierras raras pesadas.

5.5 DIFRACCION DE RAYOS X

5.5.1 Alteracion Hidrotermal Qtz+Ser La presencia de Cuarzo y Moscovita (Sericita) en los resultados del DRX (Figura 27) corrobora la paragénesis de la alteración analizada, aunque también se encuentra Clorita de Fe-Mg, según la petrografía se descarta que se encuentre en paragénesis con la alteración Qtz+Ser y la presencia de este mineral se puede asumir como una impureza debido a la alteración Ep+Chl+Qtz+Ser+Clc la cual también estaba presente al momento de extraer la muestra para el presente análisis. La manifestación de albita y microclina representan relictos de la roca parental (monzogranito).

Los resultados de DRX arrojan la presencia de fosfatos, causa curiosidad la existencia de esta fase mineral ya que podría asociarse al evento en el cual ocurrió la posible removilización de tierras raras, aun así en este caso no se detectó ninguna.

Figura 27. Resultados de la difracción realizada a la alteración Qtz+Ser (muestra BM-07-01).

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	Si O ₂	010-78-1253	Cuarzo
	Na (Al Si ₃ O ₈)	010-89-6424	Albita
	(Mg ₁₁₋₁₄₈ Fe ₀₋₈₅₂) ((Si ₄₋₉₉ Al ₃₋₀₁) O ₂₀ (OH) ₁₆)	010-75-8790	Clinocloro
	K ₄ (Al ₁₂ Si ₁₂ O ₄₀ (OH) ₈)	010-82-2717	Moscovita
	K Al Si ₃ O ₈	000-19-0932	Microclina

5.5.2 Evento de epidotización Según los datos de difracción no soportan la idea de asociar la etapa de epidotización a una etapa de removilización de tierras raras debido a que no se encuentra la presencia de ningún mineral con contenidos de REE. Este análisis confirma que el evento de epidotización está conformado por la paragénesis de epidota y piemontita.

Figura 28. Resultados de la difracción del evento de epidotización (muestra BM-05-06).

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	$\text{Ca}_2 (\text{Al}_{2.27} \text{Fe}_{0.73}) (\text{Si}_2 \text{O}_7) (\text{SiO}_4) \text{O} (\text{OH})$	010-79-6345	Epidota
	$\text{Ca}_2 (\text{Al}_{2.5} \text{Mn}_{0.5}) (\text{SiO}_4)_3 (\text{OH})$	010-73-7705	Piemontita
	$\text{Fe}_3 \text{O}_4$	010-76-0957	Óxido de Hierro

5.5.3 Vetas DE Qtz+Py En este punto se analizó el halo generado alrededor de las vetas de Qtz+Py. Según los datos de difracción obtenidos (Figura 29) se puede definir que las vetillas de Qtz+Py están asociadas a un evento de argilización, sin conocer si su origen es de carácter epigenético o supergeno ya que no se realizó análisis de cristalinidad del caolín.

Figura 29. Resultados de la difracción del halo presente en las vetillas Qtz+Py (muestra BM-08-01).

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	Si O ₂	030-65-0466	Cuarzo
	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	000-58-2030	Caolinita
	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	000-58-2037	Moscovita
	(K _{0.936} Na _{0.06} Ca _{0.01}) (Al _{1.83} Fe _{0.16} Mg _{0.01}) (Si _{3.1} Al _{0.9}) O ₁₀ (OH) ₂	010-82-3726	Moscovita

5.5.4 Ensayo al fuego Se analiza por medio del ensayo al fuego un sistema de vetillas compuestas por cuarzo y pirita, de dirección N20W/40SE, y de espesor 5cm aproximadamente, su morfología es recta y posee contactos netos (Figura 30).

Figura 30. Vetillas Qtz+Py.



Según el ensayo al fuego realizado por la escuela de metalurgia de la Universidad Industrial de Santander el contenido de oro y plata por tonelada presente en el material que compone las vetillas es de 16g/Ton y 33g/Ton respectivamente. Evidentemente, estos datos deben ser corroborados por medio de otras técnicas analíticas, debido a que el método aquí utilizado es comparativamente menos preciso y exacto (semi-cuantitativo). Adicionalmente, es posible que existan adicionalmente algunas aleaciones que pudieran enmascarar los resultados reales aquí reportados.

Las vetillas analizadas no se encuentran estrictamente en las bandas de alteración, pero sobre estas se observa el paso de un fluido que genera silicificación y piritización en sistema, por lo tanto se asume que se puede correlacionar al mismo evento (evento de argilización), los datos estructurales de las bandas y de las vetas poseen el mismo rumbo, lo que aportaría otro dato para poder asociar estos dos eventos.

Cabe mencionar que los eventos hidrotermales presentes en las bandas son de características neutras, y contrastan con este nuevo evento de carácter ácido, por lo tanto se sugiere catalogar este evento como un telescoping.

6. MODELO GENÉTICO DE LAS BANDAS DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL

A finales del Triásico e inicios del Jurásico, en un ambiente de arco magmático se generan magmas calcoalcalinos tipo I, los cuales son los responsables de la formación de la roca hospedante (Batolito de Mogotes) de las bandas verdes de alteración hidrotermal estudiadas.

Como una primera fase en la formación del Batolito de Mogotes, se genera un monzogranito fanerítico, con lamelas de exsolución tipo peritita y compuesto por Qtz+Kfs+Pl+Bt+Zr+Rt indicando un ambiente de cristalización lenta, aproximadamente emplazado a 10km de profundidad.

Conforme evoluciona este cuerpo batolítico, se generan rocas filonianas, representadas por: diques de pegmatitas graníticas compuestas de Qtz+Kfs y diques de aplita con textura micrográfica y esencialmente de composición Qtz+Kfs+Pl+Bt+Zr+Rt.

En el mismo sistema magmático del Batolito de Mogotes, se genera su parte volcánica, la cual se caracteriza por la formación de diques de riolitas, de carácter afanítica y de composición Qtz+Pl+Bt.

Luego de finalizar la cristalización del Batolito de Mogotes se generan diques básicos, los cuales cortan la roca hasta el momento descrita, aunque estos diques no poseen dataciones radiométricas, se presume que este evento esté relacionado al periodo de adelgazamiento cortical del Cretácico. Hasta el momento se desconocen las relaciones de este cuerpo con respecto a las bandas de alteración objeto de estudio.

Se presume que posteriormente se generan mineralizaciones de fluorapatitos (Monacita-Ce, Xenotima?), Epidotas (Alanitas), Niobatos (Fergusonitas?) y óxidos de titanio, gracias a fluidos hidrotermales de carácter alcalino que además movilizan Nb, Y, Ti y otras trazas de REE (Ce, Pr, Sm, Eu, Gd, Dy, Er, Yb).

La presencia de las bandas verdes de alteración son el resultado del paso de paleofluidos hidrotermales, de carácter neutro a través de canales con dirección NW, presentes en la roca caja. El primer fluido genera un brechamiento y sinécticamente, en la matriz se precipitan cristales de Epidota y Piemontita (Evento de Epidotización). Un evento de remplazamiento de Biotitas por Cloritas es el segundo evento presente en las bandas (Evento de Cloritización). Posteriormente se origina la alteración Chl+Ep+Qtz+Ser+Clc, asociadas a la alteración se encuentran vetillas de tipo Qtz+Chl y vetillas de Clc. El cuarto evento que se halla en las bandas de alteración es un episodio de alteración Qtz+Ser. Cabe mencionar que algunos de estos fluidos migran a la roca caja, donde producen leves cloritizaciones y seritizaciones.

Posteriormente el sistema tiende a hacerse más ácido, generando la alteración argílica, junto con vetillas de Qtz y Qtz+Py, estas últimas con contenidos de oro y plata. Este evento se toma como un proceso de telescoping, ya que corta bruscamente el sistema de carácter neutro. Con este trabajo no se puede confirmar si este episodio ácido está relacionado a las bandas, ya que en algunos casos se encuentran vetas de Qtz+Py completamente aisladas de las bandas verdes de alteración.

Para finalizar con el modelo geológico propuesto para esta zona, se presentan las alteraciones supergénicas, caracterizadas por caolinizaciones de los feldespatos potásicos y oxidación de los ferromagnesianos presentes. A continuación se

presenta la tabla paragenética que ayuda a tener una mejor concepción de los eventos presentes en la zona de estudio.

Figura 31. Tabla paragenética de la zona de estudio.

Tipo de Mineral	Mineral	Etapa Mesotermal	Etapa Sub-Epitermal				Etapa de movilización de tierras raras	Etapa Epitermal	Etapa Supergena
		Evento Ígneo	Evento de Epidotización	Eventos de cloritización	Evento de Ep+Chl+Qtz+Ms+Clc?	Evento Qtz+Ser	Evento de Nb-Ti-Y y REE	Evento Argilización	Oxidación y Caolinitización
primarios	Biotita	----							
	Cuarzo	----							
	Epidota	?							
	Feldespato	----							
	Potásico	----							
	Magnetita	?							
	Plagioclasa	----							
	Rutilo	:-							
	Zircón	:-							
Secundarios	Caolín							----	----
	Clorita			----	----			?	
	Clinocloro				----				
	Cuarzo				----	----		----	
	Epidota		----		----			----	
	Moscovita (Sericita)				----	----		----	

Tipo de Mineral	Mineral	Etapa Mesotermal	Etapa Sub-Epitermal				Etapa de movilización de tierras raras	Etapa Epitermal	Etapa Supergena
		Evento Ígneo	Evento de Epidotización	Eventos de cloritización	Evento de Ep+Chl+Qtz+Ms+Clc?	Evento Qtz+Ser	Evento de Nb-Ti-Y y REE	Evento Argilización	Oxidación y Caolinización
	Óxido de Hierro Piemontita		---						---
Mineralización	Allanita Ferguzonita Ilmenita Monacita Oro Pirita Plata Xenotima Zircón						---- ---- ---- ---- ? ?	

7. CONCLUSIONES

- La litología aflorante en la zona de estudio se caracteriza por presentar, Monzogranitos, diques de Aplitas, Pegmatitas graníticas y Riolitas.
- Las bandas de alteración hidrotermal objeto de estudio se encuentran asociadas a fallas de dirección NW, las cuales a su vez se encuentran asociadas a fallas regionales de NE que cortan todo el batolito de mogotes.
- Las bandas de alteración hidrotermal presentan por lo general un rumbo de N23W. Cuatro (4) eventos de alteración hidrotermal has sido reconocidos en estas bandas (franjas) hidrotermales, representados en la siguientes paragénesis minerales: 1) Evento de Epidotización [Epidota y piemontita], 2) Evento Cloritización, 3) Evento $\text{Chl}+\text{Ep}+\text{Qtz}+\text{Ser}+\text{Clc}$, y 4) evento de $\text{Qtz}+\text{Ser}$. Aun no se puede confirmar si el evento de alteración argilica está asociado al mismo sistema de las bandas verdes de alteración.
- La presencia ocasional de minerales ricos en REE y la presencia de venas de pirita con potencial contenido de Au-Ag, sugieren la necesidad de evaluar este sector para fines de conocer su verdadero potencial mineral.

8. RECOMENDACIONES

- Si es posible realizar análisis de isotopos estables en las bandas verdes de alteración y en las vetas de Qtz+Py con el fin de encontrar más datos que estipulen un modelo geológico más veraz, principalmente con el fin de llegar a conocer el origen de los paleofluidos que formaron estas estructuras, origen ígneo?, metamórfico?, ya que basados en este dato podemos proponer un modelo más completo.
- Se recomienda realizar dataciones Ar-Ar en sericitas de las bandas verdes de alteración, con el fin de conocer su edad de formación y poder asociarlas a un marco geológico del macizo de Santander. (*en proceso*).
- Ya que se reconoce la presencia de tierras raras, nace un interés desde el punto de vista metalogenico y económico, por lo tanto se recomienda realizar búsqueda de nuevos afloramientos, análisis más profundo de difracción de rayos x y análisis por medio del microscopio electrónico de barrido esto con el fin de entender sus relaciones de mineralización.
- Ya que se reconoce un interés en oro y plata en las vetas de Qtz+Py, se recomienda realizar una caracterización detallada de estas vetas, reconocer claramente sus relaciones de campo, mineralogía de mena y ganga que las componen, realizar análisis con un mayor grado de confiabilidad.
- Aunque en este trabajo no se reconocieron, se recomienda realizar una búsqueda de inclusiones fluidas en los rellenos hidrotermales para poder obtener datos de presión, temperatura, densidad y composición del fluido.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Aspend, J.A; McCourt, W.J; Brook, M. 1987. Geometrical control of subduction related magmatism: the Mesozoic and Cenozoic plutonic history of western Colombia. *Journal of the Geological Society*, V. 144: 893-905.

Cediel, F., Leal-Mejia, H., Shaw, R., Melgarego, J., Restrepo- Pace, P. (2011). *Petroleum geology of Colombia: Regional geology of Colombia*. Fondo Editorial U. Eafit, Ed. 1: 220. Medellín.

Dörr, W., Grösser, J., Rodríguez, G., and Kramm, U. 1995. Zircon U-Pb age of the Páramo Rico tonalite-granodiorite, Santander Massif (Cordillera Oriental, Colombia) and its geotectonic significance. *Journal of South American Earth Sciences*, 8: 187-194.

García Ramírez, Carlos Alberto; RÍOS REYES, Carlos Alberto and CASTELLANOS, Oscar. Medium-pressure metamorphism in the Central Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. *Boletín de Geología* [online] 2005. Vol. 27 N° 2 [cited: 6 april 2014] p. 43 – 68.

Goldsmith, R., Marvin, R.F., and Mehnert, H.H. 1971. Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. U.S. Geological Survey Professional Paper, 750-D: D44-D49'.

Kretz, R. (1983) Symbols of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68, 277–279

Mantilla-Figueroa, L.C., García-Ramírez, C.A., y Valencia, V.A. 2016. Propuesta de escisión de la denominada 'Formación Silgará' (Macizo de Santander, Colombia), a partir de edades U-Pb en circones detríticos. *Boletín de Geología*, 38 (1): 33-50.

Mantilla Figueroa, Luis Carlos *et al.* Geocronología U-Pb de los cuerpos Porfíricos del Distrito Aurífero de Vetas-California (Santander, Colombia). *Boletín de Geología UIS [En línea]* 2009. 31 (1), 31e43.

Mantilla, F.L.C., Bissig, T., Valencia, V., and Craig, H. 2013. The magmatic history of the Vetas-California mining district; Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 45: 235-249.

Spikings, R. Cochrane, R., Villagómez, D., Van Der Lelij, R., Vallejo, C., Winklerf, W., and Beate, B. 2015. The geological history of northwestern South America: from Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75 Ma). *Gondwana Research*, 27(1): 95-139.

Streckeisen, A., 1979. A classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres and melilitic rocks. Recommendations and suggestion of the IUGS on the Systematic of igneous Rocks. *Geology*, 7:331 – 335. Boulder.

Van der Lelij, R., et al., Palaeozoic to Early Jurassic history of the northwestern corner of Gondwana, and implications for the evolution of the Iapetus, Rh..., *Gondwana Research* (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2015>.

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, B., Jaramillo, C., y Restrepo, H. 1973. Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, departamento de

Santander. U.S. Geological Survey e INGEOMINAS. Boletín Geológico XXI (1-3):
1-132.

BIBLIOGRAFIA

ASPEND, J.A; MCCOURT, W.J; BROOK, M. Geometrical control of subduction related magmatism: the Mesozoic and Cenozoic plutonic history of western Colombia. *Journal of the Geological Society*, V. 144: 893-905. 1987.

CEDIEL, F., LEAL-MEJIA, H., SHAW, R., MELGAREGO, J., RESTREPO- PACE, P. Petroleum geology of Colombia: Regional geology of Colombia. Fondo Editorial U. Eafit, Ed. 1: 220. Medellín. 2011

DÖRR, W., GRÖSSER, J., RODRÍGUEZ, G., AND KRAMM, U. Zircon U-Pb age of the Páramo Rico tonalite-granodiorite, Santander Massif (Cordillera Oriental, Colombia) and its geotectonic significance. *Journal of South American Earth Sciences*, 8: 1995. 187-194.

GARCÍA RAMÍREZ, Carlos Alberto; RÍOS REYES, Carlos Alberto and CASTELLANOS, Oscar. Medium-pressure metamorphism in the Central Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. *Boletín de Geología [online]* 2005. Vol. 27 N° 2 [cited: 6 april 2014] p. 43 – 68.

GOLDSMITH, R., MARVIN, R.F., and MEHNERT, H.H. Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. U.S. Geological Survey Professional Paper, 750-D: 1971. D44-D49'.

KRETZ, R. Symbols of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 1983 68, 277–279

MANTILLA-FIGUEROA, L.C., GARCÍA-RAMÍREZ, C.A., y VALENCIA, V.A. Propuesta de escisión de la denominada 'Formación Silgará' (Macizo de Santander, Colombia), a partir de edades U-Pb en circones detríticos. Boletín de Geología, 38 (1): 2016. 33-50.

MANTILLA FIGUEROA, Luis Carlos *et al.* Geocronología U-Pb de los cuerpos Porfíricos del Distrito Aurífero de Vetas-California (Santander, Colombia). Boletín de Geología UIS [En línea] 2009. 31 (1), 31e43.

MANTILLA, F.L.C., BISSIG, T., VALENCIA, V., and CRAIG, H. The magmatic history of the Vetas-California mining district; Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia. Journal of South American Earth Sciences, 2013. 45: 235-249.

SPIKINGS, R. COCHRANE, R., VILLAGÓMEZ, D., VAN DER LELIJ, R., VALLEJO, C., WINKLERF, W., and BEATE, B. The geological history of northwestern South America: from Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75 Ma). Gondwana Research, 2015. 27(1): 95-139.

STRECKEISEN, A., A classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres and melilitic rocks. Recommendations and suggestion of the IUGS on the Systematic of igneous Rocks. Geology, 7:331 – 335. Boulder. 1979.

VAN DER LELIJ, R., et al., Palaeozoic to Early Jurassic history of the northwestern corner of Gondwana, and implications for the evolution of the Iapetus, Rh..., Gondwana Research 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2015>.

WARD, D., GOLDSMITH, R., CRUZ, B., JARAMILLO, C., y RESTREPO, H. Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, departamento de Santander. U.S. Geological Survey e INGEOMINAS. Boletín Geológico XXI (1-3): 1-132. 1973.

ANEXOS

(Ver documentos adjuntos)