

Nataly Cruz Sarmiento; José A. Carillo; Luis C. Mantilla F.

**CONSIDERACIONES PETROGENÉTICAS Y GEOCRONOLOGÍA DE LAS ROCAS
ÍGNEAS PORFIRÍTICAS AFLORANTES EN LA 'QUEBRADA VENTANAS'
(MUNICIPIO ARBOLEDAS, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA):
IMPLICACIONES METALOGENÉTICAS**

**NATALY CRUZ SARMIENTO
JOSÉ ALEJANDRO CARRILLO QUINTERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2013

**CONSIDERACIONES PETROGENÉTICAS Y GEOCRONOLOGÍA DE LAS ROCAS
ÍGNEAS PORFIRÍTICAS AFLORANTES EN LA 'QUEBRADA VENTANAS'
(MUNICIPIO ARBOLEDAS, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA):
IMPLICACIONES METALOGENÉTICAS**

**NATALY CRUZ SARMIENTO
JOSÉ ALEJANDRO CARRILLO QUINTERO**

Trabajo de grado para la obtención del título de GEÓLOGO

**Director:
Ph. D.Luis Carlos Mantilla Figueroa**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2013

TABLA DE CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN	
1. CONTEXTO GEOLOGICO Y ANTECEDENTES.....	14
2. MÉTODOS ANALÍTICOS.....	19
3. RESULTADOS.....	21
3.1. LITOLOGÍAS Y RELACIONES DE CAMPO.....	21
3.2. TIPOLOGIA DE LAS ALTERACIONES.....	24
3.3. GEOQUÍMICA DE ROCA TOTAL.....	27
3.4. GEOCRONOLOGIA.....	33
4. CONCLUSIONES.....	36
5. AGRADECIMIENTOS.....	38
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	39
ANEXOS.....	46

LISTA DE FIGURAS

	Página.
FIGURA 1. Esquema Tectónico del Macizo de Santander. (Basado en Clavijo et al. (1993) y Clavijo (1994)).....	15
FIGURA 2. Esquema geológico del sector de estudio y corte geológico. (Tomado y modificado del Informe Técnico de la empresa ORO BARRACUDA 2011).....	16
FIGURA 3. Aspecto de litologías aflorantes en el Sector Quebrada Ventanas.....	23
FIGURA 4. Características representativas de las muestras de pórfido del Neógeno (a-b-c) y del Jurásico (d-e-f edad que fue establecida, mediante relaciones de campo y/o apoyados en sus características geoquímicas-ver apartado Geoquímica).....	25
FIGURA 5. Alteración Sericítica (Fílica) afectando las rocas del Triásico-Jurasico (a-b-c-d) y del Neógeno (e-f).....	29
FIGURA 6. Diagramas geoquímicos.....	32
FIGURA 7. Edades U-Pb obtenidas a partir del análisis de circones de la muestra POY-3, mediante la técnica LA-MCICPMS(13.9±0.2 Ma).....	35

ANEXOS

Página.

ANEXO A. Datos de Geoquímica de las rocas ígneas porfiríticas, de edad Neógeno, aflorantes en el Sector ‘Quebrada Ventanas’ (Municipio de Arboledas, Norte de Santander, Colombia)..... **46**

ANEXO B. Resultados analíticos U-Pb en las diferentes zonas al interior de los circones. Estudiados en la muestra AN023-POY-3 y sus correspondientes edades..... **47**

RESUMEN

TÍTULO: CONSIDERACIONES PETROGENÉTICAS Y GEOCRONOLOGÍA DE LAS ROCAS ÍGNEAS PORFIRÍTIAS AFLORANTES EN LA 'QUEBRADA VENTANAS' (MUNICIPIO ARBOLEDAS, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA): IMPLICACIONES METALOGÉNÉTICAS.*

AUTOR: Cruz Sarmiento, Nataly** Carrillo Quintero, José Alejandro**; Mantilla Figueroa, Luis Carlos**

PALABRAS CLAVES: Quebrada Ventanas, Arboledas, Neógeno, Metalogénia, Macizo de Santander, Colombia.

DESCRIPCIÓN

En el sector de la Quebrada Ventanas (sector suroccidental del municipio Arboledas; Norte de Santander), se reconoce la presencia de rocas ígneas porfiríticas de composición riodacítica, las cuales fueron datadas mediante el método U-Pb en circones (*Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*), arrojando una edad de 13.9 ± 0.2 Ma (Langhian; Mioceno, Neógeno). Los datos petrográficos y geoquímicos de éstas rocas, indican que éstas se formaron en un contexto de subducción, en ambientes de arco magmático de margen continental. Las altas relaciones Sr/Y (entre ~44.0 y 94.3) y la ausencia de anomalía negativa en Eu en éstas rocas, apuntan a que éstos magmas debieron tener un alto contenido de volátiles y por lo tanto pueden tener un alto potencial para formar mineralizaciones de tipo pórfido de Cu-Au-Mo.

Considerando que el magmatismo del Neógeno se manifiesta igualmente en el Distrito Minero de Vetas y California (unos 40 Km al SW del área de estudio); en donde ha sido relacionado con procesos de interés metalogénico; es posible suponer que el emplazamiento de estos magmas debió haber sido facilitado por la alta permeabilidad cortical generada por algunas fallas de dirección NE que afectan al Macizo de Santander (por ejemplo: Suratá-Arboledas y Cucutilla). Por consiguiente, las áreas localizadas a lo largo de éstas estructuras pueden tener un gran interés para la exploración de depósitos minerales relacionados con procesos magmático-hidrotermales.

*Trabajo de grado, modalidad Pasantía de investigación. En proceso de evaluación de la Revista Boletín de Geología.

**Facultad de ingenierías físico-química. Escuela de Geología. Director: Ph. D Luis C. Mantilla F.

ABSTRACT

TITLE: PETROGENETIC CONSIDERATIONS AND GEOCHRONOLOGY PORPHYRITIC IGNEOUS ROCKS EXPOSED IN THE 'QUEBRADA VENTANAS' (ARBOLEDAS MUNICIPALITY, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA): IMPLICATIONS METALOGENÉTICAS IMPLICATIONS METALLOGENIC.*

AUTHOR: Cruz Sarmiento, Nataly** Carrillo Quintero, José Alejandro**; Mantilla Figueroa, Luis Carlos***

KEY WORDS: Ventanas Creek; Arboledas, Neogene, Metallogeny, Santander Massif, Colombia.

DESCRIPTION

Around the 'Ventanas creek' (southwestern sector of the Arboledas town, North Santander), igneous porphyritic rocks, rhyodacites in composition, have been recognized and were dated by zircon U-Pb method (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry), yielding an age of 13.9 ± 0.2 Ma (Langhian; Miocene, Neogene). Petrographic and geochemical data obtained from these rocks indicate they are subduction-related and emplaced in a continental magmatic arc context. The high Sr/Y (between ~ 44.0 and 94.3) ratios and the negative Eu anomaly's absence in these rocks, suggest that the related-magmas could have a high volatile content and therefore they may have a high potential to form Cu-Au-Mo porphyry mineralization.

Considering that the Neogene magmatism has been also reported in the California-Vetas Mining District (located ~40 km to SW of the studied area), in where it has been related to metallogenic processes, we may assume that these magma emplacement could have been facilitated by the high crust permeability generated by NE faults, affecting the Santander Massif (e.g. Arboledas-Suratá and Cucutilla faults). Therefore, areas located along these structures can be considered of great interest for mineral exploration because of the related magmatic-hydrothermal processes.

* Graduation Project, Internship Research Modality. In the evaluation process of Boletín de Geología Magazine.

** Students Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Geology. Director: Ph. D Luis C. Mantilla F.

INTRODUCCIÓN

En el Macizo de Santander (MS), las únicas mineralizaciones de metales preciosos y metales base conocidas, se restringen al Distrito Minero de Vetas-California (DMVC). Estos eventos de mineralización se han relacionado con procesos magmático-hidrotermales, generadores de alteraciones hidrotermales y minerales de mena, propios de ambientes Porfirítico y Epitermal (Felder et al., 2005; Bissig et al., 2012; Mantilla et al., 2011 y 2012a). Las relaciones de campo y las edades Re-Os obtenidas a partir de molibdenitas (10.14 ± 0.04 Ma; Bissig et al., 2012; Mantilla et al., 2012a), asociadas a venas hidrotermales formadas en ambiente porfirítico (*type-B veins*), establecen una relación causa-efecto entre éstos eventos de mineralización y el magmatismo de edad Mioceno reportado para ese sector del MS (Mantilla et al., 2011; Leal-Mejía et al., 2011). La sobreimposición de alteraciones hidrotermales de ambiente epitermal sobre las alteraciones de ambiente porfirítico; las cuales suelen afectar en general a todas las unidades de roca aflorantes en el DMVC, incluyendo las rocas porfiríticas de edad Mioceno; apuntan a la existencia de eventos magmáticos (magma-hidrotermales) aún más jóvenes (Mantilla et al., 2013).

La presencia de rocas porfiríticas en el área del Municipio de Arboledas (distante aproximadamente unos 40 Km al NE del municipio de California; Ver FIGURAS 1 y 2), afectadas por alteración hidrotermal, inducen a pensar '*a priori*', que el magmatismo de edad Neógeno reportado para el DMVC (Mantilla et al., 2013a), podría también extenderse hacia el NE de éste distrito, y con esto, se extendería igualmente la posibilidad de localizar nuevas áreas con potencial minero para el contexto del Macizo de Santander. En éste sentido, y considerando que ambos sectores (Arboledas y DMVC) son afectados por el trazo de fallas de dirección NE (Fallas Cucutilla y Suratá-Arboledas), es posible también especular que éstas fallas podrían controlar el escape y emplazamiento de fundidos silicatados desde profundidad (Mantilla et al., 2013a).

En el contexto antes mencionado, y dada la importancia metalogenética que presenta el magmatismo de edad Neógeno en el MS (como se mencionó anteriormente), se presenta éste trabajo, para fines de reportar la edad absoluta obtenida (U-Pb en circones) de estas rocas porfiríticas aflorantes en el Sector del Municipio de Arboledas, y sus características petrográficas y geoquímicas. Finalmente, sobre la base de esos datos y los tipos de alteración hidrotermal identificados (caracterización preliminar), se plantean algunas consideraciones relacionadas con la petrogénesis de éstas rocas porfiríticas y su posible metalogénesis asociada. De esta manera, se pretende contribuir al conocimiento geológico (fundamentalmente distribución espacial y temporal, petrogénesis y metalogénesis asociada) de uno de los eventos magmáticos más jóvenes que han afectado al MS.

1. CONTEXTO GEOLÓGICO Y ANTECEDENTES

El área de estudio (sector de la Quebrada Ventanas; FIGURA 2) se localiza en la vereda Playoncito (sector suroccidental del municipio Arboledas; Norte de Santander), distante unos 68 Km al NE de Bucaramanga y unos 40 Km al NE del distrito minero de Vetas-California.

Éste sector se proyecta en la plancha 98-III-C (según nomenclatura del Instituto Geográfico Agustín Codazzi; plancha a escala 1:25.000).

Desde el punto de vista geológico, el área de estudio se localiza en el área central del Macizo de Santander, en el denominado Bloque de Ocaña (FIGURA 1), según la división tectono-estratigráfica del MS, propuesta por INGEOMINAS (hoy Servicio Geológico Nacional) y recogida en Clavijo et al. (1993) y Clavijo (1994). Dos importantes sistemas de fallas de dirección NNE (Cucutilla y Suratá-Arboledas) fragmentan el bloque de Ocaña en su parte central, generando el sub-bloque en el cual se localiza el área de estudio (FIGURA 1).

Las unidades de roca aflorantes en el sector central del sub-bloque antes mencionado, hacen parte del basamento cristalino del MS, representando en las siguientes unidades de roca: Gneises del Bucaramanga, Esquistos del Silgará,

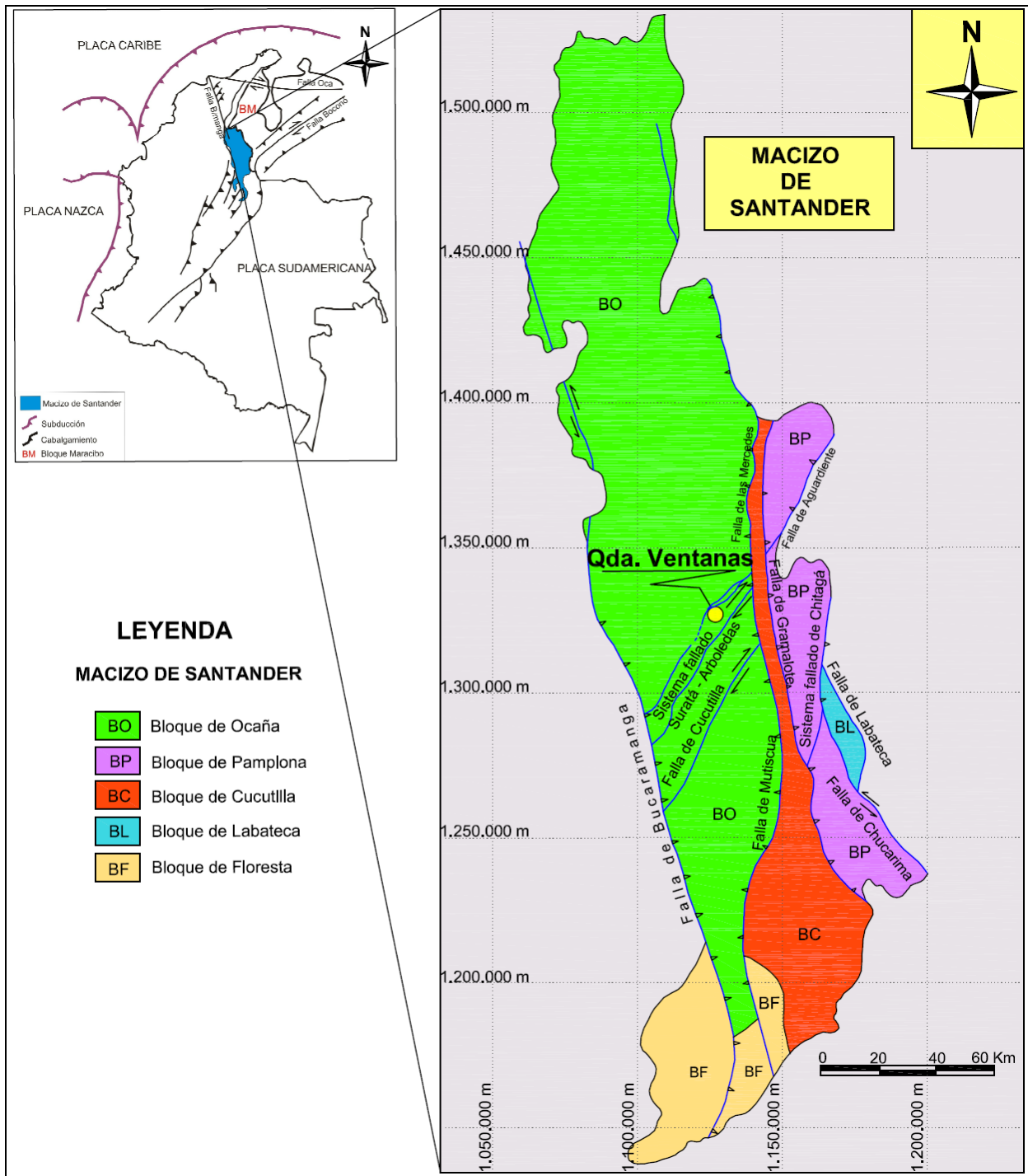


FIGURA 1. Esquema tectónico del Macizo de Santander. Basado en Clavijo et al. (1993) y Clavijo (1994).

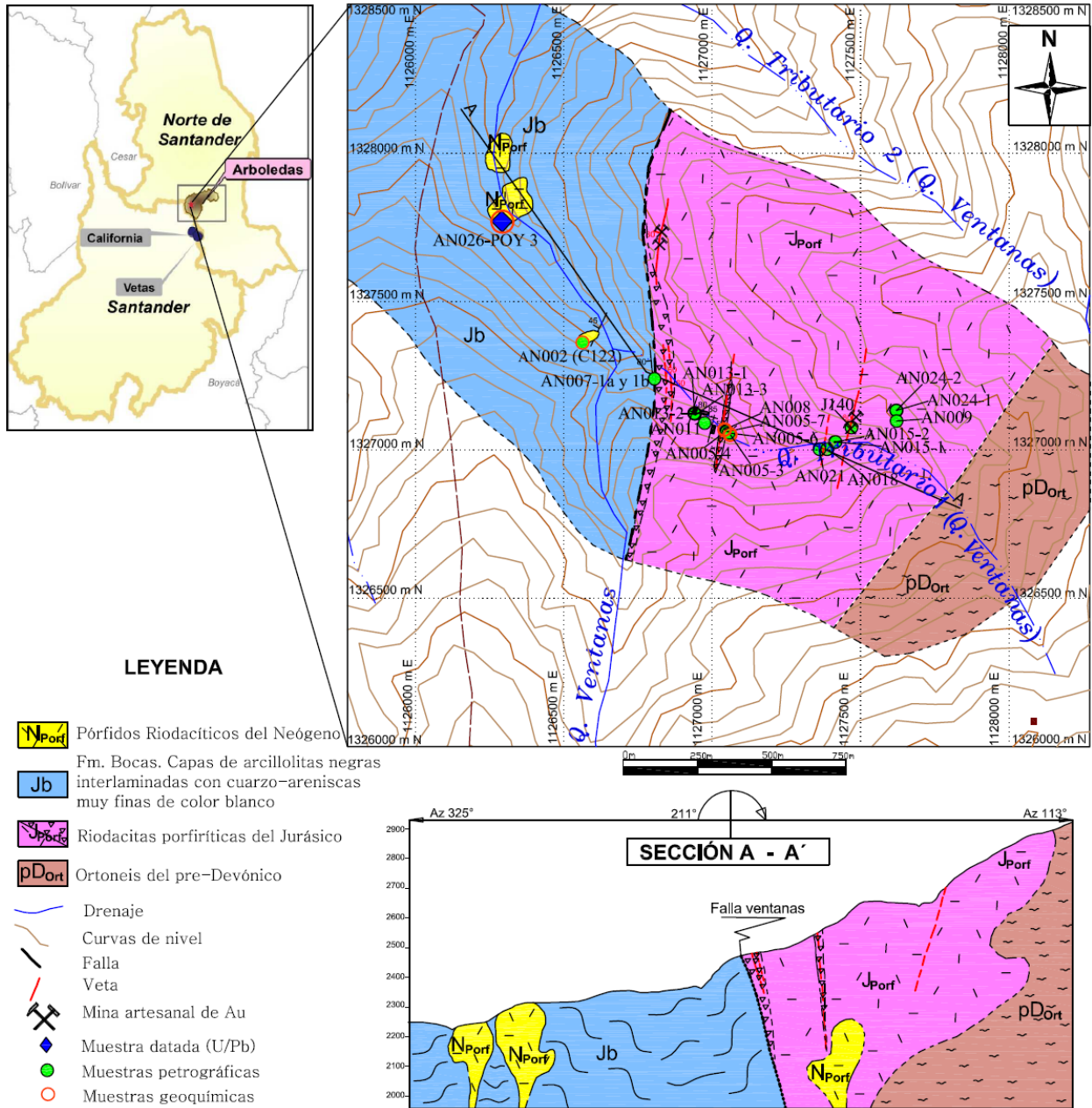


FIGURA 2. Esquema Geológico del sector objeto de estudio y corte geológico. Tomado y modificado del Informe Técnico de la empresa Oro Barracuda (2011a).

Ortogneis y Metasedimentitas de bajo grado de metamorfismo. Descripciones detalladas de éstas unidades de rocas metamórficas; aflorantes tanto a nivel de todo el MS, como en el subbloque mencionado; se reportan en diferentes trabajos geológicos (por ejemplo: Ward *et al.*, 1973; Evans, 1977; Arias y Vargas, 1978; Mendoza y Jaramillo, 1979; Clavijo, 1994; García y Ríos, 1999; Mantilla *et al.*, 2009; Mantilla *et al.*, 2012). Entre las litologías sin metamorfismo, reconocidas en el subbloque antes mencionado, destacan especialmente aquellas de naturaleza ígnea, relacionadas con eventos magmáticos del Paleozóico Inferior y especialmente aquellos de edad Triásico Tardío-Jurásico Temprano (Goldsmith *et al.*, 1971; Ward *et al.*, 1973; Polania, 1980; Polania, 1983; Dörr *et al.*, 1995; Mantilla *et al.*, 2013). Las rocas sedimentarias (al igual que rocas volcano-sedimentarias) reconocidas en el subbloque antes mencionado, se correlacionan en menor medida con eventos de sedimentación que tuvieron lugar durante el Paleozóico Superior (Devónico Medio-Pérmico) y en mayor medida durante el Mesozóico (Ingeominas, 1967; Cediél, 1968; Tschanz *et al.*, 1969; Ward *et al.*, 1973; Juliver, 1963; Clavijo, 1994 y 1997; Restrepo-Pace *et al.*, 1997; Restrepo-Pace y Cediél, 2010). Un conjunto de rocas ígneas porfíricas de edad Neógeno, las cuales representan los eventos magmáticos más recientes reconocidos en el MS, han sido igualmente reportadas para el subbloque antes citado. Estas rocas porfíricas, han sido observadas aflorando a manera de pequeños cuerpos, los cuales forman diques o cuerpos no mayores a un 1km de diámetro (Mantilla *et al.*, 2013a).

Las litologías aflorantes ya concretamente en el área de estudio (tramo de la Quebrada Ventanas-ver FIGURA 2), constan de las siguientes unidades: (a) Ortogneis (de edad Pre-Devónico Medio; (b) variedades de rocas ígneas porfíricas cortando la unidad 'Ortogneis', y las cuales se relacionan con los eventos magmáticos del Triásico Tardío-Jurásico Temprano (Goldsmith *et al.*, 1971; Ward *et al.*, 1973; Dörr *et al.*, 1995; Mantilla *et al.*, 2013); (c) una unidad de rocas siliclásticas de carácter continental, denominada Formación Bocas, y considerada de edad Mesosóica (Jurásico Medio) y descrita en Ward *et al.* (1973), Clavijo (1994) y Bayona *et al.* (2006), entre otros, y; (d) una variedad de rocas ígneas porfíricas, las cuales

han sido observadas cortando las rocas de la Formación Bocas, consideradas ‘*a priori*’ como relacionadas con el magmatismo de edad Neógeno, debido a sus semejanzas con rocas relativamente similares, reportadas en el DMVC (Mantilla et., 2011; Mantilla *et al.*, 2013a). Estas últimas litologías son el objetivo central del presente estudio, y por tal razón serán descritas más detalladamente en el apartado ‘Resultados’.

En los últimos años, debido al ‘boom minero’ experimentado por Colombia, el sector de la Quebrada Ventadas (Municipio Arboledas, Norte de Santander) fue objeto de interés para exploración mineral por parte de la empresa ORO BARRACUDA S.A.S. (años 2009-2011), debido a que en éste sector se reconoció una anomalía geoquímica en Au y Cu (Informe Técnico Barracuda, 2011b). No obstante, es importante resaltar que con anterioridad a éstos trabajos de exploración mineral, en el área ya se habían desarrollado algunos trabajos mineros artesanales (presencia puntual de pequeños socavones), dedicados a la extracción de oro. A pesar de habersen desarrollados éstos trabajos en el área, aún no se contaba con información geológica que pudiera aportar conocimiento sobre la geología local, en la cual se localiza la anomalía geoquímica antes citada. Por esta razón, y con el propósito de contribuir al conocimiento geológico del área y su potencial metalogenético asociado, se desarrolló el presente estudio.

2. MÉTODOS ANALÍTICOS

Los métodos analíticos utilizados en el estudio de las muestras colectadas en el marco del presente trabajo, fueron fundamentalmente los siguientes: (a) microscopía óptica; (b) Difracción de Rayos X (DRX); (c) ensayos mediante el uso de un Analizador Portátil Infrarrojo de Minerales (*PIMA: Portable Infrared Mineral Analyzer*); (d) geoquímica de elementos mayores menores y trazas (MMT; *whole-rock geochemistry*) y; (d) geocronología U-Pb en circones, mediante la técnica LA-ICP-MS (*Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*).

Durante el estudio de las muestras mediante microscopía óptica, se utilizaron lupas binoculares marca NIKON N1-150 modelo C-PS (para análisis de muestras de mano) y un microscopio de luz transmitida marca NIKON ECLIPSE E200 50/POL con cámara y pantalla incorporada (para estudio de láminas delgadas). Durante los análisis de DRX, se utilizó un Difractómetro de Rayos X-*Bruker D8 Advance*, con monocromador de grafito y un Filtro de Níquel (ver especificaciones del proceso analítico en:

[//www.uis.edu.co/webUIS/es/investigacionExtension/acreditacionLaboratorios/laboratorioDifraccion/serviciosPrestados.html](http://www.uis.edu.co/webUIS/es/investigacionExtension/acreditacionLaboratorios/laboratorioDifraccion/serviciosPrestados.html)). Los laboratorios usados, tanto de microscopía óptica, como de DRX, pertenecen respectivamente a las escuelas de Geología y Química de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

Los análisis PIMA se realizaron en el laboratorio *Genex Geology and Exploration* de Perú (ver detalles relacionados con éste tipo de análisis en: <http://gnxperu.com/spanish.html>).

Los análisis de geoquímica de elementos MMT, se realizaron en los laboratorios *Acme Analytical Laboratories (Vancouver, BC, Canadá) Ltd*, siguiendo las especificaciones ofrecidas en los paquetes analíticos con códigos 4AB1 (*Whole Rock Analysis Majors and Trace Elements*), 3B01 (*Fire assay fusion Au by ICP-ES*) y G806 (*FeO by titration*). Las especificaciones de los procedimientos analíticos empleados, se documentan en: http://acmelab.com/pdfs/Acme_Price_Brochure.pdf.

Las dataciones U-Pb en circones, mediante la técnica LA-ICP-MS, se realizaron en el laboratorio *ZirChron LLC* de la Universidad Estatal de Washington (WS, USA). Los detalles del procedimiento analítico seguido durante este estudio, se resume en el apartado 'Metodología', documentado en Mantilla *et al.* (2013).

3. RESULTADOS

3.1. LITOLOGÍAS Y RELACIONES DE CAMPO

Tal como se mencionó en el apartado 'Antecedentes y Contexto Geológico', las unidades de roca aflorantes en el sector objeto de estudio (Ver FIGURA 2y FIGURA 3), son las rocas metamórficas de la unidad denominada 'Ortoneis', las rocas ígneas porfiríticas del Triásico Tardío-Jurásico Temprano, las rocas sedimentarias del Mesozóico, y las rocas ígneas porfiríticas del Neógeno (según datos geocronológicos obtenidos en el marco del presente estudio, abajo reportados).

Las rocas de la unidad Ortoneis en este sector corresponden fundamentalmente a gneises Cuarzo-Feldespáticos y gneises Biotíticos-Horblendicos, con presencia ocasional de venas de cuarzo (Informe Técnico de la empresa Barracuda, 2011a - 2011b).

Las rocas porfiríticas relacionadas con los eventos magmáticos del Triásico Tardío-Jurásico Temprano (según información general reportada para el MS en Goldsmith *et al.*, 1971; Ward *et al.*, 1973; Dö rret *et al.*, 1995; Mantilla *et al.*, 2013); se presentan formando un cuerpo que cubre un área aproximada de 1Km². Estos cuerpos porfiríticos suelen presentar un color gris claro, con presencia de fenocristales subhedrales y anhedrales de plagioclasa y biotita de tamaños entre 1 y 4 mm (ver FIGURA 4d-e y f). Cristales más finos (<0.4mm) de cuarzo, sanidina, horblenda, apatito, circón y un intercrecimiento de cuarzo-feldespato a manera de esferulitas, se presentan igualmente en éstas litologías. La presencia de xenolitos de composición diorítica han sido igualmente observados en éstas rocas. La matriz está compuesta por agregados microlíticos de plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo y raramente biotita, además de diseminación de pirita, considerada claramente como epigenética (ver FIGURA 5a-b). La plagioclasa se caracteriza por presentar maclas polisintéticas y zonación; la biotita exhibe una deformación parcial sugiriendo movimiento de la matriz una vez cristalizados los fenocristales; el cuarzo generalmente presenta

embahiamientos y ocasionalmente extinción ondulante; la sanidina es caracterizada por su textura pertítica. Esta unidad localmente presenta brechificación parcial, la cual fue observada incluso a escala de algunas láminas delgadas (AN09-1, AN015-1, AN015-2 y AN-021; ver FIGURA 2), con clastos angulares y subangulares matriz soportados, las cuales se consideran preliminarmente como relacionadas con procesos tectónico-hidrotermales. Estas rocas, desde el punto de vista de su composición modal, se clasifican como Riodacitas (Streckeisen, 1976).

La Formación Bocas aflorante en el área de estudio, se compone principalmente de arcillolitas negras a gris oscura finamente laminadas, aunque hacia la parte más oeste del área, ésta unidad se presenta intercalada con areniscas blancas de grano fino (ver FIGURA 3a-b). Estas rocas se encuentran en contacto fallado (dirección aproximada N5E) con las rocas ígneas porfíricas del Triásico Tardío-Jurásico



FIGURA 3. Aspecto de litologías aflorantes en el sector de la Quebrada Ventanas: (a-b) Sucesión de rocas arcillolitas de la Formación Bocas (J_2), intercaladas con laminas delgadas de areniscas blanca de grano muy fino, localmente afectadas por plegamiento; (c) Rocas porfiríticas relacionadas con eventos magmáticos del Triásico Tardío- Jurásico Temprano, con fracturamiento y localmente afectadas por fenómenos de alteración hidrotermal; (d) Diques porfiríticos del Neógeno, cortando las rocas de la Formación Bocas.

Temprano (Falla que sigue el trazo de la Quebrada Ventanas y la cual se considera parte del sistema de Fallas Suratá-Arboledas). Ésta zona de contacto entre estas dos litologías, presenta fenómenos de brechificación y alteración hidrotermal hipógena, propia de procesos magmático-hidrotermales (especialmente alteración tipo silicificación y sericitización).

Las rocas porfiríticas del Neógeno, se observan a manera de diques (<20metros de espesor), cortando las rocas de la Formación Bocas (ver FIGURA 2). Estas rocas

porfiríticas presentan una composición mineralógica muy similar a las rocas porfiríticas del Mesozóico antes descritas (propias de rocas riódacíticas), pero el tamaño de los fenocristales es significativamente mayor (fenocristales de 7 a 15 mm de Plagioclasa; ver FIGURA 3 y FIGURA 4a-b-c). La plagioclasa presenta maclado polisintético, cuarzo intersticial e inclusiones de circón subhedral. La matriz de éstas rocas porfiríticas es de carácter microlítico. Éstas rocas, presentan igualmente biotita férrica subhedral como mineral menor, y sanidina, circón y apatito (de 10 a 800µm) como accesorios.

3.2. TIPOLOGÍA DE LAS ALTERACIONES

Apyados en estudios petrográficos de unas veinte láminas delgadas, análisis puntuales de DRX y de PIMA, se logró identificar tanto los minerales propios de las etapas magmáticas, como algunos minerales epigenéticos, relacionados con alteraciones hidrotermales hipógenas y supergénicas. Los datos aquí presentados sobre la tipología de las alteraciones hidrotermales, deben ser considerados como preliminares, debido a que el estudio detallado en éste sentido, esta por fuera del alcance de éste trabajo.

Cuatro tipos principales de alteraciones hidrotermales fueron reconocidas en el área de estudio, las cuales afectan principalmente a las rocas ígneas del Mesozóico y Neógeno. Entre éstas alteraciones hidrotermales, destacan las siguientes: (a) Alteración Propilítica, (b) Alteración Sericítica o Fílica; (c) Alteración Argílica y; (d) Silicificación.

La alteración propilítica (según definiciones de Gifkins et al., 2005), observada en la unidad porfirítica del Mesozóico (láminas delgadas AN-005-3, AN-05-6, AN-008, AN-013-2) se manifiesta principalmente como un reemplazamiento selectivo de fenocristales de biotita y plagioclasa. Los minerales de alteración presentes en todas estas muestras son clorita como reemplazamiento de biotita y anfíbol; epidota en plagioclasa y también asociada a la clorita o en contacto con fenocristales de biotita y

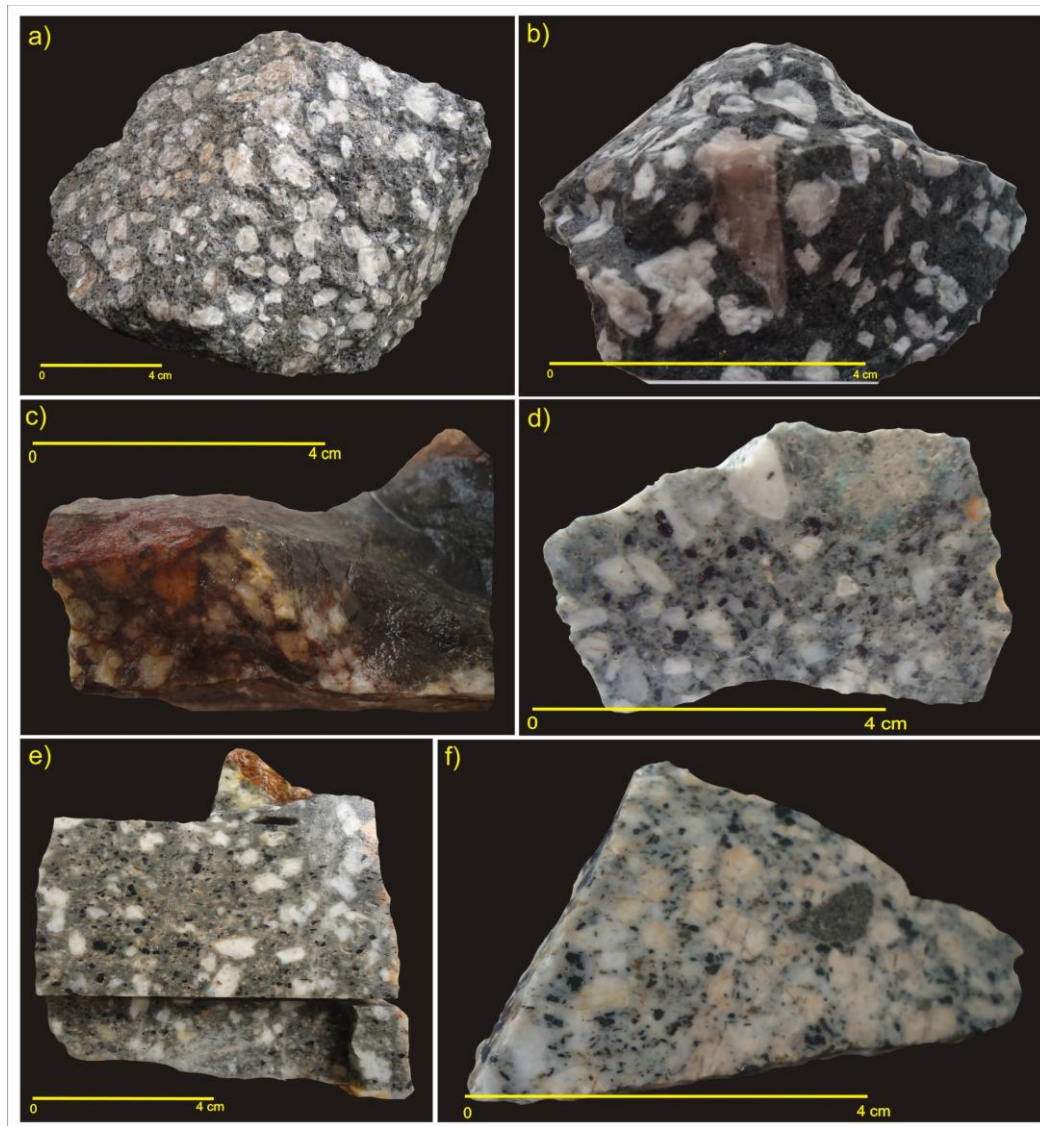


FIGURA 4. Características representativas de las muestras de pórfido del Neógeno(a-b-c) y del Jurásico (d-e-f; edad que fue establecida, mediante relaciones de campo y/o apoyados en sus características geoquímicas-ver apartado Geoquímica). a). AN025-POY2 muestra de dique porfírico con fenocristales de plagioclasa de hasta 15mm en una matriz microlítica carbonatada. b) AN026-POY3(datada por el método U-Pb como de edad Neógeno), muestra de dique porfírico con gran tamaño de fenocristales de plagioclasa y feldespato potásico en una matriz microlítica carbonatada. c) AN002-C122, dique porfírico, en la parte superior derecha preserva las arcillolitas encajante de la Fm. Bocas. d) Testigo de sección delgada de la muestra AN013-2, presenta fenocristales subhedrales de plagioclasa de hasta 5mm. e) Testigo de sección delgada de la muestra AN005-3, presenta fenocristales de plagioclasa de hasta 4mm en una matriz microlítica con diseminación de pirita. f) AN008,

muestra de pórfido en el que se aprecia un xenolito de composición diorítica con diseminación de pirita.

anfíbol. La zoicita o clinozoicita asociadas a epidota y clorita también han sido observadas. Junto a éste tipo de alteración, se reconoce la presencia de sulfuros, principalmente pirita (< 3%).

La alteración propilítica en las rocas porfíricas del Neógeno, se manifiesta como un reemplazamiento selectivo de forma similar a la descrita para las rocas ígneas del Mesozóico, pero a diferencia de esta última, se presenta carbonatación de la matriz.

La alteración sericítica o fílica (ver FIGURA 5), se ha observado en brechas hidrotermales confinadas hacia el contacto entre las rocas porfíricas del Mesozóico y la Formación Bocas (por ejemplo: muestra AN07-1). Ésta alteración se evidencia por la asociación Sericita+Cuarzo+Pirita, y se ha reconocido reemplazando casi la totalidad de la matriz y los fenocristales, tanto de las rocas porfíricas del Mesozóico, como las del Neógeno. En aquellos sectores donde se ha observado ésta alteración, se presentan ocasionalmente, algunas vetillas rectilíneas e irregulares de cuarzo-pirita.

La alteración de tipo silicificación, se ha observado asociada a los pórfidos del Mesozóico y a la brecha hidrotermal presente en el contacto de ésta litología con la Formación Bocas; y se caracteriza por la presencia de cuarzo hidrotermal formando agregados (textura en mosaico).

La presencia de minerales tipo illita, caolinita y cuarzo, reconocidos especialmente a nivel de DRX y PIMA, entre otras características, permiten sugerir la existencia de una alteración tipo argílica. Sin embargo, no se ha podido establecer si ésta se relaciona con una alteración argílica hipógena, o supergénica.

La presencia localizada de limonita y al parecer también jarosita (?), en algunos sectores del área, se considera relacionada con procesos de alteración supergénica.

3.3. GEOQUÍMICA DE ROCA TOTAL

Cuatro muestras de las rocas porfiríticas colectadas a lo largo de la Quebrada Ventanas fueron analizadas mediante geoquímica de elementos Mayores, Menores y Trazas (ver FIGURA 3 y FIGURA 4b-c-e; ANEXO 1). Dos muestras relacionadas con rocas del evento magmático Triásico Tardío-Jurásico Temprano (AN005-3 y AN008), y las otras dos muestras restantes, relacionadas con rocas del evento magmático de edad Neógeno (AN-002-C122 y AN-026-POY3).

Debido al efecto de las alteraciones hidrotermales y supergénicas, las cuales pudieron haber afectado a algunas de las litologías estudiadas [procesos que suelen re-movilizar los elementos litófilos de ión grande (*Large ion lithophile elements-LILE*)], se procedió en primer lugar a realizar un '*test de alteración*' de las muestras, siguiendo el método propuesto por Davis y Whitehead (2006). Apoyados en éste *test de alteración*, el cual considera las relaciones $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (en valores molares), se pudo establecer que dos de las cuatro muestras estudiadas presentan alteración de tipo argílica (muestras AN005-3 y AN002-C122), mientras que las restantes dos muestras se proyectan al interior o muy próximas al campo de las rocas graníticas frescas (diagramas no incluidos en el presente trabajo). En éste sentido, las dos muestras con alteración argílica antes mencionadas, deben ser consideradas como poco confiables durante los procesos de análisis que involucraban elementos LILE (por ejemplo, cuando se clasifican las rocas mediante diagramas TAS). No obstante, todas las muestras fueron consideradas en aquellos tratamientos de datos geoquímicos que incluían los Elementos de Fuerza de Campo Alto (*HFSE -High Field Strength Elements*) y los Elementos de Tierras Raras (*REE- Rare Earth Elements*), debido a que estos elementos suelen comportarse como elementos inmóviles (Rollinson, 1993; Hollings y Wymann, 2005).

En el contexto antes mencionado, se puede señalar que las rocas porfiríticas analizadas, se proyectan en el campo de las rocas ácidas, según el contenido en

SiO₂ (>65% en peso). Por otro lado, según el índice de saturación de Alúmina (ISA) óndice de Shand (Maniar y Piccoli, 1989); el cual utiliza las relaciones $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ vs Na_2O+K_2O/ Al_2O_3 , en proporciones molares; éstas rocas proyectan muy próximas al límite entre las rocas peraluminicas y metaluminicas [valores ISA para las muestras frescas = 1.05 (AN008; pórfido del Mesozóico) y 0.94

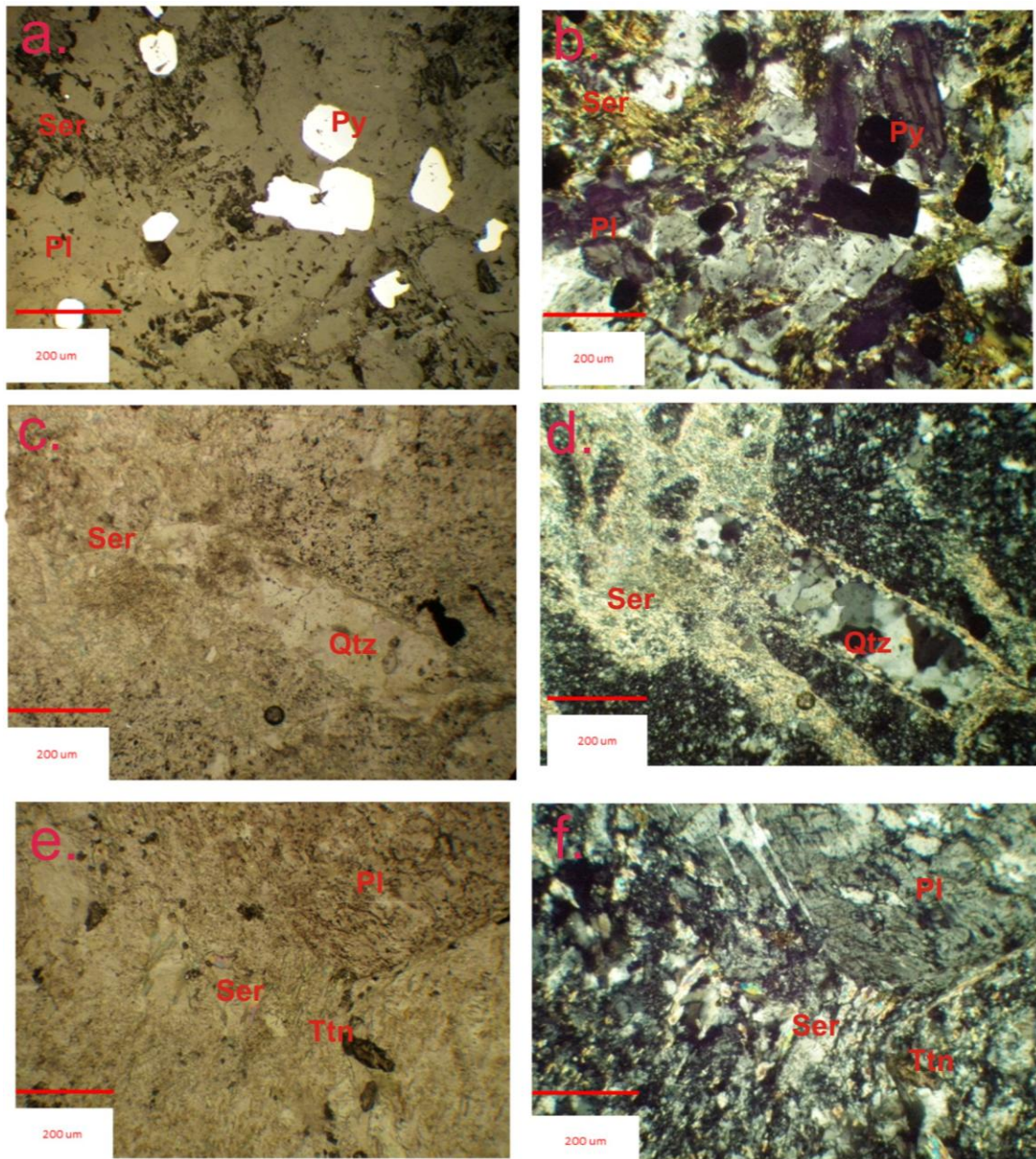


FIGURA 5. Alteración Sericítica (Fílica) afectando las rocas del Triásico-Jurásico (a-b-c-d) y del Neógeno (e-f). a)y b) AN013-2; microfotografías tomadas en microscopio de luz reflejada, en nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente. Se observa sericita, cuarzo y pirita; esta última característica por su color amarillo latón. c) y d) AN009-1; microfotografías tomadas en microscopio de luz transmitida en nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente, en la cual se observa la presencia de sericita asociada a las zonas controladas por vetillas de cuarzo. e) y f) AN002-C122 en nicols paralelos y nicols cruzados respectivamente, mostrando la alteración de la plagioclasa, sericita con buena cristalización y además la presencia de titanita (también conocida como esfena). Las

abreviaturas según Kretz (1983) utilizadas son: Qtz=cuarzo, Py=pirita, Ser=sericita, Pl=plagioclasa y Ttn=titanita.

(AN26-POY3; pórfido del Neógeno), es decir, rocas peraluminicas y metaluminicas, respectivamente]. Las muestras AN005-3 y AN002-C122, fueron excluidas de éstos cálculos, debido a que no pasaron el 'test de alteración', tal como se mencionó anteriormente.

Apoyados en los diagramas de SiO₂ vs Alkalís (Cox et al., 1979), es posible concluir que las rocas porfíricas del Mesozóico se proyectan en los campos Riolíticos (AN005-3) y Dacítico (AN008). Por otro lado, de las dos muestras de rocas porfíricas del Neógeno, una se proyecta en el campo de las rocas Dacíticas (AN26-POY3), mientras que la muestra AN002-C122 queda por fuera de los campos de clasificación, debido a las razones antes mencionadas. Utilizando éste mismo diagrama SiO₂ vs Alkalís, es posible determinar que todas las rocas se proyectan en el campo de las rocas subalcalinas (ver FIGURA 6), más concretamente en las rocas calco-álcalinas altas en potasio, según el diagrama SiO₂ vs K₂O (no incluido en éste trabajo), salvo la muestra AN002-C122 (la cual presenta evidencias de Alteración hidrotermal, como ya fue mencionado). No obstante, apoyados en el Diagrama Zr/TiO₂ vs Nb/Y (Winchester y Floyd, 1977), el cual tiene en cuenta los elementos inmóviles, las muestras analizadas se proyectan en el campo de las traquiandesitas (ver FIGURA 6C).

Los patrones de Tierras Raras para la totalidad de las muestras analizadas (del Mesozóico y del Neógeno), normalizados al condrito C1 (Sun y McDonough, 1989), muestran un mayor enriquecimiento de LREE, en comparación con las HREE. Los valores de fraccionamiento de las REE ((La/Yb)_N) (tal como propone en la bibliografía, Rollinson, 1993), muestran valores de 11.7-12.6 para las rocas del Mesozóico y 9.2-17.9 para las rocas del Neógeno. Los valores de fraccionamiento de las LREE ((La/Sm)_N) y HREE ((Gd/Yb)_N), varían respectivamente entre 4.7-4.9 y 1.7-1.8 para las rocas del Mesozóico, y 4.1-5.7 y 1.4-1.9 para las rocas del Neógeno, es decir,

existe un mayor fraccionamiento entre las LREE que entre las HREE. El poco fraccionamiento de la HREE, se interpreta en este caso como relacionado a ausencia de granate en la zona fuente, por lo que se sugiere como fuente de estos magmas, probablemente el manto con plagioclasa/espínela. El valor de la anomalía en Eu ($Eu_N/\sqrt{Sm_N * Gd_N}$) muestra una diferencia sustancial entre los dos grupos de rocas, siendo <0.82 para las rocas del Mesozóico y ~ 1.0 para las rocas del Neógeno (valores >1 indican anomalías positivas, <1 indican anomalías negativas). Esto, apunta a un ligero fraccionamiento de la plagioclasa para las rocas del Mesozóico (muestras AN005-3 y AN008).

Las altas relaciones Sr/Y (entre ~ 44.0 y 94.3 ; APENDICE 1) y la casi ausencia de anomalía negativa en Eu (valores entorno a 1; para las muestras AN002-C122 y AN26-POY3), debido al alto contenido de volátiles (Según Richards, 2011), permite suponer que los magmas asociados a las rocas ígneas porfiríticas del Neógeno, pudieron tener potencialidad para formar mineralizaciones de tipo pórfido de Cu-Au-Mo (Richards y Kerrich, 2007; Richards, 2011; Richards et al., 2012).

Según los diagramas de discriminación tectónica de Pearce et al., (1984), apoyados en las relaciones Rb vs Y+Nb y Nb vs Y, tanto las muestras del Mesozóico, como las muestras del Neógeno aquí estudiadas, se proyectan en el campo de los Granitoides de Arco Volcánico (VAG). El análisis de los Elementos Trazas, para las rocas del Mesozóico (MZ) y del Neógeno (NG), respectivamente, muestran valores de la relación La/Nb ~ 2.0 y $2.2-2.4$, Ba/Nb entre $92.5-94.1$ (MZ) y $18.1-81.8$ (NG) (18.1 para la muestra AN002-C122, con alteración argílica intensa) y; Ba/Ta entre 1160.0 y 1545.7 (MZ) y 248.7 y 1083.75 (NG) (248.7 también para la muestra AN002-C122).

Estas relaciones indicadas, junto a las bien desarrolladas anomalías negativas en Nb-Ta, P, Ti (*PrimitiveMantleNormalized Trace Element*, según Wood, 1979; diagrama no incluido en el presente estudio), indican que los fundidos silicatados, relacionados con ambos grupos de rocas porfiríticas en el sector de la

Quebrada Ventanas (Mesozóico y Neógeno), se proyectan en los rangos típicos de un magmatismo relacionado a subducción continental y emplazados en ambientes de arco magmático de margen continental.

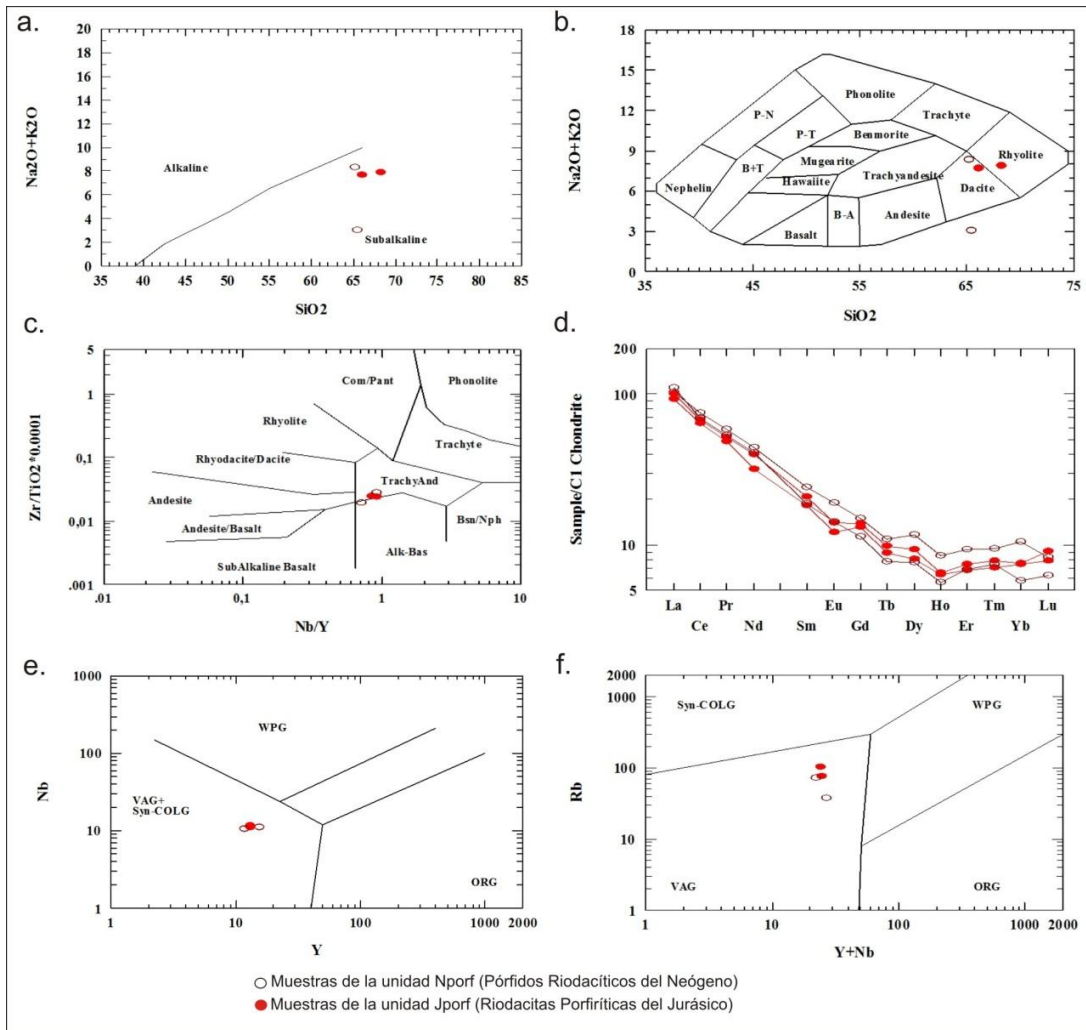


FIGURA 6. Diagramas geoquímicos. a) discriminación de series alcalinas (Irvine y Baragar 1971). b) Clasificación TAS (Wilson 1989). c) Clasificación química de las rocas porfíricas Jporf y Nporf basada en los elementos inmóviles (Winchester and Floyd 1977) d) Tierras raras normalizadas al condrito C1 e) Ambiente tectónico Nb vs Y (Pearce et al., 1984). f) Ambiente tectónico Rb vs Y+Nb.

3.4. GEOCRONOLOGÍA

Los datos analíticos y las relaciones isotópicas U-Pb determinadas en las diferentes zonas de crecimiento de los circones analizados mediante LA-MC-ICPMS (muestra AN026-POY3; ver ANEXO 2), indican la presencia de por lo menos dos grupos de edades: (a) uno conformado por cuarenta (40) de los cuarenta y siete (47) análisis realizados ($\approx 85\%$ del total de los análisis), el cual presenta un rango de edad claramente relacionado con la cristalización de los cuerpos porfiríticos estudiados, siendo éste entre 14.8 y 13.5 ± 0.2 Ma (edad determinada en 13.9 ± 0.2 Ma, luego de considerar los errores analíticos y sistemáticos; ver FIGURA 7) y; (b) otro grupo conformado por siete análisis (7) de los cuarenta y siete (47) realizados ($\approx 15\%$ del total de los análisis), con edades que oscilan entre 1723 ± 17.5 Ma y 22.1 ± 0.5 Ma.

En el segundo grupo de edades mencionado, es posible diferenciar los siguientes subgrupos por su edad: (1) uno con edades de 22.1 ± 0.5 y 24.8 ± 2.0 Ma; (2) uno con una edad de 72.0 ± 2.5 Ma; (3) uno con una edad de 201.4 ± 2.7 Ma; (4) uno con una edad de 362.4 ± 8.2 Ma; (5) uno con una edad de 447.8 ± 6.2 Ma y; (5) otro subgrupo con una edad de 1723.1 ± 17.5 Ma (ANEXO 2). En éste sentido, es posible sugerir que las edades de 22.1 ± 0.5 y 24.8 ± 2.0 Ma, pueden estar representando una mezcla de edades (posibles edades obtenidas en zonas intermedias de circónes zonados) o posiblemente pueden estar relacionadas con una herencia de circones derivados de rocas ígneas más antiguas (entorno al límite Mioceno-Oligoceno), las cuales aún no se han identificado en el contexto del MS. En éste mismo sentido se puede interpretar la edad de 72.0 ± 2.5 Ma. La edad de 201.4 ± 2.7 Ma es posible relacionarla con circones heredados de rocas que se consideran asociadas al periodo magmático Triásico Tardío-Jurásico Temprano; el cual ha sido documentado en Goldsmith *et al.* (1971), Dörret *et al.* (1995) y Mantilla *et al.* (2013), entre otros. Según estos autores, las edades de éste periodo magmático cubren un rango que oscila por lo menos entre 198 y 209 Ma. Las edades obtenidas de 362.4 ± 8.2 Ma y 447.8 ± 6.2 Ma, pueden ser interpretadas como relacionadas con herencia de algunos circones de eventos tectonomagmáticos del Paleozóico, los cuales han sido reportados en Boinet *et al.*

(1985). La edad de 1723.1 ± 17.5 Ma, se considera como relacionada con herencia de circones detríticos derivados de las rocas del Precámbricas presentes en el MS (circones detríticos de la Formación Gneis de Bucaramanga).

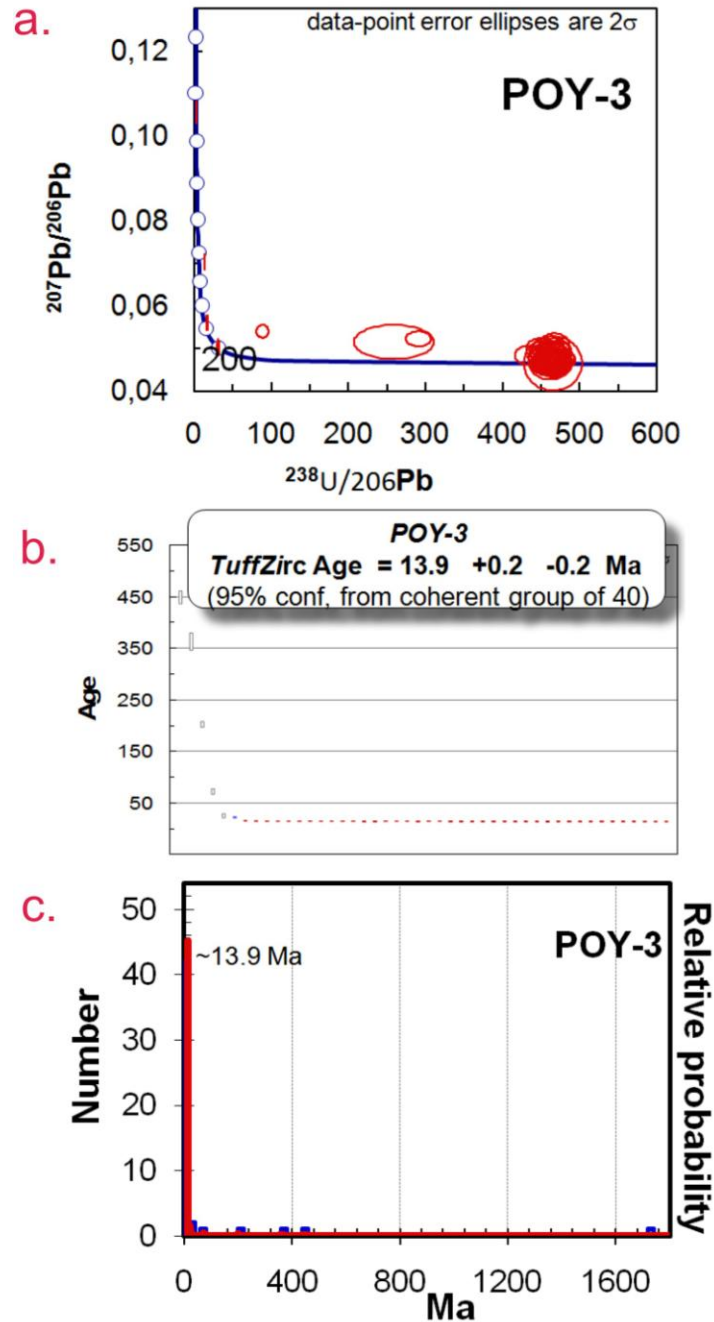


FIGURA 7.Edades U-Pb obtenidas a partir del análisis de circones de la muestra POY-3, mediante la técnica LA- MCICPMS (13.9 ± 0.2 Ma). A. Diagrama concordia U-Pb a partir de circones, donde se muestran las diferentes edades heredadas y edad de cristalización del cuerpo porfíritico del Neógeno estudiado (POY-3).B.Diagrama de distribución de las edades obtenidas (error 2s); C. Distribución de los rangos de edades obtenidas a partir del análisis de las diferentes zonas al interior de los circones, en la cual se muestra la dominancia de las edades entorno a 13.9 Ma.

4. CONCLUSIONES

Este estudio geológico puntual, realizado en el sector de la Quebrada Ventanas (vereda Playoncito (sector suroccidental del municipio Arboledas; Norte de Santander), permite reconocer la existencia de rocas metamórficas relacionadas con la unidad 'Ortogneis'; rocas riodacíticas consideradas de edad Triásico Tardío-Jurásico Temprano, según sus semejanzas mineralógicas y geoquímicas con litologías similares reportadas para el Macizo de Santander (Mantilla et al., 2013); Una sucesión de rocas sedimentarias de la Formación Bocas (fundamentalmente relacionadas temporalmente con el Jurásico Medio; apoyados en Bayona et al., 2006) y; rocas riodacíticas presentes principalmente a manera de diques, las cuales fueron datadas mediante la sistemática U-Pb en circones (LA-ICP-MS), arrojando edades de 13.9 ± 0.2 Ma [Neógeno (Mioceno; concretamente de edad Langhian)].

La geoquímica de las rocas porfiríticas del Neógeno, apunta a un magmatismo típico de subducción (rocas calco-alcálinas), en un contexto de arco magmático de margen continental, tal como lo indican las relaciones Rb vs Y+Nb y Nb vs Y (según Pearce et al. 1984). Las altas relaciones Sr/Y (entre ~44.0 y 94.3) y la ausencia de anomalía negativa en Eu en éstas rocas, apuntan a que éstos magmas debieron tener un alto contenido de volátiles (Richards, 2011). Estos rasgos permiten señalar que éste magmatismo puede tener un alto potencial para formar mineralizaciones de tipo pórfido de Cu-Au-Mo (Richards y Kerrich, 2007; Richards, 2011; Richards, et al., 2012).

En el contexto antes mencionado, se apoya lo propuesto por Mantilla et al., (2013a), en donde se señala que éste magmatismo muy posiblemente se relaciona con la subducción de la placa Caribe (aunque no se descarta el papel que ha podido jugar igualmente la micro-placa Coíba), y que el emplazamiento de éstos en el MS, debió haber sido facilitado por la alta permeabilidad cortical generada por las fallas de dirección NE (por ejemplo: Cucutilla y Suratá-Arboledas).

La presencia de éstas rocas porfiríticas de edad Neógeno en el sector objeto de estudio, permite especular sobre la existencia de un posible control estructural (Fallas Cucutilla y Suratá-Arboledas), para el emplazamiento de éstos cuerpos ígneos. De la misma manera, se infiere el interés que tendría estas estructuras en la exploración de depósitos minerales asociados a procesos magmático-hidrotermales.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan un profundo agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander (UIS), particularmente a su Escuela de Geología y al grupo de GIGBA (Grupo de investigación en Geología Básica y Aplicada; antes MINPETGEO), por apoyar el desarrollo de tesis de pregrado 'Modalidad Investigación', encaminadas a generar nuevo conocimiento geológico de nuestro territorio nacional. A todas las autoridades civiles, militares y eclesiásticas de Arboledas (Norte de Santander) y áreas circunvecinas, por su permanente amabilidad y colaboración. A Víctor Valencia por su colaboración durante los estudios geocronológicos.

Nuestra gratitud especial a la empresa ORO Barracuda S.A.S. y especialmente a su generante Christian Quintero, por su permanente apoyo y colaboración durante el tiempo en el cual sedesarrolló el presente estudio, y el cual se enmarca en un trabajo de tesis de pregrado 'Modalidad Investigación. A ésta empresa y a todo su personal técnico, reiteramos nuestros sinceros agradecimientos.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, A. y Vargas, R., 1978. Geología de las planchas 86 (Abrego) y 97(Cáchira), Departamento de Norte de Santander. Boletín Geológico Ingeominas. Volumen 23(2): 7-38.
- Bayona, G., Rapalini, A., Costanzo-Alvarez, V., 2006. Paleomagnetism in Mesozoic rocks of the northern Andes and its implications in Mesozoic tectonics of northwestern South America. *Earth, Planets and Space* 58, 1255-1272.
- Bissig, T., Mantilla, Figueroa. L. C., Rodríguez, A., Raley, Ch., Hart, C. 2012. The Vetas-California district, eastern Cordillera, Santander, Colombia: Late Miocene porphyry and epithermal mineralization hosted in Proterozoic gneisses and Late Triassic intrusions. Abstract. XVI Peruvian Geological Congress & SEG Conference. The 23rd and 26th of September 2012. Lima, Perú.
- Boinet, T., Bourgois, J., Bellon, H. y Toussaint, J. 1985. Age et repartition du magmatismPremesozoique des Andes de Colombie. *Comptesrendushebdomadaires des séaces de L'Académie des Sciences. Serie D: SciencesNaturalles* 300(II): 445-450.
- Cediél, F. 1968. El Grupo Girón: una Molasa Mesozóica de la Cordillera Oriental. Servicio Geológico Colombiano. Boletín Geológico vol 16: 5-96.
- Clavijo, J. 1997. Mapa geológico generalizado del Departamento del Norte de Santander. INGEOMINAS.
- Clavijo, J., 1994. Mapa geológico generalizado del Departamento de Norte de Santander, Memoria explicativa. Informe interno INGEOMINAS, p. 67.



- Clavijo, J., Mendoza, H., Royero, J., Bernal, L. y Reyes, G., 1993. Contribución al conocimiento de la geología de los Santanderes. Cuarto Simposio de Geología Regional. INGEOMINAS. Documento interno, 99P. Bucaramanga.
- Cox, K., Bell, J. and Pankhurst, R. 1979. The interpretation of igneous rocks. George, Allen and Unwin, London, 450p.
- Davies, J.F. and Whitehead, R.E. 2006. Alkali-Alumina and MgO-Alumina Molar Ratios of Altered and Unaltered Rhyolites. Exploration and Mining Geology, Vol. 15, N° 1-2, pp. 75-88.
- 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 itsgeotectonicsignificance. Journal of South American Earth Sciences, 8: 187-194.
- Evans, J. 1977. Geological and Geochemical reconnaissance in the Central Santander Massif, Departments of Santander and Norte de Santander, Colombia. U. S. Geological Survey (edits), 43p.
- Felder, G.; Ortiz, G.; Campos, C.; Monsalve, I. y Silva, A. 2005. ANGOSTURA PROJECT, A High Sulfidation Gold-Silver Deposit located in the Santander Complex of North Eastern Colombia. Greystar Resources Ltd. Thech. Report (http://www.greystarresources.com/i/pdf/Angostura_Greystar_ProExplo_2005Final).
- García, C. y Ríos, C. 1999. Metamorfismo y metalogénia asociada del Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia. Informe final Proyecto de Investigación 1102-05-083-95 Colciencias-Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 191p.
- Gifkins, C., Herrmann, W. and Large, R. (2005). Altered volcanic rocks. A

guide to description and interpretation. Centre for Ore Deposit Research. University of Tasmania, Australia, 272 pp.

- 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.
- Hollings, P., Wyman, D., 2005. The geochemistry of trace elements in igneous systems: principles and examples from basaltic systems. En Linnen, R.L., Samson, I.M. (eds.). Rare-Element Geochemistry and Mineral Deposits: Geological Association of Canada, GAC Short Course Notes 17, p. 1 – 16.
- Informe Técnico Interno Barracuda. 2011a. Informe de avance en las actividades de exploración en los títulos JB7-09531, JB7-09411 y LKQ-15081 municipio de Arboledas, Norte de Santander, Colombia. 16 p.
- Informe Técnico Barracuda. 2011b. Technical report on the Arboledas property, Norte de Santander, Colombia. 30 p.
- INGEOMINAS (Servicio Geológico Nacional), 1967. Geología del Cuadrángulo G-13, Cúcuta, Departamento Norte de Santander.
- Juliver, M. 1963. Nuevos datos sobre la Dinámica del ámbito del Macizo de Santander durante el Secundario (Cordillera Oriental, Colombia). Boletín de Geología UIS 12: 45-49.
- Leal-Mejía, H., Melgarejo I Draper, J.C., Shaw, R.P., 2011. Phanerozoic gold metallogeny in the Colombian Andes, in: Proceedings Let's Talk Ore Deposits, SGA biennial meeting, Antofagasta, Chile.
- Maniar, P.D., Piccoli, P.M., 1989. Tectonic discriminations of granitoids. Geological Society of America Bulletin 101: 635-643.

- Mantilla F., L. C., Valencia, V. A., Barra, F., Pinto, J., Colegial, J. 2009. Geocronología U-Pb de los cuerpos Porfíricos del Distrito Aurífero de Vetas-California (Santander, Colombia). Boletín de Geología. Universidad Industrial de Santander. 31(1): 31-43.
- Mantilla, Figueroa. L. C., Mendoza, H., Bissig, T., Hart C. 2011. Nuevas evidencias sobre el magmatismo Miocénico en el distrito minero de Vetas-California (Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia). Boletín de Geología Vol. 33(1): 41-56.
- Mantilla, Figueroa. L. C., Bissig, T., Cottle, J. M., Hart, C. 2012. Remains of early Ordovician mantle-derived magmatism in the Santander Massif (Colombian Eastern Cordillera). Journal of South American Earth Sciences 38: 1-12.
- Mantilla, Figueroa. L. C., Bissig, T., Rodríguez, A., Hart, C. 2012a. Magmatic history and mineralization in the Vetas-California Au mining district and its metallogenetic significance (Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia). Abstract. XVI Peruvian Geological Congress & SEG Conference. The 23rd and 26th of September 2012. Lima, Perú.
- Mantilla, Figueroa. L. C., Bissig, T., Valencia, V., 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.
- Mantilla, F. L. C., Bissig, T., Mendoza, H., Rueda, J., Cruz, N., Pinilla, O., Reyes, S., Mendoza, M., Suarez, G., Sánchez, S., Palacio, A., Rojas, J., Reyes, J., Mendoza, G., Carrillo, J., León, H., Hart, C. 2013a. Consideraciones sobre el magmatismo Neógeno en el Macizo de Santander (Cordillera

Oriental, Colombia) y su relación con la metalogénesis del Au (\pm Ag, Mo, Cu). XIV Congreso Colombiano de Geología y Primer Simposio de Exploradores. Memorias Digitales del Congreso ISBN-978-958-57950-0-6.

- Mendoza H. y Jaramillo, L. 1979. Geología y geoquímica del área de California, Santander. Boletín Geológico Ingeominas, 22: 3-52.
- Pearce, J.A., Harris, N.W. and Tindle, A.G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks: Journal of Petrology. 25: 956-983.
- Polania, J.H., 1980. Die Uranvorkommen von California bei Bucaramanga (Kolumbien), p. 152. Stuttgart. 
- Polania, J.H., 1983. Mineralizaciones de Uranio y otros metales en California (Santander del Sur). Geología Norandina, 57-65.
- Restrepo-Pace, P.A., Ruiz, J., Gehrels, G., Cosca, M., 1997. Geochronology and Nd isotope data of Grenville-age rocks in Columbian Andes: new constraints for late Proterozoic early Paleozoic paleocontinental reconstructions of Americas. Earth and Planetary Sciences Letters 154: 331-347.
- Restrepo-Pace, P.A., Cediél, F., 2010. Northern South America basement tectonics and implications for paleocontinental reconstructions of the Americas. Journal of South American Earth Sciences 29: 764-771.
- Richards, J.P., Kerrich, R. 2007. Special Paper: Adakite-Like Rocks:  Their Diverse Origins and Questionable Role in Metallogenesis. Economic Geology, Vol. 102, pp. 537–576.
- Richards, J.P. 2011. High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu \pm Mo \pm Au

deposits: just add water. *EconomicGeology*, Vol. 106, pp. 1075-1081.

- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Raziq, A., Fletcher, T. 2012. High Sr/Y Magmas Reflect Arc Maturity, High Magmatic Water Content, and Porphyry Cu ± Mo ± Au Potential: Examples from the Tethyan Arcs of Central and Eastern Iran and Western Pakistan. 2012 Society of EconomicGeologists, Inc. *EconomicGeology*, v. 107, pp. 295–332.
- Rollinson, H.R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Prentice Hall, Singapore, 352 p.
- Streckeisen, A. 1976. To Each Plutonic Rock its Proper Name. *Earth Science Review*. (12): 1-33. 1976.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, vol. 42, No.1, pp. 313-345.
- Tschanz, C. M., Marvin, R. F., Cruz, B. 1969. Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia) - Informe 1829. INGEOMINAS, Bogotá.
- 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.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements: *Chemical Geology*. 20: 325-343.
- Wood, D., Joron, J. and Treuil M., 1979. A re-appraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in

different tectonic settings. *Earth and Planetary Science Letters*. 45(2): 326-336.

Páginas web

- Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander. Consultado el 04 de febrero de 2013, www.uis.edu.co/webUIS/es/investigacionExtension/acreditacionLaboratorios/laboratorioDifraccion/serviciosPrestados.html
- PIMA SP, Laboratorio Genex Geology and Exploration de Perú. Consultado el 10 de octubre de 2012, <http://gnxperu.com/spanish.html>
- Portafolio de servicios del Laboratorio Acme Analytical. Ltd. Consultado el 03 de febrero de 2013, http://acmelab.com/pdfs/Acme_Price_Brochure.pdf

ANEXOS

ANEXO A.

Datos de Geoquímica de las rocas ígneas porfíricas, de edad Neógeno, aflorantes en el Sector 'Quebrada Ventanas' (Municipio de Arboledas, Norte de Santander, Colombia).

MUESTRA	AN005-3	AN-008	AN-002-C122	AN-026-POY3
TIPO DE ROCA	Pórfido Granítico	Pórfido Granodiorítico	Pórfido diorítico	Pórfido Monzodiorítico
Latitud	7° 33' 17.86''	7° 33' 18.22	7° 33' 27.79''	7° 33' 41.06''
Longitud	72° 55' 47.09''	72° 55' 47.54''	72° 56' 03.14''	72° 56' 12.10''
Local Coordinates**	X= 1127056m Y= 1327057m Z= 2527 msnm	X= 1127042m Y= 1327068m Z= 2520 msnm	X= 1126563m Y= 1327361m Z= 2314 msnm	X= 1126287m Y= 1327768m Z= 2245 msnm
Localización Geográfica	A 1529m del nacimiento del drenaje tributario 1 de la Quebrada Ventadas (Municipio Arboledas)	A 1548m del nacimiento del drenaje tributario 1 de la Quebrada Ventadas (Municipio Arboledas)	A 3198m del nacimiento de la Quebrada Ventanas (Municipio Arboledas)	A 3712m del nacimiento de la Quebrada Ventanas (Municipio Arboledas)
Elementos Mayores %				
SiO ₂	68.18	66.01	65.45	65.21
Al ₂ O ₃	16.03	17.15	17.09	17.23
Fe ₂ O ₃	2.89	3.01	4.31	2.83
MgO	0.79	1.01	1.32	0.92
CaO	2.25	3.03	6.01	3.22
Na ₂ O	3.88	4.45	2.18	5.14
K ₂ O	4.01	3.23	0.84	3.17
TiO ₂	0.34	0.39	0.46	0.34
P ₂ O ₅	0.21	0.17	0.17	0.13
MnO	0.1	0.11	0.15	0.1
Cr ₂ O ₃	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Ni (ppm)	<20	<20	<20	<20
Sc (ppm)	4	5	5	4
LOI	1.1	1.2	1.8	1.4
SUM	99.76	99.73	99.82	99.72
Menores y Trazas (ppm)				
Ba	1044	1082	199	867
Be	1	2	2	3
Co	2.7	2.3	4.3	2.8
Cs	1.4	1.6	1.1	1.6
Ga	18.5	20	19.2	19.9
Hf	2.8	2.8	3.1	3.1
Nb	11.1	11.7	11	10.6
Rb	103.1	76.7	37.4	72.3
Sr	620	874.6	686	1103
Ta	0.9	0.7	0.8	0.8
Th	6	6.2	6.4	7.2
U	3	2.8	3.1	3.8
V	70	74	99	83
Zr	82.9	93.1	88.6	96.1
Y	13.1	12.9	15.6	11.7
Pb	2.4	1.8	5.7	3.9
La	21.9	23.8	24.3	26
Ce	39.1	41.2	45.7	42.7
Pr	4.63	4.95	5.52	5.07
Nd	14.9	18.5	20.7	19.3
Sm	2.79	3.18	3.70	2.89
Eu	0.70	0.81	1.10	0.83
Gd	2.70	2.84	3.07	2.35
Tb	0.33	0.37	0.41	0.29
Dy	2.04	2.36	2.96	1.95
Ho	0.36	0.37	0.48	0.32
Er	1.13	1.24	1.54	1.14
Tm	0.18	0.20	0.24	0.19
Yb	1.26	1.28	1.78	0.98
Lu	0.20	0.23	0.21	0.16

*Por debajo del límite de detección; ** Bogotá como origen del sistema de referencia, Coordenadas Planas Gauss Krüger.

ANEXO B.

Resultados analíticos U-Pb en las diferentes zonas al interior de los circones estudiados en la muestra AN023-POY-3 y sus correspondientes edades.

Sample	U	Th	238U	1 Sigma	207Pb	1 Sigma	206Pb/238U	1 Sigma	207Pb/206Pb	1 Sigma	Bestage	1 Sigma
Name	(ppm)	U	206Pb	% error	206Pb	% error	Age	Abserr	Age	Abserr	(Ma)	AbserrMa
PO4_3_48	1.964	0,09	469,763	1,71%	0,0495	1,83%	13,7	0,2	171,9	42,1	13,7	0,2
PO4_3_47	2.761	0,13	452,564	1,60%	0,0464	1,58%	14,2	0,2	16,7	37,5	14,2	0,2
PO4_3_46	1.152	0,11	259,6299	8,18%	0,0515	3,18%	24,8	2	262,9	71,5	24,8	2
PO4_3_45	1.871	0,09	467,9946	1,73%	0,0477	1,91%	13,8	0,2	82,3	44,8	13,8	0,2
PO4_3_44	1.743	0,1	467,7963	1,69%	0,0508	2,14%	13,8	0,2	233,8	48,6	13,8	0,2
PO4_3_43	2.209	0,08	476,0992	1,66%	0,0473	1,65%	13,5	0,2	63,6	38,8	13,5	0,2
PO4_3_42	2.274	0,08	464,4859	1,60%	0,0467	1,78%	13,9	0,2	32,3	42,2	13,9	0,2
PO4_3_41	2.118	0,08	89,0864	3,53%	0,054	1,14%	72	2,5	370,5	25,4	72	2,5
PO4_3_40	3.781	0,12	459,1784	1,53%	0,0478	1,52%	14	0,2	88,9	35,6	14	0,2
PO4_3_39	354	0,73	3,1595	2,27%	0,1055	0,96%	1772,6	35,1	1723,1	17,5	1723,1	17,5
PO4_3_38	2.009	0,14	462,406	2,47%	0,0469	3,70%	13,9	0,3	44,9	86,1	13,9	0,3
PO4_3_37	1.526	0,11	291,592	2,30%	0,0522	1,37%	22,1	0,5	295,9	31,1	22,1	0,5
PO4_3_36	2.375	0,06	474,7493	1,64%	0,0478	1,70%	13,6	0,2	88,3	39,7	13,6	0,2
PO4_3_35	4.420	0,09	460,8457	1,54%	0,0471	1,34%	14	0,2	52,7	31,6	14	0,2
PO4_3_34	2.959	0,1	451,6443	1,63%	0,048	1,47%	14,3	0,2	100,4	34,4	14,3	0,2
PO4_3_33	1.761	0,11	468,6105	1,77%	0,0471	1,81%	13,7	0,2	52,8	42,6	13,7	0,2
PO4_3_32	1.252	0,64	462,4923	2,00%	0,0459	2,15%	13,9	0,3	0	44,5	13,9	0,3
PO4_3_30	1.686	0,11	466,5277	1,94%	0,0468	2,18%	13,8	0,3	40,8	51,4	13,8	0,3
PO4_3_29	1.350	0,14	466,2949	2,08%	0,0466	2,48%	13,8	0,3	26,4	58,4	13,8	0,3
PO4_3_28	2.050	0,05	466,162	3,32%	0,0464	5,59%	13,8	0,5	20,8	129,1	13,8	0,5
PO4_3_27	1.618	0,08	461,0217	1,77%	0,0467	2,21%	14	0,2	35	52,2	14	0,2
PO4_3_26	990	0,19	467,3359	2,00%	0,046	2,39%	13,8	0,3	0	53,8	13,8	0,3
PO4_3_25	1.960	0,07	466,8597	1,75%	0,0499	1,94%	13,8	0,2	192,4	44,4	13,8	0,2
PO4_3_24	1.805	0,1	459,3937	1,95%	0,0469	2,07%	14	0,3	46,5	48,8	14	0,3
PO4_3_23	2.338	0,07	461,7082	1,65%	0,0457	1,75%	13,9	0,2	0	25,4	13,9	0,2
PO4_3_22	2.659	0,08	456,1843	1,62%	0,0499	1,61%	14,1	0,2	189,4	37	14,1	0,2
PO4_3_21	2.580	0,07	460,3205	2,12%	0,0466	2,30%	14	0,3	28,8	54,2	14	0,3
PO4_3_20	317	0,2	17,2944	2,34%	0,056	1,20%	362,4	8,2	450,9	26,4	362,4	8,2
PO4_3_19	2.734	0,07	462,9981	1,61%	0,0463	1,65%	13,9	0,2	14,8	39,2	13,9	0,2
PO4_3_18	2.310	0,06	466,8069	1,50%	0,0488	1,86%	13,8	0,2	137,9	43,2	13,8	0,2
PO4_3_17	1.694	0,13	463,1356	1,68%	0,0457	2,00%	13,9	0,2	0	27,5	13,9	0,2
PO4_3_16	2.253	0,44	463,8908	1,61%	0,0481	1,81%	13,9	0,2	102,5	42,2	13,9	0,2
PO4_3_15	2.474	0,07	460,9385	1,51%	0,047	1,74%	14	0,2	48,3	41	14	0,2
PO4_3_14	279	0,39	31,5129	1,38%	0,0502	1,56%	201,4	2,7	202,3	35,8	201,4	2,7
PO4_3_13	1.674	0,1	464,7128	1,74%	0,0491	2,11%	13,9	0,2	151,8	48,7	13,9	0,2
PO4_3_12	1.332	0,08	460,4499	1,73%	0,0464	1,99%	14	0,2	16	47,2	14	0,2
PO4_3_11	1.833	0,07	462,3083	1,58%	0,0466	1,78%	13,9	0,2	30,5	42,2	13,9	0,2
PO4_3_10	1.905	0,09	456,0959	1,58%	0,0461	2,00%	14,1	0,2	0,3	47,3	14,1	0,2
PO4_3_9	25.974	0,05	464,2564	1,48%	0,0501	1,20%	13,9	0,2	200,9	27,6	13,9	0,2
PO4_3_8	1.926	0,1	459,1618	1,50%	0,0472	1,89%	14	0,2	59,3	44,5	14	0,2
PO4_3_7	1.018	0,14	13,9026	1,44%	0,0703	1,09%	447,8	6,2	937,3	22,1	447,8	6,2
PO4_3_6	2.291	0,08	457,7485	1,59%	0,0471	1,86%	14,1	0,2	53,2	43,8	14,1	0,2
PO4_3_5	3.125	0,08	454,4826	1,72%	0,049	1,67%	14,2	0,2	146,5	38,7	14,2	0,2
PO4_3_4	1.622	0,05	462,6106	1,79%	0,0479	2,06%	13,9	0,2	95,9	48	13,9	0,2
PO4_3_3	1.490	0,06	450,5939	1,74%	0,0499	2,05%	14,3	0,2	190	47	14,3	0,2
PO4_3_2	1.956	0,07	456,9564	1,60%	0,0464	1,90%	14,1	0,2	19,8	45	14,1	0,2
PO4_3_1	2.198	0,05	434,2465	1,66%	0,0484	1,86%	14,8	0,2	116,9	43,4	14,8	0,2