

---

---

## Petrografia del Pórfido de Santa Lucía departamento del Cauca, Colombia

## Petrography of the Santa Lucia porphyry, departamento del Cauca, Colombia

---

---

MARIA ALEXANDRA AGUJA-BOCANEGRA<sup>1</sup>

ANA ELENA CONCHA-PERDOMO<sup>2</sup>

JUAN CARLOS-MOLANO-MENDOZA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geóloga

E-mail: [maagujab@gmail.com](mailto:maagujab@gmail.com)

<sup>2</sup>Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

E-mail: [aeconchap@unal.edu.co](mailto:aeconchap@unal.edu.co)

E-mail: [jcmolano@unal.edu.co](mailto:jcmolano@unal.edu.co)

AGUJA-BOCANEGRA, M.A.; ANA ELENA CONCHA-PERDOMO, A.E. & MOLANO, J.C. (2009): Petrografia del Pórfido de Santa Lucía departamento del Cauca, Colombia.- GEOLOGÍA COLOMBIANA, 34, pp. 95-110, 21 Figs., Bogotá.

### RESUMEN

El pórfido de Santa Lucía aflora en el área del municipio de La Sierra, Departamento del Cauca, sobre el flanco occidental de la Cordillera Central. Este cuerpo ígneo cristalizó entre 1 y 2 kilómetros de profundidad y ha sido datado como Mioceno Plioceno. La región ha sido explorada con el fin de determinar la presencia de minerales de mena como pirita, calcopirita y magnetita y minerales de alteración, característicos de sistemas porfíricos.

Petrográficamente, las rocas de este cuerpo han sido clasificadas como andesitas y dacitas con una variación hacia granodioritas y cuarzdioritas. Ocasionalmente, el pórfido está afectado por diques compuestos por rocas de la serie lamprofírica; estas rocas presentan enriquecimiento en fenocristales de hornblenda y biotita y una matriz con microlitos de feldespato potásico. Como minerales accesorios y minerales de introducción hidrotermal se observaron pirita, calcopirita y magnetita.

Las alteraciones hidrotermales predominantes son potásica, rica en biotita secundaria con una paragénesis biotita-epidota-clorita-calcita, y propilítica, con una paragénesis epidota –calcita-clorita. (SILLITOE 2000).

Geoquímicamente, las rocas fueron clasificadas como dacitas, andesitas y dioritas sub-alcalinas con contenido medio de potasio y carácter calco alcalino. Empleando este carácter como indicador petrogenético y aplicando diagramas de discriminación tectónica se estableció que el ambiente de generación del cuerpo porfírico de Santa Lucía está relacionado con la subducción de la placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana.

Palabras Clave: *alteración hidrotermal, paragénesis, pórfido, subalcalino, calcoalcalino, hipoabisal.*

### ABSTRACT

The Santa Lucia porphyry is an hypo-abyssal body of 5 km<sup>2</sup> of areal expression, located on La Sierra county, Cauca Department, western flank of the Central Cordillera. This igneous body crystallized between 1 and 2 kilometers deep, and has been dated as Miocene-Pliocene. The region has been explored looking for the presence of ores and alteration minerals as pyrite, chalcocopyrite and magnetite, proper of the porphyritic systems.

Petrographically, the rocks of this igneous body have been classified as andesites and dacites with a variation to granodiorites and quartz-diorites. Occasionally, the porphyry is affected by dikes composed by rocks of the lamprophyric series; these rocks present phenocrystals of hornblende and

biotite and a matrix with potassic feldspar microlithes. As accessory and hydrothermal introduction minerals pyrite, chalcopyrite and magnetite were observed.

Predominant hydrothermal alterations are potassic, rich in secondary biotite with a biotite – epidote – chlorite – calcite paragenesis, and propylitic with an epidote – calcite – chlorite paragenesis (SILLITOE 2000).

Geochemically, the rocks were classified as sub-alkaline, with medium content of potassium and calc-alkaline character dacites, andesites und diorites. Using this character as a petrogenetic indicator and applying tectonic discrimination diagrams, a generation environment related with the Nazca Plate subduction under the Southamerican plate is established.

Key words: *Hydrothermal alteration, paragenesis, porphyry, sub alkaline, calc-alkaline, hypo- abyssal.*

## INTRODUCCIÓN

Las rocas del cuerpo porfirítico de Santa Lucía, más conocido como pórfido de Piedrasentada (por presentarse en cercanías de esta población), están ubicadas en la región central del departamento del Cauca. Este cuerpo ha sido asociado por diversos autores a un sistema mineralizante tipo pórfido, perteneciente al trend de sistemas porfiríticos originado por el magmatismo calcoalcalino de edad mioceno – plioceno, encontrado desde el sur oeste colombiano hasta la parte central de Argentina (SILLITOE 2005).

El presente trabajo se centró en clasificar petrográficamente las rocas del cuerpo porfirítico de Santa Lucía, debido a que su litología hasta el momento no había sido descrita detalladamente y al interés económico que representan. Para tal fin se realizó la descripción y cuantificación de cada uno de los minerales esenciales, accesorios, menas y minerales de alteración. Los minerales de alteración junto con los minerales metálicos analizados corresponden a alteraciones típicas de sistemas porfiríticos como las descritas por Sillitoe en el 2000.

Por otro lado, haciendo uso de análisis químicos, se caracterizaron y clasificaron geoquímicamente las rocas. Para tal fin se utilizaron los diagramas propuestos por IRVINE & BARAGAR (1971, 1979), MIYASHIRO (1974), MIDDLEMOST (1975), LE MAITRE (1989), COX *et al.* (1979) y LE BAS *et al.* (1986). Así mismo se postula preliminarmente su posible ambiente de formación.

El presente estudio fue realizado como parte de las actividades del proyecto “Socialización y delimitación de prospectos en las áreas de Piedrasentada y Dominical, Departamento del Cauca, Colombia” realizado por la Universidad Nacional de Colombia en convenio con CARBOANDES S.A.

## LOCALIZACION

La zona de estudio se encuentra ubicada en la vereda de Santa Lucía del municipio La Sierra, en la parte central del departamento del Cauca sobre el flanco oeste de la Cordillera Central. La zona posee forma rectangular con un área aproximada de 20 km<sup>2</sup>. Se encuentra limitada al norte por la Vereda La Depresión y al sur por los ríos San

Pedro y Guachicono, que se georeferencian en la plancha topográfica 364-III-B escala 1:25000 publicada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Las coordenadas definidas para el área de estudio son (Fig. 1): X<sub>1</sub>: 731000 Y<sub>1</sub>: 1025000. X<sub>2</sub>: 734000 Y<sub>2</sub>: 1029000.

## METODOLOGIA

Se revisó la literatura existente acerca del área de estudio de donde se obtuvo información geológica, estructural y minera.

Se elaboró la cartografía geológica a escala 1: 5000, haciendo énfasis en el reconocimiento macroscópico de las rocas que constituyen el cuerpo porfirítico de Santa Lucía. Se tomaron 62 muestras para su caracterizar macroscópicamente (Fig. 2).

En los laboratorios del departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, se analizaron 18 secciones delgadas pulidas de roca (de superficie y de núcleos de perforación), haciendo conteos en 12 campos visuales para el reconocimiento de texturas, minerales translúcidos y metálicos. Las rocas fueron clasificadas según STRECKEISEN (1976).

Una vez realizada la clasificación petrográfica de las muestras, fueron seleccionadas cinco de ellas (aquellas que presentaron menor alteración) para análisis químicos (XRF) y de microsonda en los laboratorios del CEIF en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Los análisis de Fluorescencia de Rayos X, se llevaron a cabo en un espectrómetro de Fluorescencia de Rayos-X Pw 2440 equipado con tubo Rh y potencia máxima de 4 Kw y los de microsonda en un Microscopio Electrónico de Barrido FEI QUANTA 200, utilizando aceleraciones de entre 500v hasta 30kV.

Los análisis de microsonda permitieron corroborar la presencia de algunos especímenes mineralógicos, y determinar la química mineral de plagioclasas, micas y minerales opacos y los de fluorescencia para clasificar geoquímicamente las rocas y observar el comportamiento de algunos elementos seleccionados en ellas.

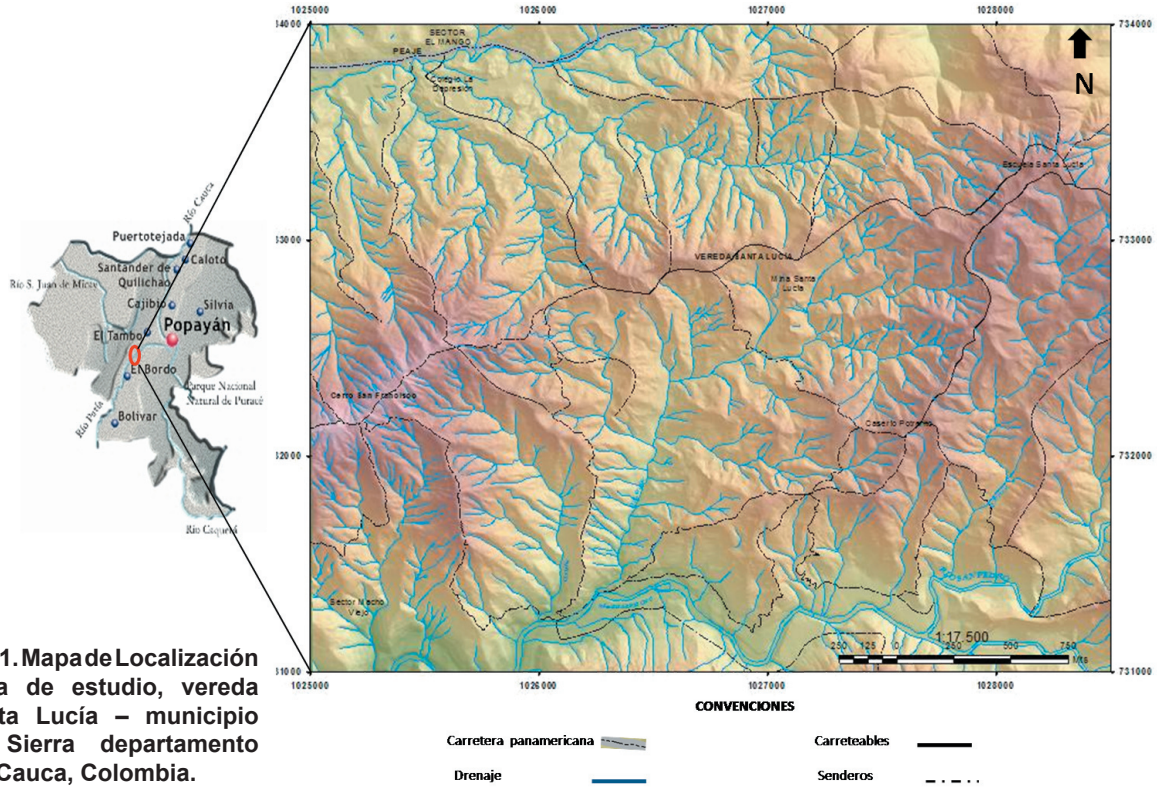


Fig. 1. Map de Localización zona de estudio, vereda Santa Lucía – municipio La Sierra departamento del Cauca, Colombia.

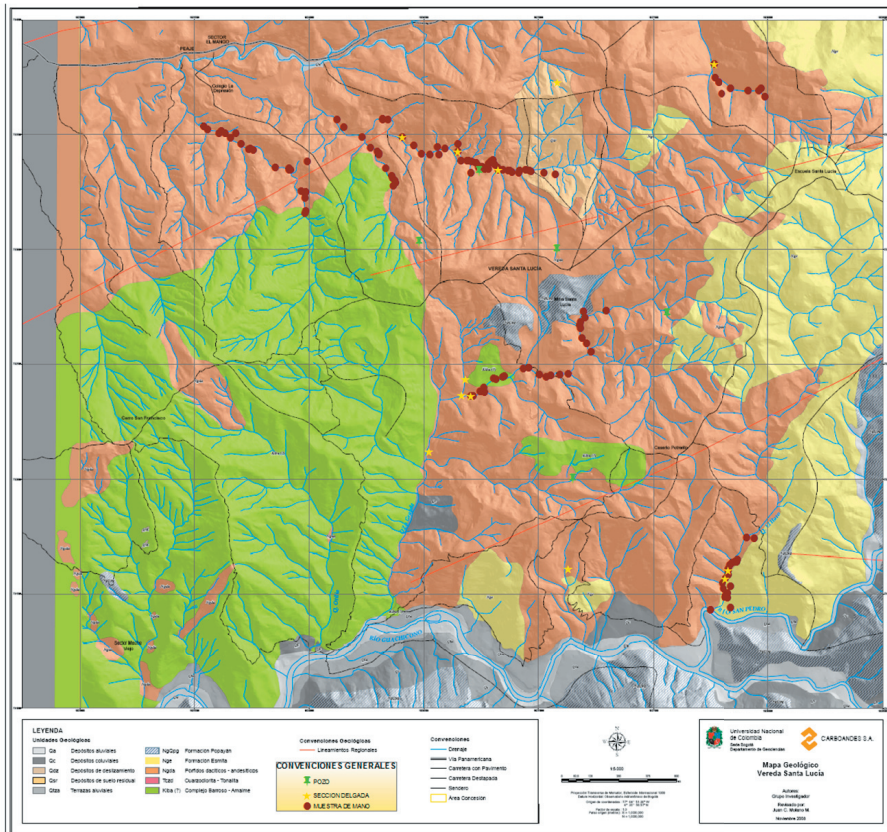


Fig. 2. Mapa Geológico escala 1:5.000. Ubicación muestras de mano y muestras para secciones delgadas de afloramiento y pozo.



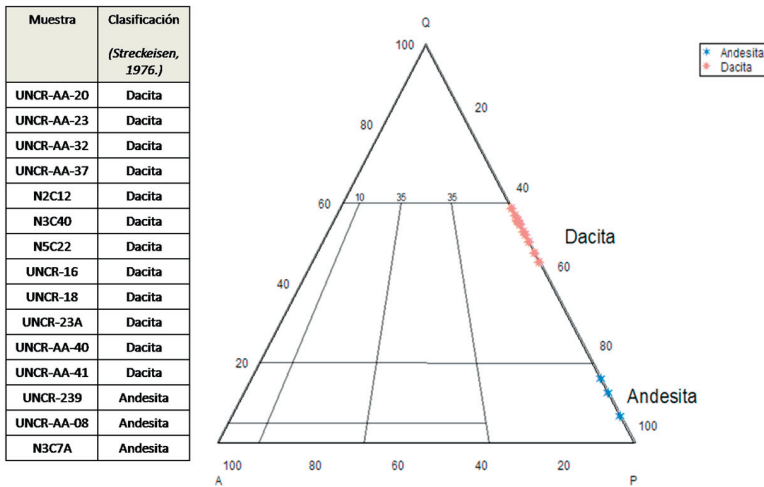


Fig. 3. Clasificación modal de las muestras analizadas del Pórfido de Santa Lucía según STRECKEISEN (1976).

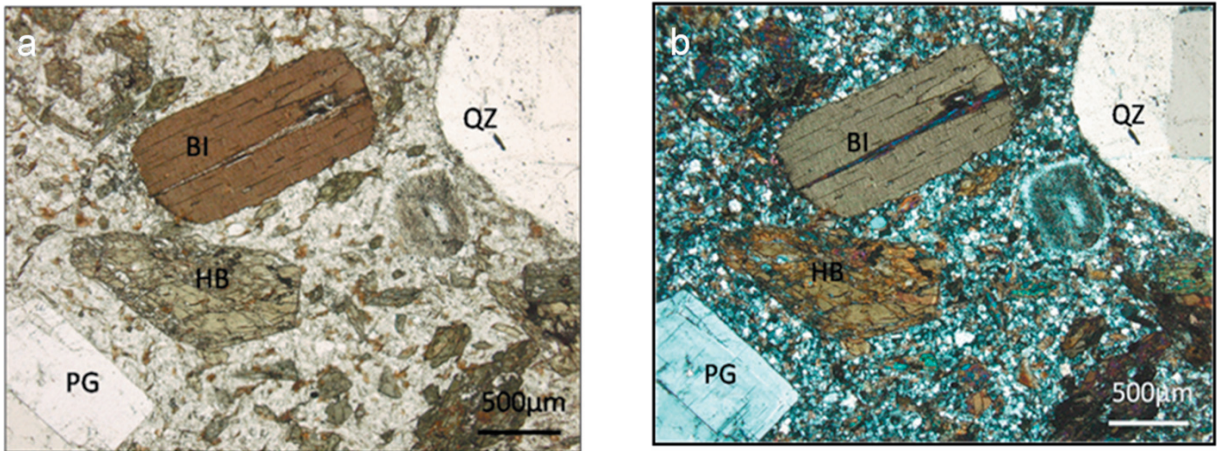


Fig. 4. Dacita donde se observan fenocristales de plagioclasa (pg), cuarzo (qz), hornblenda(hb) y biotita(bi), embebidos en una matriz criptocristalina. (a). Nícoles Paralelos (ppl) / objetivo 4x. (b) Nícoles Cruzados (xpl)/ objetivo 4x. Muestra N5-C22.

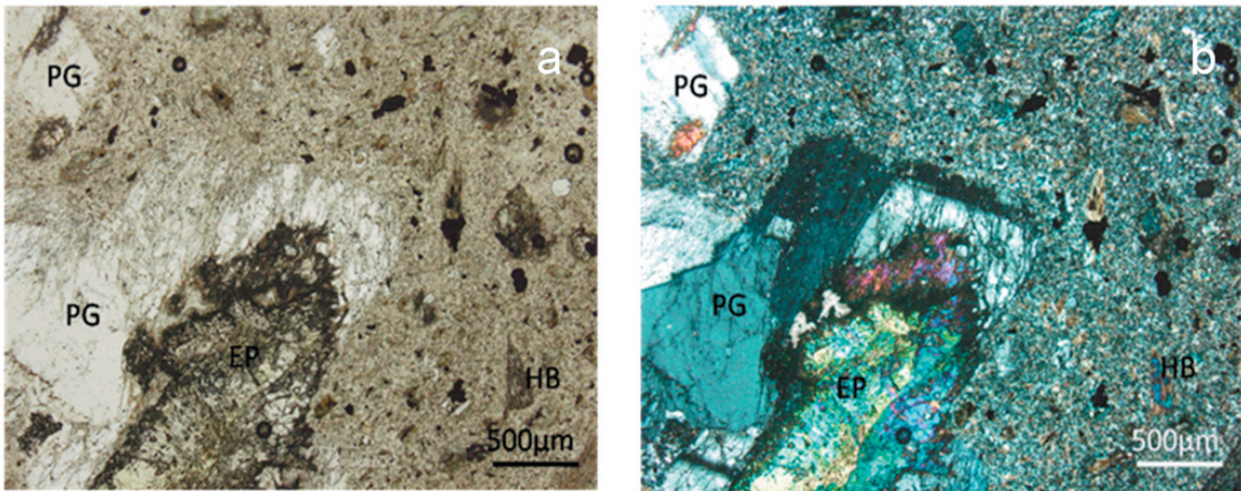


Fig. 5. Andesita donde se observan fenocristales de plagioclasa (pg), hornblenda (hb) y epidota (ep) como producto de alteración de la plagioclasa, embebidos en una matriz criptocristalina. (a.) Nícoles paralelos (ppl) / objetivo 4x (b). Nícoles cruzados (xpl)/ objetivo 4x. Muestra N3-C7A.



## MARCO GEOLOGICO

En general la configuración tectónica del área de estudio se encuentra controlada por la subducción de bajo ángulo y con dirección al este de la placa tectónica de Nazca bajo la Sur americana, al igual que por la acreción por el último bloque (Bloque Chocó), al continente, que genera la Orogenia Andina (DUQUE-CARO 1990).

Específicamente el pórfido de Santa Lucía está ubicado en el mega terreno Romeral, controlado estructuralmente por el sistema de fallas del Cauca-Romeral, expuesto en la cuenca Cauca – Patía, con componente de cabalgamiento y vergencia al oeste, el cual constituye el límite o paleo sutura entre las placas de Nazca y Sudamérica (CEDIEL *et al.* 2003).

Las mineralizaciones encontradas a lo largo de todo el Cauca- Patía se atribuyen al control que ejercen las fallas sobre la distribución de los stocks porfiríticos y los fluidos hidrotermales ocasionados por la acreción del Bloque del Chocó (Mioceno) (CEDIEL *et al.* 2003).

## GEOLOGÍA LOCAL

Estudios anteriores realizados en el área de estudio por MARULANDA (1976), ORREGO (1982), JICA (1983); MURILLO & DIAZ (1986), MOLANO *et al.* (2003), ROA *et al.* (2007), reportan unidades litoestratigráficas descritas por PARÍS & MARÍN (1979) con edades que oscilan entre el Cretácico y el Holoceno correspondientes a Complejo Barroso – Amaime (Kiba?) de Edad Jurásico a Cretáceo Temprano (ORREGO & PARÍS 1990), Formación Esmita (Nge) de edad Mioceno Tardío (LEÓN *et al.* 1973), Rocas Ígneas (Ngda-Tczd) de edad Mioceno (PARÍS & MARÍN 1979), y por la Formación Popayán (NgQpg) de edad Plioceno-Cuaternario (ORREGO & PARÍS 1990).

La unidad Rocas Ígneas Descrita por PARÍS & MARÍN (1979), en el área de estudio está representada principalmente por cuerpos hipoabisales dacíticos a andesíticos y en menor proporción cuarzodioríticos.

MARULANDA (1976) y JICA (1983) reconocen la presencia de un alto grado de alteración hidrotermal sobre todas las rocas de las unidades litoestratigráficas aflorantes en el área, por la asociación de epidota, calcita clorita y sericita que reemplazan parcial o totalmente los minerales primarios y por la presencia de mineralizaciones de pirita y cantidades menores de calcopirita y molibdenita.

Estructuralmente el área se encuentra afectada por el sistema de fallas de Cauca- Romeral. Específicamente

en el área, asociadas a este sistema, se encuentran las fallas Guachicono y el Horno con direcciones NW-SE y E-W (BALLESTEROS & CÁRDENAS 1977).

## Porfido de Santa Lucía

Se ha llamado Pórfido de Santa Lucía a un cuerpo hipoabisal con una expresión areal aproximada de 5 km<sup>2</sup>, que se encuentra intruyendo rocas del Complejo Barrroso-Amaime y de la Formación Esmita. Se considera que ha cristalizado a una profundidad entre uno y dos kilómetros (SILLITOE 2000). Ha sido categorizado como prospecto de cobre - molibdeno del sistema tipo pórfido, originado en el Subcinturón Porfirítico Central de los Andes Colombianos durante la época metalogénica ocurrida entre el Mioceno al Plioceno Temprano (SILLITOE 1982, SILLITOE *et al.* 2005).

El cuerpo porfirítico de Santa Lucía posee una morfología contrastante con las unidades adyacentes, representada por divisorias de aguas, caños profundos y valles amplios. Su patrón de drenaje principal es subparalelo y el secundario dendrítico. Las rocas se encuentran cubiertas por vegetación arbórea y pequeños cultivos. En los filos topográficos las rocas se hallan altamente meteorizadas, dando un color amarillo a rojizo.

Las rocas del pórfido de Santa Lucía fueron clasificadas macroscópicamente como dacitas y andesitas con texturas fuertemente porfiríticas y colores que varían entre gris, verde y negro. Se reconocen cristales esenciales de cuarzo, plagioclasa, biotita y hornblenda con tamaños entre 1 a 3 mm, embebidos en una matriz microcristalina. Se encuentran afectadas por eventos hidrotermales, haciéndose evidente la alteración propilítica debido a la presencia de la asociación mineralógica epidota, calcita y clorita. Del mismo modo se identificaron sulfuros (pirita, calcopirita, bornita y covelina) al igual que vetillas de cuarzo y calcita con espesores entre 1 a 15 cm.

Esporádicamente, fueron reconocidas rocas faneríticas, en su mayoría frescas y poco afectadas por alteración hidrotermal, con tamaños de grano de fino a medio (<1 mm a 2 mm), color gris claro, constituidas por cuarzo, plagioclasa y hornblenda las cuales fueron clasificadas macroscópicamente como tonalitas.

## Descripción Petrográfica

La petrografía, se llevo a cabo en cinco secciones delgadas pulidas de roca de núcleo de perforación y trece de roca de superficie. Quince muestras fueron clasificadas como dacitas y andesitas hornbléndicas porfiríticas, una como cuarzodiorita, una como granodiorita y la otra como

espesartita.

### Dacitas – Andesitas

En la clasificación modal según STRECKEISEN (1976) doce muestras se ubican en campo de dacitas y tres en el campo de andesitas (Fig. 3).

Corresponden a dacitas y andesitas hornbléndicas, hipocristalinas, con textura microporfírica y tamaño de los fenocristales que varía entre medio y fino.

Mineralógicamente están constituidas por fenocristales de plagioclasa, cuarzo, hornblenda y biotita embebidos en una matriz microcristalina a criptocristalina, constituida por cuarzo y plagioclasa (Fig. 4 y 5). Como minerales accesorios se identificaron esfenas, circones y apatitos. Pirita, calcopirita, magnetita, pirrotina están presentes como minerales secundarios de introducción, junto con epidota, calcita, actinolita, biotita secundaria, sericita y clorita.

### Composición Mineralógica de las Andesitas y Dacitas

Plagioclasa (PG). Los fenocristales poseen formas euhedrales a subhedrales, son tabulares, con tamaños que varían de fino a medio (250 a 1750 micras) y cristales subhedrales a anhedral con tamaños muy finos (25 micras) en la matriz.

Las plagioclasas se presentan como cristales individuales y aglomerados con maclas polisintéticas según la ley de albita y maclas de carlsbad, su composición varía entre oligoclasa ( $An_{10-30}$ ) y andesina ( $An_{30-50}$ ) determinada a partir del método Michel-Levy. Su porcentaje modal en todas las secciones varía entre el 30% y el 50%. Los cristales muestran zonación normal. Dicha zonación fue confirmada con los análisis de microsonda en donde se tomaron cuatro puntos para verificar este cambio composicional (Fig. 6). En algunos cristales se observaron coronas de reacción debidas a disequilibrios térmicos y composicionales o formadas por reacciones post-magmáticas entre minerales adyacentes, inducidas por soluciones deutéricas (TURNER *et al.* 1983).

En su mayoría las plagioclasas se encuentran alteradas hidrotermalmente a calcita, caolinita y sericita. La presencia de estos minerales se hace más evidente a lo largo de los planos de exfoliación. Es notable la sobreimposición de epidota, variedad pistacita, sobre las plagioclasas.

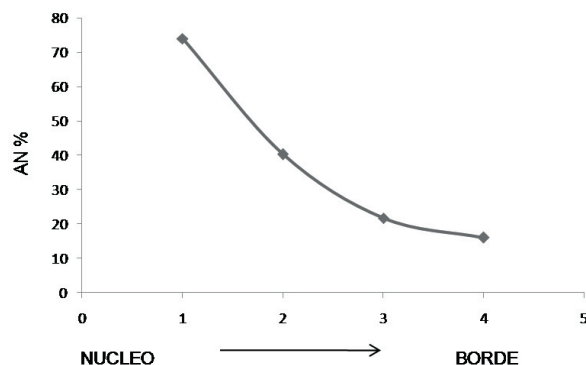


Fig. 6. Perfil de la zonación normal de la plagioclasa, determinada con microsonda electrónica. Muestra UNCR-AA-20.

Cuarzo (QZ). Los fenocristales son euhedrales a subhedrales con formas bipiramidales a subredondeadas, presentan bahías y microfracturas rellenas de material de introducción como calcita, sericita y minerales metálicos. Los cristales varían en tamaño entre muy fino en la matriz (25 micras) a medio en los fenocristales (1750 micras). Su porcentaje modal está entre 3% y 14% para las andesitas y entre 30% y 60% para las dacitas.

En la matriz el cuarzo primario es anhedral con bordes irregulares. Así mismo fue identificado cuarzo secundario, cuya presencia se atribuye a la liberación de sílice en las reacciones de alteración hidrotermal (silicificación) (GARCÍA 2007), relleno de cavidades y en forma de vetillas, mostrando textura "Diente de Perro" y de mosaico policristalino.

Hornblenda (HB). Se observa en cristales tabulares prismáticos con macla sencilla y exfoliación en dos direcciones formando ángulos aproximados de 58 a 120°, su color es verde oliva con fuerte pleocroísmo a amarillo. Los cristales tienen tamaños que varían entre 150 y 100 micras. Presenta intercrecimientos de magnetita y alteración a clorita, epidota y biotita secundaria. Su porcentaje modal varía entre 10 y 16% para dacitas-andesitas.

Biotita (BI). De color marrón con débil pleocroísmo a amarillo pálido, con formas tabulares alargadas, euhedrales a subhedrales, de tamaños que varían de fino a medio (250 a 1000 micras), con extinción ondulante, lo cual indicaría que las rocas sufrieron



Muestra	Clasificación (Streckeisen, 1976.)
UNCR-EC-182A	Cuarzodiorita
N4C3	Granodiorita

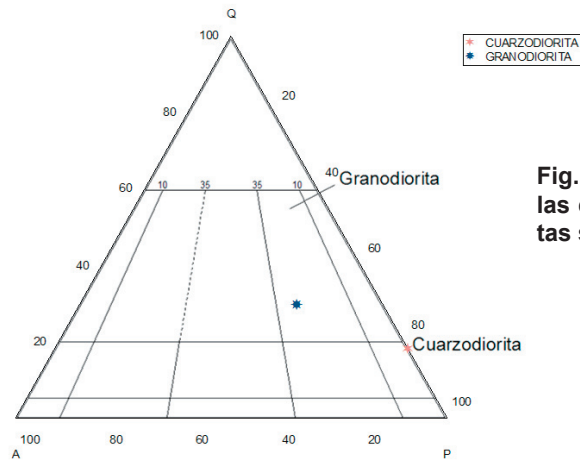


Fig. 7. Clasificación modal de las cuarzodioritas y granodioritas según STRECKEISEN (1976).

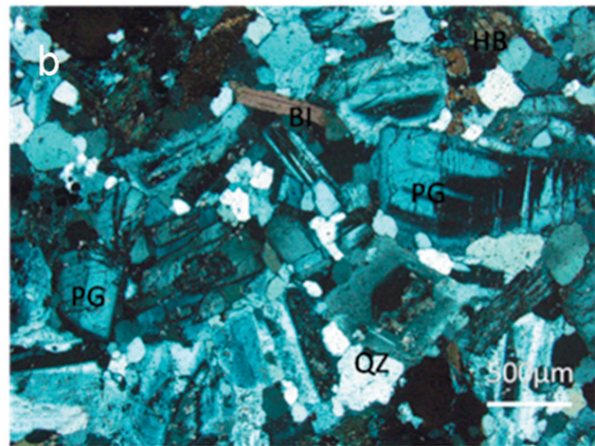
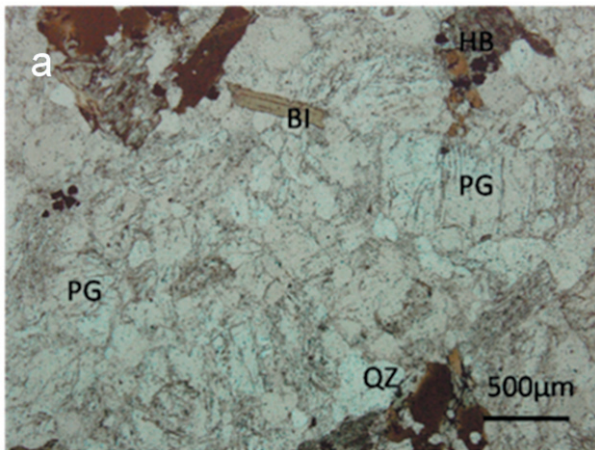


Fig. 8. Cuarzodiorita donde se observa cuarzo, plagioclasa, biotita y hornblenda. (a). Nícoles paralelos (ppl) / objetivo 4x (b). Nícoles cruzados (xpl)/ objetivo 4x. Muestra UNCR-EC-182A.

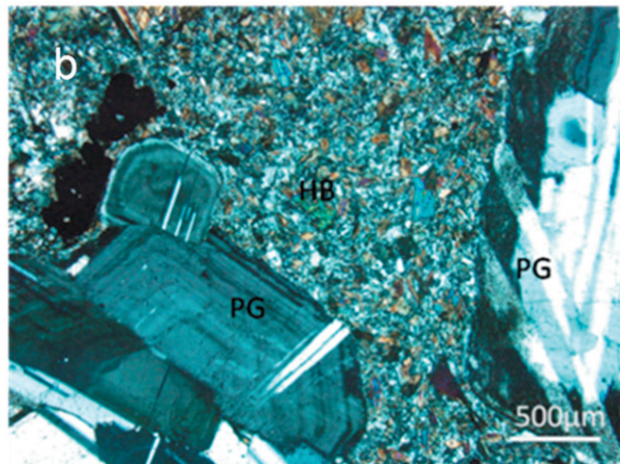
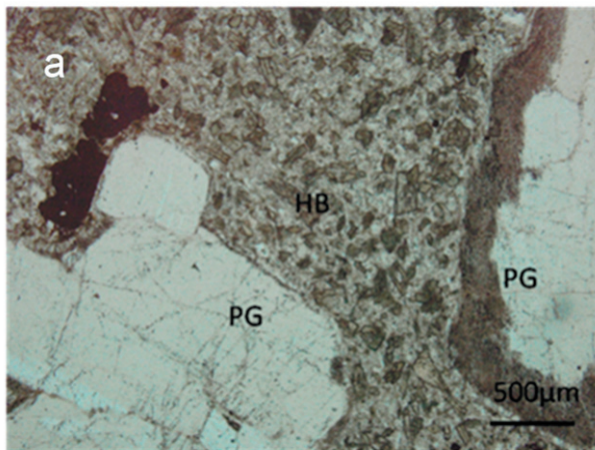


Fig. 9. Espersatita con fenocristales de plagioclasa y hornblenda en matriz plagioclasa (pg), hornblenda (hb), clinopiroxeno (cp) y feldespato potásico (fkf) (No son observados en la figura por su tamaño muy fino). (a). Nícoles paralelos (ppl) / objetivo 4x (b) Nícoles cruzados (xpl)/ objetivo 4x). Muestra UNCR-206.



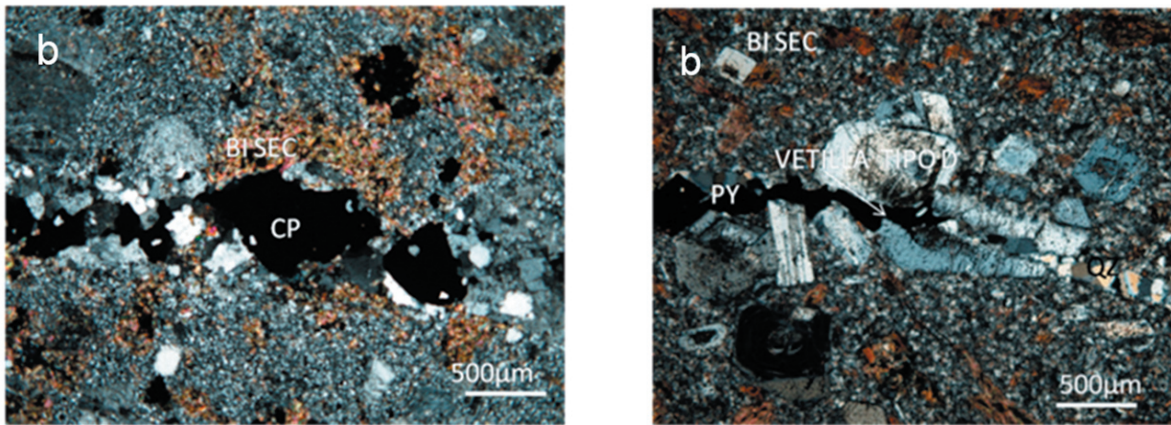


Fig. 11. (a) Nícoles cruzados (xpl) / objetivo 4x muestra UNCR-AA-23 que corresponde a una dacita, se observa el reemplazamiento total de la hornblenda por los neocristales de biotita secundaria (bi sec); (b) Nícoles cruzados (xpl)/ objetivo 4x muestra UNCR-AA-32 dacita, se observa vetilla de cuarzo+ calcopirita (cp) rodeada de Biotita secundaria.

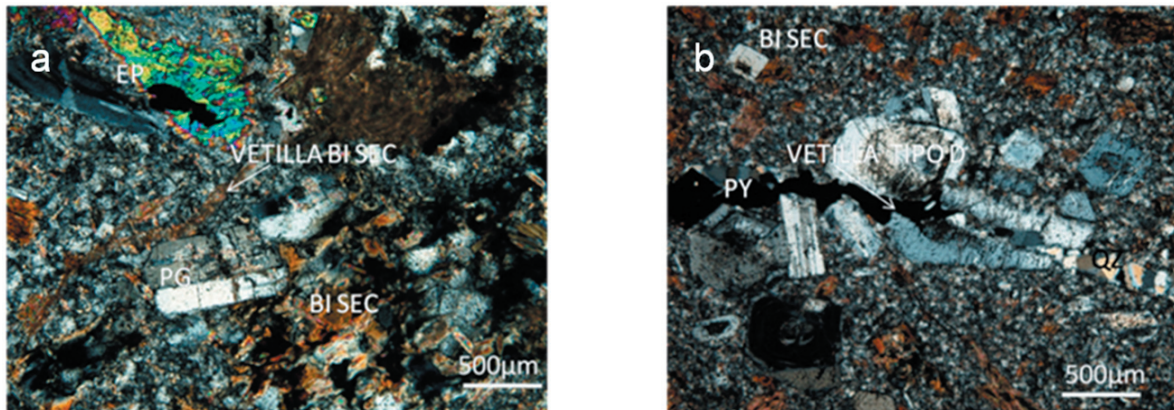


Fig. 12. Muestra UNCR-AA-23, dacita (a) Nícoles cruzados (xpl) / objetivo 4x Vetilla de biotita secundaria de aproximadamente 25 micras de espesor, (b) Nícoles cruzados (xpl)/ objetivo 4x. Vetilla de cuarzo + pirita sinuosa de espesor aproximado de 100 micras.

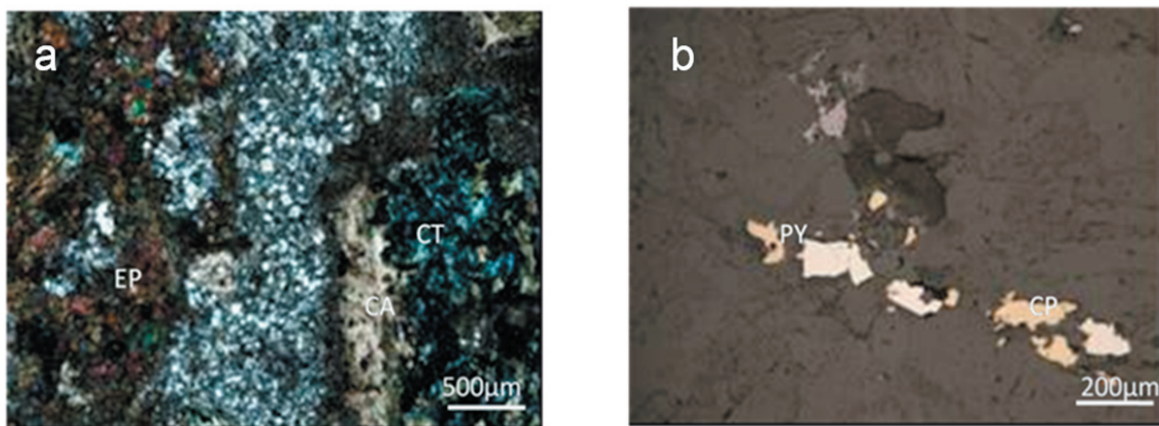
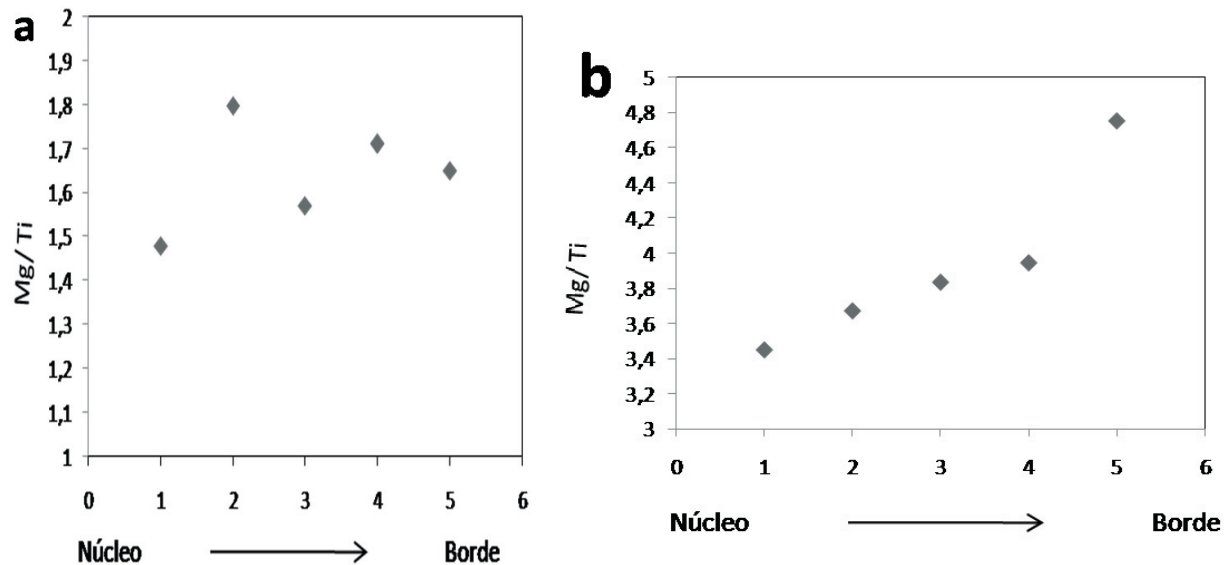


Fig. 13. (a) Nícoles cruzado/ (xpl) objetivo 4x, Dacita, muestra UNCR-AA-41. Obsérvese los minerales de alteración epidota, calcita, clorita que definen la alteración propilítica. (b) Luz reflejada/ (xpl) objetivo 10x. Minerales metálicos de introducción calcopirita y pirita en vetilla, muestra UNCR-EC-182A, cuarzodiorita.





**Fig. 10. Variación de la relación Mg/Ti: (a) Comportamiento relativamente constante de la relación Mg/Ti en un cristal de la biotita primaria, (b) Aumento de la relación Mg/Ti en un cristal de biotita neoformada.**

un leve metamorfismo dinámico (RODRÍGUEZ 2006). Algunos cristales se encuentran cloritizados y/o reemplazados totalmente por cristales muy finos de biotita secundaria. El porcentaje modal de la biotita en las dacitas y andesitas varía entre el 5% y el 10%.

**Matriz.** Corresponde a una masa criptocristalina generada por procesos de devitrificación relacionados con el hidrotermalismo que afecta las rocas.

En algunas secciones fue posible distinguir microlitos de plagioclasa en porcentajes que varían del 4 al 6% en las dacitas y hasta el 33% en las andesitas. El cuarzo está presente entre 16 y 20%. Se observan minerales metálicos (pirita y calcopirita) diseminados, en porcentajes que no sobrepasan el 5% de total del matriz.

**Esfena (SH).** Mineral accesorio, de color café rosado con fuerte relieve y cristales individuales de tamaño fino a medio (500 a 1000 micras) con forma euhedral prismática. Se encuentra asociada a epidota, calcita y hornblenda.

**Apatito y Circón.** Minerales accesorios en cristales muy finos (25 micras) euhedrales a subhedrales. Se observan como inclusiones en los cristales de hornblenda y cuarzo, al igual que en la matriz.

**Pirita (PY).** Se presenta como mineral accesorio

de la roca y como mineral de introducción, con tamaños que varían entre muy fino a fino. Su color es amarillo pálido en cristales euhedrales a anhedrales individuales, diseminados en la matriz o como fenocristales agrupados. Se observa asociada a magnetita y en vetillas sinuosas de espesor promedio de 250 micras junto al cuarzo de introducción (estas vetillas son definidas como vetillas tipo D por SILLITOE (2000)). La presencia de pirita en estas rocas varía entre 2 y 5%.

**Calcopirita (CP).** Con forma subhedral a anhedral de color amarillo, diseminada en la matriz y como inclusiones en las hornblendas. Hace parte de los minerales accesorios de la roca con porcentajes que varían entre el 1% y el 5% y como mineral de introducción dentro de vetillas en un 6%. Se observa en asociación con pirita y magnetita.

**Magnetita (MT).** Cristales de color gris, subhedrales a anhedrales, en tamaños de muy fino a medio, diseminados en la matriz, y como inclusiones en cristales de pirita, calcopirita y hornblendas y dentro de vetillas. Algunos cristales de tamaño medio se encuentran rodeados de biotita secundaria (mineral de alteración) y con procesos de martitización (alteración a hematita). Sus porcentajes varían entre 1 y 4%, aumentando su concentración en las rocas de superficie, en su mayoría hace parte de los minerales de introducción.

Pirrotina (PO). Cristales de color gris-rosado, anhedrales, de grano muy fino como inclusiones en cristales de pirita y magnetita, en concentraciones menores al 1%.

Otros minerales opacos identificados en menor proporción son: la molibdenita como cristales muy finos diseminados en la matriz y presente en vetillas con espesores menores a 250 micras, bornita, covelina y calcosina que se encuentran generalmente asociados y se observan bordeando los cristales de calcopirita.

### **Cuarzodiorita y granodiorita**

Se clasificaron microscópicamente como cuarzodioritas y granodioritas (Fig. 7) a dos rocas holocristalinas, con texturas de fino a meso granulares. Como minerales esenciales se encuentran cuarzo, plagioclasa, hornblenda y biotita (Fig. 8). Los minerales metálicos presentes son pirita y calcopirita y como minerales de alteración biotita secundaria, epidota y clorita.

### **Composición mineralógica**

Cuarzo (QZ). En cristales con formas subhedrales a anhedrales. En su mayoría se presenta de forma intersticial con bordes irregulares y con tamaño de grano medio (200 micras). Su porcentaje modal varía entre el 18% en la cuarzodiorita y el 30% en la granodiorita.

Fue observado cuarzo secundario policristalino con textura de mosaico relacionado a vetillas.

Plagioclasa (PG). Se trata de oligoclasa ( $An_{10-30}$ ) – andesina ( $An_{30-50}$ ), con formas tabulares euhedrales a subhedrales, con macla polisintética según la ley de albita y carlsbad, zonación ondulante y coronas de reacción. Algunos cristales se presentan epidotizados y alterados a sericita. El porcentaje modal en que se encuentra está entre el 50% en la granodiorita y 79% en la Cuarzodiorita.

Feldespato potásico (KFD). En cristales tabulares, euhedrales a subhedrales, de grano fino (500 a 700 micras). Su porcentaje en la granodiorita es del 20%.

Hornblenda (HB). Cristales de color verde con fuerte pleocroísmo, de formas tabulares y prismáticas con tamaños de grano medio (500 micras), con alteración a epidota y biotita secundaria. Presenta intercrecimientos de minerales metálicos.

Biotita (BI). De color marrón con pleocroísmo moderado, en cristales tabulares alargados Euhedrales,

de grano fino (250 a 500 micras).

Pirita (PY). Cristales subhedrales de tamaño muy fino a fino (25 a 100 micras) de color amarillo pálido con inclusiones de magnetita y asociada a calcopirita, se encuentra como mineral accesorio diseminado en la roca e intersticial entre los cuarzos y plagioclasas. También fue reconocido como mineral de introducción dentro de vetillas. Su porcentaje varía entre el 1 y el 2%.

Calcopirita (CP). Cristales individuales subhedrales a anhedrales de color amarillo, asociados con pirita y magnetita en porcentajes del 1%.

Magnetita (MG). Cristales anhedrales de tamaño fino como inclusiones en pirita y hornblendas, presente entre un 3 a 4%.

Se reconoció otro tipo de roca que petrográficamente posee una textura microporfirítica, con plagioclasa, considerable contenido de hornblenda, además de menor proporción clinopiroxeno y feldespato alcalino (Fig. 9). En comparación con las dacitas y andesitas descritas anteriormente, el porcentaje de matriz es menor y los minerales máficos se encuentran agrupados. La presencia de feldespato alcalino fue corroborada por medio de las mediciones realizadas con la microsonda electrónica. Esta muestra fue clasificada como una roca de la serie lamprofírica, más exactamente como una espersatita, de acuerdo con lo recomendado por HUGHES (1982), TUNER (1983) y SHELLEY (1993). Estas rocas se presentan a manera de diques cortando las dacitas y andesitas del pórfido de Santa Lucía.

Los minerales identificados en este tipo de roca son: Plagioclasa (PG). Los fenocristales poseen formas euhedrales a subhedrales, son tabulares, con tamaños que varían de fino a medio (250 a 1750 micras). Los microlitos de la matriz son subhedrales a anhedrales de tamaño muy fino (25 micras), su porcentaje modal es del 63,6%.

Hornblenda (HB). Se presenta como cristales de color verde con fuerte pleocroísmo, con formas tabulares y prismáticas, de grano fino (50 micras) a medio (500 micras); su porcentaje modal es del 32%.

Sanidina (FKD): Observada como fenocristales de tamaño fino (100 a 250 micras) y en la matriz como cristales tabulares de grano muy fino. Su porcentaje modal es del 6%.

Clinopiroxeno (CPX). De color verde con débil



pleocroísmo en cristales tabulares, euhedrales de tamaño fino (25 micras) presente en un 1%.

Cuarzo (QZ). Se observa subhedral a anhedral como cristales intersticiales y cuarzos bipiramidales de tamaño de grano que varían de fino a medio (100 a 1000 micras). Su porcentaje modal es del 30.2%.

Biotita (BI) De color café con pleocroísmo a amarillo, Subhedral de tamaño absoluto entre 500  $\mu\text{m}$  a 1000  $\mu\text{m}$ . Su porcentaje modal es del 2%.

## ALTERACIÓN HIDROTHERMAL

La alteración hidrotermal conceptualmente proviene de cambios sobre condiciones de presión-temperatura y composición de los fluidos circulantes, que generan destrucción mineral, transformación o crecimiento de nuevos minerales. Las asociaciones de los minerales secundarios permiten el reconocimiento de diferentes tipos de alteración hidrotermal. A partir de las asociaciones mineralógicas, SILLITOE (2000) discrimina seis tipos de alteración hidrotermal características de los depósitos porfíricos: Alteración Ca-Na, alteración potásica, alteración propilítica, alteración argílica intermedia, alteración filica y argílica avanzada.

En el pórfido de Santa Lucía fueron reconocidas dos alteraciones a partir de la aparición y asociación de los minerales secundarios identificados en las rocas:

Alteración potásica rica en biotita secundaria caracterizada por la neoformación de cristales de biotita rica en magnesio, la cual fue corroborada mediante el uso de microsonda electrónica. Se observa un aumento de Mg y disminución de Ti con respecto a la composición de la biotita primaria, (Fig. 10). La disminución de Ti en la biotita secundaria se atribuye a que este elemento entra a hacer parte de la estructura del rutilo que se encuentra acompañando a la biotita secundaria (GARCÍA 2007).

La biotita secundaria de color rojo, se encuentra en cristales diseminados en la matriz y como cristales tabulares de tamaño muy fino reemplazando totalmente a las hornblendas (Fig. 11a), su concentración oscila entre el 5 y el 13%. Se encuentra rodeando minerales metálicos tales como pirita y calcopirita y en paragénesis con actinolita, clorita, epidota y calcita en menores proporciones. También se observa como halos en los bordes de vetillas de cuarzo, magnetita y calcopirita (vetillas tipo A, SILLITOE 2000) (Fig. 11b).

Otras vetillas que se observan en las muestras con

alteración potásica rica en biotita secundaria, son vetillas de pirita con cuarzo (Vetillas tipo D) (Fig. 12a) y vetillas de solo biotita (Vetillas tipo EB) (12b).

La alteración propilítica está representada por la asociación de epidota (11,5 a 2,4%), clorita (11 al 5%) y calcita (5%) (Fig. 13a). Microscópicamente la epidota (variedad pistacita) se observa en agregados de cristales anhedrales, reemplazando parcial o totalmente a los cristales de plagioclasa. La clorita (variedad pennina) se presenta en cristales anhedrales como producto de alteración de los minerales máficos como hornblenda y biotita. La calcita en cristales de tamaño muy fino, individuales o sobre las plagioclasas a lo largo de sus planos de exfoliación.

Los minerales metálicos encontrados corresponden a pirita, calcopirita, magnetita, pirrotina, (en vetillas de cuarzo, calcopirita (vetillas tipo A)) (Fig. 13 b), bornita (en halos de alteración de la pirita) y calcosina y covelina (en trazas, diseminadas en las muestras).

La alteración Potásica rica en biotita secundaria predomina sobre la propilítica en casi todas las muestras analizadas (superficie y profundidad) sobre todo en las rocas dacíticas y andesíticas, con excepción de las muestras UNCR-18, UNCR-23A, UNCR-AA-37, UNCR-AA-40, UNCR-AA-41 y UNCR-EC-182A donde predomina la alteración propilítica y la asociación epidota-calcita-clorita con biotita secundaria en menor porcentaje que se interpreta como la transición entre la alteración potásica, que implica alta temperatura, y la alteración propilítica, consecuencia de un enfriamiento o declinación de temperatura en el sistema.

## CARACTERIZACION Y CLASIFICACION GEOQUIMICA DE LAS ROCAS

Debido al elevado contenido de matriz criptocristalina a microcristalina presente en la mayoría de las rocas clasificadas petrográficamente, se realizaron análisis químicos, por el método de Fluorescencia de Rayos X a cinco muestras seleccionadas (Fig. 14), para así confirmar su clasificación petrográfica y caracterizarlas geoquímicamente.

La concentración de los óxidos de los elementos mayores fue normalizada, libre de agua al 100%. Los valores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3^T$  fueron recalculados según la relación  $(\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeO}) = 0,2$  de acuerdo con WILKINSON (1986) y la norma CIPW fue calculada (Fig. 15)

Para descartar la posibilidad de que las muestras

seleccionadas para análisis químicos se encontraron alteradas, se utilizó el diagrama Na<sub>2</sub>O/ K<sub>2</sub>O vs Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O de MIYASHIRO (1975) que separa las rocas frescas de las alteradas. Como se observa en la figura 16 todas las muestras seleccionadas caen en el campo de rocas frescas, lo cual dio certeza que la caracterización y clasificación geoquímica reflejara la composición original de la roca.

### Caracterización Geoquímica

Para caracterizar la serie a la cual pertenecen las rocas del cuerpo porfirítico de Santa Lucía, se utilizó el diagrama de álcalis total contra sílice y el diagrama de

Ol- Ne-Q normativos de acuerdo con lo propuesto por IRVINE & BARAGAR (1971) donde se observa claramente que las rocas analizadas pertenecen a la serie subalcalina (Fig. 17a y 17b).

Haciendo uso del diagrama K<sub>2</sub>O vs SiO<sub>2</sub> de MIDDLEMOST (1975), el cual permite diferenciar las rocas de las series alcalinas, subalcalina y subalcalina baja K, se corrobora el carácter subalcalino de las muestras del pórfido de Santa Lucía (Fig. 18a). Del mismo modo al clasificarlas en el diagrama de LE MAITRE (1989), se determinó que las rocas son subalcalinas con contenidos medios de potasio (Fig. 18b).

muestra	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Rb	Ba	Sr	Cr	Ni	Zr	As	Cu	Zn	S	Pb
uncr-239	66,33	0,47	15,71	1,97	2,18	0,05	2,31	4,88	3,13	0,89	0,11	14,5	280,9	408,8	47,5	37	54,5	0	70,1	28,1	2099,7	8,3
uncr-ec-182a	61,7	0,56	16,49	2,06	2,93	0,07	2,15	4,88	2,83	2,06	0,24	14,3	863,6	369,1	152,4	20,8	102,1	5	170,4	58,7	2500	13,7
n5c22	63,46	0,42	15,49	1,92	2,63	0,05	2,84	5,35	3	1,04	0,16	17,3	304,5	393	124,1	18,4	53,7	4,9	160,2	35,8	3392,4	13,5
uncr-aa-08	56,81	0,74	16,39	2,24	5,74	0,15	4,75	7,11	2,58	1,48	0,24	0,1	438,3	342,1	156,2	22	57,5	1,8	70,7	57,5	2603,9	7,5
n3c7a	62,02	0,6	17,55	2,10	3,71	0,03	2,72	4,82	3,25	1,69	0,22	36,4	375,8	438,1	103,6	32,5	66	0	49,8	38	5936,8	5,2

Fig. 14. Composición química de cinco muestras del cuerpo porfirítico de Santa Lucía (óxidos de elementos mayores y menores en % y trazas en ppm). Petrográficamente las muestras UNCR-239 y n5c22 corresponden a dacitas; UNCR-AA-08 y N3C7A a andesitas; y la UNCR-EC-182A a una cuarzdiorita.

muestra	%AN	Q	or	ab	an	C	hy	mt	il	ap
uncr-239	47	31	5	23	23	1	7	3,16	0,89	0
uncr-ec-182a	46,09	21	12	26	23	1	8	2,99	1,06	1
n5c22	50	26	6	25	26	1	10	2,78	0,8	0
uncr-aa-08	50	12,04	9	22	29	0	18	3,25	1,41	1
n3c7a	45	21	10	28	22	2	11	3,04	1,14	1

Fig. 15. Porcentajes de minerales normativos (CIPW) para las cinco muestras seleccionadas.



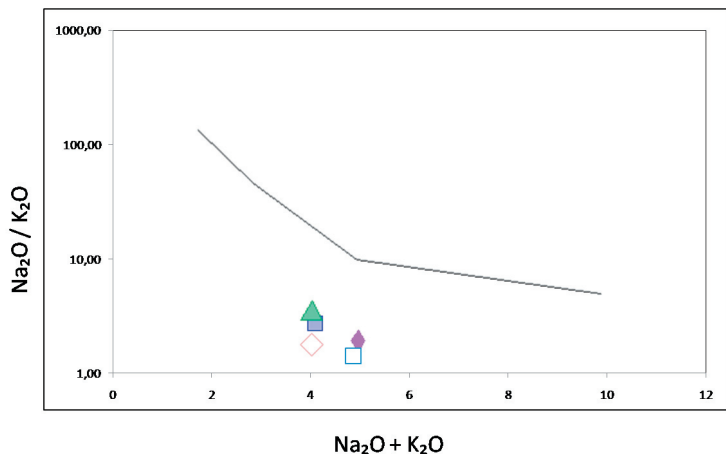


Fig. 16. Diagrama  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  vs  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  de MIYASHIRO (1975) para separar rocas frescas de alteradas. Símbolos como en la Fig. 14.

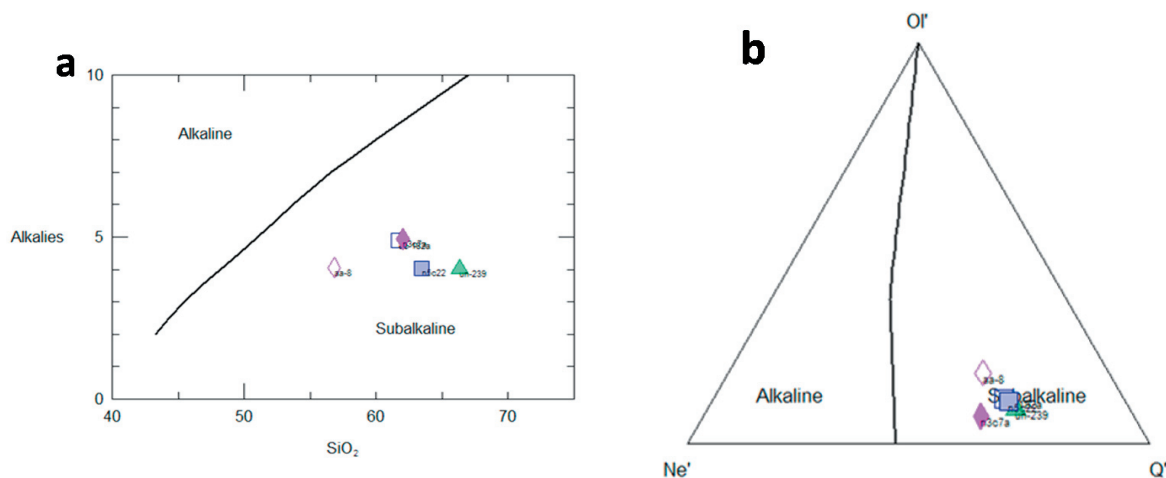


Fig. 17. (a) Diagrama álcalis total vs sílice (IRVINE & BARAGAR 1971) para cinco muestras del cuerpo porfírico de Santa Lucía, (b) diagrama de OI- Ne- Q. En los cuales se observa que las cinco muestras caen en campo subalcalino. Símbolos como en la Fig. 14.

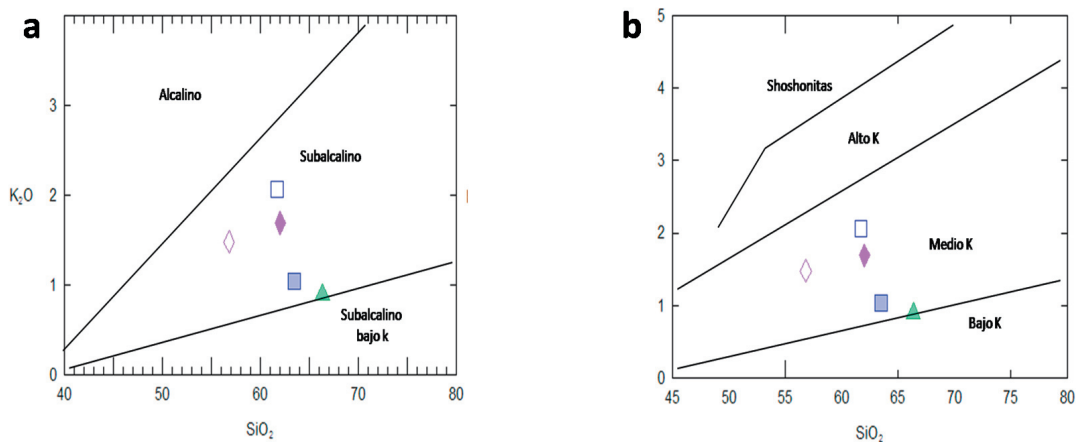


Fig. 18 (a) diagrama  $\text{K}_2\text{O}$  vs  $\text{SiO}_2$  según MIDDLEMOST (1975) para diferenciar rocas alcalinas, subalcalina y subalcalina baja en K donde se observa el carácter subalcalino de la cinco muestras; (b) diagrama  $\text{K}_2\text{O}$  vs  $\text{SiO}_2$  según LE MAITRE (1989) utilizado para determinar su contenido de potasio. Símbolos como en la Fig. 14.

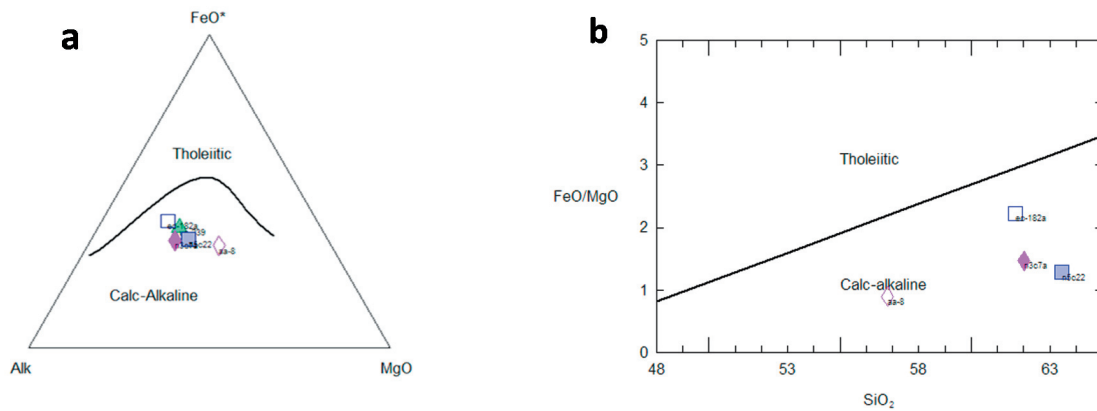


Fig. 19. (a) Diagrama AFM para diferenciar rocas toleíticas de calcoalcalinas según IRVINE & BARAGAR (1971), (b) diagrama FeO/MgO vs SiO<sub>2</sub> para diferenciar roca toleíticas de calcoalcalina con base en MIYASHIRO (1974). Obsérvese el carácter calcoalcalino. Símbolos como en la Fig. 14.

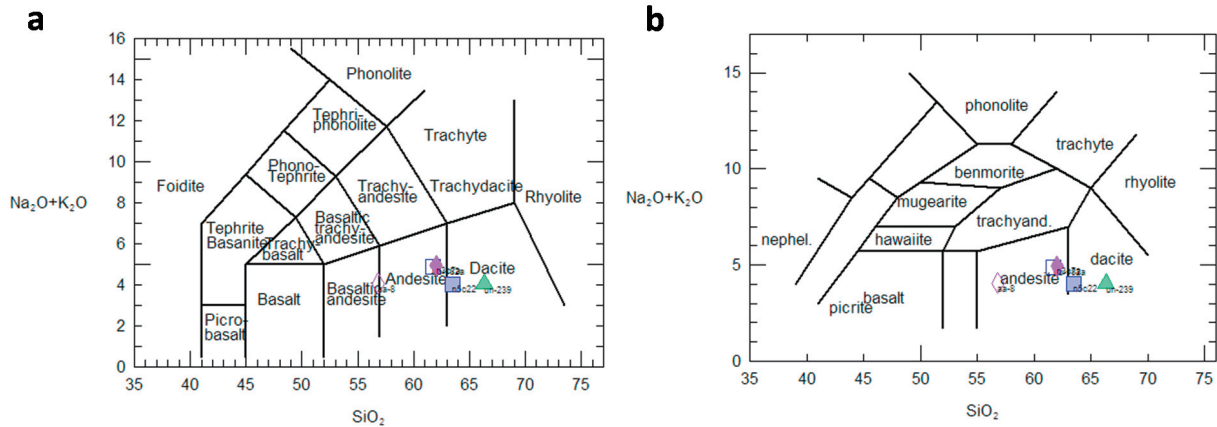


Fig. 20. (a) Diagrama de álcalis total (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) vs SiO<sub>2</sub> según LE BAS *et al.* (1986), (b) Diagrama de álcalis total (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) vs SiO<sub>2</sub> de COX *et al.* (1979), para las muestras analizadas. Símbolos como en la Fig. 13.

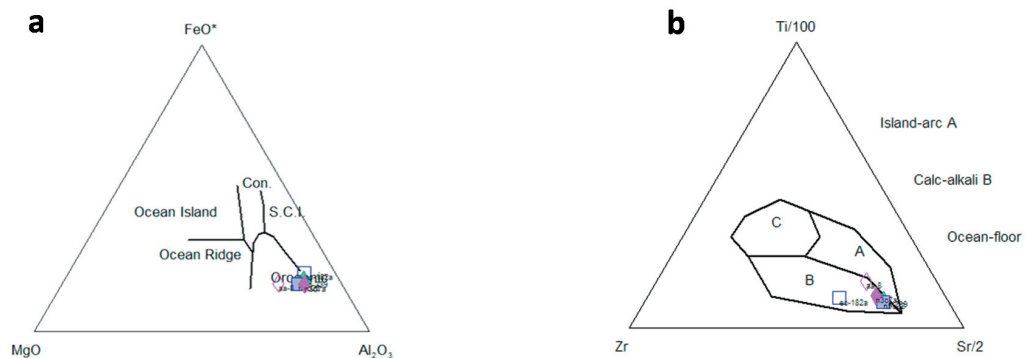


Fig. 21. (a) Diagrama de discriminación geotectónica MgO- FeO\*- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> según PEARCE *et al.* (1977), donde se observa que las rocas están relacionadas con un ambiente orogénico (márgenes convergentes) (b) Diagrama Ti-Zr-Sr de discriminación tectónica según PEARCE & CANN (1973) donde las muestras se ubican en el campo que corresponde a un ambiente compresivo (zonas de subducción). Símbolos como en la Fig. 13.

Por medio de los diagramas AFM de IRVINE & BARAGAR (1971) (Fig. 19a) y FeO/MgO vs SiO<sub>2</sub> de MIYASHIRO (1974), se observa claramente que las rocas pertenecen a la serie calcoalcalina (Fig. 19b).

### Clasificación Geoquímica

Para la clasificación geoquímica de las rocas fueron utilizados los diagramas de álcalis total (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) vs SiO<sub>2</sub> de COX *et al.* (1979) y el de LE BAS *et al.* (1986). En dichos diagramas las muestras son clasificadas como dacitas, andesitas y dioritas (Fig. 19).

La muestra UNCR-239 la cual es clasificada geoquímicamente como una dacita (Fig. 20a y 20b), petrográficamente fue clasificada como andesita. Esta diferencia en la clasificación es debida principalmente a la imposibilidad de reconocer los constituyentes mineralógicos en la matriz criptocristalina.

La muestra UNCR-AA-8 ubicada en el límite entre basalto andesítico y andesita en los diagramas de clasificación geoquímica, corresponde petrográficamente a una andesita debido a la composición de la plagioclasa cuyo componente anortítico es < de 50. Geoquímicamente la muestra UNCR-EC-182A se clasifica como diorita, la N5C22 se clasifica como dacita y la muestra N3C7A como andesita, coincidiendo con la clasificación petrográfica.

Utilizando los diagramas de discriminación geotectónica de PEARCE *et al.* (1977) (Fig. 21a) y PEARCE & CANN (1973) (Fig. 21b) y con base en la aseveración de WILSON (1989), con respecto a la afinidad genética de las rocas calcoalcalinas con zonas de subducción, podemos afirmar que el origen del pórfido de Santa Lucía está relacionado específicamente con la subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana.

### CONCLUSIONES

La mayoría de las rocas del cuerpo porfírico de Santa Lucía fueron clasificadas petrográficamente como dacitas y andesitas hornbléndicas. Ocasionalmente fueron identificadas granodioritas y cuarzdioritas que pueden corresponder a variaciones texturales dentro del mismo cuerpo. Las rocas presentan un grado de cristalinidad hipocristalino con textura microporfírica y tamaño de grano que varía entre medio a fino. La matriz presenta procesos de devitrificación relacionados con cambios de temperatura causados por la presencia de fluidos hidrotermales.

Se reconocieron rocas lamprofíricas con

enriquecimiento de minerales máficos como hornblenda y biotita, además de la presencia de feldespatos alcalinos en la matriz.

Se determinaron dos tipos de alteraciones hidrotermales de depósitos tipo pórfido: Alteración propilítica y alteración potásica rica en biotita secundaria, siendo esta última la predominante en las muestras analizadas.

Las rocas fueron clasificadas geoquímicamente como dacitas, andesitas y diorita, clasificaciones que concuerdan, en la mayoría de las muestras, con la clasificación petrográfica.

El cuerpo porfírico de Santa Lucía es de carácter subalcalino y pertenece a la serie calcoalcalina, con contenido de potasio medio, el cual es tomado como indicador petrogenético para relacionar su ambiente de formación con zonas de subducción, concluyendo que este cuerpo porfírico hace parte del magmatismo calcoalcalino originado por la subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado en el marco del proyecto de investigación "Socialización y Delimitación de Prospectos en las áreas Piedra Sentada y Dominical, Departamento de Cauca, Colombia" desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia en asociación con la empresa CARBOANDES S.A. Los autores agradecen tanto a la institución educativa como a la empresa privada y a todas aquellas personas que colaboraron en el desarrollo de los estudios, correcciones del manuscrito y permitieron esta publicación.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARD, J.P. (1980): Microtextures of igneous and metamorphic rocks. Reidel publishing company.
- BALLESTEROS, L. E. & CARDENAS, R. E. (1977): Estudio geológico de La Sierra, Cauca. (Tesis de grado).- 153 p., Universidad Nacional de Colombia; Departamento de Geociencias, Bogotá
- CAMUS, I. F. (2003): Geología de los Sistemas Porfíricos en los Andes de Chile. Servicio de Geología y Minería Santiago, Chile. 267p
- CEDIEL, F. SHAW, R.P., CACERS, C. (2003): Tectonic assembly of the northern andean block, in C. Bartolini, R.T. Buffler, and J. Blickwede, eds., The Caribbean: Hydrocarbon habitat, basin formation, and plate tectonics: AAPG memoir 79, p 815-848.
- DUQUE-CARO, H. (1990): The Chocó block in the NW corner of South America structural, tectonostigraphic and paleogeographic implications. Journal of south American Earth Sciences, v.7, p71-84. Pergamon press, London.



- GARCÍA, C. A. (2007): Caracterización petrográfica y metalográfica del prospecto pórfido aurífero Dos Quebradas – la Cumbre, Quinchía, Risaralda. Tesis de grado para optar el título de geólogo, Universidad de Caldas.
- IRVINE, T.N. & BARAGAR, W.R (1971): A guide to the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth sciences, v. 8, p 523-548.
- JAPAN INTERNACIONAL COOPERATION AGENCY (JICA). (1987): Informe sobre Exploración de minerales del área de Almaguer, Departamento de Cauca, Colombia. Compilación Fases I, II y III.
- JAPAN INTERNACIONAL COOPERATION AGENCY (JICA). (1985): Informe sobre Exploración de minerales del área de Almaguer, Departamento de Cauca, Colombia. Fase I.
- JAPAN INTERNACIONAL COOPERATION AGENCY (JICA). (1986): Informe sobre Exploración de minerales del área de Almaguer, Departamento de Cauca, Colombia. Fase II.
- JAPAN INTERNACIONAL COOPERATION AGENCY (JICA). (1987): Informe sobre Exploración de minerales del área de Almaguer, Departamento de Cauca, Colombia. Fase III.
- JARAMILLO, L. & ESCOVAR, R. (1980): Cinturones de pórfidos cupríferos en las cordilleras colombianas. I-1801. INGEOMINAS. Bogotá, Colombia
- LE BAS, M. J., LE MAITRE, R. W., STRECKEISEN, A & ZANETTIN, B (1986): A chemical classification of volcanic rocks base on total alkali-silica diagram. Journal of petrology, V27, part3, p745-750
- MARULANDA, N. (1976): Geología y geoquímica del área de Piedra Sentada, Municipio de El Bordo, Departamento del Cauca. I-1703 INGEOMINAS. Popayán, Colombia.
- MARULANDA, N. (1978): Geología y Prospección geoquímica del área mineralizada La Vega y Almaguer. I-1762, INGEOMINAS. Popayán, Colombia.
- MIYASHIRO, E.A. (1975): Classification, characteristics and origin of ophiolites, Journal of geology. V83. P249-281.
- MOLANO, J. C., LONDOÑO, S. E., MOJICA, J. (2003): Catálogo de las propiedades mineralógicas, físicas y químicas de los yacimientos auríferos primarios de los departamentos Cauca, Nariño y Valle del Cauca. INGEOMINAS. Cali, Colombia.
- PARIS, G. & MARIN, P. (1979): Generalidades a cerca de la geología del Departamento de Cauca. INGEOMINAS. Popayan, Colombia.
- PEARCE, J. & CANN, J. (1973): Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace elements analyses. Earth and planetary science letters, N 19, p.239-300
- SEEDORFF, E., DILLES, J.H., PROFFETT, J.M. & EINAUDI, M. T.,(2005): Porphyry deposits: characteristic and origin of hypogene features. Economic Geology 100th anniversary volume. 251-298.
- SHELLEY, D. (1992): Igneous and Metamorphic Rocks under the Microscope. Chapman & Hall. P. 16-17.
- SILLITOE, R., JARAMILLO, L., DAMON, P., SHAFIQUILLAH, M. & ESCOVAR, R. (1982): Setting, characteristics, and age of the Andean porphyry copper belt in Colombia. Economic Geology, Vol. 77, p. 1837 – 1850.
- SILLITOE, R. (1998): Major regional factors favoring large size, high hypogene grade, elevated gold content and supergene oxidation and enrichment of porphyry copper deposits. Porter, T.M., Eds. Porphyry and hydrothermal copper and gold deposits. A global perspective, Perth, 1998, Conference proceedings: Glenside, South Australia, Australian Mineral Foundation, p. 21 - 34.
- SILLITOE, R. (2000): Gold-rich porphyry deposits: descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery. SEG REVIEWS, Vol. 3, p. 315 – 345. Canada
- SILLITOE, R. (2005): Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types metallogeny, exploration, and discovery: Economic Geology 100th anniversary volume. P845-890.
- STRECKEISEN, A. (1976): To each plutonic rock its proper name. Earth-science reviews, v.12, p1-33, Amsterdam.
- WILSON, M. (1989). Igneous petrogenesis. Unwin Hyman, London.
- WILKINSON, J.F. (1989): Classification and average Chemical Compositions of Common Basalts and Andesites. Journal of Petrology. Vol 7, part 1, pp31-62.

*Manuscrito recibido Agosto 2009; aceptado Noviembre 2009.*