

**ESTRATIGRAFÍA, PETROLOGÍA Y GEOQUÍMICA DE LAS ROCAS VOLCÁNICAS
DEL FLANCO OCCIDENTAL DEL VOLCÁN PURACÉ, ALREDEDORES DE
COCONUCO**

SANDRA MILENA LÓPEZ CASTRO

Maestría en Ciencias de la Tierra

Departamento de Geología

Universidad EAFIT

Medellín

2009

**ESTRATIGRAFÍA, PETROLOGÍA Y GEOQUÍMICA DE LAS ROCAS VOLCÁNICAS
DEL FLANCO OCCIDENTAL DEL VOLCÁN PURACÉ, ALREDEDORES DE
COCONUCO**

Sandra Milena López Castro

Directora:

Gloria Elena Toro Villegas, PhD.

Maestría en Ciencias de la Tierra

Departamento de Geología

Universidad EAFIT

Medellín

2009

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial a la profesora **Gloria Elena Toro** por su apoyo, dedicación y compañía durante el desarrollo de este trabajo.

A **INGEOMINAS**, por el soporte económico y apoyo. Por los análisis de laboratorio realizados durante la segunda fase de éste. Un agradecimiento especial a **Bernardo Pulgarín** por ser el líder de esta institución al frente del proyecto junto con la **Doctora Martha Calvache** y, las geólogas **María Luisa Monsalve y Adriana Agudelo**.

A la comunidad indígena del departamento de Cauca, especialmente al resguardo de Puracé - Coconuco, por ayuda y acompañamiento durante el trabajo de campo.

A los **profesores del Departamento de Geología**: José Ignacio Martínez, Gloria Sierra, Juan Darío Restrepo, Michel Hermelin, Geovany Bedoya e Iván Correa, por sus enseñanzas, colaboración y apoyo durante el período transcurrido en la universidad.

A las amigas y compañeras de estudio, sueños, angustias y alegrías: **Patricia Torres, Eliana Cañola, Laura Téllez y Katherine Jerez**, de quienes guardo los mejores recuerdos. Gracias por el apoyo en todos los momentos de este trabajo. A la **Dra María Isabel Marín-Cerón** por su ayuda desinteresada y consejos. A los geólogos **José Fernando Duque y Harold Andrés Albarracín**, compañeros y amigos de las salidas de campo, con quienes compartí gratos momentos.

A **María Isabel Acevedo y Wilton Echavarría**, por la paciencia y ayuda con las actividades logísticas del proceso.

A mi familia, por estar incondicionalmente, seguir creyendo en mí y permitirme seguir adelante con mis sueños.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	10
1. Introducción.....	11
1.1 Objetivos.....	12
1.1.1. Objetivo General.....	12
1.1.2. Objetivos específicos.....	12
1.2 Localización.....	13
1.3 Metodología.....	13
2. Geología.....	17
2.1 Configuración tectónica de los Andes del norte.....	17
2.2 Volcanismo.....	19
2.3 Basamento y estratigrafía de las rocas volcánicas en el área de estudio.....	21
3. Resultados.....	27
3.1 Geomorfología.....	27
3.1.1. Unidad de Colinas Altas (Ca).....	27
3.1.2. Unidad de Lomas Altas (La).....	27
3.1.3. Unidad de Colinas Medias (Cm).....	29
3.1.4. Unidad de Colinas bajas de cima redondeada (Cbcr).....	29
3.1.5. Unidad de Vertientes largas y rectas (Vlr).....	29
3.1.6. Unidad de Cañón del río Cauca (Crc).....	29
3.1.7. Unidad de Superficie Ondulada (So).....	29
3.1.8. Unidad de Escarpe del río La Calera (Erc).....	30
3.1.9. Unidad de Morrenas (Mo).....	30
3.1.10. Unidad de Coluvión (Co).....	30
3.1.11. Unidad de Llanuras de inundación y terrazas aluviales (Lita).....	31
3.2 Geología.....	31
3.2.1 Depósitos piroclásticos de la Formación Popayán al occidente del río Cauca (Dpp).....	36
3.2.2 Ignimbrita Soldada (Dp).....	37
3.2.3 Depósito de lava asociada a Paletará (DI1).....	39
3.2.4 Depósitos de lava asociados a Chagartón (DI 2, DI 3, DI 4, DI 5, DI6)..	40
3.2.5 Depósito de ceniza y pómez (Dcp).....	40
3.2.6 Depósitos de tilita (Dt).....	41
3.2.7 Depósitos de vertiente (Dv).....	41
3.2.8 Depósitos aluviales (Qal).....	41

3.3	Petrografía	41
3.4	Caracterización Mineralógica de la matriz de los depósitos piroclásticos	45
3.5	Geoquímica	47
4.	Análisis y discusión.....	53
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	60
5.1	Conclusiones	60
5.2	Recomendaciones	61
6.	Referencias.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio	14
Figura 2. Marco tectónico del arco volcánico del suroccidente de Colombia.	18
Figura 3. Columna estratigráfica de la Formación Coconucos	22
Figura 4. Mapa de la Formación Coconuco (Tomado de Monsalve, 2000).....	24
Figura 5. Mapa geomorfológico del área de estudio.	28
Figura 6. Unidades geomorfológicas alrededor de Coconuco.....	30
Figura 7. Correlaciones aloestratigráficas del Miembro Chagartón – Formación Coconucos.....	33
Figura 8. Mapa de estaciones. Base cartográfica escala 1:25.000.....	34
Figura 9. Columna aloestratigráfica generalizada del Miembro Chagartón.....	35
Figura 10. Mapa Geológico de la zona de estudio. Cartografía base escala 1:25.000	38
Figura 11. Estructura columnar en el depósito de lava asociado a Paletará (DI1).....	39
Figura 12. Diagrama de Streckeisen para las muestras de lava analizadas.....	42
Figura 13. Textura sériate en las plagioclasas del sector Peña La Estrella	43
Figura 14. Minerales secundarios en las rocas explosivas (Fotografía con nicoles cruzados).....	45
Figura 15. Diagrama de composición mineral para los depósitos piroclásticos no consolidados.....	46
Figura 16. Análisis de minerales densos para los depósitos piroclásticos no consolidados.....	46
Figura 17. Diagrama AFM para las muestras estudiadas (Según Irvine y Barragar, 1971).....	48
Figura 18. Diagrama TAS para las muestras estudiadas (Después de Le Bas <i>et al.</i> 1986).....	50
Figura 19. Diagrama de variación de SiO ₂ vs K ₂ O para las muestras estudiadas (Después de Gill, 1981)	50
Figura 20. Diagramas Harker de variación de los óxidos mayores con respecto al sílice de las muestras estudiadas	51
Figura 21. Diagramas Harker de variación de los elementos trazas en las muestras estudiadas.	52
Figura 22. Diagrama de clasificación TAS para muestras de la Formación Coconucos analizadas en diferentes trabajos (Después de Le Bas <i>et al.</i> 1986)	55
Figura 23. Relación SiO ₂ vs K ₂ O para muestras de la Formación Coconucos analizadas en diferentes trabajos (Después de Gill, 1981)	56
Figura 24. Diagramas Harker de variación de óxidos mayores con respecto al sílice de muestras analizadas por diferentes autores.....	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos obtenidos para elementos mayores, menores y trazas en toca total, de muestras de lava del Miembro Chagartón – Formación Coconucos.....	49
---	----

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Información de campo

Anexo 2. Petrografía y Montajes de grano

Anexo 3. Recopilación de datos geoquímicos

RESUMEN

El estudio cartográfico y aloestratigráfico de las rocas volcánicas que afloran alrededor del municipio de Coconuco, aporta nuevos datos para ampliar el conocimiento del volcanismo en el suroccidente colombiano.

La cartografía de 10 unidades aloestratigráficas y 11 unidades geomorfológicas, permitió construir la columna aloestratigráfica del sector, para describir la intercalación e interdigitación de los depósitos de flujos de lavas y los depósitos de flujos piroclásticos asociados a la actividad de la Cadena Volcánica de los Coconucos, registrada en el flanco occidental del volcán Puracé, entre los 2400 y 3200 msnm.

Hacia la base de la columna se registró una ignimbrita que representa un evento explosivo de gran magnitud, que se extiende más allá del área de estudio y podría correlacionarse con la Formación Popayán. Sobre esta unidad basal, reposa un depósito de lava con dirección norte – sur, cuya área fuente se sitúa posiblemente en el Valle del Paletará. Estas lavas son suprayacidas por un conjunto de depósitos de lava con dirección este – oeste, asociados al centro de emisión de Chagartón; hacia el techo se encuentran depósitos piroclásticos de menor magnitud recubiertos por un paleosuelo y finalmente una capa de cenizas volcánicas recientes dispersas en el área. Por medio de las relaciones de campo y las características morfológicas de las unidades, se estableció la cronología de los depósitos.

El análisis petrográfico de 14 secciones delgadas y el análisis geoquímico (elementos mayores y algunos trazas) de 10 muestras representativas de los depósitos de lava, indican una tendencia calcoalclina, de composición traquiandesítica – andesítica, con alto contenido de potasio. Estos rasgos son característicos de las zonas de subducción y están relacionadas con la interacción de las placas Nazca y Suramérica. El modelo de formación de estas rocas volcánicas es controversial y, con los datos obtenidos en este trabajo no se logra plantear una hipótesis, sin embargo, los resultados obtenidos están de acuerdo con los datos reportados para el sector y permiten detallar la aloestratigrafía del Miembro Chagartón de la Formación Coconucos definida por Mosalve (2000).

ABSTRACT

The cartographic and allostratigraphic analysis of volcanic rock outcrops surrounding the Coconuco municipality gather new data which expands the knowledge of volcanism in southwestern Colombia.

The cartography of 10 allostratigraphic and 11 geomorphologic units allowed to define a general allostratigraphic column for the region in order to describe the intercalation and interdigitation of lava flow deposits and pyroclastic deposits associated with the Coconucos volcanic chain, located in the western flank of the Puracé Volcano between 2400 and 3200 masl.

Representing an explosive event of great magnitude, a deposit was registered at the base of the column, which extends beyond the study area and could be correlated with the Popayán Formation. Over this basal unit lies a lava deposit with north-south direction, probably associated genetically with a source located in the Paletara Valley. These lavas are overlaid by a lava deposit assemblage with an east – west direction associated with the Chagartón emission center. Over to the top, minor palaeosoil-coated pyroclastic deposits are found and at the end a recent volcanic ashes layer are dispersed over the area. The deposit chronology was established through the units' distinguished by field work relations and morphologic characteristics.

Petrographic analysis of 14 thin sections and geochemical analysis of major and some trace elements of 10 representative samples of the lava deposits, indicate a calc – alkaline trend and traquiandesite-andesite composition with high potassium content. These features are typical of subduction zones and related to the interaction of the Nazca plate and South America. The formation model for these volcanic rocks still controversial and it is not possible to establish a hypothesis with the data obtained in this study. Nevertheless the obtained results agree with the reported data for this region and allow detailing the Coconucos Formation allostratigraphy defined by Mosalve (2000).

1.Introducción

El volcán Puracé se localiza en el extremo septentrional de la Cadena Volcánica de los Coconucos, en la Cordillera Central de Colombia, en cercanías de los municipios de Popayán, Puracé y Coconuco. Es uno de los volcanes más activos de Colombia (Kuroda y Paris, 1978) y por lo tanto, es importante conocer y entender la evolución del sistema magmático, las etapas del volcanismo y los productos asociados a su actividad, tanto de las épocas pasadas como recientes. Por esta razón INGEOMINAS y la Universidad Eafit, iniciaron la tarea de caracterizar y analizar detalladamente los depósitos volcánicos del departamento del Cauca y, así aportar nuevos datos para avanzar en el conocimiento del volcanismo en el suroccidente colombiano.

En este estudio se presentan los resultados estratigráficos, petrográficos y geoquímicos obtenidos en los depósitos volcánicos aflorantes en los alrededores del Municipio de Coconuco. La caracterización realizada permitió detallar la cartografía del Miembro Chagartón de la Formación Coconucos definida por Monsalve (2000). Esta nueva información aporta datos para entender la evolución del volcanismo del suroccidente colombiano, conocimiento importante para los estudios de actualización de la amenaza volcánica del volcán Puracé.

En el capítulo 1, Introducción, se presentan los objetivos generales y específicos, los detalles de localización y se describe la metodología seguida durante el trabajo de campo, de laboratorio y el análisis de los datos.

El capítulo 2, Geología, se describe el marco geodinámico del suroccidente colombiano a partir de los estudios anteriores con énfasis en la Formación Coconucos.

El capítulo 3, Resultados, se discuten los mapas geológico y geomorfológico levantados a escala 1:25.000. Se sintetiza una columna aloestratigráfica generalizada de acuerdo con los datos de estratigrafía, petrografía y geoquímica.

El capítulo 4, Análisis y discusión, se interpretan los datos obtenidos en el trabajo, se retoman algunos modelos propuestos para la evolución del volcanismo en el suroccidente colombiano y su relación con la cadena volcánica de los Coconucos.

En el capítulo 5, se presentan las conclusiones y algunas recomendaciones importantes para estudios futuros.

Finalmente, en los anexos se detallan las coordenadas de las estaciones de campo, los datos analíticos de la petrografía y la geoquímica publicada por otros autores.

1.1 Objetivos

Objetivo General

Caracterizar por medio de la petrografía, geoquímica y estratigrafía las rocas que afloran en la margen noroccidental del volcán Puracé, y definir las relaciones con otras rocas volcánicas del sector.

Objetivos específicos

- Presentar una revisión sobre el conocimiento del volcán Puracé y la cadena volcánica de los Coconucos, en el contexto del volcanismo del suroccidente colombiano y su marco geodinámico.
- Realizar el mapa geomorfológico a escala 1:25.000 para la Formación Coconucos, en los alrededores del municipio de Coconuco.
- Cartografiar los depósitos volcánicos y volcano-sedimentarios a escala 1:25.000 en los alrededores del municipio de Coconuco y sintetizar la información en un mapa geológico, con base en la cartografía de la Formación Coconuco propuesta por INGEOMINAS (2003).
- Analizar los datos petrográficos y geoquímicos obtenidos de muestras de lava del Miembro Chagartón – Formación Coconucos.
- Integrar, comparar y discutir los datos obtenidos en este trabajo con los estudios sobre volcanología del suroccidente colombiano, y aportar nuevas luces para el entendimiento del contexto regional.

1.2 Localización

La Cadena volcánica de los Coconucos pertenece a la denominada Zona Volcánica Norte de la Cadena de los Andes, caracterizada por la presencia de centros volcánicos hasta 5°N (Figura 1). El volcán Puracé está ubicado en la cima de la Cordillera Central, en el departamento de Cauca, a 35 km de la ciudad de Popayán. La zona de estudio está localizada sobre la margen noroccidental del volcán Puracé, en inmediaciones del casco urbano del municipio de Coconuco; el sector está representado en las planchas topográficas 365 IA y 365 IC, escala 1:25.000 del IGAC, entre las coordenadas 76°32'30"W – 76°24'30"W y 2°16' N – 2°21'30" N. El volcán Puracé junto con seis picos más, conforma la Cadena Volcánica de los Coconucos.

1.3 Metodología

La recopilación bibliográfica relacionada con los aspectos geodinámicos de los Andes del norte y la interacción con el volcanismo, además de las características geológicas, petrográficas, geoquímicas y vulcanológicas del suroccidente de Colombia, permitieron realizar una síntesis sobre el conocimiento actual del volcanismo de la cadena volcánica de los Coconucos.

La fotointerpretación de las fotografías aéreas M7 – M550 (7435 – 7452) y M5 – M550 (7370 – 7381), permitió realizar un mapa fotogeológico para establecer los recorridos de campo y los lugares para visitar. Este mapa se utilizó como base para elaborar el mapa geomorfológico según las características del terreno, tales como forma de la superficie, forma y longitud de las vertientes, tipo de drenaje, grado de disección, insición y grado de evolución. Se utilizaron las planchas topográficas del IGAC, como base para la digitalización de los mapas en el software ArcGis 9.2, en el cual se elaboró una geodatabase y donde está consignada toda la información del proyecto al cual está adscrito este estudio.

El trabajo de campo se realizó en 32 días entre los meses de abril-mayo y septiembre de 2007, en el cual se hizo un muestreo riguroso, con precaución de tomar muestras de roca frescas, para los análisis de laboratorio posteriores. La cartografía de los depósitos volcánicos fue a escala 1:25.0000 y se tomó como base la Plancha 365 – Coconucos (INGEOMINAS, 2003); de igual manera se levantaron las columnas aloestratigráficas, en los afloramientos que representan los diferentes eventos volcánicos y cuyo acceso fue posible, siguiendo los parámetros recomendados por INGEOMINAS para recopilar la información de campo.

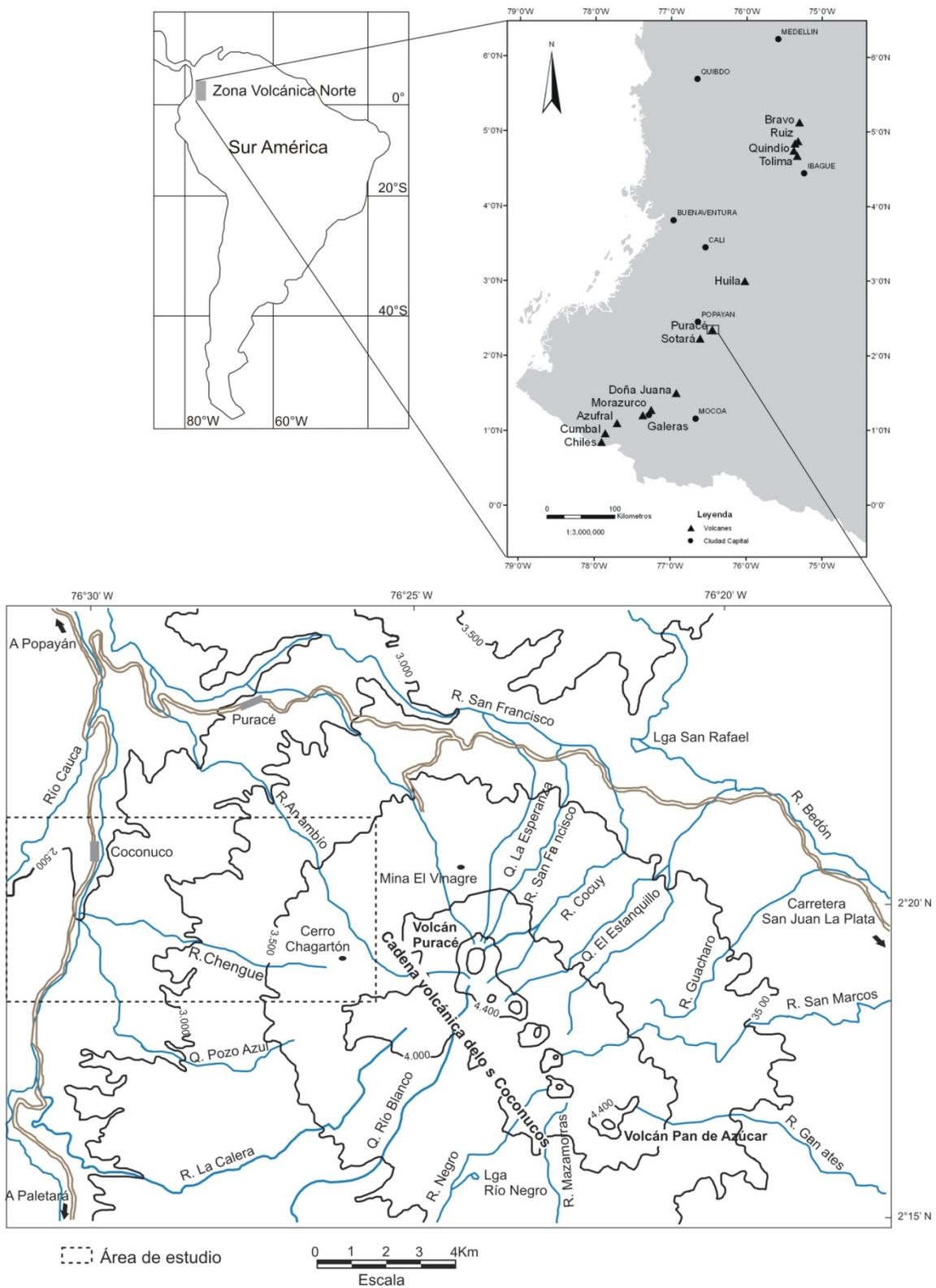


Figura 1. Localización del área de estudio

Se utilizó el concepto de **unidad aloestratigráfica**, para diferenciar los depósitos con límites discontinuos caracterizados por la heterogeneidad litológica, distinguir entre diferentes depósitos superpuestos con límites discontinuos de litología similar, depósitos contiguos con límites discontinuos de litología similar, o unidades con límites discontinuos separadas geográficamente de litología similar (North American Stratigraphic Code, 2005). Esto debido a que los depósitos volcánicos asociados al volcán Puracé y estructuras anteriores, están separados geográficamente y dispersos en las vertientes del volcán actual. También, están confinados en el valle del río La Calera y restringidos a los valles estrechos de los cauces secundarios. Es común observar depósitos piroclásticos, que representan eventos explosivos alternantes con depósitos de la actividad efusiva.

El trabajo de laboratorio incluyó la selección de muestras para la elaboración de las secciones delgadas, la elaboración de montajes de granos para la caracterización de la matriz de los depósitos piroclásticos y la preparación de muestras para futuras dataciones por trazas de fisión. Para los estudios geoquímicos las muestras se seleccionaron excluyendo todas aquellas donde se observó meteorización y/o alteración hidrotermal. Se elaboraron un total de 14 secciones delgadas, 5 placas de montajes de grano, para analizar la matriz de las rocas piroclástica y 10 muestras para el análisis geoquímico.

Las secciones delgadas fueron descritas con énfasis especial en la identificación y análisis de las texturas, que conservan las evidencias de procesos ocurridos en la cámara magmática, como mezclas de magmas, orden de cristalización y evidencias de reabsorción (Vernon, 2004). Para la clasificación petrográfica de Streckeisen (1979) se realizó un conteo modal de 500 puntos y se siguieron las recomendaciones para la clasificación de rocas de Le Maitre *et al.* (2002). De otro lado, si bien Fisher y Schmincke (1984) proponen una clasificación genética de las ignimbritas, sin condicionar el término al soldamiento, sino al proceso piroclástico generador del depósito, ya sea colapso de edificio, colapso de domo, colapso de columna o erupción dirigida, en este trabajo se siguieron las recomendaciones del INGEOMINAS y, se denomina ignimbrita sólo aquellos depósitos donde se observaron evidencias de soldamiento.

En los montajes de grano realizados a las matrices de los depósitos piroclásticos, se describieron todos los constituyentes, y se realizó el conteo de al menos 250 minerales densos (anfíbol, piroxeno, biotita), que permite clarificar los cambios físicos y químicos

en la fuente de las erupciones piroclásticas y, así realizar correlaciones entre las diferentes unidades (Kamata *et al*, 1997).

Las muestras para los análisis de elementos mayores, menores y trazas, fueron inicialmente procesadas en los laboratorios de la Universidad Eafit. Cada una de las muestras fueron trituradas con almadrana y con un molino de quijada, hasta llevarlas a fragmentos de roca de tamaños entre 1 – 3 cm; usando una lupa de 80 X, se seleccionaron 10 g de los fragmentos de roca frescos y se le lavaron con alcohol 3 veces; finalmente se secó a temperatura ambiente, y con un ágata se maceró hasta obtener un polvo fino impalpable al tacto, el cual corresponde aproximadamente a tamaño arcilla. Esta fracción fue enviada al laboratorio de INGEOMINAS (Bogotá) donde se realizó la caracterización química de la roca, la cual incluyó análisis por fluorescencia de rayos X (XRF) para determinar Ti, Sr, Zr, Ba, Rb; absorción atómica (A.A) para determinar Fe total, Al, Mn, Ca, Mg, Na, K, Si, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, V, Pb; análisis de volumetría para conocer el Fe oxidado por meteorización de la roca y gravimetría para determinar la humedad (LOI) y P. También se realizó el análisis por duplicado de algunas muestras para verificar la reproducibilidad de los análisis.

El análisis de los óxidos mayores se realizó con el objetivo de clasificar las rocas, determinar su afinidad calcoalcalina y/o toleítica y analizar sus variaciones dentro de series volcánicas, empleando los diagramas TAS, AFM y diagramas Harker (Gill, 1981; Rollinson, 1993).

Finalmente, la integración de los resultados de los análisis geoquímicos, la petrografía y las observaciones de campo, fueron comparados y discutidos con los estudios existentes sobre volcanología de la Cadena Volcánica de los Coconucos y el volcán Puracé, para aproximarse a un modelo de evolución de este sector del suroccidente colombiano, aportando nuevas luces para el entendimiento del contexto regional.

2.Geología

A partir de la información geológica publicada se presenta en este capítulo una síntesis de los principales eventos tectónicos y geológicos, con énfasis en la evolución del volcanismo en el suroccidente de Colombia. El conocimiento del contexto regional permite un acercamiento a los rasgos geológicos y tectónicos, que han influido en la configuración actual del área de estudio.

2.1 Configuración tectónica de los Andes del norte

Desde la década de los años setenta, diferentes autores han abordado el estudio del volcanismo de los Andes (Gansser, 1973) y es ampliamente aceptado por todos los investigadores que esta cadena corresponde en la actualidad a una margen continental activa producto de la interacción de la subducción de la placa oceánica por debajo de la placa continental (Radelli, 1967; Case *et al.* 1971; Meissner *et al.* 1976, Marriner y Millward, 1984). Los autores estudiados (Pilger, 1984; Aspden *et al.*, 1987; Lonsdale, 2005) concuerdan con el hecho de que la partición de la placa Farallones en las placas Nazca y Cocos, hace 25 Ma generó un cambio en la dirección de convergencia de la placa Nazca con respecto a la placa Suramérica y, también un incremento en la tasa de convergencia, esto se refleja en el aumento en la actividad magmática de la margen occidental de la cadena andina (Stern, 2004).

El entendimiento de la subducción de la placa Nazca debajo de Suramérica, ha sido estudiado con métodos geofísicos, para determinar las características del mecanismo de subducción (Meissner *et al.* 1976, van der Hilst y Mann, 1984, Gutscher *et al.* 1999, Corredor, 2003, Gailler *et al.* 2007). De este modo, se ha definido un alto grado de complejidad en la segmentación de los Andes, relacionado con un patrón de sismicidad y volcanismo regional, asociados a la heterogeneidad de la placa de Nazca que está subduciendo. Esta heterogeneidad, está reflejada en las características de la corteza que subduce, la influencia de las dorsales oceánicas y la configuración de la margen continental (Gutscher *et al.* 1999). En la Figura 2, se presenta el ambiente tectónico del arco volcánico del suroccidente colombiano.

Gailler *et al.* (2007) indican que en el proceso de subducción se inducen variaciones laterales de sismicidad, arcos magmáticos, deformaciones, movimiento vertical y distribución de sedimentos a lo largo de la margen continental. Estos últimos, representan para Patino *et al.* (2000) un factor importante, en la generación de magmas. En los Andes del Norte, estos materiales están representados por sedimentos ricos en carbonatos intercalados con cantidades menores de sedimentos

hemipelágicos. Los sedimentos carbonatados están influenciados por la alta productividad biológica del Océano Pacífico Tropical Oriental, y la señal geoquímica se evidencia en el comportamiento del Pb, el cual presenta variaciones en el arco volcánico del suroccidente colombiano, siendo mayor en el grupo de volcanes más cercanos a la zona de subducción en Colombia (Marín-Cerón, 2007).

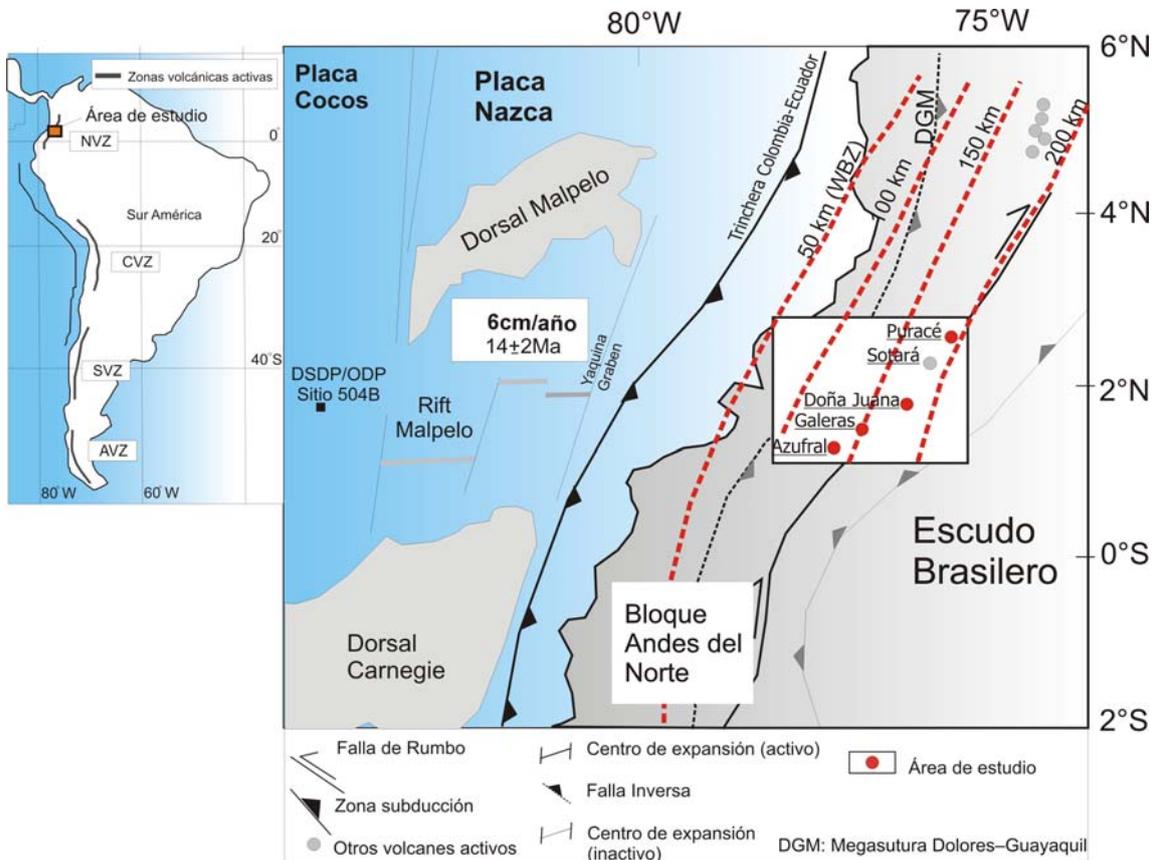


Figura 2. Marco tectónico del arco volcánico del suroccidente de Colombia (Compilado por Marín-Cerón, 2007). Se presenta la distribución de los principales sistemas de fallas y volcanes activos en el suroccidente colombiano. También las isobatas que representan los contornos de las Zona de Wadati-Benioff (WBZ) causados por la subducción de la placa Nazca debajo del Bloque de los Andes del Norte.

Pocos estudios describen las características de la corteza continental Colombiana. Meissner *et al.* (1976), a partir de una sección geofísica en el suroccidente colombiano, determinaron los valores de velocidad a través de la corteza e identificaron claramente dos tipos de basamentos, uno de afinidad oceánica y otro continental. A este último, le asignan un espesor de 40 km y 150 km de profundidad al plano de Benioff debajo del arco magmático, situado a 150 km de la fosa. Conocer estas características de la corteza continental, permite entender los procesos que toman lugar en la generación del volcanismo e interpretar la señal que trae consigo.

2.2 Volcanismo

Es aceptado que la actividad volcánica reciente de Colombia está relacionada con la subducción de la placa Nazca debajo de Suramérica, una margen continental activa, en la cual la generación de magmas está directamente relacionada con la interacción entre la placa oceánica y continental. Marriner y Millward (1984) han identificado tres divisiones en el tiempo de esta actividad, a partir de la distribución espacial y de las características petrográficas y geoquímicas: el volcanismo Cretácico inferior – Eoceno, Mioceno – Plioceno y el reciente.

El volcanismo Cretácico inferior a Eoceno, está representado por el Grupo Diabásico que comprende las rocas Cretácicas toleíticas bajas en K, localizadas en la Cordillera Occidental y al occidente de la Cordillera Central y, por la Cordillera Costera que es un conjunto de basaltos y andesitas basálticas, toleíticas con bajo K, del Cretácico inferior – Eoceno. Además es reconocido el Complejo Quebrada Grande (Maya y González, 1995), conformado por rocas sedimentarias y volcánicas básicas de afinidad oceánica del Albiano-Aptiano. Este conjunto de rocas, que en la actualidad conforman la corteza continental en la margen occidental de los Andes del norte, representan terrenos aloctónos relacionados con arcos de islas sucesivamente acrecionados (Mc Court *et al.* 1984; Grosser, 1989; Kellog y Vega, 1995). Sin embargo, aún hacen falta datos geoquímicos, petrográficos y geofísicos, que den mayor confianza a las hipótesis planteadas sobre el marco regional de las acreciones en Colombia y su relación con la actividad volcánica anterior al choque del terreno de Baudó y al choque de la placa de Panamá.

El volcanismo del Mioceno - Plioceno, está representado por la Formación Combia, definida por Grose en 1926 como Estratos de Combia. Según Jaramillo (1976) el norte de la depresión Cauca, fue una estructura tipo graben, una zona muy permeable que permitió el ascenso de diferentes fragmentos de magma generado bajo diferentes condiciones y/o profundidades. De otro lado, para Restrepo *et al.* (1981) es una cuenca de tracción localizada al occidente de Medellín y Manizales, que representaría el volcanismo más antiguo del Cenozoico, caracterizado con una edad de 9.1 ± 1 Ma. Un volcanismo posterior, definido por Toro *et al.* (1999) como volcanismo Cauca, está emplazado a lo largo del río Cauca y tiene asociado los cuerpos subvolcánicos de Marmato e Irrá, con edades alrededor de 6.3 Ma. En el sur del país, ha sido reportado por Van der Wiel (1991) edades entre 6 y 8 Ma para la Formación Gigante, sin embargo no se tiene clara su relación con el volcanismo reconocido al norte. También

hay existencia de un gran número de cuerpos intrusivos porfiríticos no datados posiblemente relacionados con este volcanismo.

En el volcanismo reciente se identifican dos grupos: el volcanismo calco alcalino de los centros de emisión actuales y, los basaltos alcalinos localizados en el Valle Superior del Magdalena, que según Kroonenberg *et al.* (1982) son de edad Plio-Pleistoceno, debido a que descansan sobre una ignimbrita riolítica, cuya edad es 7.1 ma según una datación K/Ar en biotita.

El volcanismo calco alcalino, está distribuido espacialmente hasta 5°N sobre el eje de la Cordillera Central, en la depresión Cauca - Patía y en la Cordillera Occidental. Hall y Wood (1985) presentaron un agrupamiento de los centros volcánicos, a partir de una imagen satelital LANDSAT, ellos propusieron siete grupos de segmentos de acuerdo con las características estructurales longitudinales, la ausencia de volcanismo, tendencia del arco volcánico, ocurrencia de estructuras transversales importantes y cambios anómalos en los datos de gravedad.

Estudios posteriores, agrupan los volcanes según las características petrográficas y geoquímicas de los centros de emisión. En términos generales, es ampliamente aceptado que el volcanismo reciente, está caracterizado por la presencia de andesitas basálticas, andesitas y dacitas, de la serie calco alcalina con medio y alto potasio (James y Murcia, 1984, Vatin-Pérignon *et al.*, 1990; Droux y Delalouye, 1996; Calvache and William, 1997; Marín-Cerón, 2007).

Droux y Delalouye (1996) proponen dos grupos de lavas según análisis de elementos mayores, menores y tierras raras, las lavas tipo noreste, representadas por los volcanes Puracé y Doña Juana y, las lavas tipo sureste de los volcanes Galeras, Azufra, Chiles y Cumbal. Marín-Cerón (2007) define dos tipos de dominios para agrupar el volcanismo del suroccidente colombiano, el frente volcánico (Volcanic Front - VF) y el arco posterior (Rear Arc - RA), de acuerdo con la señal geoquímica obtenida de muestras de lavas e ignimbritas de los volcanes Galeras, Azufra, Doña Juana y Puracé.

Un interés especial, representan la Formación Esmita y la Formación Galeón, sobre las cuales reposan los depósitos asociados al volcanismo más reciente, es decir, las Formaciones Popayán y Coconucos. La Formación Esmita es una secuencia sedimentaria que está intruída por cuerpos hipoabisales del Mioceno medio (Murcia y

Cepeda, 1984). La Formación Galeón está constituida por intercalaciones de depósitos de flujos piroclásticos y capas de rocas volcánico – sedimentarias (De Porta, 1974).

Finalmente, es importante anotar, que este volcanismo reciente se emplaza por zonas de debilidad de la corteza, representadas por dos sistemas principales de fallas, el sistema Romeral y Cauca – Patía con dirección N – S, que tienen fallas secundarias asociadas. Además, el fallamiento transversal a la dirección del sistema andino, en la mayoría de los casos parece ser el canal emisor de los diferentes focos volcánicos recientes; de este modo, el sistema de falla NW – SE tiene una estrecha relación con el volcanismo actual (CHEC, 1983).

2.3 Basamento y estratigrafía de las rocas volcánicas en el área de estudio

De acuerdo con los estudios anteriores, no es claro el espesor de la corteza, sin embargo, es importante definir cuales es el tipo de basamento sobre el que se ha construido el volcanismo actual, para obtener la señal de posible contaminación de los magmas en su ascenso a la superficie.

La unidad litológica más antigua reportada en el área de estudio, son los esquistos del Complejo Cajamarca (Maya y González, 1995) de edad Paleozoica según Nelson (1962) y, rocas volcánicas básicas del Complejo Quebrada Grande (Maya y González, 1995), ubicadas sobre la margen izquierda de la Falla San Jerónimo.

Estas rocas están cubiertas por espesas capas de rocas volcánicas y volcanoclásticas que conforman la topografía actual de valles profundos y colinas suavizadas. Los estudios anteriores, realizados en el sector por Torres *et al.* (1992), Monsalve y Pulgarin (1995), Torres *et al.* (1999) y Monsalve (2000) agrupan estas secuencias y definen las Formaciones Popayán y Coconucos, de edades Plio- Cuaternarias.

Aunque no está bien establecido en la literatura, el inicio del volcanismo reciente en el sector podría ser la Formación Popayán, con una edad de 2.8 Ma (Torres, en preparación). La Formación Popayán fue caracterizada estratigráficamente en 7 miembros por Torres *et al.* (1992) y está en contacto con la Formación Coconucos, sin embargo, no son precisos los límites cartográficos y estratigráficos representado en la Plancha 365 de INGEOMINAS, dado que la ausencia de dataciones y escasez de datos geoquímicos dificulta definir estos límites.

La Formación Coconucos fue definida por Monsalve (2000), para agrupar los productos volcánicos recientes de la Cadena volcánica de los Coconucos y las

estructuras volcánicas del Valle de Paletará, de acuerdo con sus características particulares de distribución, litología, composición química, edad y origen. En la Figura 3 se presenta la columna estratigráfica propuesta por Monsalve (2000).

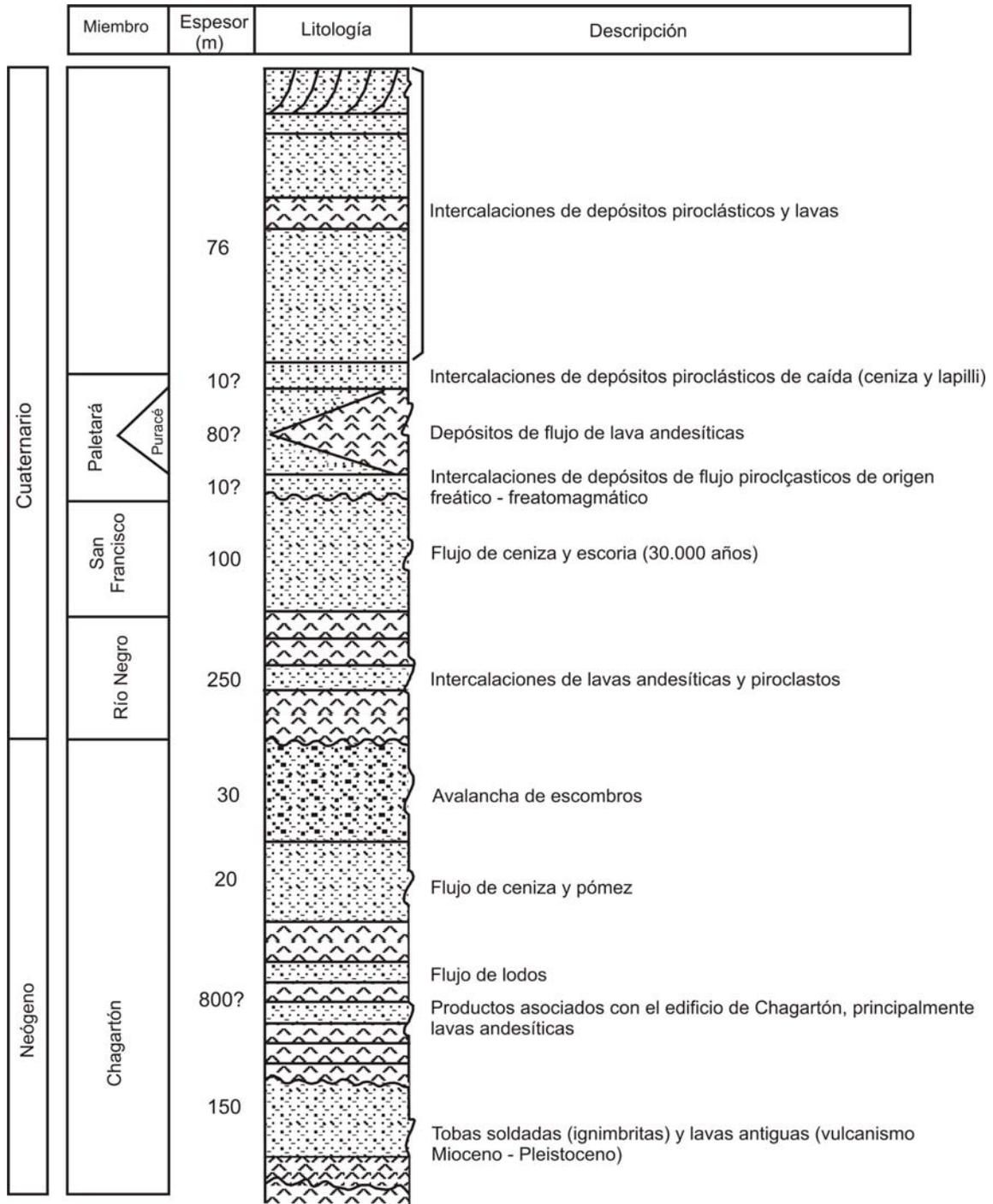


Figura 3. Columna estratigráfica de la Formación Coconucos (Tomado de Monsalve, 2000).

Según Monsalve (2000) está constituida por la intercalación e interdigitación de depósitos de flujo de lavas y depósitos de flujo piroclásticos. Se le asigna una edad entre 3 Ma y la fecha, con base en las dataciones de Monsalve (2000), que según una datación K/Ar en roca total, obtiene una edad de 2,9 ma, y Ramírez (1982), quien reporta una edad de 0,59 ma (Roca total?) en una lava de la vía que conduce a los Termales de Coconuco. Monsalve (2000) divide la Formación Coconucos en seis miembros estratigráficos denominados a) Miembro Chagartón, b) Miembro Río Negro, c) Miembro San Francisco, d) Miembro Paletará, e) Miembro Shaka y f) Miembro Puracé (Figura 4).

- a) El Miembro Chagartón agrupa los productos efusivos asociados a un centro de emisión que se localizaría hacia el suroccidente del Puracé actual y está constituido por depósitos de flujo de lava andesítica que afloran en el área de la población de Coconuco; remanentes de un flujo piroclástico de ceniza y pómez, ubicado cerca de la confluencia del Río San Francisco y Anambío, en la quebrada San Andrés y en el sector de Pozo Azul; también se encuentran brechas volcánicas, flujos de lodo y depósitos morrénicos. Todos los depósitos están afectados por erosión glacial, y a excepción de los últimos productos del Miembro Chagartón (depósitos morrénicos) provienen de la actividad de la Caldera de Chagartón, que es una estructura de aproximadamente 40 km de diámetro, y de la cual se conservan restos de un cono volcánico delimitado por la peña Chagartón y los alrededores del volcán Puracé (Acevedo *et al.* 1987). Este miembro, está en contacto con productos de la Formación Popayán al sur, los Miembros Paletará y Río Negro al sureste y Miembro Puracé al norte.
- b) El Miembro Río Negro está constituido por depósitos de flujo de lava de composición andesítica, afectados por acción glacial y depósitos morrénicos. Aflora alrededor de la Cadena volcánica de los Coconucos, y fue originado por aparatos volcánicos anteriores a los actuales centros que constituyen la cadena.
- c) El Miembro San Francisco lo constituye un depósito de ceniza y escoria caótico, en algunos lugares con unidades de flujo. Se distribuye en el cañón del río San Francisco, y rellena desde su parte media hasta la desembocadura en el río Cauca, formando mesetas y paredes verticales. Una datación C¹⁴ arroja una edad de 30.000 años para este depósito.

d) El Miembro Paletará está representado por depósitos piroclásticos que rellenan y afloran en el Valle de Paletará, correspondientes a flujos de cenizas, producto de actividad freática y freato-magmática y depósitos piroclásticos plinianos de caída.

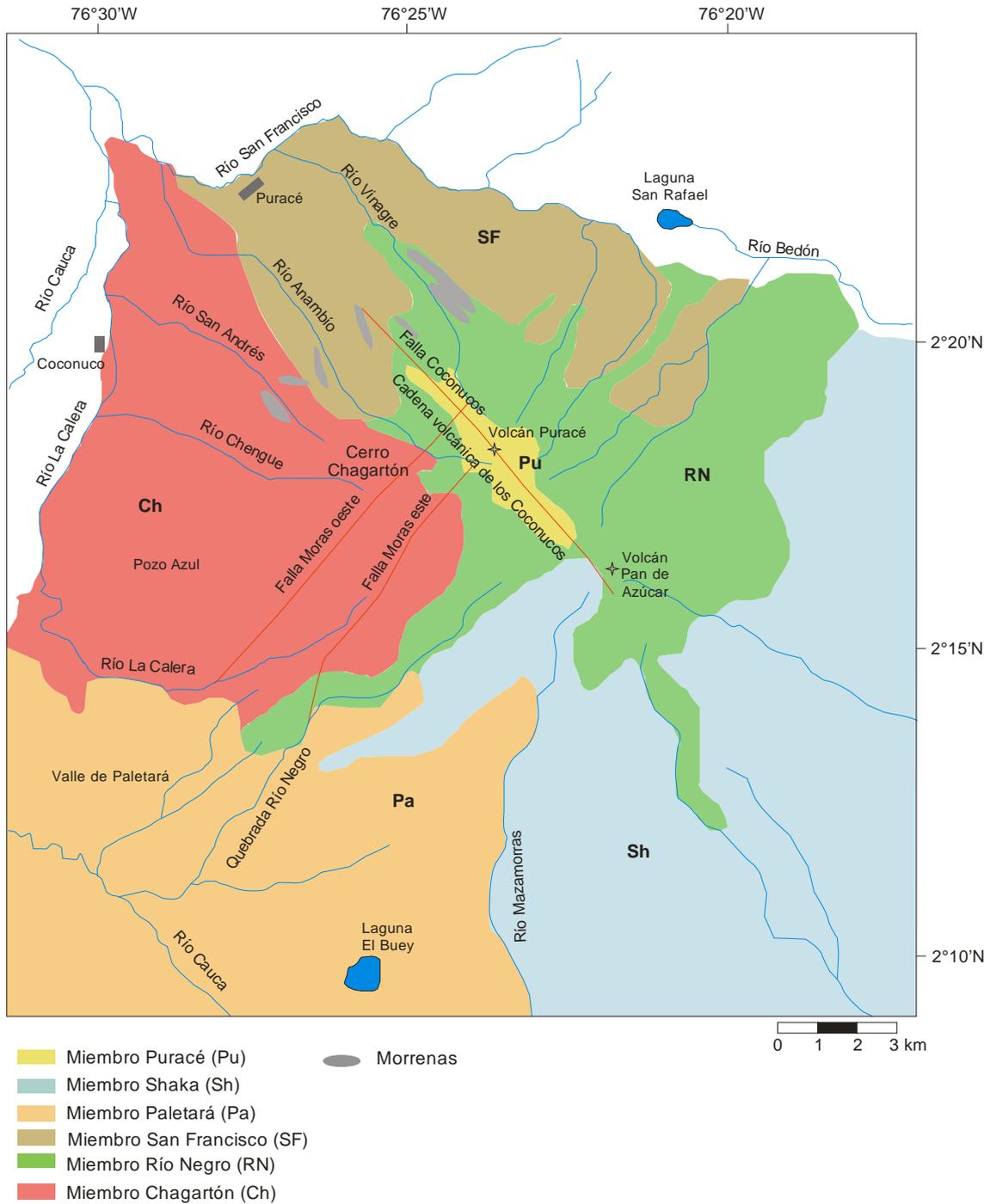


Figura 4. Mapa de la Formación Coconuco (Tomado de Monsalve, 2000).

- e) El Miembro Shaka agrupa las lavas más recientes que provienen de los centros eruptivos de la Cadena volcánica de los Coconucos y las brechas que conforman los conos.

- f) El Miembro Puracé consta principalmente de intercalaciones de productos piroclásticos y algunos flujos de lava que afloran en los alrededores del volcán Puracé. El principal depósito piroclástico fue datado por el método C^{14} en 2000 años (Monsalve, 1991) y el más joven corresponde a un depósito dejado por una erupción del volcán Puracé en 1869 (Cepeda *et al.* 1991).

Desde la geoquímica, los trabajos realizados por Kuroda y Paris (1978); Hormman y Pichler (1979); Murcia y Marín (1981); Ramirez (1982); Schmitt (1983; en Monsalve y Pulgarín, 1995); Marriner y Millward (1984); Monsalve (1991); Monsalve y Pulgarín (1995); Droux y Delalouye (1996); Marín-Cerón (2004) y Marín-Cerón (2007), proponen modelos para el entendimiento del volcanismo en el suroccidente colombiano, estos datos se presentan en el Anexo 3. Las muestras analizadas en la mayoría de los casos representan depósitos de flujos de lava que se encuentran en cercanías del volcán Puracé actual.

Los resultados arrojados por estos trabajos clasifican las rocas como andesitas, con algunas variaciones a dacitas, de la serie calco alcalina definida por Irvine y Baragar (1971). Un rasgo característico es el alto contenido de K de todas las muestras del sector del volcán Puracé, la cadena volcánica de los Coconucos y estructuras relacionadas (Marriner y Millward, 1984, Monsalve y Pulgarín, 1995; Marín-Cerón, 2007).

Los autores concuerdan con la importancia del proceso de asimilación - cristalización fraccionada (AFC) para la generación de los magmas andesíticos del volcán Puracé (James y Murcia, 1984; Droux y Delalouye, 1996). Este proceso es explicado por James y Murcia (1984) como el proceso en el cual la pared de la roca es asimilada y a su vez hay cristalización fraccionada del magma, y hacen énfasis en que las relaciones isotópicas de O, Sr, Nd y Pb, reflejan la naturaleza de los componentes que han interactuado en el proceso.

Los análisis isotópicos, también han sido utilizados para interpretar la formación de los magmas. Es aceptado, que en este proceso hay dos partes comprometidas, una representada por un componente mantélico y otro cortical, y ambas dan origen a los

magmas. Sin embargo, existen algunas diferencias en la interpretación del alto contenido de potasio de las rocas de la cadena volcánica de los Coconucos, según Droux y Delalouye (1995) interpretan la señal isotópica como una influencia muy importante de la corteza continental, la cual es más espesa en el volcán Puracé que en el volcán Doña Juana. De otro lado James y Murcia (1984) y Marín Cerón (2007) coinciden con Gill (1981), en que esta es una característica de las márgenes continentales activas, y es explicado por el enriquecimiento de potasio a medida que la subducción avanza y se disminuyen los fluidos transferidos de la placa subducente a la corteza, además del potasio que se adquiere posteriormente durante el ascenso del magma a través de la corteza.

3.Resultados

En este capítulo se organizan los resultados, los cuales están sintetizados en el mapa geomorfológico, el mapa geológico y la columna aloestratigráfica generalizada para la zona de estudio. Los detalles de campo se encuentran en el anexo 1, donde se incluye las coordenadas X,Y,Z, de las muestras recolectadas; en el anexo 2 se encuentran las descripciones petrográficas de las secciones delgadas.

3.1 Geomorfología

La Figura 5 corresponde al mapa geomorfológico, en el que se definieron 11 unidades geomorfológicas según los aspectos metodológicos discutidos en el capítulo 1. Estas unidades geomorfológicas se describen en orden cronológico relativo, con base en las relaciones espaciales, los procesos erosivos y/o agradacionales observados. Sin embargo, se debe tener en cuenta, que en algunos casos la litología de las geoformas puede presentar diferentes grados de competencia y resistencia a los procesos erosivos, ocasionando posibles errores en la estimación cronológica relativa establecida. Finalmente, el nombre de cada unidad es asignado de acuerdo con su característica geomorfológica principal.

Unidad de Colinas Altas (Ca)

Es una franja alargada que se extiende desde la población de Coconuco hasta el norte en el sector de Patíco, sobre la margen oriental del río Cauca y comprende la vertiente oriental del río La Calera y el río San Andrés. Tiene un área de 5.7 km². Esta unidad se caracteriza por sus colinas altas y alargadas, con crestas estrechas y redondeadas, de vertientes rectas de longitud media a alta con pendientes altas e incisión baja. La unidad se desarrolla sobre depósitos de lava.

Unidad de Lomas Altas (La)

Se localiza en la margen occidental del río Cauca en los alrededores de la vereda El Carmelo cerca de la población de Coconuco y cubre un área de 22.9 km². Dentro de las principales características morfológicas se destaca la presencia de lomas altas con cima ondulada y las vertientes cortas con pendientes moderadas de forma convexas. El drenaje es subdendrítico, de disección moderada a alta, lo que origina valles en forma de V abierta. El basamento de esta unidad son los depósitos de flujos de ceniza y bloques, asociados a la actividad de la caldera de Paletará (Torres *et al.* 1999).

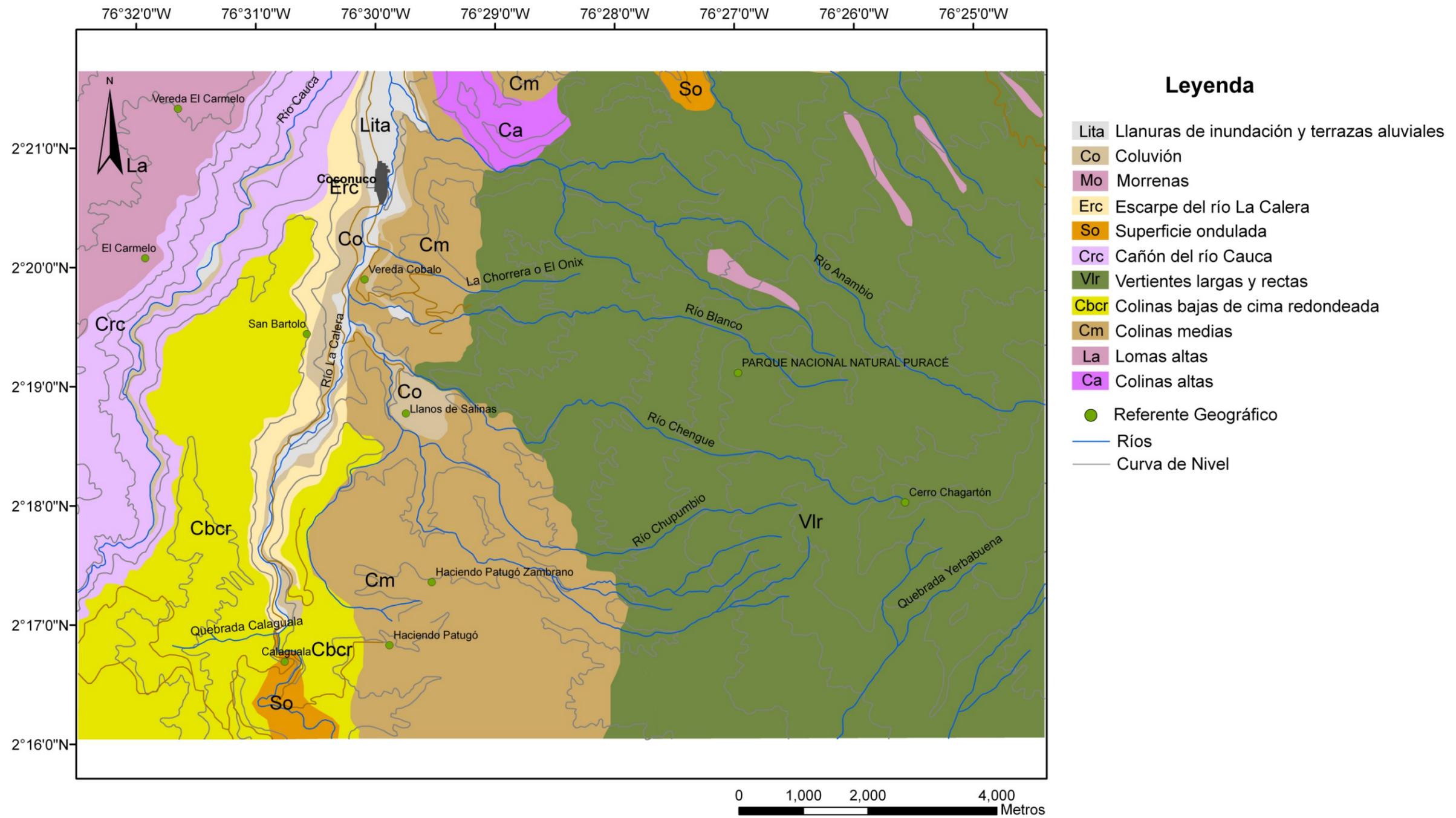


Figura 5. Mapa geomorfológico del área de estudio. Cartografía base escala 1:25.000.

Unidad de Colinas Medias (Cm)

Se localiza sobre la margen derecha del río La Calera, en una franja alargada de dirección N – S. Cubre un área de 26.7 km². En esta unidad geomorfológica se agrupan las colinas medias de cimas subredondeadas, con vertiente recta y pendientes moderadas. El drenaje es subparalelo con disección moderada e incisión alta que favorece el desarrollo de valles en forma de v abierta. El basamento son depósitos de lava.

Unidad de Colinas bajas de cima redondeada (Cbcr)

Esta unidad se localiza en los alrededores de la vereda San Bartolo. Cubre un área de 11.2 km². El principal rasgo geomorfológico es la presencia de colinas bajas de cima redondeada que constituyen altos topográficos. El drenaje es subparalelo con disección e incisión baja, y desarrollo de valles en forma de v cerrada. El basamento son depósitos de lava.

Unidad de Vertientes largas y rectas (Vlr)

Esta unidad se ubica al oriente del río La Calera, desde la parte media de las cuencas del río Chengue y San Andrés hasta el límite oriental del área. Cubre un área de 70.8 km². En esta unidad geomorfológica las lomas son de vertientes largas y rectas, de pendientes altas a moderadas y de cimas agudas. El drenaje es subparalelo, con diferentes grados de incisión y disección. Se desarrolla sobre depósitos de lavas.

Unidad de Cañón del río Cauca (Crc)

Esta unidad está representada por los escarpes del río Cauca desde el extremo suroeste del área de estudio hasta la altura del sector Patico, y cubre un área de 18.3 km². Se caracteriza por presentar vertientes largas y rectas, con fuerte inclinación, drenaje subparalelo de baja incisión y disección media. El basamento lo constituyen depósitos de flujos de lavas y depósitos piroclásticos asociados a la Formación Popayán.

Unidad de Superficie Ondulada (So)

Esta unidad se localiza en el extremo norte del área de estudio, en la margen izquierda del río Anambio, y en el extremo sur a lo largo del río La Calera. Cubre un área de 0.72 km² y se caracteriza por presentar un patrón de drenaje paralelo, con incisión y disección baja; esta superficie ondulada desarrolla vertientes cortas, y está construida sobre depósitos de flujo piroclásticos y flujos de lava.

Unidad de Escarpe del río La Calera (Erc)

Esta unidad está ubicada en la margen izquierda del río La Calera (Figura 6) y, representa una franja delgada y alargada en dirección norte – sur, paralela al río y abarca un área de 3.8 km². Esta unidad se caracteriza por la presencia de vertientes largas y rectas, con fuerte inclinación; el drenaje es subparalelo y la disección media. Litológicamente corresponde a depósitos de lava. Esta unidad tiene un fuerte control tectónico, ya que es limitada por la falla San Jerónimo, y en algunos sectores de la unidad se puede clasificar como un escarpe compuesto de falla.



Figura 6. Unidades geomorfológicas alrededor de Coconuco.

Unidad de Morrenas (Mo)

Se localizan en la parte alta de los ríos Anambio y San Andrés. Son morrenas laterales que se presentan como superficies suaves en la parte alta de las laderas y su disposición es paralela al cauce de los ríos. Las morrenas cubren 0.88 km² y litológicamente representan depósitos de tillitas. Están asociadas a procesos de deshielo del casquete glacial que en algún momento estuvo formado en la cumbre del volcán Puracé y otros centros de emisión de la Cadena volcánica de los Coconucos.

Unidad de Coluvión (Co)

Ubicados principalmente en la base de las vertientes que conforman el escarpe del río La Calera, y asociados a algunos drenajes menores. Se caracterizan por presentar superficies de pendiente media, con incisión y disección baja. Litológicamente representan depósitos de vertiente y cubren un área de 4.2 km². Son remanentes de

depósitos de flujos de escombros asociados a crecientes de los ríos y mezclados con coluviones provenientes de las zonas escarpadas.

Unidad de Llanuras de inundación y terrazas aluviales (Lita)

Esta unidad está representada por las terrazas aluviales de los ríos La Calera y Cauca, y el abanico que forma el río Blanco al llegar al río La Calera. Son superficies planas y homogéneas que cubren un área de 3.0 km², tienen poca diferencia topográfica respecto al nivel base, sin desarrollo de vertientes; el patrón de drenaje es subparalelo, la incisión del drenaje es mínima y la disección es baja.

3.2 Geología

En el capítulo 1, se presentó la metodología utilizada para la adquisición de la información, igualmente, se establecieron los criterios de edad relativa y se discutieron las recomendaciones para el levantamiento de las columnas aloestratigráficas.

Las estructuras regionales con dirección N – S en el sector de Coconuco, tienen una clara relación con la actividad volcánica reciente (Bohórquez *et al.*, 2005), y están asociadas a las trazas principales de las Fallas Romeral y Cauca – Patía. Las estructuras de tendencia N-NW y N-NE, son claramente reconocidas y están representadas por las Fallas Moras y la Falla Coconucos (INGEOMINAS, 2003), ésta última alineada con los centros de emisión de la Cadena volcánica de los Coconucos (Monsalve y Pulgarín, 1995).

La secuencia volcánica del flanco occidental del volcán Puracé, está conformada esencialmente por depósitos de flujo de lava, acompañadas por depósitos piroclásticos. El detalle estratigráfico permitió conocer con mayor precisión la distribución de los depósitos volcánicos del sector. Entre estos se asociaron algunos depósitos anteriores a la actividad de Chagartón, que posiblemente pertenecen a la Formación Popayán, redefinida por Torres *et al.* (1999) y, se delimitaron unidades volcánicas pertenecientes posiblemente al Miembro Chagartón de la Formación Coconucos en el sentido de Monsalve (2000). Estos detalles cartográficos permiten un mejor entendimiento de los eventos volcánicos, su distribución espacial y temporal.

Las columnas aloestratigráficas se levantaron a lo largo de las quebradas, de las carreteras y de los caminos veredales y se les asignó el nombre de un lugar geográfico. En total, se levantaron 220 m de espesor en 10 columnas aloestratigráficas (Figura 7) cuya ubicación geográfica se presenta en la Figura 8. Por la génesis de las

diferentes unidades de depósitos de lava y su distribución semiradial, no fue posible establecer una columna tipo y varias de las columnas se levantaron en una sola unidad volcánica para su caracterización petrográfica y geoquímica. Otra dificultad está relacionada con los contactos entre las diferentes unidades de depósitos de lava que no afloran en el sector. Se propone una columna aloestratigráfica generalizada para el Miembro Chagartón de la Formación Coconucos en el área (Figura 9), y aunque la ausencia de dataciones genera incertidumbre a la propuesta presentada, la cartografía geomorfológica permite establecer la cronología relativa.

A continuación se describen de base a techo, las columnas que conforman la secuencia volcánica:

En la columna sector margen occidental del río La Calera, la ignimbrita basal con 2 m visibles, está recubierta por el depósito de lava 1, con un espesor visible en el escarpe de 100 m, de los cuales se describieron al detalle 32 m a lo largo de la carretera Coconuco - Paletará, donde se tomaron las muestras SESW 65, SESW 66, SESW 67, SESW 68 y SESW 90 (ver Figura 8). La ignimbrita basal es la unidad estratigráfica más antigua de la zona, observada también en las columnas sector Chupumbio y vía Pozo Azul. El depósito de lava 1 es la unidad efusiva más antigua de la zona con una dirección norte sur paralelo al río La Calera. Posiblemente, este depósito constituyó un alto topográfico que sirvió de barrera a los depósitos volcánicos posteriores provenientes de la actividad de Chagartón y por esta relación topográfica es considerada la más antigua.

La columna sector Chupumbio, tiene un espesor de 36 m, levantada a lo largo del camino desde la vía que conduce a Pozo Azul hasta la Peña de los Curdos. A la base aflora 16 m visibles del depósito ignimbrítico basal conformado por dos unidades de flujo. Hacia la base tienen un espesor visible de 6 m y la unidad superior tiene un espesor de 10 m. El contacto entre estos dos depósitos es neto y conforman la ignimbrita basal más antigua de la zona, cartografiada como ignimbritas soldadas. Por estar recubierto por depósitos de lava, su cartografía se presenta en achurado en los sectores donde se corroboró en campo. Este depósito ignimbrítico está suprayacido por la unidad depósito de lava 2 con un espesor de 20 m. No se observó un contacto estratigráfico entre las unidades depósito de lava 1 y 2.

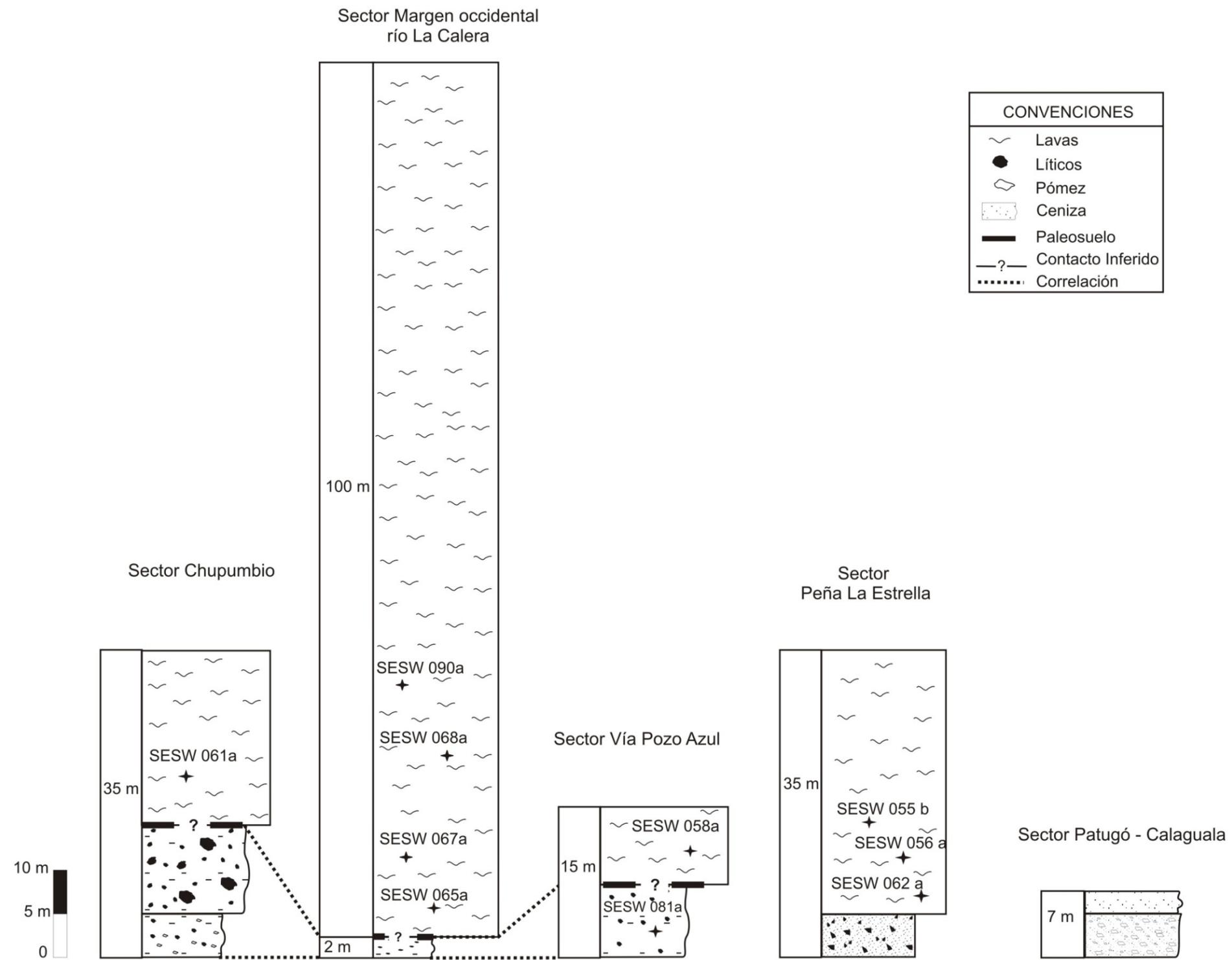


Figura 7. Correlaciones aloestratigráficas del Miembro Chagartón – Formación Coconucos.

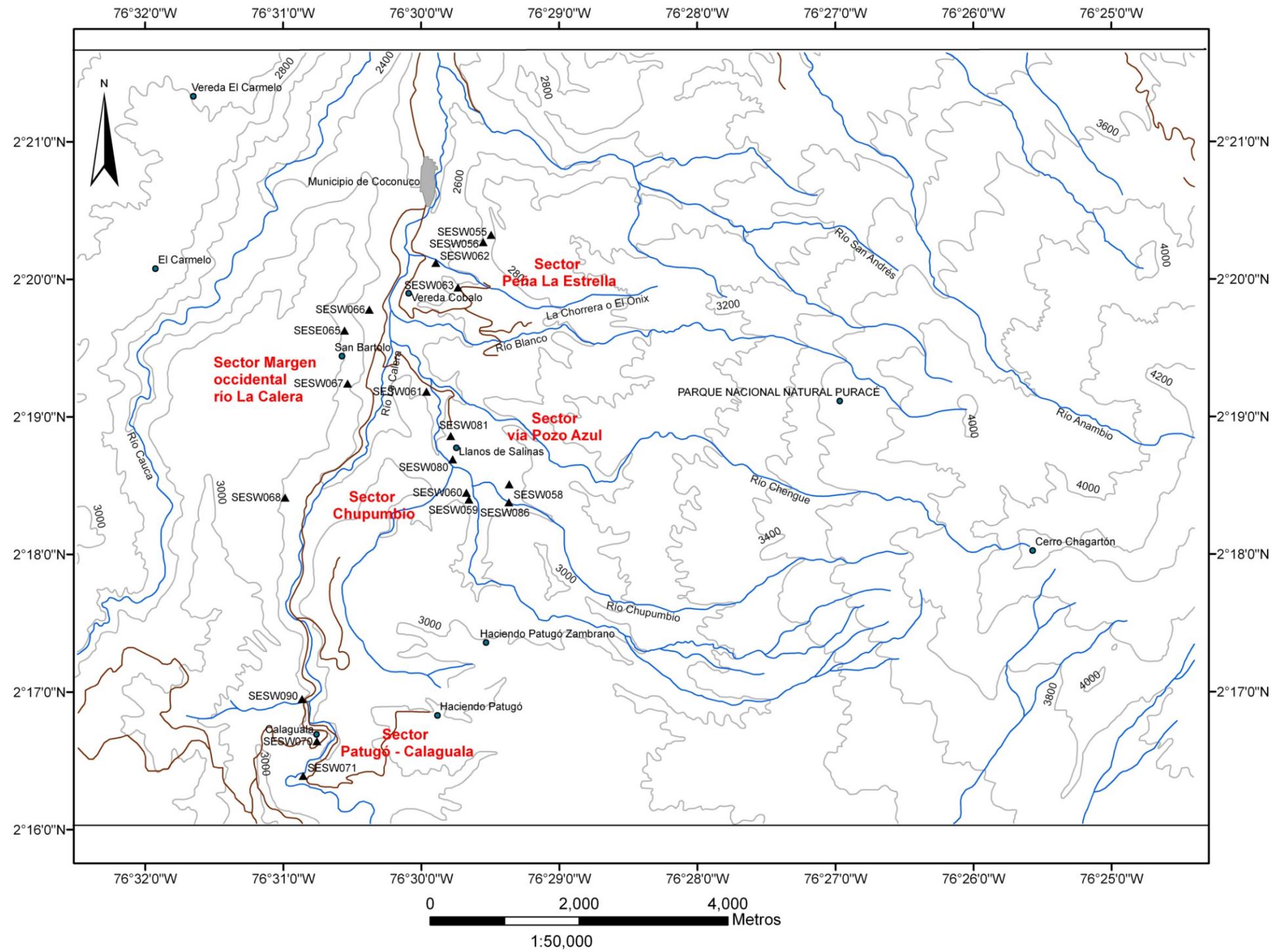


Figura 8. Mapa de estaciones. Base cartográfica escala 1:25.000.

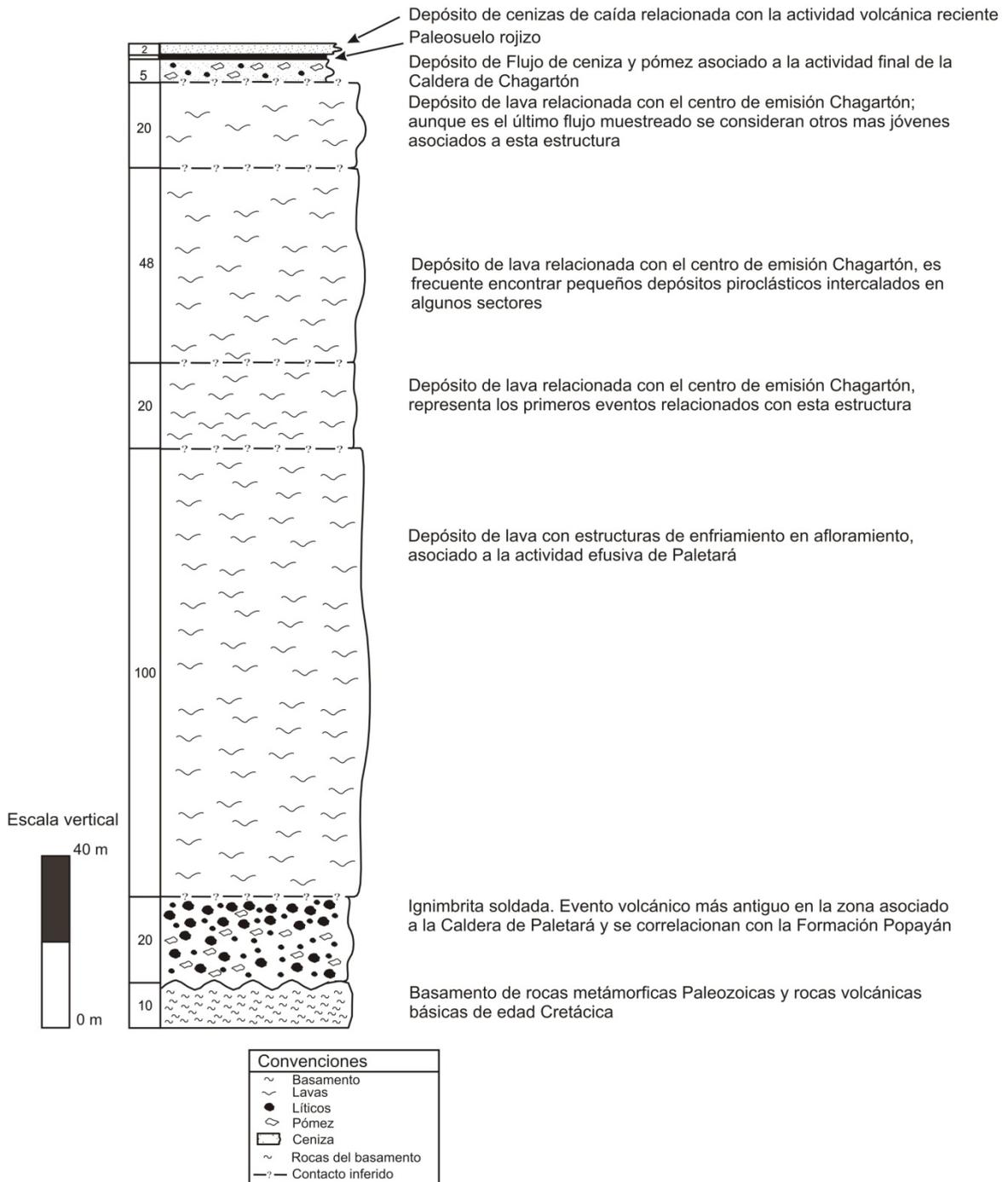


Figura 9. Columna aloestratigráfica generalizada del Miembro Chagartón

La columna estratigráfica del sector Peña la Estrella, se levantó a lo largo del escarpe que el depósito de lava 4 origina en la vertiente oriental del río La Calera. El contacto basal es neto y suprayace un depósito de flujo piroclástico, no cartografiable en la escala de trabajo, sin embargo, está caracterizado por la presencia de bloques de lava angulares en medio de una matriz arenosa. Este contacto se observó a mitad del escarpe a una altura de aproximadamente 30 m, lo que permite asignar un espesor de 30 m del depósito de lava 3 en este sitio. En este punto, se tomó la muestra SESW55. La continuidad de esta lava a lo largo del escarpe se verificó en otras 2 ventanas situadas a media ladera y en la quebrada El Onix, donde se tomaron las muestras SESW 56 y SESW 62, respectivamente.

Finalmente en el sector vía Pozo Azul, se levantó una columna estratigráfica de 15 m, a lo largo de la vía que conduce a Pozo Azul y que representa la parte superior del escarpe de la quebrada Chengue. Las ignimbritas basales con un espesor >8m (estación SESW 81, ver mapa), están suprayacidas por el depósito de lava 4, que recubre el Llano de Salinas. No se observó el contacto entre las dos unidades y el depósito de lava alcanza espesores visibles de hasta 7 m (estación SESW 58).

La parte superior de la secuencia se caracterizó en la vía que de Coconuco conduce a Paletará y hacia la vereda de Patugó. En las columnas del sector Patugó y del sector Calaguala se sintetiza la información estratigráfica. Las cenizas volcánicas de caída superiores de 2 m descansan sobre un paleosuelo de 0.30 m desarrollado sobre un depósito de ceniza y pómez de 5 m de espesor.

La integración de los datos datos petrográficos y geoquímicos junto con la información geológica, geomorfológica y estratigráfica, que se presentan a continuación, permite construir la columna aloestratigráfica generalizada para el Miembro Chagartón – Formación Coconucos, alrededores del municipio de Coconuco (Figura 9).

A continuación se presenta la descripción de las unidades aloestratigráficas definidas a partir del trabajo cartográfico (Figura 10).

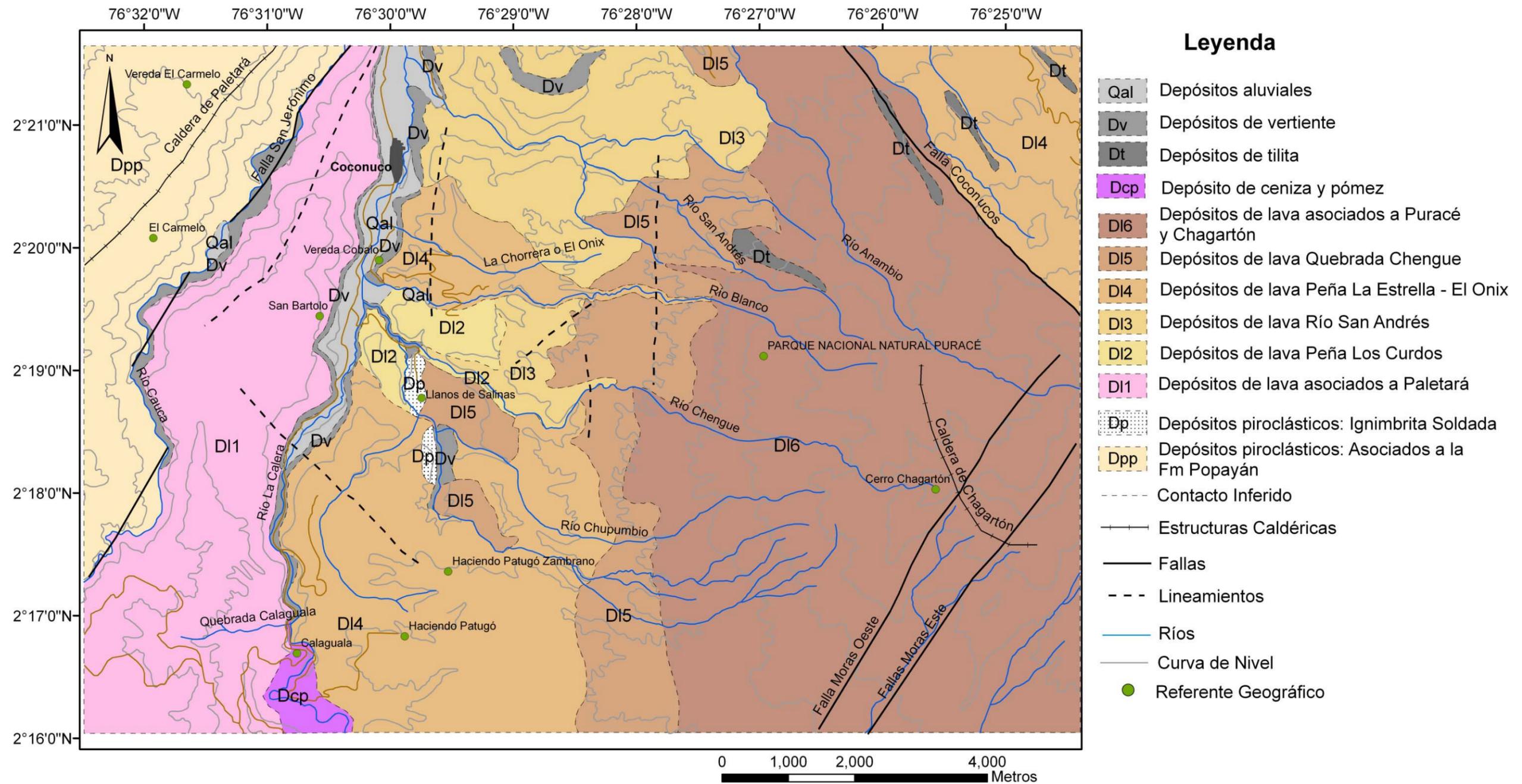
3.2.1 Depósitos piroclásticos de la Formación Popayán al occidente del río Cauca (Dpp)

La unidad basal en el área de estudio, son los depósitos piroclásticos de la Formación Popayán (Dpp) que afloran hacia el occidente de la zona de estudio, en el sector de El Carmelo y representa 40.9 km². Esta unidad es cartografiada por INGEOMINAS (2003)

como Miembro La Venta de la Formación Popayán, la cual extendían hasta el río La Calera. El trabajo de campo permitió establecer el río Cauca y la traza de la Falla San Jerónimo como el límite occidental para los depósitos de la Formación Popayán.

3.2.2 Ignimbrita Soldada (Dp)

Esta unidad constituye la base observada de la secuencia al oriente del río Cauca. Se localiza en el sector Chupumbio, en la cuenca de los ríos Chengue y Chupumbio, vereda Fortaleza. Aflora en un área de 0.4 km² con un espesor visible de 20 m y está compuesto por dos unidades. La unidad basal, de composición andesítica, es un depósito matriz soportado, mal seleccionado, donde el material juvenil volcánico es una pómez con vesículas aplastadas “textura fiammé” y presencia de líticos de lava angulares de tamaño promedio, máximo de 1 m. La matriz de la roca está oxidada. Corresponde a una ignimbrita. Esta unidad basal está recubierta por un depósito piroclástico de bloques y ceniza de composición andesítica, endurecido, caótico y con mala selección; es un depósito oligomítico, conformado por bloques de lava embebidos en una matriz vítrea, vesiculada, meteorizado. La textura fiammé es visible en los fragmentos vítreos de la matriz. Por las características de estas ignimbritas su origen estaría asociado a la destrucción de edificio (la base) y de un domo (la parte superior) de acuerdo con la clasificación genética de Fisher y Smincke (1984) y se interpretan como dos ventanas de ignimbritas correlacionadas con la Formación Popayán.



3.2.3 Depósito de lava asociada a Paletará (DI1)

Este depósito de flujo lava fenoandesítica, aflora entre los ríos Cauca y La Calera, con una orientación norte – sur, paralela a estos cauces. Constituye un alto topográfico que sobresale en la zona y comprende un área de 15.1 km², con un espesor visible de 100 m. En la cartografía de INGEOMINAS (2003) está cartografiado como Formación Popayán.

Este depósito de lava se caracteriza por presentar estructuras columnares (Figura 11) en diferentes estados de desarrollo, asociadas a diferentes grados de enfriamiento dentro de la unidad de flujo, aunque en algunos afloramientos su aspecto es masivo.

Aunque no se ha identificado claramente el centro de emisión, es posible que se ubique en el Valle de Paletará. De acuerdo con esto y por las características geomorfológicas actuales, no estaría relacionado a los centros de emisión de Chagartón, Prepuracé y Puracé definidos por Monsalve (1991).



Figura 11. Estructura columnar en el depósito de lava asociado a Paletará (DI1)

3.2.4 Depósitos de lava asociados a Chagartón (DI 2, DI 3, DI 4, DI 5, DI6)

Diferentes depósitos de lava fenoandesíticas con dirección de flujo E – W, se cartografiaron en el sector que INGEOMINAS (2003) mapea como Miembro Chagartón. Su orientación es un criterio básico que permitió diferenciarlas de la unidad anterior descrita y los criterios cronológicos fueron discutidos en el numeral anterior.

1. El depósito de lava Peña los Curdos (DI2), cubre el sector de la vereda San Bartolo, con una extensión visible de 2.1 km² y tiene un espesor de 20 m. Esta unidad de depósito de lava desarrolló estructuras de enfriamiento, representadas por lajas horizontales y paralelas, espaciadas 0.10 – 0.12 m. Su origen estaría asociado al centro efusivo de Chagartón.
2. Depósito de lava Río San Andrés (DI3), localizado en la cuenca del río San Andrés y sus alrededores, tiene un área de 16.9 Km². Aunque no fue muestreado, con base en la descripción realizada por Monsalve (2000) para el Miembro Chagartón y las características de otros depósitos de lava analizados en este trabajo, son lavas andesíticas, porfíricas, medias a gruesas, de color gris, con afloramientos masivos a columnares.
3. Los depósitos de lava de Peña La Estrella y Cascada El Onix (DI4), localizadas en el escarpe oriental del casco urbano de Coconuco, tiene un área de 27.6 km². Los afloramientos son cuerpos masivos con fracturamiento y espesores de 40 m. En algunos sectores, se observan pequeños depósitos piroclásticos intercalados.
4. Depósito de lava Quebrada Chengue (DI5), se distribuye como una franja delgada y alargada, en la parte media de las cuencas de las quebradas Chengue, Chupumbio y Pozo Azul. Los afloramientos tienen 40 m de espesor, son masivos y homogéneos, aunque un afloramiento ubicado sobre la vía que conduce a Pozo Azul, está altamente fracturado. Esta colada tienen 6 km de longitud y abarca un área de 12.2 km². Es de los últimos productos de la actividad efusiva del centro de emisión Chagartón.
5. Un depósito de lava más reciente cartografiada (DI6), ubicada en el sector proximal del volcán Puracé actual y parte alta de los drenajes, es representativa de la actividad volcánica reciente y tiene un área de 40,5 km².

3.2.5 Depósito de ceniza y pómez (Dcp)

Se localiza hacia el sur de la zona de estudio, en la vía que conduce a Paletará y en el camino a Patugó. El depósito es matriz soportado con material pumítico, fragmentos de roca (fragmentos de lava de tamaño milimétrico - centimétrico) y restos de materia orgánica carbonizada. En promedio alcanza 5 m de espesor y tiene un área de 2 km², y marcan un cambio en la geomorfología del sector, pasando de superficies con

fuertes escarpes a una superficie suave y ondulada. Este depósito corresponde posiblemente con el colapso de una columna eruptiva y representa la actividad de la Caldera de Chagartón, antes de iniciar la actividad Pre-Puracé. Un paleosuelo rojizo, ubicado en la vía que conduce a Paletará, concordante con la paelotopografía descansa sobre este depósito, con un espesor de 0.3 m, e indica una pausa en la actividad volcánica de la zona. Sobre este, se encuentran cenizas de caída, en paquetes homogéneos, de color gris y distribuido aleatoriamente en el sector, asociados posiblemente a la actividad reciente del Volcán Puracé.

3.2.6 Depósitos de tilita (Dt)

Monsalve (2000) reporta depósitos de tills asociados a la Formación Coconucos, restringidos al sector oriental del área de estudio. La altura de estos depósitos es superior a los 3400 msnm, y se caracterizan por la mala selección, con clastos de varios tamaños y con estrías que permiten definir su origen glacial. Abarcan un área de 0.9 km². Los depósitos afectan los Miembros Chagartón y Río Negro de la Formación Coconucos, y su origen está relacionado con la actividad glacial del sector.

3.2.7 Depósitos de vertiente (Dv)

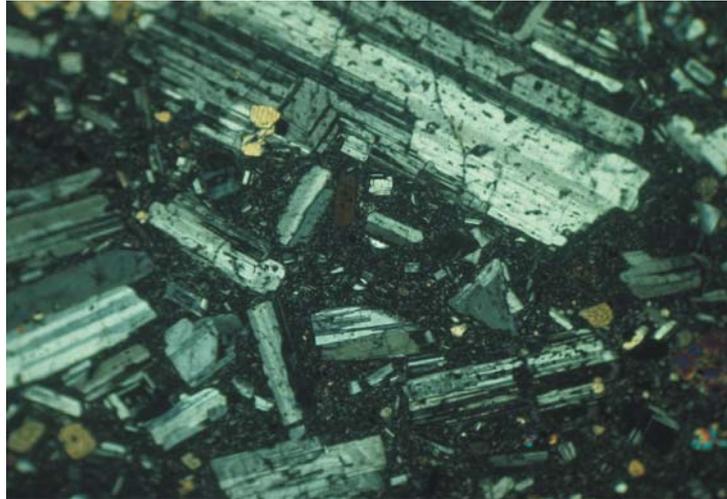
Se localizan sobre las márgenes del río Cauca, La Calera, San Andrés y Anambio principalmente. Son depósitos asociados a eventos aluviotorrenciales y se cartografiaron dentro de esta unidad los coluviones y/o depósitos torrenciales localizados hacía la zona de escarpes. Tiene un área de 3.6 km².

3.2.8 Depósitos aluviales (Qal)

Representados por terrazas aluviales en los ríos La Calera y Cauca, y por el abanico que forma el río Blanco al llegar al río La Calera. Se caracterizan por la presencia de bloques de diferentes tamaños, redondeados a subredondeados y composición heterogénea, con una matriz arenosa. El porcentaje matriz bloques es variable, pero predominan los bloques. Comprenden un área de 3.6 km² y representan la unidad más joven cartografiada en la zona.

3.3 Petrografía

Con base en el estudio de 14 secciones delgadas de roca y de 5 montajes de grano de las matrices de los depósitos, se pudo establecer que toda esta secuencia de lavas asociadas al Miembro Chagartón, como el depósito de lava 1 de dirección norte sur, tienen una petrografía similar y sólo algunos aspectos texturales como la variación en la cantidad de anfíbol permiten diferenciaciones.



0 2 mm

Figura 13. Textura sériate en las plagioclasas del sector Peña La Estrella (Fotografía con nicoles cruzados)

Las plagioclasas del grupo de depósitos de lavas asociadas a Chagartón están fracturadas, mientras que el depósito de lavas asociadas a Paletará no se observó fracturamiento. En todas las unidades se observaron inclusiones de opacos.

El piroxeno está representado por cristales de clinopiroxenos (augita) y ortopiroxenos (hiperstena), que alcanzan hasta 1,3 mm de tamaño. Se presentan en diferentes proporciones en los depósitos de lava, sin que puedan ser un criterio de diferenciación para éstas; en las rocas efusivas están restringidos a la matriz de una sola muestra. En general, los cristales están maclados, son subhedrales y tienen un grado de fracturamiento moderado. En la matriz de los depósitos de lavas asociadas al centro de Chagartón, se presentan como microlitos acompañando la plagioclasa. De igual manera en los depósitos de lava más antiguas asociadas a Chagartón se presentan crecimientos de cristales de ortopiroxeno alrededor de clinopiroxeno. Las inclusiones de apatitos y opacos, es frecuente en algunos cristales, sin embargo, no son marcadores de ningún evento.

Los anfíboles son cristales subhedrales de oxihornblenda; este mineral está ausente en las rocas explosivas de la base de la columna y, en las rocas efusivas asociadas a Paletará representan menos del 1% de las asociaciones minerales. En las rocas asociadas a Chagartón, la proporción de anfíbol aumenta desde las unidades más antiguas a las más recientes, sin embargo, no representan más del 3% de los minerales de la roca. Los cristales están aislados y, generalmente están reemplazados por opacos parcial y totalmente, los opacos algunas veces son cristalitos y otras veces

son una masa homogénea, pero no hay una tendencia que permita caracterizar los eventos.

La biotita se encuentra en cristales aislados, subordinada a dos muestras asociadas a la ignimbrita soldada, que representan los eventos explosivos de la base de la columna, y en general están en un estado avanzado de meteorización.

Los opacos se presentan como cristales aislados, formando glomeropórfidos y como inclusiones en todos los niveles de la columna aloestratigráfica. Es importante resaltar que en algunos casos están reemplazando completamente algunos cristales, como es el caso del anfíbol, posiblemente son cristales de titanomagnetita e illmenita.

Los minerales secundarios se presentan en venas de cuarzo restringido a algunas de los depósitos de lava asociados a Chagartón. En las rocas explosivas de la base de la columna, las vesículas están rellenas por minerales secundarios (amigdalas), producto de la circulación de soluciones acuosas a través de las grietas que disuelven los componentes químicos, es posible que estos minerales sean sulfatos y zeolitas, que presentan agregados radiales (como esferulitas), y los cuales pueden ser producidos por soluciones posteriores de diferentes composiciones (Figura 14). También se encuentran arcillas que reemplazan completamente los minerales primarios.

Las vesículas se encuentran de varias formas, alargadas y achatadas, o redondeadas, y están restringidas a las rocas explosivas definidas como ignimbrita soldada, ubicada en la base de la columna, e indican la presencia de una fase de vapor importante en el proceso de generación.

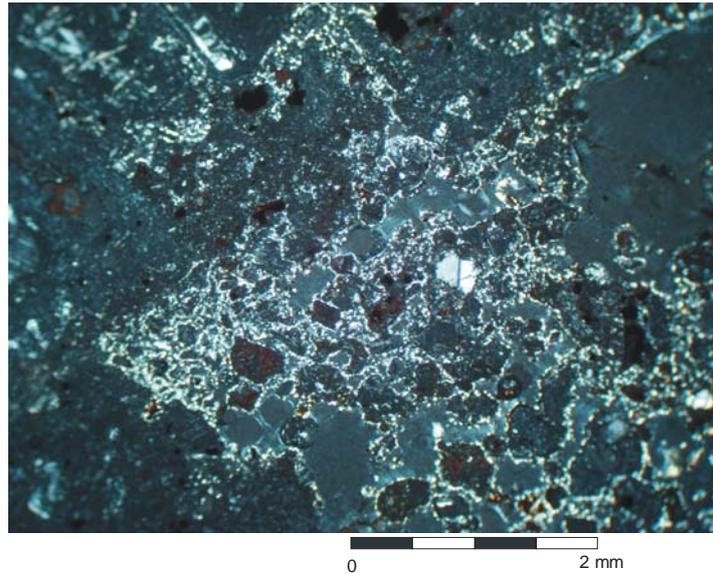


Figura 14. Minerales secundarios en las rocas explosivas (Fotografía con nicoles cruzados).

Fragmentos de roca se encuentran en todas las muestras analizadas de la columna aloestratigráfica. Hacia la base, en las rocas explosivas los fragmentos de roca corresponden a ignimbritas y lavas, en las rocas efusivas todos los fragmentos de rocas son lavas.

La matriz en las rocas asociadas a los eventos efusivos que se han mencionado, está conformada por vidrio volcánico y está acompañado de microlitos de plagioclasa, piroxeno y opacos. La dirección de flujo está bien marcada en algunos casos por los microlitos de plagioclasa, sin embargo, en sectores puntuales dentro de algunas rocas, no siempre se reconoce esta textura, y se observa una masa amorfa en la que no es posible diferenciar los minerales. En las rocas explosivas, la matriz está conformada esencialmente por vidrio volcánico, con microlitos de plagioclasa y vesículas, en un estado avanzado de meteorización.

3.4 Caracterización Mineralógica de la matriz de los depósitos piroclásticos

Los montajes de granos se realizaron a la ignimbrita basal (un montaje); al depósito de flujo de ceniza y pómez (dos montajes) y a las cenizas de caída que recubren la zona de estudio y están asociadas a la actividad reciente del volcán Puracé (dos montajes).

En la Figura 15, se presentan los resultados del análisis de la composición mineral, sobre el conteo total de aproximadamente 800 cristales, en la Figura 16 se muestran los resultados de minerales densos sobre un conteo de 250 granos (Ver análisis en anexo 2).

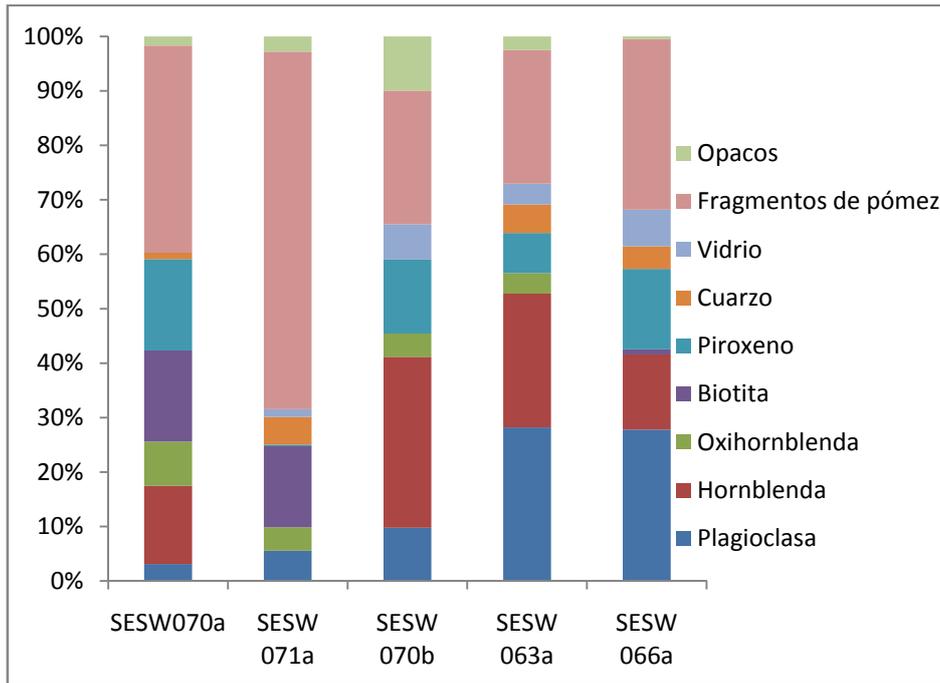


Figura 15. Diagrama de composición mineral para los depósitos piroclásticos no consolidados.

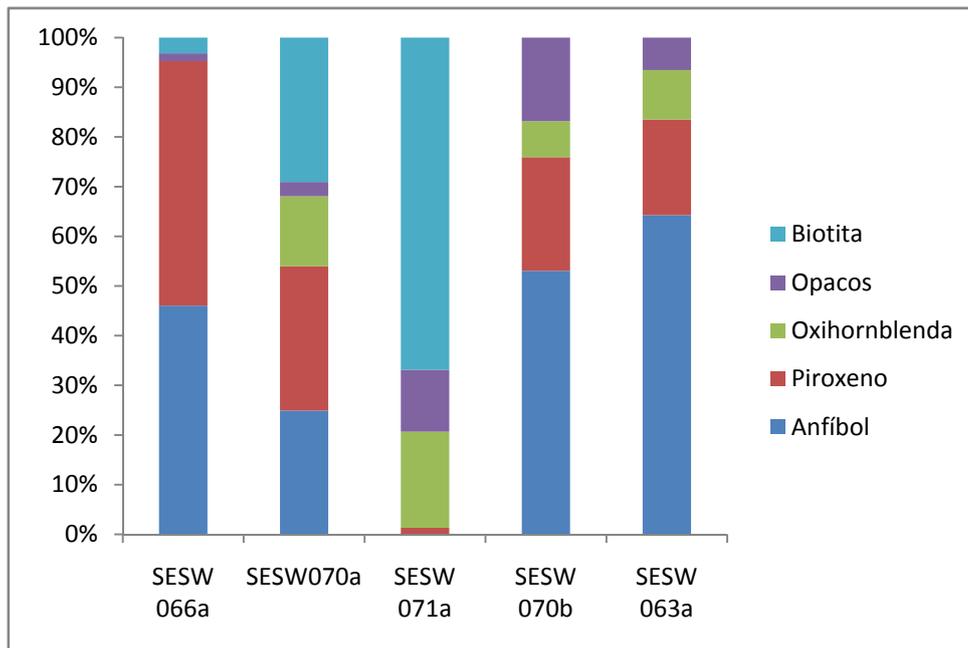


Figura 16. Análisis de minerales densos para los depósitos piroclásticos no consolidados.

Los depósitos piroclásticos son caracterizados por los minerales opacos y, se pueden caracterizar tres eventos explosivos:

La ignimbrita soldada, ubicada en la base de la columna, aflora en una pequeña ventana (SESW 066 a) y se está en un estado avanzado de meteorización. En esta muestra, el anfíbol y el piroxeno son las fases minerales más abundantes. El depósito de ceniza y pómez (SESW 070 y SESW071a), ubicado en el techo de la columna, está caracterizado por la presencia de biotita con abundancias > 20%. Finalmente, las cenizas recientes (SESW 070b y SESW 063 a), se caracterizan por la presencia de anfíbol, piroxeno y oxihornblenda, lo que está bien correlacionado con la composición básica del volcanismo actual del volcán Puracé.

3.5 Geoquímica

La Tabla 1 sintetiza los resultados analíticos de óxidos mayores y de los elementos trazas V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Zr. Las 10 muestras analizadas corresponden a cuatro muestras de depósito de lava 1, una del depósito de lava 2, tres del depósito de lava 3 y dos del depósito de lava 4. Cada una de estas muestras está representada en el mapa de estaciones y su posición aloestratigráfica en las figuras 7 y 8, respectivamente.

El valor de L.O.I (*loss on ignition*) representa el contenido total de volátiles, H₂O, CO₂ y S. Dicho valor indica el grado de alteración de las muestras debido a alteración hidrotermal, meteorización química o procesos metamórficos en grados diversos. El valor límite para este parámetro es establecido por cada laboratorio, en este trabajo se aceptan los valores menores 1% de L.O.I para realizar un análisis confiable de los datos geoquímicos.

Los análisis de elementos mayores (Tabla 1) realizados en roca total a las lavas de la Formación Coconucos, permiten agruparlas en la región calco - alcalina de la gráfica AFM (Figura 17), de acuerdo con la clasificación de Irvine y Baragar (1971).

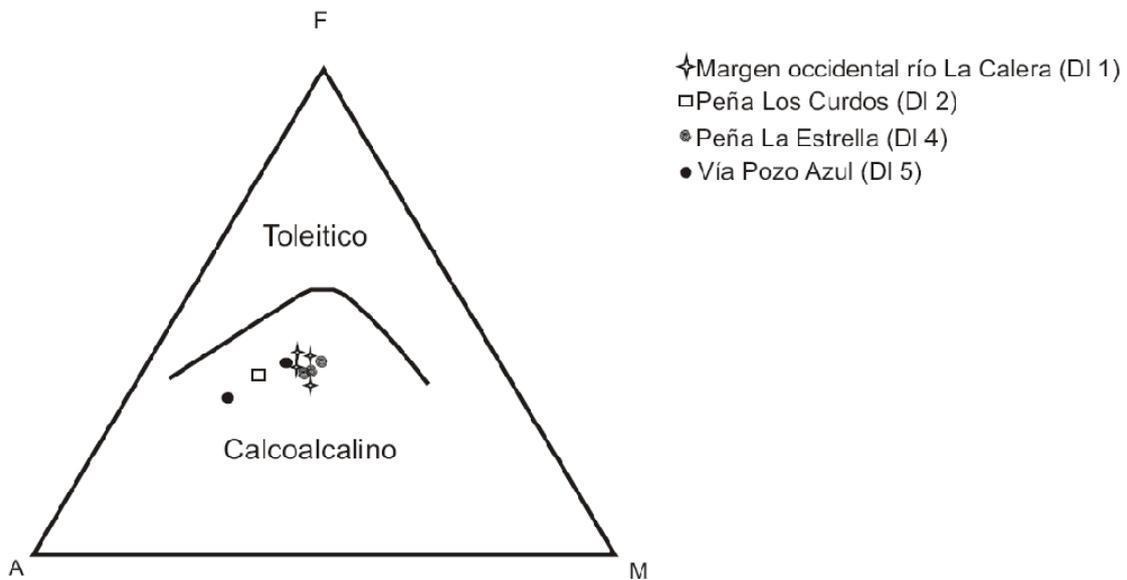


Figura 17. Diagrama AFM para las muestras estudiadas (Según Irvine y Barragar, 1971)

Las andesitas son definidas por Gill (1981) como rocas volcánicas con contenido de SiO₂ entre 53 y 63 wt.% calculado sobre la base anhidrica; a su vez son subdivididas en andesitas bajas en sílice o básicas (SiO₂ entre 53 y 57%) y andesitas altas en sílice o ácidas (57 y 63%). Las lavas analizadas están en un estrecho rango en el contenido de sílice, 60.91 – 62.74 wt%, de esta manera, son clasificadas como andesitas altas en sílice. Todas las lavas de dominio calcoalcalino caen en el campo de las traquiandesitas (Figura 18), sin embargo las muestras del depósito de lava 4 está en el límite con andesitas y andesitas basálticas.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
SESW055b	62,74	0,53	15,86	4,46	1,53	0,10	2,75	4,84	4,10	2,45	0,45	0,20
SESW056a	61,87	0,67	16,21	5,34	0,53	0,10	2,65	5,30	4,22	2,47	0,48	0,16
SESW058a	62,45	0,82	16,68	4,88	0,33	0,08	1,80	4,07	4,14	2,84	1,38	0,54
SESW061a	62,65	0,72	16,35	2,23	2,88	0,08	1,69	4,79	4,38	2,76	1,15	0,32
SESW062a	60,05	0,72	16,23	4,33	2,08	0,12	2,90	6,15	3,91	2,33	1,02	0,16
SESW065a	60,91	0,69	16,35	3,86	2,48	0,09	2,49	5,35	4,15	2,64	0,58	0,40
SESW067a	62,09	0,70	15,70	3,89	1,68	0,10	2,82	5,60	4,14	2,62	0,60	0,06
SESW068a	61,40	0,62	16,37	5,18	0,78	0,10	2,45	5,21	4,15	2,63	0,46	0,62
SESW086a	62,41	0,68	15,99	5,37	0,48	0,09	2,20	4,04	4,12	2,61	1,49	0,52
SESW090a	62,55	0,72	15,08	5,75	0,63	0,09	2,68	4,75	4,09	2,67	0,76	0,24

	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Ba	Pb
SESW055b	108,00	16,00	12,00	10,00	48,00	40,00	73,13	636,43	227,94	1665,93	1,40
SESW056a	100,00	18,00	12,00	8,00	54,00	38,00	70,21	659,21	235,52	1829,93	1,20
SESW058a	94,00	12,00	8,00	8,00	58,00	56,00	87,49	626,11	257,99	2083,43	3,00
SESW061a	88,00	12,00	12,00	6,00	34,00	50,00	91,34	763,30	273,60	2413,79	4,20
SESW062a	122,00	8,00	12,00	6,00	36,00	36,00	71,26	711,54	243,87	1447,05	< 1
SESW065a	110,00	24,00	12,00	12,00	44,00	50,00	84,37	617,86	280,17	1426,40	1,40
SESW067a	98,00	14,00	12,00	10,00	42,00	42,00	76,34	606,49	258,08	1571,43	2,00
SESW068a	110,00	16,00	12,00	10,00	22,00	54,00	82,62	640,90	268,37	1623,64	9,00
SESW086a	96,00	16,00	12,00	10,00	30,00	48,00	82,99	649,62	292,76	2097,49	3,20
SESW090a	86,00	18,00	12,00	12,00	48,00	28,00	107,92	668,97	336,87	1868,71	4,60

Tabla 1. Datos obtenidos para elementos mayores, menores y trazas en toca total, de muestras de lava del Miembro Chagartón – Formación Coconucos

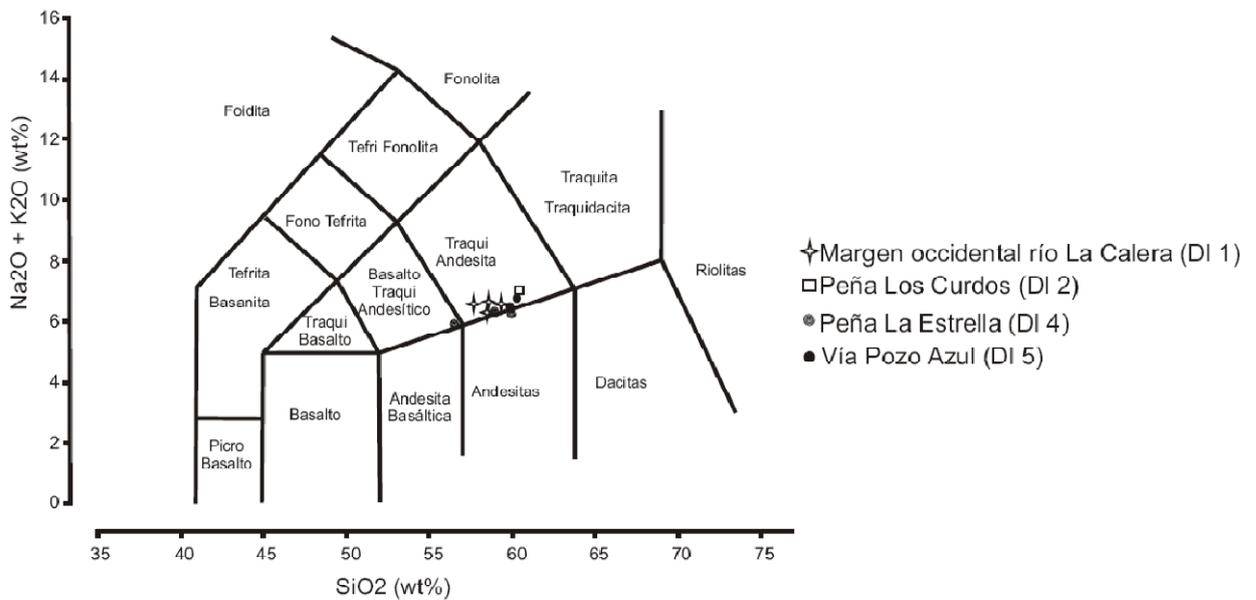


Figura 18. Diagrama TAS para las muestras estudiadas (Después de Le Bas et al. 1986)

La relación de potasio y sílice, permite identificar tres divisiones para las rocas calcoalcalinas (Gill, 1981). Las muestras analizadas están agrupadas en el campo de alto contenido de K (Figura 19).

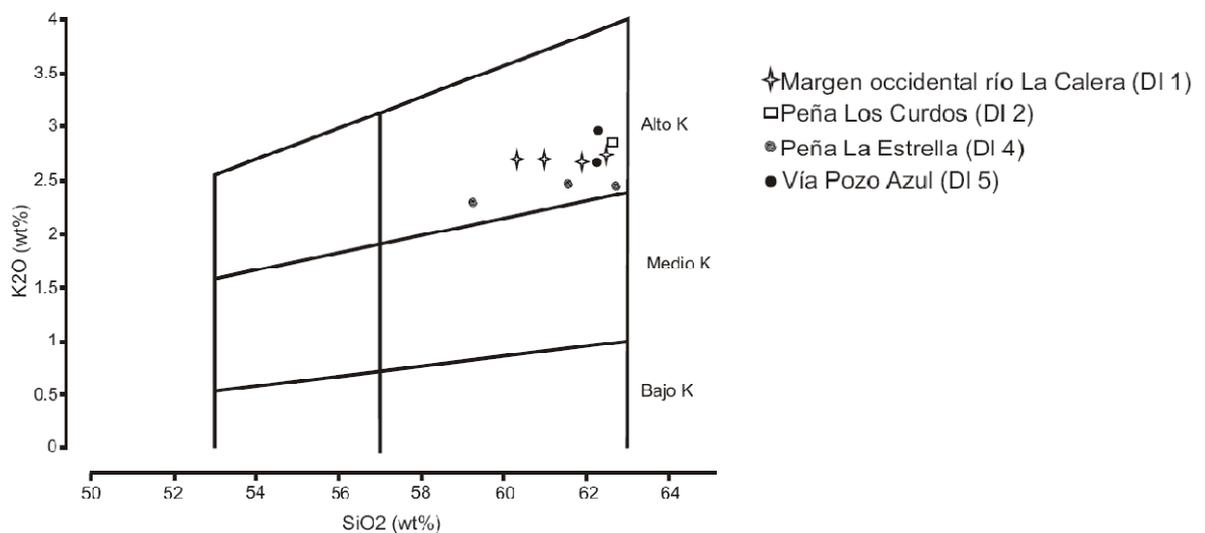


Figura 19. Diagrama de variación de SiO₂ vs K₂O para las muestras estudiadas (Después de Gill, 1981)

Los diagramas Harker (Figura 20), representan la variación de los óxidos mayores con respecto al contenido de sílice, éste último se considera como un indicador de diferenciación relativo de las muestras.

Establecer la tendencia en las correlaciones de los elementos mayores es difícil, dado que los datos están dispersos. Sin embargo, es posible definir una relación inversa entre MgO, Fe₂O₃ y CaO con el sílice, que es indicador la cristalización temprana de las fases minerales de opacos. Los otros elementos no presentan una tendencia tan clara, la baja correlación puede representar que la cristalización fraccionada no es el único proceso que está involucrado en la evolución del sistema magmático.

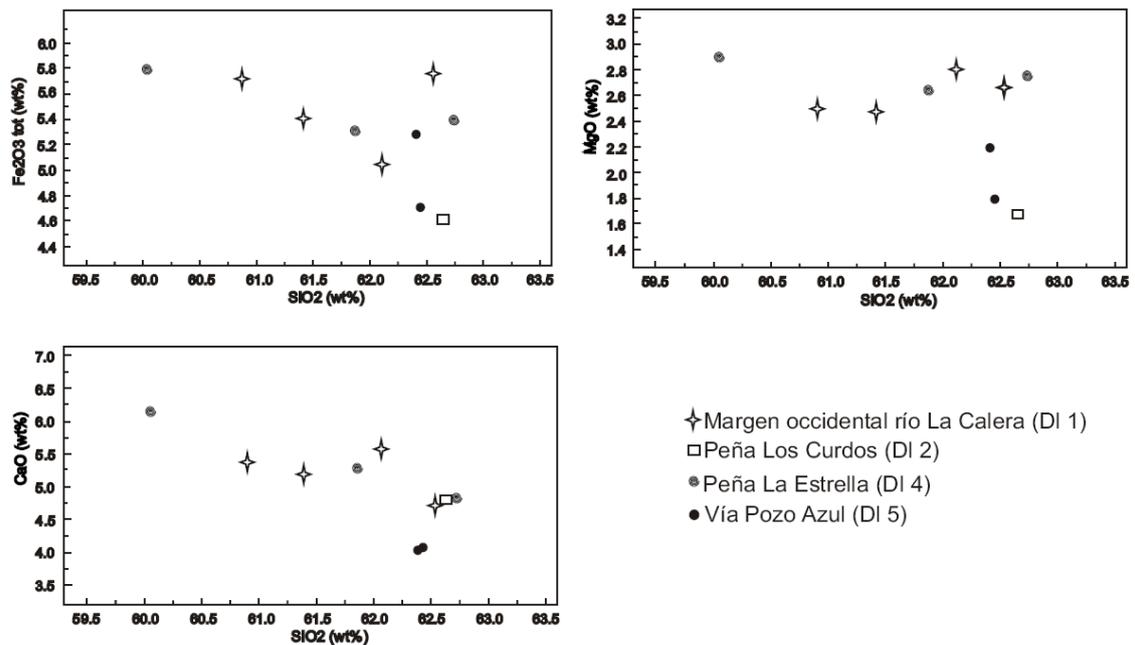


Figura 20. Diagramas Harker de variación de los óxidos mayores con respecto al sílice de las muestras estudiadas

A partir de los resultados arrojados en los análisis de laboratorio (Tabla 1), se definen una ligera correlación positiva (Figura 21) entre SiO₂ con Rb, Ba y correlaciones negativas con V. No es posible definir otras relaciones entre los datos obtenidos.

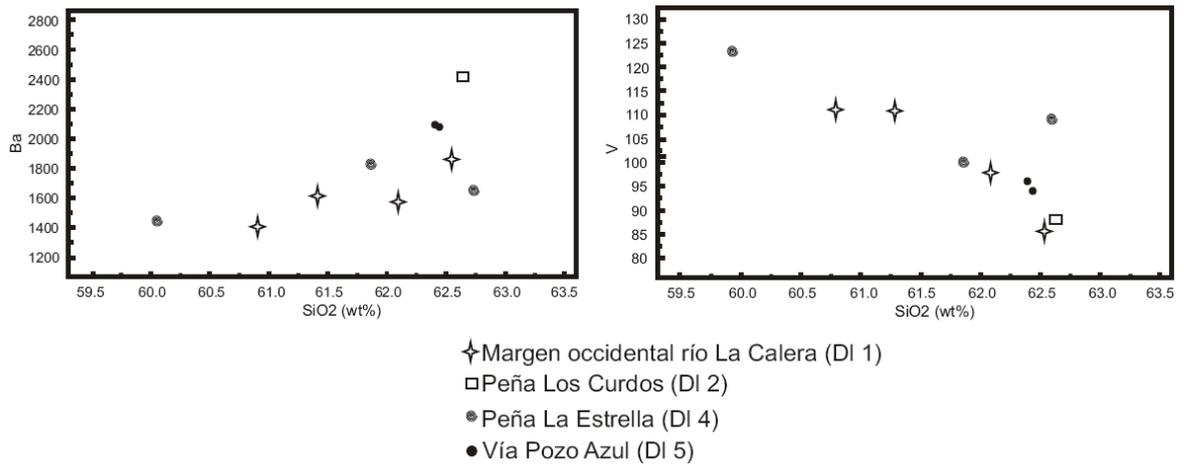


Figura 21. Diagramas Harker de variación de los elementos trazas en las muestras estudiadas.

4. Análisis y discusión

A partir de los resultados presentados en el capítulo 3, se realiza una interpretación de las relaciones cartográficas y estratigráficas entre las diferentes unidades volcánicas definidas. El principal resultado de este trabajo, es la aproximación estratigráfica de los depósitos volcánicos del sector, que permite acercarse al modelo evolutivo del volcanismo en el suroccidente colombiano, basados en la ventana de observación que representan los depósitos asociados a la actividad del volcán Puracé y sus estructuras anteriores.

Monsalve (2000) definió la Formación Coconucos para agrupar los productos volcánicos depositados en los alrededores del volcán Puracé y la Cadena Volcánica de los Coconucos. Posteriormente, INGEOMINAS (2003) en la plancha 365 – Coconucos, presenta oficialmente la cartografía de esta unidad a escala 1:100.000, lo cual no permite tener detalles sobre los depósitos volcánicos y sus relaciones.

Para el denominado Miembro Chagartón, se definieron 5 unidades de depósitos de lava intercalados con depósitos piroclásticos de menor dimensión, ubicados en la margen oriental del río La Calera en cercanías del municipio de Coconuco. El área fuente de estos depósitos, es el centro de emisión Chagartón.

La cartografía de estos depósitos de lava, indican que el magma alcanzó distancias máximas hasta de 9 km de la fuente. Con base en el área de cada depósito de lava cartografiado, el espesor y la distancia, el volumen promedio estimado de estos depósitos es de 1,56 km³. Según el volumen calculado, las distancias alcanzadas y la relación matriz/fenocristales de las rocas estudiadas permiten proponer que el magma era viscoso.

Por otro lado, en la margen occidental del río La Calera, se identificó un depósito de lava de dirección norte – sur. Este sector, INGEOMINAS (2003) lo cartografió como Miembro La Venta de la Formación Popayán, el cual está constituido esencialmente por depósitos de flujos de cenizas. En este trabajo, la caracterización cartográfica, petrográfica y geoquímica han permitido separar esta unidad del Miembro La Venta, y se considera asociado a actividad efusiva más antigua en el sector, cuya área fuente está relacionada con un volcanismo resurgente en la Caldera de Paletará y el centro de emisión se ubica posiblemente en el Valle de Paletará.

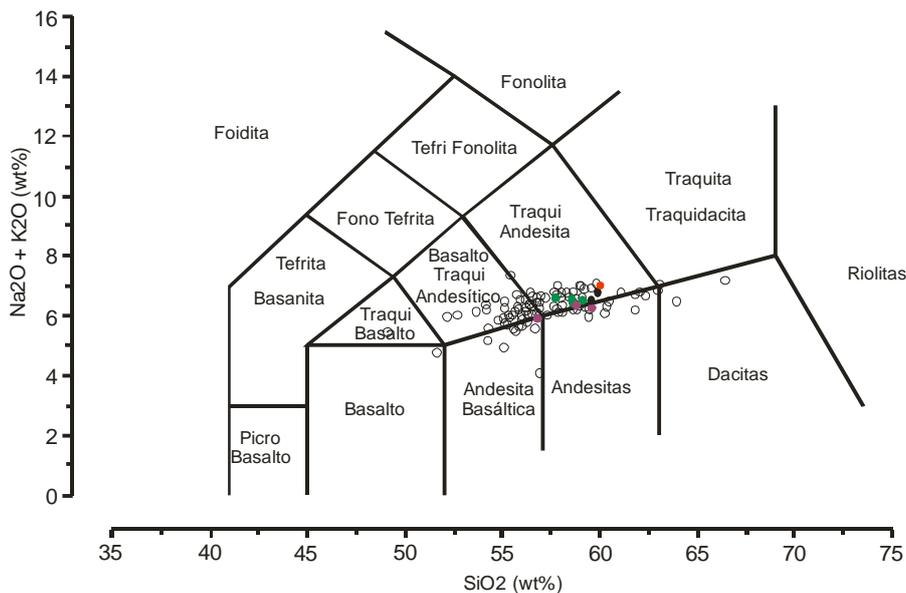
De acuerdo con las columnas aloestratigráficas levantadas y sus correlaciones, se identifican diferentes eventos volcánicos en el área de estudio. Hacia la base, se reportan dos niveles, uno explosivo y otro efusivo, que están asociados a la actividad de la Caldera de Paletará y representan los eventos volcánicos más antiguos del sector. El evento explosivo, constituye una extensa capa ignimbrítica, dispuesta por debajo de los productos más recientes de la actividad volcánica. El evento efusivo, representado por los depósitos de lava cartografiados en ambos sectores (aquí denominado depósito de lava 1 y en Popayán cartografiado en el sector de Conexpe), permiten proponer una actividad intracaldérica importante antes de iniciar el volcanismo que caracteriza la Formación Coconucos.

Los resultados de los análisis geoquímicos obtenidos, indican que las muestras hacen parte de las series calcoalcalinas, y presentan una ligera variación en la composición de los depósitos de lava. Las muestras están en el campo de las traquiandesitas y en el límite traquiandesitas – andesitas, todas con alto contenido de potasio. Estos resultados son típicos de las márgenes continentales activas

Aunque el rango de variación del sílice es pequeño, 60 y 63.5%, la variación de los elementos mayores y menores con respecto éste, no siempre presentan una tendencia lineal definida, lo cual puede ser interpretado como evidencia de que los procesos de cristalización fraccionada no son los únicos que actúan en el sistema magmático (Wilson, 1989).

Existen reportes de análisis geoquímicos para muestras de lava, generalmente ubicadas en cercanías al volcán Puracé actual; estos datos son integrados con los obtenidos en este trabajo, para evaluar las características geoquímicas con mayor cantidad de datos. Es importante considerar, que de todos los datos reportados no se tiene información sobre los métodos utilizados ni los laboratorios, sin embargo, es posible realizar una aproximación al comportamiento de volcán Puracé y las estructuras anteriores.

El conjunto de datos indican que todas las rocas pertenecen a la serie calcoalcalina. La mayoría de las muestras están en el campo de las andesitas, con variaciones en el contenido de sílice, que de acuerdo con el diagrama de Le Bas *et al.*, (1986), están en el campo de traquiandesitas, andesitas, andesitas basálticas y traquiandesitas basálticas (Figura 22). Unas pocas muestras están por fuera de esta tendencia y presentan composiciones basálticas y dacíticas.



- Margen occidental río La Calera (DI 1)
- Peña Los Curdos (DI 2)
- Peña La Estrella (DI 4)
- Vía Pozo Azul (DI 5)
- Otros estudios

Figura 22. Diagrama de clasificación TAS para muestras de la Formación Coconucos analizadas en diferentes trabajos (Después de Le Bas *et al.* 1986)

La variación del contenido de potasio con el sílice, ubica las rocas en el rango de alto contenido de potasio (Figura 23), esta característica marca la diferencia con los productos emitidos por otros centros volcánicos del suroccidente colombiano. Algunas muestras, se salen del rango alto en potasio, posiblemente debido a estados avanzados de meteorización de la roca o deficiencias en los métodos de laboratorio utilizados para el procesamiento.

Varias teorías se han planteado para explicar el enriquecimiento en potasio de las rocas del volcán Puracé y la Cadena volcánica de los Coconucos. Droux y Delalouye (1996) plantean que las altas concentraciones en elementos del grupo de K del volcán Puracé, está relacionado con aporte cortical a los magmas y refleja la asimilación posiblemente en la corteza superior, de material heterogéneo representado por rocas Precámbricas y Paleozoicas de la Cordillera Central, y lo sustentan al comparar con el volcán Doña Juana, que se encuentra aproximadamente a la misma distancia de la trinchera y a igual profundidad de la zona de Benioff, que no presenta este enriquecimiento. Por otro lado, Kuroda y París (1978) y Marín-Cerón (2007), explican este incremento en el arco volcánico del suroccidente colombiano, como una variación

normal identificada en otros arcos volcánicos de las márgenes continentales activas (Gill, 1981; Wilson, 1989), debido a la disminución en el aporte de fluidos de la placa que subduce y la fusión parcial de la corteza. De acuerdo con las muestras analizadas en este trabajo, que no están restringidas al volcán Puracé, si no que representan estados anteriores, tales como lavas asociadas a la Caldera de Paletará y al centro efusivo Chagartón, se interpreta el contenido alto en potasio, como una respuesta a la distancia de la trinchera (~ 190 km) y a la profundidad del plano de Benioff (~ 150 km), tal como ha sido propuesto por otros autores.

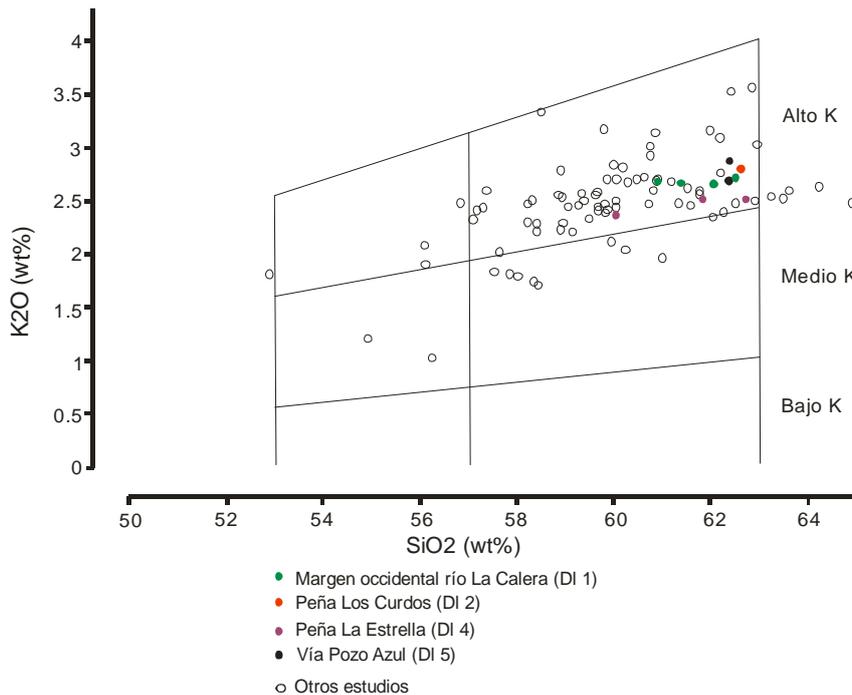


Figura 23. Relación SiO₂ vs K₂O para muestras de la Formación Coconucos analizadas en diferentes trabajos (Después de Gill, 1981)

Los procesos de cristalización fraccionada deben tener tendencias lineales coherentes en los diagramas Harker (Wilson, 1989), sin embargo, en las muestras analizadas esta característica no está bien definida y, sólo algunos elementos, como el CaO, Fe₂O₃ y TiO₂ (Figura 23) presentan una buena correlación, lo cual indica la cristalización temprana de ferromagnesianos.

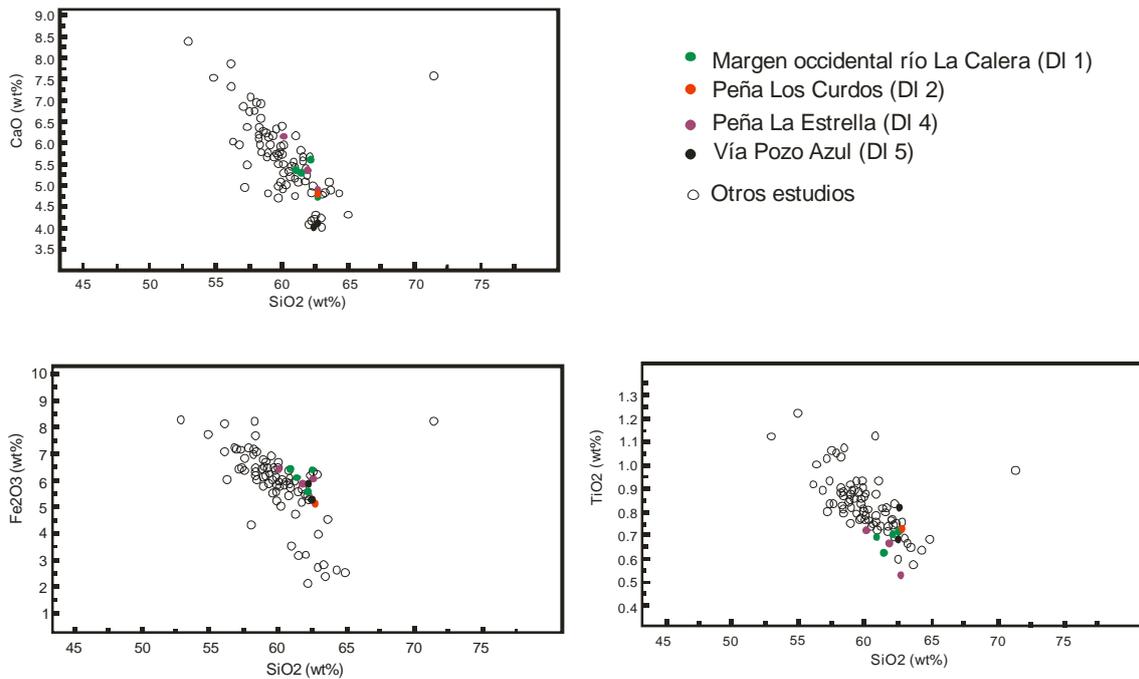


Figura 24. Diagramas Harker de variación de óxidos mayores con respecto al sílice de muestras analizadas por diferentes autores

La fuente del magma de la Cadena Volcánica de los Coconucos y estructuras anteriores, al igual que de los magmas andesíticos en general, es incierta y controversial. Se han planteado diferentes modelos para la generación de estos magmas: fusión del slab que subduce, fusión de la cuña del manto, fusión de las eclogitas en el slab que subduce después de deshidratación, fusión de la corteza continental y, una mezcla de algunas o todas las anteriores (Calvache y Williams, 1997). Por falta de datos geoquímicos de las muestras estudiadas (análisis isotópicos, elementos trazas y de las tierras raras), que permitan apoyarse en alguna de las teorías anteriores para plantear una posible fuente magmática, se intenta hacer un acercamiento a las condiciones que han dado origen a este material, a partir de las observaciones petrográficas y otros estudios desarrollados en el área.

La asociación de minerales da información importante sobre las condiciones de evolución de los magmas en niveles someros. Según Gill (1981) la biotita es poco común en rocas con <63% de SiO₂, y usualmente está restringida a andesitas ácidas altas en K, con temperatura de enfriamiento entre 800 y 950 °C, y casi siempre coexiste con hornblenda; por otro lado, se ha establecido que el anfíbol reemplazado parcial y/o totalmente, es un buen indicador de que los magmas alcanzaron niveles donde los anfíboles no eran estables, lo cual corresponde con presiones menores a 2

kbar y temperaturas de 900°C (Rutherford y Hill, 1993). De este modo, se puede considerar una temperatura de formación de alrededor de 900° C, para los magmas estudiados. Los piroxenos por su parte, no indican características especiales de las condiciones físicas de su formación, ya que es documentado por Gill (1981) que la augita y el ortopiroxeno, se precipitan simultáneamente en algunas andesitas a través del rango de presiones, aunque el ortopiroxeno precede la augita en muchos casos y, durante el ascenso del magma, puede darse el crecimiento de ortopiroxeno sobre augita. Además, se considera que mientras el magma se desplaza hacia arriba y alcanza niveles someros, empieza a cristalizar piroxenos y óxidos de Fe y Ti. Las inclusiones de material fundido y en general de otros minerales dentro de las plagioclasas, son características relevantes e indicadores de mezclas de magmas (Gill, 1981), y que es interpretado por Marín-Cerón (2007) como un suministro constante de magma desde la corteza inferior, y de acuerdo con Droux y Delalouye (1996) al darse la mezcla de magmas hay cambios en la presión y temperatura dentro de la cámara magmática y no cambios composicionales del magma. Se considera que un proceso importante que se da durante la mezcla de los magmas es la reabsorción. Gill (1981) indica que la presencia de oxihornblenda ocurre sólo en flujos o intrusiones cerca a superficie, y son más comunes en flujos internos oxidados; por otra parte la presencia de vidrio en bajas proporciones, en las matrices de las muestras analizadas, indican que el enfriamiento del fundido se dió en cercanías a la superficie, sin embargo se conserva la microestructura que evidencia el flujo magmático, en la cual el flujo puedes ser observado en progreso, de acuerdo con Vernon (2004) estás líneas pueden ser definidas por concentraciones de cristalitos y microlitos, como es el caso de las muestras estudiadas.

Es ampliamente identificado que los magmas eruptados en los límites de placa convergente, tienen numerosas inclusiones de rocas, las cuales han sido clasificadas en varias vías e incluyen grupos de glomeropórfidos, rocas ígneas máficas o ultramáficas de varias texturas, y rocas metamórficas. En este caso específico, los fragmentos de roca reportados representan las rocas del mismo sistema volcánico, por lo cual pueden representar cumulos cognates y/o mezclas de magmas (xenolitos) de las paredes de la roca (Gill, 1981) o material incorporado durante el flujo (Fisher y Schmincke, 1984); con estas inclusiones se tienen otras evidencias para hablar de la historia de cristalización antes de la erupción y de las mezcla de magmas. Por otra parte, Acevedo *et al.* (1987) sugieren que la frecuencia de glomeropórfidos, en especial aquellos con vidrio entre los cristales que indicarían restos de cúmulos, sugiere un mecanismo de cristalización fraccionada importante en el sistema.

La señal geoquímica de los materiales explosivos, representados por ignimbritas y depósitos de ceniza y bloques, deben dar luces sobre los mecanismos de formación, sin embargo, por el avanzado estado de meteorización de las muestras recolectadas durante la ejecución de este trabajo, no fue posible obtener material fresco para enviar al laboratorio y obtener resultados confiables. Sin embargo, a partir de las observaciones petrográficas, es claro el aporte de gases y agua en el sistema que activaron las explosiones que dieron a su origen, dada la presencia de minerales hidratados (anfíbol y biotita) y vesículas. Se espera en otras posibles campañas de campo en el sector, recolectar material adecuado para realizar análisis geoquímicos, y así mejorar la cantidad y calidad de datos, que permitan obtener señales sobre características de los eventos explosivos asociados al volcán Puracé, Cadena Volcánica de los Coconucos y estructuras anteriores.

Finalmente, es importante hacer una breve revisión sobre el origen del Miembro Chagartón y la Formación Coconucos en general. Monsalve (2000) ha estudiado detalladamente los depósitos alrededor de este sistema, y define tres períodos de volcanismo asociado a la historia evolutiva de la Cadena Volcánica de los Coconucos y las estructuras anteriores, que ella denomina centros eruptivos del Valle de Paletará. El primer periodo está representado por extensos depósitos de flujos ignimbriticos que representan la Formación Popayán y la Formación Huila, cuyas edades probables son Plioceno – Pleistoceno. El segundo periodo está caracterizado por la formación de un nuevo aparato volcánico que evoluciona hasta una estructura caldérica (Caldera de Chagartón), y a la cual está asociada un flujo de ceniza y pómez; los productos emitidos por este centro y de la posterior actividad de la caldera, se agrupan en el denominado Miembro Chagartón de la Formación Coconucos. El tercer periodo, está representado por tres fases; la primera ocurre después del colapso de la Caldera de Chagartón y se forman los centros eruptivos sobre los cuales se construye la Cadena Volcánica de los Coconucos, entre estos el edificio Pre-Puracé, los productos volcánicos están agrupados en los Miembros Río Negro y San Francisco. La segunda fase, está representada por un volcanismo de tipo freático y freatomagmático, cuyos productos están representados en el Miembro Paletará junto con otros productos volcánicos de los cuales no se conoce su área fuente. La fase final, está representada por los centros de emisión actuales de la Cadena volcánica de los Coconucos y que se han construido sobre los edificios destruidos, los productos recientes están agrupados en el Miembro Shaka y el Miembro Puracé.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Sobre la base del análisis geoquímico de los óxidos mayores y características petrográficas, las lavas del Miembro Chagartón – Formación Coconucos, se clasifican como andesitas de dos piroxenos, con tendencia calcoalcalina con contenido alto en potasio.

Otros productos asociados al Miembro Chagartón, son clasificados sobre análisis petrográficos y por las características de campo. Estos productos representan eventos explosivos, que se ubican a la base y el techo de la columna generalizada presentada en este trabajo.

La mineralogía de los fenocristales y el análisis de elementos mayores, evidencia procesos de desequilibrio en la cámara magmática, tales como mezcla de magmas. Además, permiten realizar inferencias sobre la historia de cristalización de los magmas en reservorios localizados en niveles superiores.

Con la cartografía realizada durante la realización de este trabajo, se precisaron los límites geográficos de las Formaciones Popayán y Coconucos, y se propuso un mayor detalle a los diferentes flujos de lava que están asociados al Miembro Chagartón – Formación Coconucos.

La estratigrafía permitió establecer una predominancia de eventos efusivos, representados por depósitos de lava, limitados a la base y techo por eventos explosivos

La actividad explosiva representa un tema de mucho interés, y su estudio debe ser emprendido desde una adecuada recolección de muestras, de modo que las pruebas de laboratorio sean confiables para realizar análisis y ser utilizados en diferentes áreas, tales como evolución del sistema magmático, amenaza y riesgo volcánico.

5.2 Recomendaciones

Realizar análisis geoquímicos de elementos trazas (incluidos Nb, Y, Nd, entre otros) y análisis isotópicos, permitirá aumentar el grupo de datos para el suroccidente colombiano, además que permitirá apoyar o replantear el modelo aquí aceptado para la generación de los magmas andesíticos de la Cadena volcánica de los Coconucos y estructuras anteriores.

Un programa de datación de las muestras analizadas en este trabajo es necesario. El método adecuado para esto, es el de trazas de fisión, dada la baja densidad de minerales propicios para dataciones K/Ar y Ar/Ar (biotita y anfíbol). Además de reconocer las edades de los eventos efusivos y su recurrencia, las dataciones permitirán precisar el límite inferior del Miembro Chagartón, lo que conllevará a definir el límite entre las Formaciones Popayán y Coconucos, que aún es incierto.

Con este trabajo se pretende aportar al conocimiento del volcán Puracé, la Cadena volcánica de los Coconucos y su área de influencia, avanzando en el entendimiento del sistema magmático, productos necesarios para la actualización del mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del volcán Puracé, con el cual cuenta el país. Sin embargo, se hace necesario la integración de esta información con los resultados arrojados por los otros trabajos que han hecho parte de este proyecto.

6.Referencias

Acevedo, A.P., Monsalve, M.L., Cépeda, H., 1987. Petrografía de algunas lavas de la Cadena Volcánica de los Coconucos: Informe interno INGEOMINAS, 8 p.

Aspden, J. A., McCourt, W., Brook, M., 1987. Geometrical control of subduction-related magmatism: The Mesozoic and Cenozoic plutonic history of western Colombia: *Journal of the Geological Society, London*, v 144, p 893 – 905.

Bohorquez, O.P., Monsalve, M.L., Velandia, F., Gil, F., Mora, H., 2005. Marco tectónico de la cadena volcánica más septentrional de la cordillera central de Colombia: *Boletín de Geología*, v. 27 (44), p 55 - 79.

Calvache, M.L., Williams, S., 1997. Geochemistry and petrology of the Galeras Volcanic Complex, Colombia: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v 77, p 21 – 38.

Case, J.E., Duran, L.G., López, A., Moore, W.R., 1971. Tectonic investigation in Western Colombia and Eastern Panama: *Geological Society of America Bulletin*, v 82, p 2685 – 2712.

Cepeda, H., Monsalve, M.L., Pulgarín, B., 1991. Origen y magmatismo del flujo piroclástico de Agua Blanca, volcán Puracé: Simposio sobre magmatismo andino y su marco tectónico, v 2, p 40 – 57.

CHEC – Central Hidroeléctrica de Caldas -, 1983. Investigación Geotérmica Macizo volcánico del Ruiz: v II – Etapa A, 112 p.

Corredor, F. 2003. Seismic strain rates and distributed continental deformation in the northern Andes and three-dimensional seismotectonics of northwestern South America: *Tectonophysics*, v 372, p 147 -166.

De Porta, J., 1974. *Lexique Stratigraphique international, V. V Amerique Latine*, Fascículo 4b, Colombie, 690 p.

Droux, A., Delaloye, M., 1996. Petrography and geochemistry of Plio-Quaternary Calc-alkaline volcanoes of southwestern Colombia: *Journal of South American Earth Science*, v 9 (1 -2), p 27 – 41.

Fisher, V., Schmincke, H., 1984. *Pyroclastic rocks*: Springer-Verlag, 472 p.

Gailler, A., Charvis, P., Flueh, E., 2007. Segmentation of the Nazca and South American plates along the Ecuador subduction zone from wide angle seismic profiles: *Earth and Planetary Science Letters*, v 260 (444 – 467).

Gansser, A., 1973. Facts and theories on the Andes: *Journal of the Geological Society, London*, v 129, p 93–131.

Gill, J.B., 1981. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Heidelberg, Springer. 390 p.

Grosse, E., 1926. *Estudio geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia*: Berlin, Dietrich, 361 p.

Grosser, J. R., 1989. Geotectonic evolution of the Western Cordillera of Colombia: new aspects from geochemical data on volcanic rocks: *Journal of South American Earth Science*, v 2 (4), p 359 – 369.

Gutscher M.A., Malavieille J., Lallemand S., Collot J.Y., 1999. Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision: *Earth and Planetary Science Letters*, v 168, p 255–270.

Hall, M.L., Wood, C.A., 1985. Volcano-tectonic segmentation of the Northern Andes: *Geology*, v 13, p 203 – 207.

Hormann, P., Pichler, H., 1979. Colombian – German scientific programs of volcanic rocks. Report of fieldworks: INGEOMINAS – Bogotá, 13 p.

INGEOMINAS, 2003. *Geología de la Plancha 365 Coconuco*. Escala 1: 100.000.

Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks: *Canadian Journal of Earth Science*, v 8, p 523 – 548.

James, D., Murcia, A., 1984. Crustal contamination in northern Andean volcanic: Journal of the Geological Society of London, v 141, p 823 – 860.

Jaramillo, J.M., 1976. Volcanic rocks of the río Cauca Valley, Colombia, S.A: Tesis de Maestría, Rice University, 98 p.

Kamata, H., Hayashida, A., Danhara, T., 1997. Identification of a pair of co-ignimbrite ash and underlying distal plinian ash in the Early Pleistocene widespread tephra in Japan: Journal of Volcanology and Geothermal Research, v 78, p 51-64.

Kellogg, J.N., Vega, V., 1995. Tectonic development of Panama, Costa Rica and the Colombian Andes: constrains from Global Positioning System geodetic studies and gravity: Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America, Mann, P. (Ed), Geological Society of America Special Paper 295, p 75-90.

Kroonenberg, S., Pichlerh, H., y Diederix, H., 1982. Cenozoic alkalibasaltic to ultrabasic volcanism in the uppermost Magdalena Valley, Southern Huila Department, Colombia: Geologia Norandina, v 5, p 19-26.

Kuroda, N., París, G., 1978. Petrographical notes some dacites and andesites of Purace volcano, Cauca Colombia: Report of Andean studies, Shizuoka University, Special volume, p 21 – 32.

Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram: Journal Petrology, v 27, p 745 – 750.

Le Maitre, R.W, Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, A., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lamyere, J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sørensen, H., Woolley, A.R., 2002. Igenous rocks: A classification and glossary of terms, recommendations of the Internacional Union of Geological Sciences Subcommission on the systematics of Igneous rocks: Cambridge University Press, 2nd Edition: Cambridge University Press, 256 p.

Lonsdale, P., 2005. Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon Plate: Tectonophysics, v 404, p 237 – 264.

Marín-Cerón, M.I., 2004. Geochemical variation of late Cenozoic volcanic rocks in time and space, SW Colombia. Sin publicar: Tesis de Maestría, Universidad de Shimane, Japón,

Marín-Cerón, M.I., 2007. Major, trace and multi-isotopic systematics of SW Colombian volcanic arc, northern Andes: Implications to the stability of carbonate-rich sediment at subduction zone and the genesis of andesite magmas. Sin publicar: Tesis de Doctorado, Universidad de Okayama, Japón, 161 p.

Maya, M., González, H., 1995. Unidades litodémicas de la cordillera Central de Colombia: Boletín Geológico INGEOMINAS, v 35 (2 - 3), p 43-57.

Marriner, G.F., Millward, D. 1984. The petrology and geochemistry of Cretaceous to Recent volcanism in Colombia: the magmatic history of an accretionary plate margin: Journal of Geological Society of London, v 141, p 473 – 486.

McCourt, W.J., Aspden, J.A., Brook, M., 1984. New geological and geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by multiple accretion: Journal of Geological Society of London, v 141, p 831-845.

Meissner, R.O., Flueh, E.R., Stibane, F., Berg, E. 1976. Dynamics of the active plate boundary in southwest Colombia according to recent geophysical measurements: Tectonophysics, v 35, p 115– 136.

Monsalve, M.L., 1991. Geoquímica y dataciones de episodios tipo San Vicente en el volcán Puracé: Boletín Geológico INGEOMINAS, v 33 (1-3), p 3 – 16.

Monsalve, M.L., 2000. Catalogo de las volcánicas Neógenas de Colombia, Fascículo Formación Coconucos: INGEOMINAS, 32 p.

Monsalve, M.L., Pulgarín, B., 1995. Cadena volcánica de los Coconucos (Colombia): Centros eruptivos y productos recientes: Boletín Geológico, v 37 (1-3), p 17 – 51.

Murcia, A., Marín, p., 1981. Petrología y petroquímica en lavas recientes de algunos volcanes en Colombia: Revista CIAF, v 6 (1-3), p 349 – 363.

Murcia, A., Cepeda, H. 1984. Memoria geológica de la plancha 429 Pasto: INGEOMINAS, 193 p.

Nelson, H.W., 1962. Contribución al conocimiento de la Cordillera Central de Colombia. Sección entre Ibagué y Armenia: Boletín Geológico INGEOMINAS v 10 (1-3), p 161–203.

North American Stratigraphic Code - North American Commission on Stratigraphic Nomenclature, 2005: AAPG Bulletin, v 89 (11), p 1547 – 1591.

Patino, L., Carr, M., Feigenson, M., 2003. Local and regional variations in Central American arc lavas controlled by variations in subducted sediment input: Contrib Mineral Petrol, v 138, p 265 – 283.

Pilger, R., 1984. American Andes Cenozoic plate kinematics, subduction and magmatism: South American Andes: Journal of the Geological Society, v 141, p 793 – 802.

Radelli, L., 1967. Geologie des Andes Colombiennes: Travaux du Laboratoire de Geologie de la Faculte des Sciences de Grenoble, Memoires, v 6, 457 p.

Ramírez, C., 1982. El vulcanismo Neógeno y Cuaternario de Colombia: cronología y caracterización químico-petrográfica: Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 207 p.

Restrepo, J.J., Toussaint, J.F., Gonzalez, H., 1981. Edades mio – pliocenas del magmatismo asociado a la Formación Combia, Departamento de Antioquia y Caldas, Colombia. Geologia No 3, pp. 21 – 26.

Restrepo, J.J., 1985. Algunas consideraciones sobre el origen del magmatismo Mioceno tardío de la depresión norte del río Cauca: Memorias VI Congreso Colombiano de Geología, Tomo I, p 335 – 336.

Rollinson, H., 1993. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation: Longman group, UK, 352 p.

Rutherford, M.J., Hill, P.M., 1993. Magma ascent rates from amphibole breakdown: An experimental study applied to the 1980 – 1986 Mount St Helenns eruption: *Journal of Geophysical Research*, v 98, p 19667 – 19685.

Stern, C.R., 2004. Active andean volcanism: its geological and tectonic setting: *Revista Geológica de Chile*, v 31 (2), p 161 – 206.

Streckeisen, A. 1979., Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melilite rocks. Recommendation and suggestions of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Geology*, v 7, 331 – 335.

Taboada, A., Rivera, L.A., Fuenzalida, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., Rivera, C., 2000. Geodynamics of the Colombian Andes: subductions and intracontinental deformation (Colombia): *Tectonics*, v 19 (5), p 787-813.

Toro, G., Restrepo, J.J., Poupeau, G., Saenz, E., Azdimousa, A., 1999. Datación por trazas de fisión de circones rosados asociados a la secuencia volcánico – sedimentaria de Irra (Caldas): *Boletín Ciencias de la Tierra*, v 13, p 28 -34.

Torres, M. P., Ibáñez, D., Vásquez, E., 1992. Geología y estratigrafía de la Formación Popayán: Informe interno INGEOMINAS, 85 p.

Torres, M. P., Monsalve. M.L., Pulgarín, B., Cepeda, H., 1999. Caldera de Paletará: Aproximación a la fuente de las ignimbritas del Cauca y Huila: *Boletín Geológico de INGEOMINAS*, v 37, p 1 – 15.

Trenkamp, R., Kellog, J., Freymuller, J., Mora, H., 2002. Wide margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations: *Journal of South America Earth Sciences*, v 15, p 157 – 171.

Van der Hilst, R., Mann, P., 1994. Tectonic implications of tomography images of subducted lithosphere beneath northwestern South America: *Geology*, v 22, p 451 – 454.

Van der Wiel, A.M., 1991. Uplift and volcanismo f the SE Colombian Andes in relation to Neogene sedimentation in the Upper Magdalena Valley: The Quaternary of Colombia, T. Van der Hammen (Editor), 207 p.

Vatin-Pérignon, N., Goemans, P., Oliver, R., Parra, E., 1990. Evaluation of magmatic processes for the products of the Nevado de Ruiz Volcano, Colombia from geochemical and petrological data: Journal of Volcanology and Geothermal Research, v 41, p 153 - 176.

Vernon, R.H., 2004. A practical guide to rock microstructure. Cambridge University Press. 594 p.

Wilson, M., 1989. Igneous Petrogenesis: a global tectonic approach: Unwin Hyman, 466 p.

ANEXO 1
INFORMACION DE CAMPO

A continuación se describe la ubicación geográfica, las coordenadas X, Y, Z y la plancha topográfica IGAC en escala 1:25.000 en la que se localizan las estaciones de campo representadas en el mapa de estaciones (Figura 8).

Estación	Ubicación geográfica	X	Y	Z	Plancha IGAC
SESW055	Peña de la Estrella	1065557	750066	2660	365IA
SESW056	Peña de la Estrella	1065450	749968	2640	365IA
SESW057	Cerro La Estrella	1065654	749793	2850	365IA
SESW058	Vía Pozo Azul, Peña Los Comuneros	1065801	746724	2740	365IA
SESW059	Margen izquierda de la Quebrada Chupumbio	1065260	746520	2645	365IA
SESW060	Margen izquierda de la Quebrada Chupumbio	1065226	746612	2683	365IA
SESW061	Marquen izquierda del río Chengue, sector Chiliglio	1064689	747965	2570	365IA
SESW062	Cascada del Onix	1064815	749692	2475	365IC
SESW063	Vía Coconuco los Termales	1065113	749362	2600	365IC
SESW064	Sector el Alto	1063600	748612	2770	365IC
SESW065	Camino del Alto a la vía Coconuco Paletará	1063589	748783	2700	365IC
SESW066	Vereda El Salado	1063921	749064	2400	365IC
SESW067	Vía Coconuco Paletará, chorrera San Bartolo	1063629	748075	2600	365IC
SESW068	Peña de Agua Tibia	1062791	746547	2730	365IC
SESW069	Vía Coconuco Paletará, cascada Calagualua	1063066	743738	2760	365IC
SESW070	Vía Coconuco Paletará, desvío a Patugó	1063218	743282	2840	365IC
SESW071	Vía a la vereda Patugó	1063042	748226	2840	365IC
SESW072	Vía Popayán Coconuco, sector Cocochico	1064793	752963	2290	365IC
SESW081	Vía Coconuco – Pozo Azul	1065015	747372	2600	365IC
SESW086	Margen derecha de la quebrada Chengue por el camino que conduce a Peña los ratones	1065795	746483	2640	365IC
SESW087	Peña de los ratones, margen izquierda río Chupumbio	1065260	746520	2645	365IC
SESW088	Margen izquierda quebrada Chupumbio	1065226	746612	2683	365IC

Estación	Ubicación geográfica	X	Y	Z	Plancha IGAC
SESW089	Camino de Peña los Ratones a la carretera que conduce a Pozo Azul	1065518	746475		365IC
SESW090	Cascada Calaguala, vía Coconuco-Paletará	1063019	743847	2750	365IC
SESW091	Vía Coconuco Paletará, antes del desvío a Patugó	1063218	743282	2840	365IC

ANEXO 2
PETROGRAFÍA Y MONTAJES DE GRANO

Muestra: SESW 055b

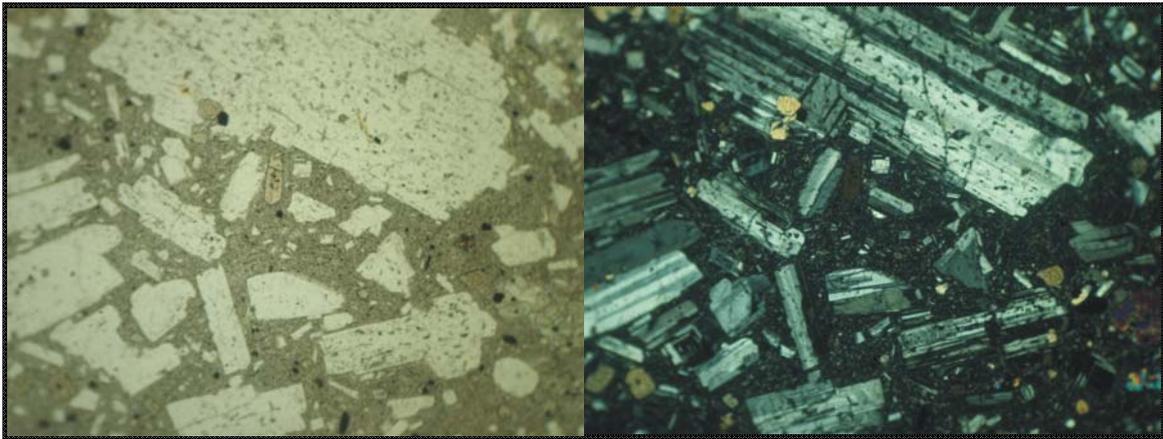
Localidad: Peña La Estrella, margen oriental del río La Calera

Descripción macroscópica: Roca masiva, compacta, afanítica, inequigranular, con fenocristales de plagioclasa y piroxeno. Presenta textura porfídica, color gris oscuro. Lava fenoandesitoide.

Descripción microscópica: Roca hipocristalina, afanítica, inequigranular. Textura general porfídica seriate. Componentes:

- **Plagioclasa (30%),** son cristales euhedrales a subhedrales, tabulares. Hay dos generaciones representadas por tamaños promedios de 3,21 mm y 0,78 mm. La generación de tamaños mayores, tiene texturas de reabsorción, sieve y poiquilítica, indicada por las inclusiones de cristales de piroxeno, opacos y circón. Algunos cristales tienen zonación normal. Los cristales están maclados según albita. Es común observar la textura glomeroporfídica, representada por cristales de plagioclasa, piroxeno y opacos. La plagioclasa es una andesina con 32% de contenido de anortita.
- **Piroxenos (11%),** se presentan como cristales subhedrales, representados por augita e hiperstena. El tamaño promedio es de 1,9 mm y algunos cristales están maclados. Hay cristalización de clinopiroxeno rodeando un cristal de ortopiroxeno.
- **Oxianfíbol (1%),** son cristales subhedrales reemplazados a opacos totalmente, el tamaño promedio es de 0,9 mm.
- **Opacos (3%),** están representados por pequeños cristales anhedrales, que se encuentran en la matriz, como inclusiones en la plagioclasa, reemplazando el oxianfíbol y como cristales aislados.
- **Matriz (55%),** está compuesta por vidrio y microlitos de plagioclasa, piroxeno y opacos. La plagioclasa está orientada, e indica la dirección del flujo.
- **Fragmento lítico,** compuesto por cristales de plagioclasa y piroxeno; bordes bien definidos, xenolito cognate.

Clasificación según recomendaciones de Le Maitre (2002): Fenoandesita



Nicoles paralelos; Nicoles cruzados

0 2mm

Obsérvese la textura general porfídica seriate. Texturas de reabsorción y sieve en los fenocristales de plagioclasa.

Muestra: SESW 056 a

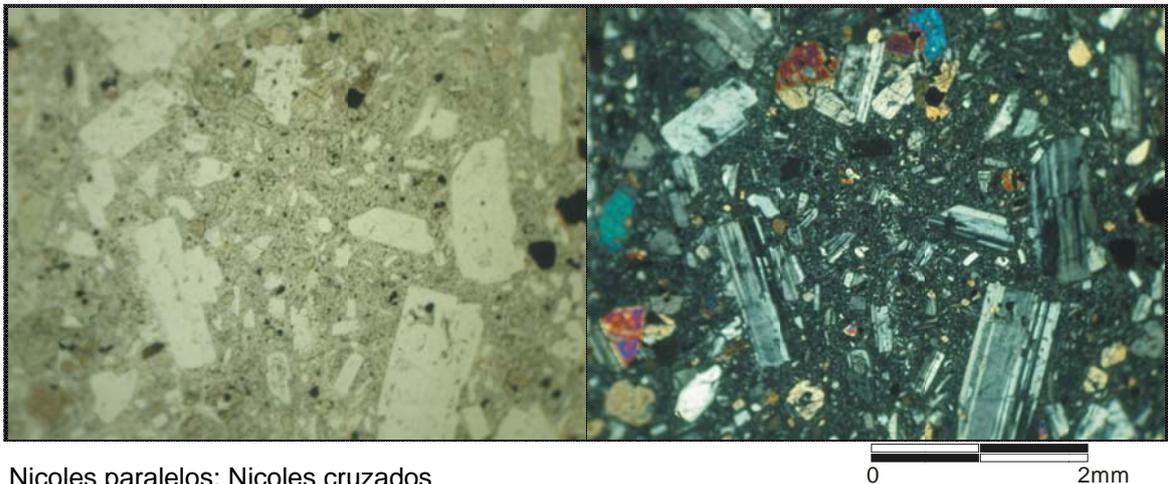
Localidad: Peña La Estrella, margen oriental del río La Calera

Descripción macroscópica: Roca masiva, compacta, afanítica, inequigranular, con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y una venita de cuarzo. Presenta textura porfídica, color gris oscuro. Se clasifica como una lava fenoandesitoide.

Descripción microscópica: Roca hipocristalina, afanítica, inequigranular. Textura general porfídica seriate. Componentes:

- **Plagioclasa (29%),** se presenta en cristales subhedrales a anhedrales, tabulares. Hay dos generaciones representadas por tamaños promedios de 2,63 mm y 0,61 mm. La zonación de los cristales es normal y hay maclas de albita y albita - carlsbad. Se observa las texturas glomeroporfídica (Plagioclasa + piroxeno + opacos), sieve y poiquilítica. Son frecuentes los cristales con inclusiones de fundido y bordes de reacción. Algunos cristales están fracturados. La plagioclasa es una andesina con el 37% de contenido de anortita.
- **Piroxenos (8%),** se presentan como cristales euhedrales a subhedrales, de augita y algunas hiperstenas. El tamaño promedio es de 1,9 mm y en general están fracturados. Hay cristalización de clinopiroxeno rodeando un cristal de ortopiroxeno.
- **Oxihornblenda (1%),** son cristales subhedrales reemplazados totalmente por cristales muy finos de opacos. El tamaño promedio de la oxihornblenda es 2,5 mm.
- **Opacos (2%),** se presentan en pequeños cristales anhedrales, reemplazando la oxihornblenda y en la matriz.

- **Matriz (60%)**, está compuesta por vidrio y microlitos de plagioclasa, opacos y piroxeno.
 - **Cuarzo**, conforma una vena cuyos cristales son subhedrales y anhedrales.
- Clasificación según recomendaciones de Le Maitre (2002):** Fenoandesita.



Nicoles paralelos; Nicoles cruzados

0 2mm

Textura porfídica - seriate. Se observa textura glomeroporfídica, definida por la agrupación de cristales de plagioclasa, piroxeno y opacos.

Muestra: SESW 058 a

Localidad: Peña de Los Comuneros en la vía que conduce de Coconuco al sector Caracoles – Fortaleza.

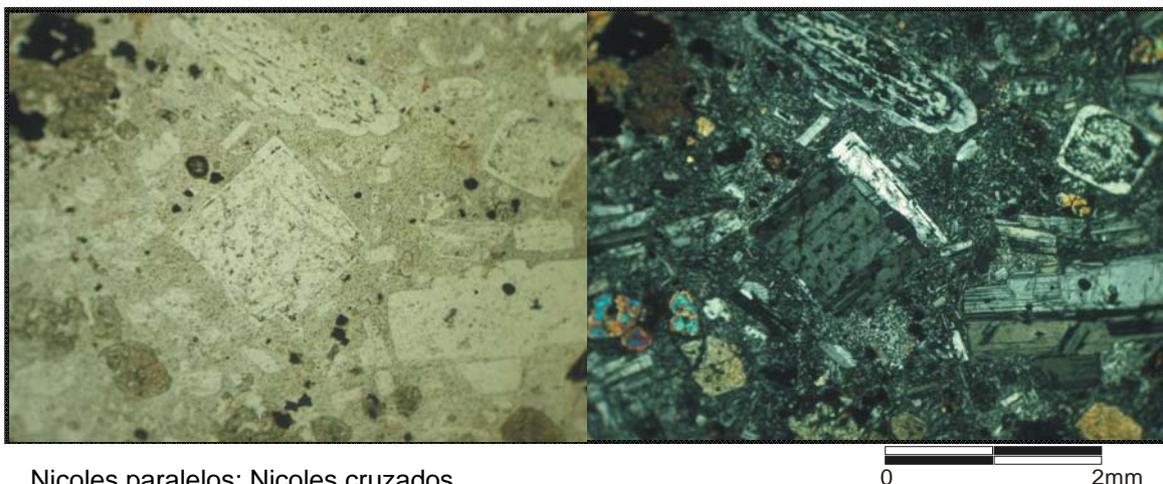
Descripción macroscópica: Roca masiva, compacta, inequigranular, porfídica con matriz afanítica y fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol. Se clasifica como lava fenoandesitoide.

Descripción microscópica: Roca hipocristalina, inequigranular. Textura general porfídica seriate. Componentes:

- **Plagioclasa (39%)**, se presenta en fenocristales euhedrales a subhedrales de forma tabular; la plagioclasa esta maclada según albita y la composición es andesina con el 36% de anortita. Algunos cristales tienen extinción normal oscilatoria. Hay dos generaciones de cristales, con tamaño promedio de 2,01 mm y 0,76 mm. Los cristales de plagioclasa más grandes tienen reabsorción por el material de la matriz en el interior y los bordes corroídos. También se presenta textura sieve. Se presentan como cristales aislados y en textura glomeroporfídica.
- **Piroxenos (7%)**, se presentan como fenocristales subhedrales. Se encuentra ortopiroxeno (hiperstena) y clinopiroxeno (augita) en textura glomeroporfídica y como cristales aislados. Algunos cristales están maclados y otros fracturados. El tamaño promedio es de 2,1 mm.

- **Oxianfíbol (2%)**, son cristales anhedrales, aislados muy deteriorados (fracturados) y con un avanzado estado de meteorización. Las fracturas están rellenas por opacos y en algunos casos hay plagioclasas, presentan bordes de opacos.
- **Opacos (2%)**, se presentan en cristales anhedrales.
- **Matriz (50%)**, está compuesta por vidrio y microlitos de plagioclasa con dirección de flujo (textura traquitica), en algunos sectores se observa como una masa amorfa.
- **Fragmento de roca** conformado por cristales de plagioclasa, ortopiroxeno y opacos.

Clasificación según recomendaciones de Le Maitre (2002): Fenoandesita.



Nicoles paralelos; Nicoles cruzados

0 2mm

Detalle de los bordes de corrosión y la textura sieve de las plagioclasas. En la parte superior se observa la textura glomeroporfídica.

Muestra: SESW 059 a

Localidad: Sector Fortaleza, peña de los Ratones.

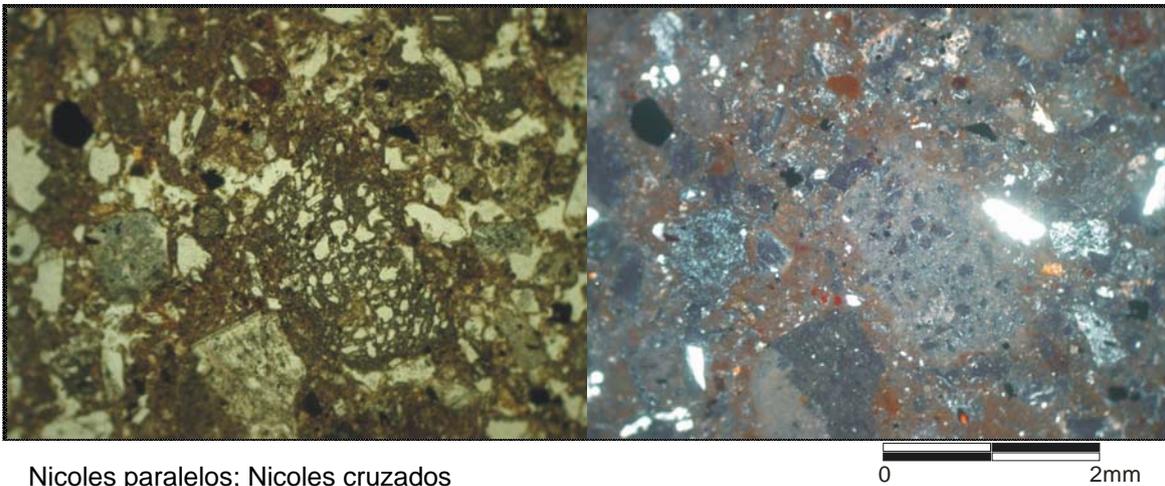
Descripción macroscópica: Roca masiva, vesiculada, compuesta de fragmentos de cristales, líticos y pómez, embebidos en una matriz de ceniza fina vítrea. Es una Ignimbrita.

Descripción microscópica: Roca compuesta de fragmentos de pómez, líticos y cristales, que está dentro de una matriz formada de ceniza fina y cristales. Componentes:

- **Plagioclasa (6%)**, son cristaloclastos y cristales anhedrales a subhedrales que hacen parte del material juvenil. La plagioclasa es una andesina con el 35% de anortita.
- **Piroxeno (2%)**, son cristales de augita, subhedrales a anhedrales, que están fragmentados. En algunos casos sólo se observan remanentes de piroxenos.

- **Opacos (1%)**, cristales anhedrales en la matriz.
- **Material vítreo (22%)**, representados por pómez microvesiculada y macrovesiculada, las vesículas son redondeadas.
- **Matriz (60%)**, compuesta por un agregado de ceniza fina, parda, con una ligera orientación de cristales de plagioclasa y piroxeno.
- **Fragmentos de roca (9%)**, representados por **lavas vítreas** con pocos cristales de plagioclasa euhedrales dentro de una matriz vítrea con textura eutaxítica; **ignimbritas** afaníticas, vítreas y vesiculadas.

Clasificación según recomendaciones de Le Maitre (2002): Toba vítrea de composición fenoandesítica (Ignimbrita).



Nicoles paralelos; Nicoles cruzados

0 2mm

Cristales de plagioclasa, augita y opacos. Los componentes se encuentran dentro de una matriz de ceniza fina y pómez.

Muestra: SESW 060 a

Localidad: Sector fortaleza, peña de los Ratones.

Descripción macroscópica: Roca masiva, vesiculada, compuesta de fragmentos de cristales, líticos y pómez, embebidos en una matriz de ceniza fina vítrea. Es una Ignimbrita.

Descripción microscópica: Roca compuesta de fragmentos de pómez, líticos y cristales, que está dentro de una matriz formada de ceniza fina, pómez y cristales. Componentes:

- **Plagioclasa (4%)**, son cristales euhedrales a subhedrales que hacen parte del material juvenil. En general, están muy alteradas a sericita.
- **Piroxeno (1%)**, son cristales de augita subhedrales alterados totalmente.
- **Opacos (1%)**, son cristales ahedrales en la matriz.

- **Material vítreo (9%)**, representado por pómez microvesiculada
- **Vesículas (6%)**, se encuentran en algunos casos rellenas por material vítreo y microlitos cúbicos de plagioclasa; en general son alargadas y se presentan achatadas.
- **Matriz (70%)**, está compuesta por un agregado de ceniza fina, pómez, opacos, microlitos y cristalitos de plagioclasa.
- **Fragmentos de roca (9%)**, representados por lavas vítreas con pocos cristales de plagioclasa e ignimbritas con cristaloclastos de plagioclasa dentro de una matriz de aspecto terroso.
- **Minerales secundarios**, son cristales cúbicos concentrados en un sector poroso de la roca, posiblemente corresponden a sulfatos producto de la circulación de aguas.

Clasificación según recomendaciones de Le Maitre (2002): Toba vítrea de composición fenoandesítica (Ignimbrita).



Nicoles paralelos; Nicoles cruzados

0 2mm

Textura general en la cual se observa material pumítico juvenil dentro de un agregado fino de ceniza.

Muestra: SESW 061 a

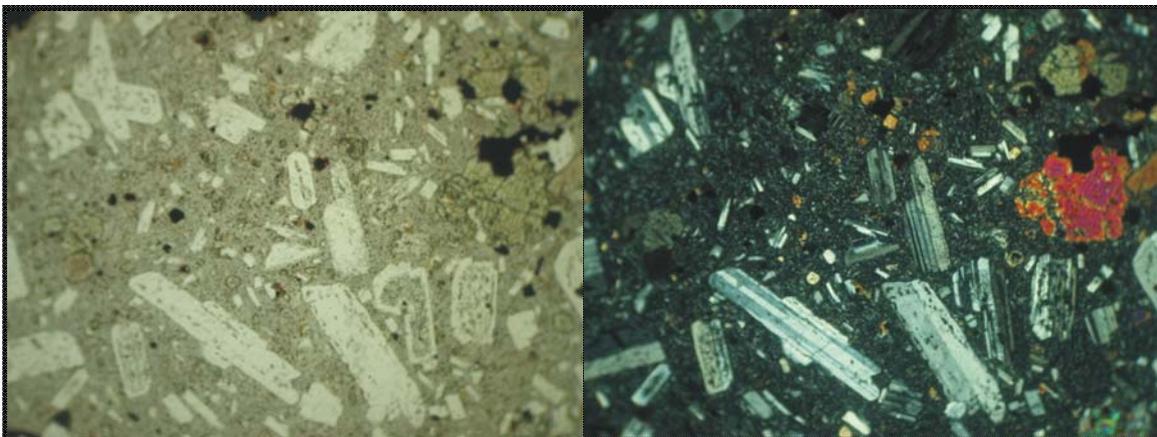
Localidad: Peña Los Curdos, margen occidental del río Chengue antes de llegar al río La Calera.

Descripción macroscópica: Roca masiva, compacta, afanítica, inequigranular, con fenocristales de plagioclasa y piroxeno. Presenta textura porfídica, color gris oscuro. Es una lava fenoandesítica.

Descripción microscópica: Roca hiporistalina, afanítica, inequigranular. Textura general porfídica seriate. Componentes:

- **Plagioclasa (24%)**, son cristales euhedrales, subhedrales y anhedrales, de forma tabular. Hay tres generaciones de cristales, con tamaños promedio de 1,78 mm, 0,83 mm y 0,35 mm. Se observa un proceso de reabsorción incipiente en los cristales más grandes, los bordes de algunos cristales están corroídos por material de la matriz. Hay fracturas en los cristales y la zonación es normal. Están presentes las texturas poiquilítica, sieve y glomeroporfídica. La plagioclasa es una andesina con el 40% de contenido de anortita y los cristales están maclados según albita.
- **Piroxeno (9%)**, se presentan en cristales euhedrales de augita e hiperstena. El tamaño promedio es de 0,82 mm y en algunos casos están maclados y fracturados. En algunos cristales se observan inclusiones de plagioclasas pequeñas. Hay cristalización de clinopiroxeno rodeando un cristal de ortopiroxeno.
- **Oxihornblenda (1%)**, son cristales subhedrales con hábito prismático. El tamaño promedio es 1,7 mm y tienen bordes de opacos homogéneos.
- **Opacos (3%)** son cristales anhedrales.
- **Matriz (63%)**, está compuesta por vidrio masivo, microlitos de plagioclasa, piroxeno y opacos. La textura de flujo es evidenciada en la orientación de los microlitos.

Clasificación según recomendaciones de Le Maitre (2002): Fenoandesita.



Nicoles paralelos; Nicoles cruzados

0 2mm

Textura porfídica sériate. Textura sieve e inclusiones de fundido de las plagioclasas.

Muestra: SESW 062 a

Localidad: Cascada El Onix, sobre la vía que conduce de Coconuco a los termales de Agua Hirviendo.

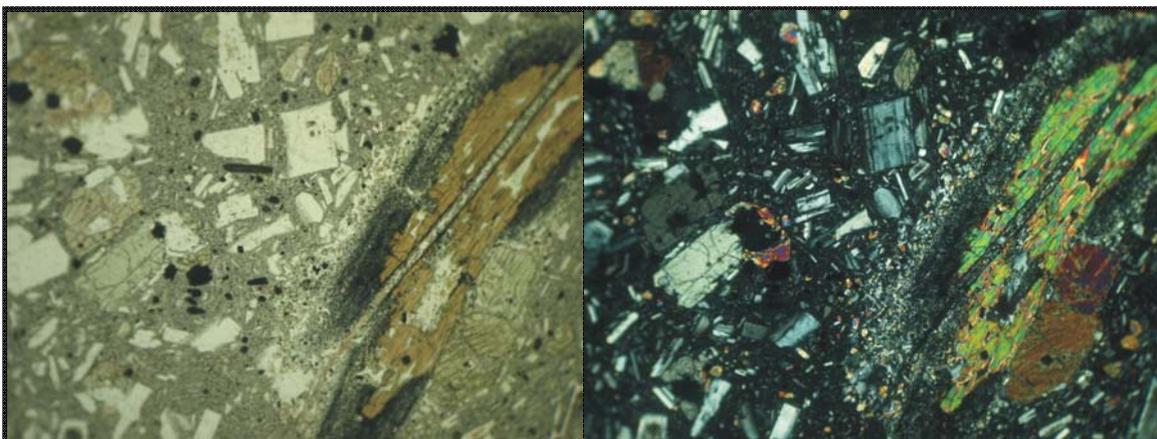
Descripción macroscópica: Roca masiva, compacta, inequigranular, porfídica, matriz afanítica gris oscura y fenocristales de plagioclasa y biotita. Se clasifica como lava fenoandesitoide.

Descripción microscópica: Roca hipocristalina, inequigranular, porfídica, seriada.

Componentes:

- **Plagioclasa (33%)**, caracterizada por presentar cristales tabulares, euhedrales; están maclados según albita y su composición es andesina con 35% de anortita. También hay cristales con macla albita carlsbad, algunos cristales tienen zonación normal oscilatoria. Se presenta la textura sieve y reabsorción del material de la matriz al interior de los cristales. Hay tres generaciones de plagioclasas, con tamaños promedios de 2,49 mm, 0,73 mm y 0,25 mm. Los cristales grandes pueden presentar inclusiones de piroxenos en su interior. Se presentan como cristales aislados y tienen una ligera tendencia a estar orientados.
- **Piroxenos (12%)**, se presentan como fenocristales euhedrales a subhedrales. Se encuentra ortopiroxeno (hiperstena) y clinopiroxeno (augita) y tienen un bajo grado de fracturamiento; es frecuente encontrar opacos dentro de los cristales y algunos cristales están maclados. El tamaño promedio es 0,56 mm.
- **Oxihornblenda (2%)**, representado por cristales euhedrales, tabulares, alargados y delgados, son cristales aislados que están cubiertos por un borde de opacos, que por lo general es homogéneo pero en otros se ven como cristalitos. El tamaño promedio es 0,57 mm.
- **Opacos (3%)**, representados por cristales anhedral.
- **Matriz (49%)**, está compuesta por vidrio y microlitos de plagioclasa con dirección de flujo (textura traquítica).
- **Fragmentos de roca (1%)**, compuestos por plagioclasa, opacos, piroxenos; algunos presentan un fuerte grado de oxidación.

Clasificación según recomendaciones de Le Maitre (2002): Fenoandesita.



Nicoles paralelos; Nicoles cruzados

0 2mm

Textura porfídica sériate. Observe la corona de opacos en la oxihornblenda.

Muestra: SESW 065 a

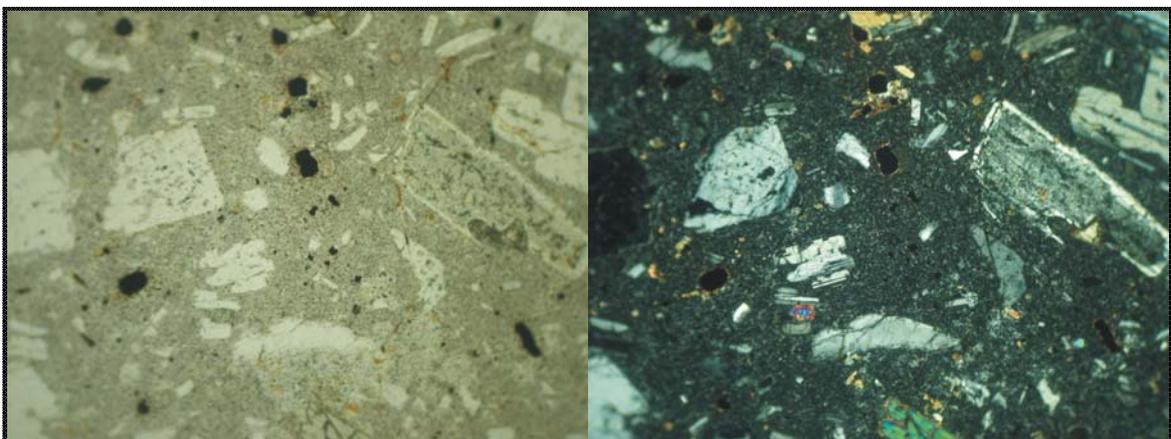
Localidad: Camino desde el sector el Alto hacia la vía que de Coconuco conduce a Paletará.

Descripción macroscópica: Roca masiva, compacta, afanítica, inequigranular, con pequeños fenocristales de plagioclasa y piroxeno. Presenta textura porfídica, color gris. Es una lava fenoandesitoide.

Descripción microscópica: Roca hiporistalina, afanítica, inequigranular; presenta textura general porfídica seriate. Componentes:

- **Plagioclasa (25%),** se presenta en cristales subhedrales a anhedrales, tabulares. La zonación de los cristales es normal y presenta maclado albita. Hay tres generaciones de cristales, con tamaños promedios de 2,78 mm, 0,82 mm y 0,24 mm; los cristales más grandes tienen los bordes corroídos por material de la matriz, y también se presentan texturas de reabsorción, sieve y glomeroporfídica. La plagioclasa es una andesina con el 40% de contenido de anortita.
- **Piroxeno (6%),** son cristales subhedrales de augita e hiperstena; el tamaño promedio de los cristales es de 0,89 mm. Se observan cristales maclados y/o fracturados. Es común encontrar inclusiones de apatito y opacos dentro de los cristales.
- **Oxihornblenda (1%),** representada por cristales euhedrales, delgados y alargados. Son cristales aislados y están reemplazados totalmente por opacos. El tamaño promedio es 0,22 mm.
- **Opacos (1%),** ocurren en la roca como pequeños cristales anhedrales.
- **Matriz (66%),** está compuesta por vidrio y microlitos de plagioclasa, piroxeno y opacos. Los microlitos de plagioclasa están orientados.
- **Fragmento lítico (1%),** constituido por un xenolito cognate, parte de material cristalizado previamente.

Clasificación según recomendaciones de Le Maitre (2002): Fenoandesita.



Nicoles paralelos; Nicoles cruzados

0 2mm

Detalle de la textura sieve de los cristales de plagioclasa. Las plagioclasas presentan inclusiones vítreas.

Muestra: SESW 067 a

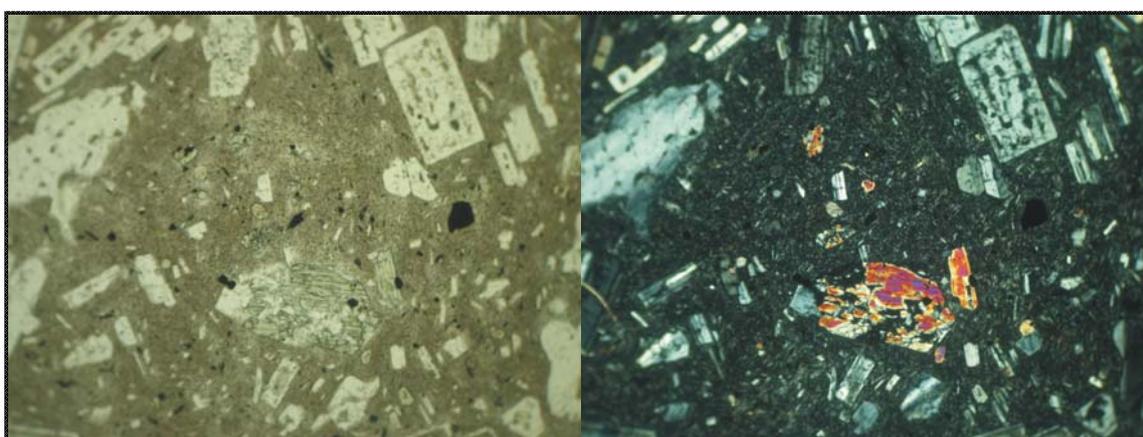
Localidad: Chorrera San Bartolo, margen derecha de la vía Coconuco - Paletará.

Descripción macroscópica: Roca masiva, compacta, inequigranular, porfídica con fenocristales de plagioclasa. Se clasifica como lava fenoandesitoide.

Descripción microscópica: Roca hiporistalina, inequigranular; presenta textura general porfídica seriate. Componentes:

- **Plagioclasa (31%),** se presenta en fenocristales euhedrales a subhedrales de forma tabular; la plagioclasa esta maclada según albita y la composición es andesina con el 32% de anortita. Hay texturas de reabsorción en un estado avanzado, sieve y glomeroporfídica. Hay tres generaciones de cristales, con tamaños promedio de 2,78 mm, 0,71 mm y 0,24 mm.
- **Piroxenos (7%),** son fenocristales euhedrales a subhedrales y se encuentra ortopiroxeno (hiperstena) y clinopiroxeno (augita). Algunos cristales están fracturados y/o maclados; se presentan inclusiones de circones. Se observan cristales de ortopiroxeno bordeados por clinopiroxenos y el tamaño promedio es 0,93 mm.
- **Oxihornblenda (2%),** son cristales anhedrales, aislados y presentan borde de opacos; el tamaño promedio es 0,52 mm.
- **Opacos (2%),** son cristales anhedrales que se presentan como cristales aislados.
- **Matriz (57%),** está compuesta por vidrio y microlitos de plagioclasa con dirección de flujo (textura traquitica).
- **Fragmento de roca (1%),** conformado por cristales de plagioclasa y opacos.

Clasificación según recomendaciones de Le Maitre (2002): Fenoandesita.



Nicoles paralelos; Nicoles cruzados

0 2mm

Detalle de la textura porfídica seriate. Los cristales de plagioclasa con inclusiones vítreas. La textura de flujo está marcada por la orientación de la plagioclasa.

Muestra: SESW 068 a

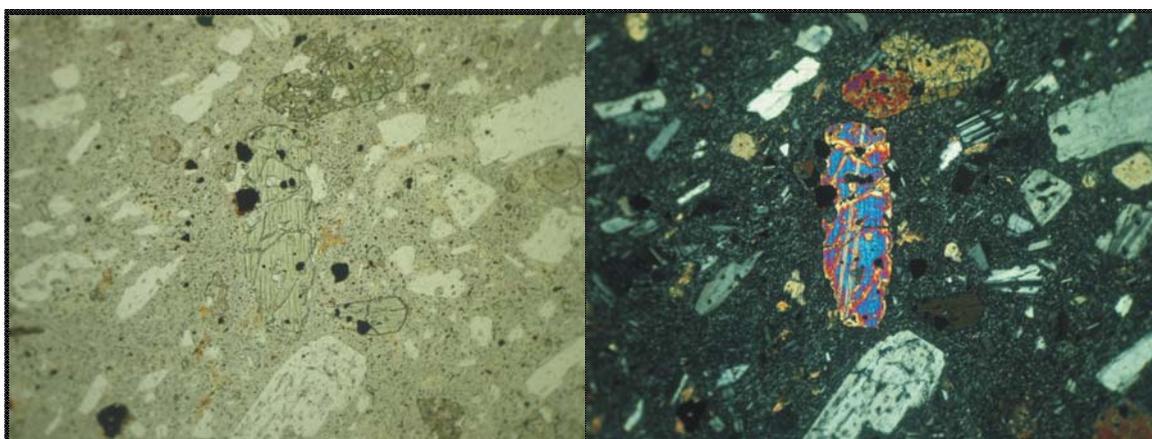
Localidad: Camino desde el sector el Alto hacia la vía que de Coconuco a Paletará.

Descripción macroscópica: Roca masiva, compacta, afanítica, inequigranular, con pequeños fenocristales de plagioclasa, biotita y piroxeno. Presenta textura porfídica, color gris. Se clasifica como una lava fenoandesitoide.

Descripción microscópica: Roca hipocristalina, inequigranular; presenta textura general porfídica seriate. Componentes:

- **Plagioclasa (25%),** se presenta en cristales euhedrales a subhedrales, tabulares. La zonación de los cristales es normal, y tiene maclado albita. Hay tres generaciones de cristales, con tamaños promedios de 2,33 mm, 0,74 mm y 0,19 mm. Los bordes de los cristales más grandes están corroídos y se observa la textura sieve y poiquilítica. La plagioclasa es una andesina con el 38% de contenido de anortita.
- **Piroxeno (6%)** son cristales subhedrales de augita con tamaño promedio de 1,1 mm. Algunos cristales están fracturados.
- **Opacos (1%),** ocurren en la roca como pequeños cristales anhedrales.
- **Oxihornblenda (1%),** son por cristales euhedrales, delgados y alargados. Son cristales aislados y están reemplazados totalmente por opacos. El tamaño promedio es 0,33 mm.
- **Matriz (67%),** está compuesta por vidrio y microlitos orientados de plagioclasa.

Clasificación según recomendaciones de Le Maitre (2002): Fenoandesita.



Nicoles paralelos; Nicoles cruzados

0 2mm

Textura sieve en las plagioclasas. Textura de flujo marcada por la orientación de la plagioclasas.

Muestra: SESW 090 a

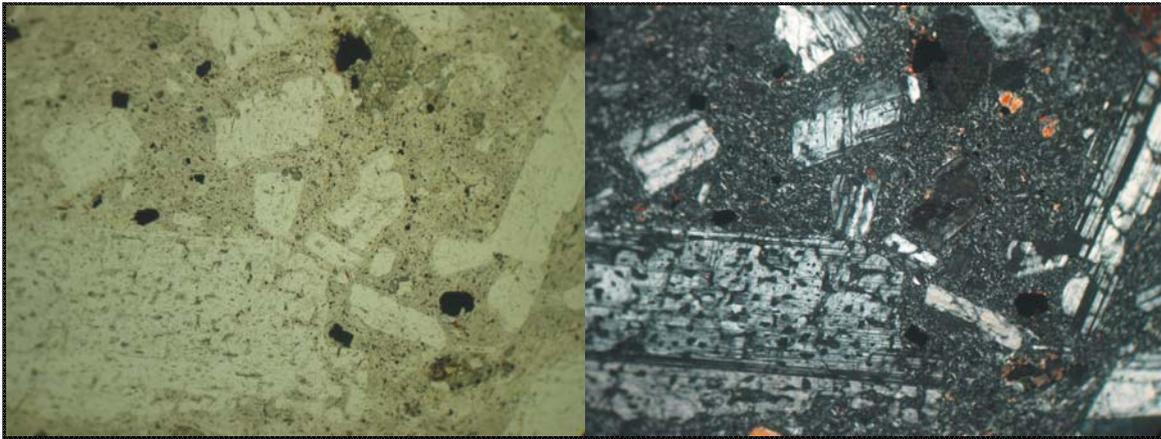
Localidad: Cascada de Calaguala, margen derecha de la vía que conduce de Coconuco a Paletará.

Descripción macroscópica: Roca masiva, compacta, inequigranular, porfídica con matriz afanítica y fenocristales de plagioclasa y piroxeno. La roca está fresca y se clasifica como lava fenoandesitoide.

Descripción microscópica: Roca hipocristalina, inequigranular; presenta textura general porfídica seriate. Componentes:

- **Plagioclasa (24%),** presenta cristales tabulares, euhedrales - subhedrales; están maclados según albita y su composición es andesina con 40% de anortita. Se presenta la textura sieve y reabsorción del material de la matriz al interior de los cristales; también se observa la textura glomeroporfídica y poiquilítica (cristales de apatitos al interior). Los cristales tienen una zonación normal y se identifican tres generaciones, con tamaños promedio de 2,68 mm, 0,8 mm y 0,51 mm.
- **Piroxeno (10%),** se presentan como fenocristales subhedrales. Se encuentra ortopiroxeno (hiperstenita) y clinopiroxeno (augita) formando textura glomeroporfídica y como cristales aislados. Algunos cristales están maclados y en algunos casos los cristales están corroídos hacia los bordes. En general están fracturados y el tamaño promedio es 0,81 mm.
- **Opacos (4%),** representados por cristales anhedrales y se presentan en la matriz, aislados y en textura glomeroporfídica.
- **Matriz (62%),** conformada por vidrio y microlitos de plagioclasa ligeramente orientados y opacos.

Clasificación según recomendaciones de Le Maitre (2002): Fenoandesita.



Nicoles paralelos; Nicoles cruzados

0 2mm

Reabsorción de las plagioclasas. La matriz conformada por microlitos de plagioclasa tiene una ligera orientación.

Muestra: SESW 081 a

Localidad: Vía Coconuco – Pozo Azul

Descripción macroscópica: Roca masiva, vesiculada, compuesta de fragmentos de cristales, líticos y pómez, embebidos en una matriz de ceniza fina vítrea oxidada. Es una Ignimbrita.

Descripción microscópica: Roca hipocristalina, inequigranular, compuesta por fragmentos de líticos, pómez y cristales, que está dentro de una matriz de ceniza fina y cristales de plagioclasa. Componentes:

- **Plagioclasa (14%),** cristales anhedrales a subhedrales, fragmentados, en algunos casos tienen zonación normal y tienen macla albita.
- **Biotita (1,5%),** son cristales subhedrales que tienen un estado avanzado de oxidación.
- **Opacos (0,5%),** son cristales ahnedrales en la matriz.
- **Vesículas (6%),** en general son alargadas y se presentan achatadas.
- **Matriz (32%),** está compuesta por material vítreo, opacos, microlitos de plagioclasa.
- **Fragmentos de roca (42%),** representados por lavas con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita en una matriz vítrea con microlitos de plagioclasa y dirección de flujo marcada. También se encuentran ignimbritas con matriz vítrea, microvesiculada, y cristales de plagioclasa y biotita.

Clasificación según recomendaciones de Le Maitre (2002): Toba vítrea de composición fenoandesítica (Ignimbrita).

Muestra: SESW 086 a

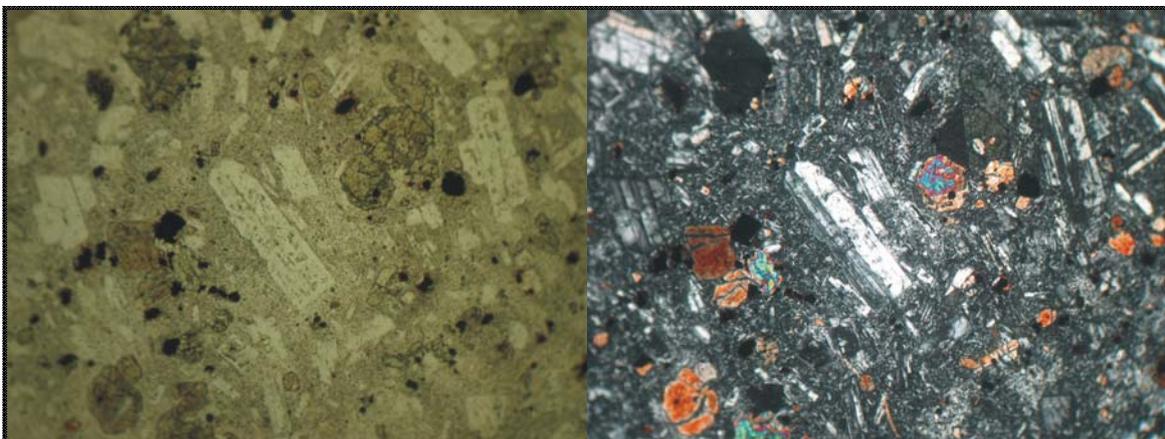
Localidad: Margen derecha del río Chengue, por el camino que conduce a Peña Los Ratones.

Descripción macroscópica: Roca masiva, compacta, inequigranular, porfídica con matriz afanítica y fenocristales de plagioclasa y piroxeno. Se clasifica como lava fenoandesitoide.

Descripción microscópica: Roca hipocristalina, inequigranular; presenta textura general porfídica seriate. Componentes:

- **Plagioclasa (34%),** son cristales euhedrales – subhedrales, maclados según albita, con 3 generaciones de tamaños promedio 1,86 mm, 0,82 mm y 0,36 mm. Algunos cristales presentan zonación normal y están fracturados. Se observa las texturas sieve, glomeroporfídica y una ligera tendencia de orientación. En los fenocristales más grandes, se evidencia un proceso de reabsorción de los bordes del cristal. La plagioclasa es andesina con el 30% de anortita.
- **Piroxeno (11%),** representado por cristales subhedrales, con predominio de augita sobre hiperstena. Los cristales están fracturados y es común encontrar opacos en su interior. Algunos cristales están maclados y el tamaño promedio es de 0,70 mm.
- **Oxihornblenda (3%),** son cristales subhedrales de forma tabular y algunas veces se observa la sección transversal. Son cristales aislados que tienen borde de opacos.
- **Opacos (2%),** son cristales euhedrales.
- **Matriz (50%),** está compuesta por vidrio y microlitos de plagioclasa y opacos; hay una ligera tendencia de orientación. En algunos sectores la matriz se observa como una masa amorfa.

Clasificación según recomendaciones de Le Maitre (2002): Fenoandesita.



Nicoles paralelos; Nicoles cruzados

0 2mm

Textura serte en las plagioclasas. Cristales de piroxeno fracturados.

Muestra: SESW 088 a

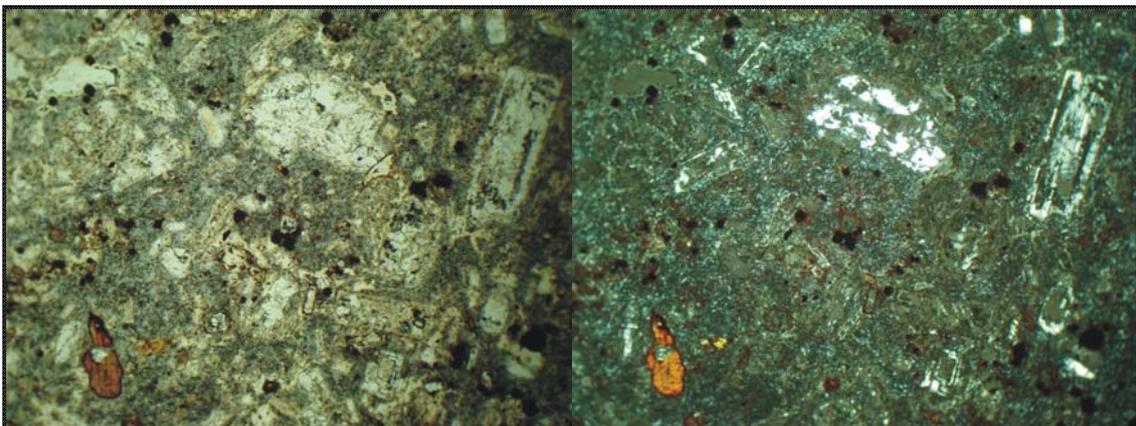
Localidad: Sector Fortaleza, peña de los Ratones.

Descripción macroscópica: Roca masiva, vesiculada, compuesta de fragmentos de cristales y líticos embebidos en una matriz de ceniza fina vítrea meteorizada. Es una Ignimbrita.

Descripción microscópica: Roca hipocristalina, inequigranular compuesta de fragmentos de líticos y cristales, que está dentro de una matriz formada de ceniza fina, pómez y cristales. Componentes:

- **Plagioclasa (20%),** son cristales subhedrales, fracturados, y presentan un avanzado de reabsorción, por el material de la matriz. La plagioclasa es una andesina con el 32% de anortita.
- **Biotita (4%),** son cristales subhedrales de forma tabular, tienen un estado avanzado de alteración.
- **Opacos (4%),** son cristales ahedrales en la matriz.
- **Vesículas (10%),** se encuentran diferentes clases, algunas son alargadas y achatadas, otras tienen una forma redondeada.
- **Matriz (47%),** está compuesta por vidrio y microlitos de plagioclasa.
- **Minerales secundarios (15%),** representados por arcillas que están reemplazando totalmente minerales preexistentes, sin embargo no es posible determinarlo.

Clasificación según recomendaciones de Le Maitre (2002): Toba vítrea de composición fenoandesítica (Ignimbrita).



Nicoles paralelos; Nicoles cruzados

Cristales de plagioclasa con material vítreo en el interior.

Muestra: SESW 070 a – Montaje de granos

Localidad: Vía Coconuco – Paletará, desvío a Patugó.

Descripción mineralógica:

- **Plagioclasa (3%)**, cristales subhedrales, tabulares, algunas veces maclados.
- **Cuarzo (1%)**, cristales anhedrales con fractura concoidea, extinción odulatoria e inclusiones de minerales opacos.
- **Biotita (17%)**, láminas delgadas oxidadas e isotrópicas.
- **Anfíbol (14%)**, cristales euhedrales, tabulares, verdes, pleocroicos.
- **Oxihornblenda (8%)**, cristales subhedrales, tabulares, marrón fuerte, pleocroico.
- **Piroxeno (17%)**, cristales subhedrales, tabulares, de color marrón.
- **Fragmento de pómez (38%)**, material de color naranja oxidado, con opacos en el interior, isotrópico.
- **Opacos (2%)**, cristales subhedrales – euhedrales.

Muestra: SESW 071 a – Montaje de granos

Localidad: Vía a la vereda Patugó.

Descripción mineralógica:

- **Plagioclasa (6%)**, cristales subhedrales, tabulares, relieve moderado, en algunos casos están maclados.
- **Biotita (14%)**, son cristales tabulares, euhedrales, se presenta en paquetes y están muy alterados y reemplazados en su mayoría por opacos.
- **Piroxeno (1%)**, son cristales de augita subhedrales, tabulares, marrón claro.
- **Oxihornblenda (4%)**, cristales subhedrales, tabulares, marrón fuerte, pleocroico.
- **Fragmentos de vidrio (2%)**, color rosado pálido, algunas veces incoloros con fractura concoidea, isotrópico, con diferentes grados de alteración.
- **Cuarzo (5%)**, cristales anhedrales con fractura concoidea.
- **Fragmento de pómez (65%)**, material de color naranja oxidado, con opacos en el interior, isotrópico
- **Opacos (3%)**, cristales subhedrales – euhedrales.

Muestra: SESW 063 a – Montaje de granos

Localidad: Vía Coconuco – Los Termales.

Descripción mineralógica:

- **Plagioclasa (28%)**, cristales subhedrales, tabulares, transparentes, algunas veces maclados. Se observan algunos cristales con burbujas en las paredes.
- **Piroxeno (7%)**, cristales subhedrales, pleocroicos y fractura diente de perro.

- **Anfíbol (25%)**, cristales subhedrales – euhedrales, tabulares, verde, pleocroico, superficie lisa.
- **Cuarzo (5%)**, cristales anhedrales, relieve bajo y extinción ondulatoria.
- **Oxihornblenda (4%)**, cristales subhedrales, con vidrio y opacos en el interior.
- **Opacos (2%)**, cristales subhedrales – anhedrales.
- **Fragmentos de vidrio (4%)**, relieve alto, incoloro e isotrópico.
- **Fragmentos de pómez (25%)**, material de color rosado con abundantes inclusiones de opacos e isotrópicos.

Muestra: SESW 070 b – Montaje de granos

Localidad: Vía Coconuco – Paletará, desvío a Patugó.

Descripción mineralógica:

- **Anfíbol (31%)**, cristales subhedrales – euhedrales, tabulares, pleocroico, superficie lisa. Se observan colores verdes y marrones; en algunos casos, están reemplazados por opacos.
- **Oxihornblenda (4%)**, cristales subhedrales, tabulares, marrón fuerte, pleocroico
- **Piroxeno (13%)**, cristales de hiperstena, subhedrales, pleocroicos y fractura diente de perro
- **Plagioclasa (10%)**, cristales subhedrales, tabulares, transparentes, algunas veces maclados
- **Fragmento de vidrio (7%)**, relieve alto, incoloro e isotrópico.
- **Fragmento de pómez (25%)**, material rosado e isotrópico, con inclusiones de opacos.
- **Opacos (10%)**, cristales subhedrales – anhedrales.

Muestra: SESW 066 a – Montaje de granos

Localidad: Vereda El Salado, detrás del Cabildo de Coconuco.

Descripción mineralógica:

- **Anfíbol (13%)**, cristales marrón, poco pleocroicos, con superficie lisa y homogénea.
- **Plagioclasa (28%)**, cristales subhedrales, tabulares, fracturadas y en algunos casos tienen inclusiones de fundido.
- **Piroxeno (15%)**, cristales fragmentados de hiperstena.
- **Opacos (1%)**, cristales subhedrales – anhedrales.
- **Fragmentos de vidrio (7%)**, material amorfo, transparente, incoloro e isotrópico, está achatado.

- **Fragmentos de pómez (31%)**, material amorfo, color naranja con inclusiones de opacos en el interior.
- **Biotita (1%)**, cristales subhedrales, de color marrón.
- **Cuarzo (4%)**, cristales anhedrales, relieve bajo y extinción ondulatoria.

ANEXO 3

RECOPIACIÓN DE DATOS GEOQUÍMICOS

Se presentan los datos geoquímicos disponibles para el volcán Puracé y la Cadena volcánica de los Coconucos. Se diferencian elementos mayores, trazas y tierras raras. Las referencias bibliográficas completas se encuentran en el texto principal.

ELEMENTOS MAYORES

Volcán - Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	FeO*	FeO*/MgO	H ₂ O	Autor
Puracé	61.31	16.5	0.79	5.11	2.42	4.31	1.76	0.87		5.52	2.2		Murcia y Marin, 1981
Puracé	59.39	16.28	1	4.9	2.69	4.04	1.76	1.2		5.35	2		
Puracé	60.3	16.8	0.83	5.74	2.27	4.33	2.81	0.23		5.97	2.63		Kuroda y Paris, 1979
Puracé	59.21	17.08	0.94	5.69	2.73	4.02	2.59	0.24		6.17	2.26		
Puracé	58.2	17.6	0.86	6.2	2.4	4.55	2.1	0.35		6.1	2.54		Hormann and Pichler, 1979
Puracé	59.4	17.1	0.88	5.5	2.75	3.95	2.6	0.27		5.83	2.12		
Puracé	62	15.6	0.78	5.85	3.15	3.9	2.45	0.26		5.27	1.67		
Curiquina	62.68	16.81	0.73	4.34	2.82	3.96	3.12	0.28		5.58			Monsalve y Pulgarin, 1999
Curiquina	57.36	17.57	0.89	6.58	3.81	4.04	2.23	0.04		6.72			
Curiquina	55.86	17.94	0.98	7	4.14	4.18	2.19	0.04		6.86			
Paletará	57.79	17	1.04	6.72	4.64	3.64	1.77	0.04		7.15			
Paletará	57.36	17.76	1.03	6.86	3.64	4.18	2.3	0.08		7.15			
Calambás	58.22	17.19	0.91	6.02	3.32	3.91	2.41	0.28		5.72			
Quintín	58.65	17.38	0.84	5.6	3.32	4.04	2.61	0.04		5.4			
Shaka	58.22	17.19	0.84	7.14	4.48	3.91	2.01	0.3		6.86			
Shaka	58.65	17.38	0.8	6.58	3.48	4.58	2.26	0.17		6.43			
Shaka	60.97	18.13	0.8	5.04	3.48	4.18	2.85	0.27		5.86			
Shaka	60.76	17.94	0.81	4.9	3.48	4.12	2.81	0.37		5.72			
Machángara	59.29	17.19	0.89	6.16	3.32	4.18	2.42	0.04		6.43			
Machángara	59.26	16.24	0.92	4.9	3.98	4	3.11	0.34		6.29			
Machángara	61.4	16.81	0.88	4.76	3.48	4.08	3.14	0.3		6			
Killa	59.72	17	0.85	5.74	3.32	4.45	2.43	0.31		6			
Pan Azúcar	63.11	17.38	0.75	4.2	2.98	4.18	3.1	0.28		5.43			
Pan Azúcar	62.07	17	0.82	5.6	2.82	4.31	2.6	0.04		5.58			
Pan Azúcar	62.04	17.38	0.76	4.06	2.82	4.18	3.13	0.26		5.43			
Pan Azúcar	58.43	17.38	0.95	8.16	3.98	4.45	2.13	0.18		8.43			
Pukará	59.48	16.43	1.1	5.32	2.85	4.21	2.92	0.27		5.29			
Pukará	58.66	17.44	0.79	6.26	3.13	4.37	3.31	0.3		5.98			
Pukará	57.98	17	0.9	6.02	3.27	4.21	2.7	0.29		6			
Pukará	53.08	17.57	1.12	8.4	5.64	4.04	1.8	0.34		8.29			

Volcán - Muestra	SiO2	Al2O3	TiO2	CaO	MgO	Na2O	K2O	P2O5	MnO	FeO*	FeO*/MgO	H2O	Autor
Amancay	55.86	18.04	0.91	7.28	3.65	4.45	1.87	0.39		7.01			
Piki	59.08	17.19	0.83	6.02	3.15	4.18	2.51	0.04		8.29			
Puracé	59.13	16.5	0.86	5.84	3.41	4.09	2.43	0.28		5.89			
Pan Azúcar	60.71	16.88	0.73	5.01	2.79	4.23	2.63	0.26		5.89			Schmitt, 1983. Tesis doctoral en Monsalve y Pulgarin, 1999
Coconucos	59.51	16.66	0.75	5.41	3.24	4.18	2.38	0.27		6.58			
Coconucos	61.96	16.95	0.59	4.26	2.02	4.45	2.42	0.21		6.23			
Coconucos	58.48	16.16	0.72	5.32	3.14	3.73	2.35	0.26		6.09			
E1 (ML-702)	59.17	17.26	0.81	6.27	3.19	4	2.34		0.16	6.81			
E2 (ML603B)	58.45	17.28	0.88	6.3	3.74	4	2.18		0.12	7.05			
E2 (ML-643)	58.93	17.21	0.87	6.17	3.69	4.05	2.2		0.11	6.77			
E2 (ML420A)	59.52	16.96	0.88	6.31	3.34	3.71	2.29		0.11	6.87			Monsalve, 1991
E3 (ML661A)	60.85	17.12	0.78	5.52	3.03	4.02	2.56		0.11	6			
E3 (ML425A)	61.4	17.28	0.81	5.8	3.47	4.02	2.44		0.11	4.67			
E4 (ML-651)	61.82	16.71	0.73	5.22	3.07	4.2	2.55		0.09	5.62			
E4 (ML710C)	63.67	16.84	0.57	4.87	2.43	4.44	2.55		0.07	4.55			
PU2	60.16	16.69	0.78	5.49	2.87	3.58	2.66	0.25	0.13	5.82		1.65	Droux y Delalouye, 1996
PU3	54.87	16.51	1.22	7.51	5.78	3.81	1.18	0.36	0.12	7.69		0.82	
PU72	61.63	16.62	0.71	5.37	2.94	4.26	2.51	0.25	0.09	5.17		0.18	
PU74	60.38	16.64	0.77	5.34	2.91	3.89	2.63	0.26	0.1	5.73		0.46	
PU75	58.91	17.18	0.85	6.11	3.53	4.05	2.17	0.28	0.11	6.12		0.23	
COL-36	60.15	17.44	0.78	5.52	3.22	3.87	2.36	0.22	0.09	3.06		0.94	Ramirez, 1982
COL-37	60.62	17.74	0.81	4.79	3.81	3.74	2.28	0.23	0.07	2.01		1.18	
COL-45	63.94	15.81	0.667	4.23	3.92	4.03	2.4	0.11	0.07	2.44		0.82	
COL-65	62.12	16.86	0.63	4.96	3.61	4.17	2.42	0.2	0.08	2.33		0.4	
COL-66	63.08	16.66	0.62	4.71	3.1	4.2	2.55	0.2	0.08	2.54		0.4	
COL-67	59.55	16.93	0.91	5.99	4	4.03	1.88	0.25	0.1	3.4		0.53	
COL-68	56.87	17.63	1.01	6.78	4.43	4.06	1.73	0.27	0.12	4.19		0.89	
COL-69	61.9	17.16	0.67	4.69	3.05	4.28	2.42	0.24	0.07	2.63		1.2	

Volcán - Muestra	SiO2	Al2O3	TiO2	CaO	MgO	Na2O	K2O	P2O5	MnO	FeO*	FeO*/MgO	H2O	Autor
COL-71	62.28	16.8	0.65	4.74	4.02	4.24	2.45	0.19	0.07	2.67		0.3	
COL-72	60.94	17.66	0.75	5.53	2.95	4.19	2.27	0.26	0.09	3.1		0.39	
QU-02	59.881	16.590	0.810	5.903	3.399	4.184	2.341	0.303	0.102	6.071		0.417	
CU-02	58.436	16.668	1.073	6.912	3.938	4.051	1.694	0.306	0.103	6.171		0.645	
SHA-03	60.006	15.997	0.773	6.375	4.042	3.779	2.072	0.224	0.110	6.465		0.160	
PPU-01	59.733	16.532	0.833	5.483	3.268	3.903	2.362	0.256	0.099	6.444		1.082	Marín-Cerón, 2007
PA-03	61.791	16.234	0.734	5.077	2.967	4.086	2.528	0.224	0.090	5.567		0.699	
T-01	62.904	14.923	0.751	4.227	2.690	3.829	3.528	0.153	0.102	6.188		0.706	
T-05	58.452	16.913	0.789	6.316	3.352	3.486	1.680	0.231	0.129	7.667		0.985	
T-03	58.269	16.918	0.892	6.087	3.409	3.705	2.262	0.273	0.115	7.078		0.996	
T-01	62.48	14.82	0.75	4.2	2.67	3.8	3.5	0.15	0.1	6.15		0.2	
T-03	56.89	14.82	0.89	5.91	3.24	3.78	2.45	0.25	0.11	7.19		1.5	
PPU-01	57.23	16.03	0.8	4.93	2.92	3.88	2.38	0.23	0.09	6.39		4.15	
PU-01	57.4	16.04	0.83	5.45	3.04	3.99	2.57	0.23	0.1	6.44		3.48	
PU-02	59.91	15.42	0.9	5.04	2.95	3.83	2.38	0.13	0.09	5.22		3.66	
QU-01	58.98	16.52	0.85	4.79	2.94	3.64	2.48	0.19	0.09	5.74		2.93	
QU-02	58.99	16.39	0.82	5.73	3.29	4.29	2.49	0.27	0.1	6.34		0.22	
PA-01	58.9	16.44	0.84	5.65	3.17	4.16	2.52	0.23	0.1	6.42		0.63	
PA-02	60.34	16.09	0.76	5.27	3.01	4.21	2.64	0.22	0.1	6.01		0.18	
PA-03	60.95	16.39	0.72	5.15	2.72	4.31	2.67	0.21	0.09	5.63		0.12	
PA-04	60.5	16.52	0.73	5.3	2.78	4.31	2.67	0.21	0.09	5.77		0.16	Marín-Cerón, 2004
PA-05	58.45	16.52	0.87	5.76	3.69	4.53	2.17	0.31	0.1	6.26		0.07	
CU-01	60.66	15.96	0.74	5.17	2.91	4.28	2.69	0.21	0.09	5.77		0.24	
CU-02	57.55	16.61	1.06	6.73	3.69	4.27	1.81	0.29	0.11	6.35		0.52	
CU-03	58.27	16.75	0.88	6.16	3.43	4.1	2.44	0.24	0.11	6.93		0.11	
CU-04	60.82	16.3	0.75	5.14	2.7	4.14	2.89	0.22	0.09	5.96		0.26	
PK-01	59.74	16.75	0.77	4.69	2.7	3.84	2.41	0.23	0.08	5.47		2.55	
PK-02	62.25	16.37	0.69	4.79	2.61	4.45	2.72	0.21	0.08	5.28		0.18	
PK-03	57.38	16.87	0.93	6.36	3.59	4.29	2.41	0.28	0.11	7.09		0.24	
SHA-01	59.64	16.9	0.76	5.72	3.01	4.41	2.52	0.25	0.1	5.97		0.17	
SHA-02	59.71	16.83	0.76	5.66	3	4.37	2.55	0.25	0.1	5.99		0.09	
SHA-04	59.41	16.72	0.79	5.65	3.1	4.34	2.54	0.25	0.1	6.2		0.44	

Volcán - Muestra	SiO2	Al2O3	TiO2	CaO	MgO	Na2O	K2O	P2O5	MnO	FeO*	FeO*/MgO	H2O	Autor
SHA-05	59.1	16.6	0.89	5.95	3.39	4.14	2.41	0.24	0.1	6.67		0.08	
SHA-03	58.99	16.08	0.75	6.18	3.65	4.02	2.27	0.21	0.11	6.45		0.21	
P4	60,3	17,1	0,87	5,28	2,70	4,09	2,70	0,27	0,09	5,6			Marriner y Millward, 1984
P12	56,3	17,2	1,00	6,92	3,68	3,90	1,90	0,36	0,12	6,81			
PC8 + 5.85	63,0	17,4	0,80	4,10	1,89	4,19	3,18	0,23	0,07	4,96			

ELEMENTOS TRAZAS

Volcan - Muestra	Ba (ppm)	Ce	Cr (ppm)	Nb	Ni (ppm)	Pb	Rb (ppm)	Th	Sr (ppm)	V (ppm)	Y (ppm)	Zr (ppm)	Hf	Rb/Sr	Ta	Autor
Puracé	700		30		15		75		848	100	10	70		0.088		Murcia y Marin, 1981
Puracé	700		20		10		84		770	100	10	100		0.109		
PU2	1105		22		9		75		641	144	15	155	5			Droux y Delalouye, 1996
PU3	625		134		64		25		614	200	15	109	4			
PU72	1053		25		12		71		746	98	16	146	5			
PU74	941		20		9		76		631	112	15	163	5			
PU75	934		15		16		55		687	139	16	140	5			
T-01	1092	45	26	9	17	13	121	17	503	169	3468	200				Marin-Cerón, 2004
T-03	1019	31	24	8	20	11	66	9	701	194	4000	150				
PPU-01	1119	29	57	11	32	7	65	10	699	170	2760	140				
PU-01	1013	38	16	9	17	9	79	12	661	170	3461	168				
PU-02	996	21	22	9	15	10	74	11	631	147	2093	155				
QU-01	1117	33	21	8	16	10	75	12	682	154	2514	162				
QU-02	1108	40	30	9	22	10	73	10	813	161	3020	163				
PA-01	1073	40	38	7	24	12	75	12	726	176	3234	160				
PA-02	1166	37	43	8	25	11	81	13	708	161	2704	161				
PA-03	1192	38	36	7	22	13	82	13	728	146	2635	160				
PA-04	1153	37	29	8	21	12	82	13	730	147	2650	160				
PA-05	1169	40	92	11	44	10	52	8	920	169	2791	154				
CU-01	1179	42	40	7	26	11	83	13	748	157	2582	160				

Volcan - Muestra	Ba (ppm)	Ce	Cr (ppm)	Nb	Ni (ppm)	Pb	Rb (ppm)	Th	Sr (ppm)	V (ppm)	Y (ppm)	Zr (ppm)	Hf	Rb/Sr	Ta	Autor
CU-02	789	32	87		0	333		2603	49	0	14	20				
CU-03	1007	38	35	7	20	10	71	12	706	192	3835	160				
CU-04	1125	41	26	9	19	12	92	15	680	156	3033	178				
PK-01	1159	38	61	7	33	11	69	10	868	139	2235	160				
PK-02	1246	35	46	9	25	11	83	13	759	141	2272	169				
PK-03	1013	42	25	11	21	7	68	12	875	201	3978	163				
SHA-01	1125	47	31	10	19	10	76	12	824	159	2799	167				
SHA-02	1123	43	33	9	21	11	77	13	810	153	2900	165				
SHA-04	1120	37	33	10	19	10	77	11	809	168	2936	173				
SHA-05	958	37	63	9	25	7	73	13	719	187	3449	159				
SHA-03	1003	30	66	7	22	9	69	11	724	173	3202	148				
P4	1265		27	13	16		81	10,77	766	133	22	178	4,94		0,86	Marriner y Millward, 1984
P12	1060		31	9	21		51	7,66	1001	180	21	134	1,54		0,42	
PC 84																
5.85	1455		9	12	9		96	7,37	744	104	18	196	5,41		0,69	

TIERRAS RARAS

Volcan - Muestra	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb	Lu	Autor
PU2	25.73	53.94	18.85	4.34	0.91	3.78	2.6	1.38	1.46	0.25	Droux y Delalouye, 1996
PU3	17.5	38.6	21.6	4.9	1.33	4	2.9	1.4	1.4	0.17	
PU72	26.72	51.87	21.58	4.15	1.06	3.48	2.59	1.35	1.26	0.26	
PU74	25.72	48.87	20.21	4.16	1.13	4.03	2.81	1.58	1.44	0.31	
PU75	22.66	49.46	20.65	4.34	1.37	3.09	2.5	1.28	1.4	0.24	
P4	40,30	59	40,96	7,54	1,79				2,03	0,29	Marriner y Millward, 1984
P12	27,55	48,24	26,64	5,23	1,42	5,29			1,54	0,22	
PC 84											
5.85	29,61	55,22	27,23		1,29				1,57	0,23	