

**PETROGRAFÍA, GEOCRONOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DE LAS IGNIMBRITAS DE
LA FORMACIÓN POPAYÁN, EN EL CONTEXTO DEL VULCANISMO DEL
SUROCCIDENTE DE COLOMBIA**

MARÍA PATRICIA TORRES HERNÁNDEZ

MEDELLÍN

UNIVERSIDAD EAFIT

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

2010

**PETROGRAFÍA, GEOCRONOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DE LAS IGNIMBRITAS DE
LA FORMACIÓN POPAYÁN, EN EL CONTEXTO DEL VULCANISMO DEL
SUROCCIDENTE DE COLOMBIA**

María Patricia Torres Hernández

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Magister en Ciencias de la Tierra, con énfasis en vulcanología**

Directora:

Prof. Gloria Elena Toro Villegas, PhD.

MEDELLÍN

UNIVERSIDAD EAFIT

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

2010

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Medellín, EAFIT, Octubre 2010

AGRADECIMIENTOS

Agradezco muy especialmente a la profesora doctora Gloria Elena Toro Villegas por su apoyo permanente, dedicación y entusiasmo en el desarrollo de esta investigación.

A los profesores del programa de maestría de la Universidad EAFIT doctor Michel Hermelin Arboux el maestro de siempre, a la doctora María Isabel Marín por su acompañamiento, a la ingeniera Beatriz Susana Acosta y al geólogo Jorge Patiño por su apoyo y colaboración en aspectos relacionados con la cartografía y ajuste de la geodatabase, al director del departamento de geología Msc Geovanny Bedoya Sanmiguel y al director del programa de maestría doctor Juan Darío Restrepo. A los funcionarios del laboratorio de geología María Isabel Acevedo y Wilton Echavarría por su ayuda y soporte en las actividades administrativas requeridas para el buen desarrollo del proyecto. Se agradece a la ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos) por su apoyo al laboratorio de termocronología donde se realizaron todas las separaciones minerales y análisis petrográficos del proyecto.

A INGEOMINAS por su apoyo académico y financiero, y muy especialmente a la doctora Martha Calvache y al geólogo Bernardo Pulgarín directores del proyecto Modelo Vulcanológico del Neógeno de Colombia y a los geólogos María Luisa Monsalve, Gloria Patricia Cortés y Mónica Arcila por su acompañamiento y disponibilidad cuando se requería debatir y discutir sobre el vulcanismo del Neógeno de Colombia. Al ingeniero Oscar Manzo por las sugerencias acerca de la edición del documento.

A mis amigas y compañeras de estudio Sandra Milena López, Katerine Jerez, Eliana Cañola y Laura Téllez con quienes construimos una gran amistad y un buen equipo de trabajo académico, fundamentado en el respeto y la colaboración. A los geólogos y amigos José Fernando Duque y Harold Andrés Albarracín con quienes realizamos la primera campaña de campo.

A la Universidad del Cauca y a profesores y amigos de ésta institución, en particular al rector Msc. Danilo Reinaldo Vivas, al vicerrector de investigaciones ingeniero Eduardo Rojas y al .Msc Germán Gómez por estimular esta empresa del conocimiento.

A mi familia y muy especialmente a mis padres José María Torres y Emma Hernández y a mis hijos Pablo José y Juan Carlos Negret Torres forjadores de sueños y esperanzas, quienes tuvieron la paciencia necesaria para que la mamá hiciera realidad sus sueños.

A Martha Medina Canencio por su apoyo desinteresado y oportuno, al historiador Gonzalo Buenahora por su paciencia al leer diferentes versiones del texto; y en general a todas aquellas personas que de una u otra forma me apoyaron y contribuyeron para ascender un peldaño más en el propósito de entender el vulcanismo del Neógeno del suroccidente de Colombia

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| RESUMEN | xi |
| 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1 Objetivos | 2 |
| 1.1.1 Objetivo general..... | 2 |
| 1.1.2 Objetivos específicos..... | 2 |
| 1.2 Localización | 3 |
| 1.3 Metodología | 4 |
| 1.4 Alcances y limitaciones | 10 |
| 2. Estudios Anteriores | 11 |
| 2.1 Introducción | 11 |
| 2.2 Ignimbritas..... | 11 |
| 2.3 Ignimbritas y estructuras caldéricas en los Andes | 15 |
| 2.4 Ignimbritas de Colombia..... | 16 |
| 2.5 Edad del vulcanismo ignimbrítico en Colombia..... | 18 |
| 2.6 Modelos Vulcano-tectónicos propuestos para el emplazamiento de grandes volúmenes de ignimbritas. | 22 |
| 2.7 Características de la Subducción, composición y aspectos estructurales de la corteza continental en Colombia | 23 |
| 2.8 Aspectos estructurales relacionados con el vulcanismo de los Andes en general y en Colombia en particular. | 26 |
| 2.9 Unidades litológicas de la zona de estudio | 28 |
| 2.9.1 Rocas del Complejo Arquía (Pz?ecm) | 28 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.9.2 | Rocas basálticas, ultrabásicas y los sedimentos asociados de edad mesozoica | 30 |
| 2.9.3 | Rocas del Grupo del Cauca (Pgech, Pgog, Pgof, Ngme) | 30 |
| 2.9.4 | Intrusivos del Neógeno (Ngi)..... | 31 |
| 2.9.5 | Formaciones volcano sedimentarias de Neógeno | 31 |
| 2.9.6 | Depósitos de flujos de escombros volcánicos..... | 34 |
| 2.9.7 | Depósitos aluviales y depósitos de vertiente (Qalca, Qal, Qt, Qv) ... | 34 |
| 3. | Resultados | 35 |
| 3.1 | Geomorfología | 35 |
| 3.1.1 | Unidad de montañas con laderas largas y rectas (Mllr)..... | 38 |
| 3.1.2 | Unidad de colinas aisladas (Ca) | 38 |
| 3.1.3 | Unidad de cañones y valles (Crca, Crpa, Ceb, Crpipe; Vrpt, Vrca, Vrh, Vrpa)..... | 39 |
| 3.1.4 | Unidad bloque de Piendamó (Bpi) | 39 |
| 3.1.5 | Unidad de escarpes (Ess, Esn, EsfPo, Esfpi) | 39 |
| 3.1.6 | Unidad de Colinas de Cimas Redondeadas (Ccr) | 40 |
| 3.1.7 | Unidad de superficies onduladas con control estructural (Soce) .. | 40 |
| 3.1.8 | Unidad del abanico de escombros volcánicos del río Piendamó (Api)..... | 41 |
| 3.1.9 | Unidad de colinas de cima plana (Ccp) | 41 |
| 3.1.10 | Unidad de ápices de abanicos sucesivos (Aas) | 41 |
| 3.1.11 | Unidad del abanico de escombros volcánicos de los ríos Blanco y Cofre (Abcof) | 41 |
| 3.1.12 | Unidad del abanico de escombros volcánicos del río Cajibío (Acaj)..... | 42 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.1.13 | Unidad del abanico de escombros volcánicos de Calibío (Acab)..... | 42 |
| 3.1.14 | Unidad del abanico de escombros volcánicos de San Isidro (Asi)..... | 43 |
| 3.1.15 | Unidad del cono aluvial del río Cauca (Carc) | 43 |
| 3.1.16 | Unidad de llanuras de inundación y terrazas aluviales (LLita)... | 44 |
| 3.2 | Caracterización de las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán..... | 44 |
| 3.2.1 | Geología | 44 |
| 3.2.2 | Estratigrafía de las secuencias ignimbríticas de la Formación Popayán..... | 46 |
| 3.2.3 | Caracterización petrográfica de las secuencias de ignimbritas..... | 58 |
| | | 64 |
| 3.2.4 | Caracterización geoquímica de las ignimbritas..... | 64 |
| 3.2.5 | Cronología | 74 |
| 3.2.6 | Correlación estratigráfica de las ignimbritas de la Formación Popayán | 79 |
| 4. | Análisis y discusión de los resultados | 81 |
| 5. | Conclusiones..... | 95 |
| 6. | Recomendaciones | 97 |
| 7. | Referencias | 98 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Localización área de estudio. Meseta de Popayán | 3 |
| Figura 2. Cartografía base IGAC, planchas 1:25.000..... | 4 |
| Figura 3. Distribución de los cuatro segmentos volcánicos activos de los Andes modificado de: Ramos y Alemán (2.000); Cordilleras Oceánicas (Gutscher, 2.002); Tasas de convergencia y dirección de las placas a lo largo de los Andes (Angermann et al al, 1.999); edad del basamento de las zonas volcánicas andinos y pre-andinos (Ramos, 1.999)..... | 12 |
| Figura 4. Andes de Colombia: Cordillera Occidental, Cordillera Central, Cordillera Oriental, Valles Intercordillerranos, Serranías..... | 13 |
| Figura 5. Calderas de los Andes Centrales y extensión de los depósitos de ignimbritas asociados. Modificado de Lindsay et al. (2001a)..... | 16 |
| Figura 6. Distribución de los depósitos de ignimbritas en el Suroccidente de Colombia. Modificado de Murcia y Pichler (1987)..... | 17 |
| Figura 7. Distribución de los depósitos de ignimbritas y de las estructuras caldéricas en los departamentos del Cauca y del Huila. Construido con base en la información de Kroonenberg et al. (1.981, 1.982); Van Der Wiel (1.991), Torres et al. (1.992); Torres (1.997); Torres et al. (1.999); Ruiz y Marquinez (2.002)..... | 19 |
| Figura 8. Marco geodinámico de los Andes del Norte. Se indican los principales sistemas de fallas y se muestra la dirección y velocidad promedio de convergencia para la placa Nazca. Modificado de: Taboada et al. (2.000); Corredor, (2.003)..... | 20 |
| Figura 9. Modelo de corteza, tomado de Meissner et al. (1.976)..... | 24 |
| Figura 10. Modelo de corteza tomado de Kellog y Vega (1995)..... | 25 |
| Figura 11. Zonas volcánicas activas de los Andes del Norte (ZVN). Modificado de Hall y Wood (1.985)..... | 27 |

| | |
|---|----|
| Figura 12. Principales zonas volcánicas transversales de los Andes Centrales. (Modificado de Riller et al. (2.001). | 29 |
| Figura 13. Síntesis de la información estratigráfica de las formaciones de Popayán y Guacacallo..... | 33 |
| Figura 14. Macrounidades geomorfológicas de la Meseta de Popayán. Se presentan los sistemas de fallas de dirección Norte Este y las fallas de dirección Norte Oeste y Este-Norte-Este, los movimientos relativos de las diferentes fallas y las estructuras volcánicas localizadas en el eje de la Cordillera Central, en el departamento del Cauca. | 36 |
| Figura 15. Columna estratigráfica tipo de la Formación Popayán, Morales, Cauca..... | 48 |
| Figura 16. Imágenes de la secuencia de depósitos de flujos de ignimbritas de la quebrada El Charco-Río Hondo. Municipio de El Tambo, Cauca | 49 |
| Figura 17. Imágenes de los afloramientos de los depósitos de las Secuencia de ignimbritas del río Cauca. Quebrada el Cedral. Municipio de Popayán, departamento del Cauca | 51 |
| Figura 18. Secuencia de ignimbritas del río Palacé. Vía Popayán-Totoró. Municipio de Popayán, departamento del Cauca..... | 54 |
| Figura 19. Depósitos de flujos de ignimbritas de la secuencia de la quebrada Sombrerillo. Municipio de Morales, departamento del Cauca..... | 55 |
| Figura 20. Imágenes de la secuencia de ignimbritas de Pisojé Alto, cantera Conexpe. Municipio de Popayán, departamento del Cauca. | 57 |
| Figura 21. Detalles petrográficos de la matriz de los depósitos de ignimbritas de la Meseta de Popayán. | 59 |
| Figura 22. Detalle petrográfico de los diferentes tipos de vidrio que se observan en las ignimbritas de los depósitos de la Meseta de Popayán..... | 60 |
| Figura 23. Detalle de fragmentos de vidrio con textura esferulítica. | 61 |
| Figura 24. Detalle de cristales de cuarzo con bahías de disolución. | 63 |
| Figura 25. Clasificación Modal QAP de las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán y de las ignimbritas y las lavas de Pisojé Alto de acuerdo a Streckeisen (1978)..... | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 26. Diagrama de clasificación general de las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto (Después de LeBas et al, 1968). Los depósitos de las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán son de composición riolítica. | 69 |
| Figura 27. Diagrama de Clasificación de la serie magmática de las ignimbritas de la Formación Popayán y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto (después de Kuno, 1976). | 70 |
| Figura 28. Diagrama TAS de las ignimbritas de la Formación Popayán y de las ignimbritas y lavas de Pisojé alto. | 71 |
| Figura 29. Diagramas Harker de variación de los óxidos mayores con respecto a SiO ₂ de las ignimbritas de la Formación Popayán y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto. | 72 |
| Figura 30. Diagrama Harker de variación de algunos elementos menores con respecto al contenido de SiO ₂ de las ignimbritas de Formación Popayán y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto. | 73 |
| Figura 31. Diagrama Harker de variación SiO ₂ vs TiO ₂ y diagramas de variación TiO ₂ vs Sr/Ba y Sr/Rb de las ignimbritas de la Formación Popayán en la Meseta de Popayán y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto..... | 74 |
| Figura 32. Diagrama Harker de variación de (Na ₂ O+K ₂ O) con respecto al SiO ₂ de las ignimbritas de las formaciones de Popayán y Guacacallo y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto (Después de Le Bas et al, 1968). | 83 |
| Figura 33. Diagrama de Clasificación de la serie magmática de las ignimbritas de las formaciones de Popayán y Guacacallo y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto (después de Kuno, 1976)..... | 84 |
| Figura 34. Diagrama Harker de variación de SiO ₂ con respecto al contenido de K ₂ O de las ignimbritas de las formaciones Popayán y Guacacallo y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto (Pecerillo y Taylor, 1976)..... | 84 |
| Figura 35. Diagramas de variación Harker de los óxidos mayores con respecto a SiO ₂ de los depósitos de ignimbritas de las formaciones de Popayán y Guacacallo y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto. | 85 |

| | |
|--|----|
| Figura 36. Depósitos de ignimbritas de las formaciones de Popayán y Guacacallo, Caldera de Paletará (Torres et al, 1.999), lineamientos y fallas. | 89 |
| Figura 37. Diagrama TAS de las ignimbritas de las formaciones de Popayán y Guacacallo; del vulcanismo resurgente de la cadena volcánica de Paletará y de las ignimbritas y lavas de PISOJÉ ALTO (Después de LeBas et al, 1968). | 92 |
| Figura 38. Diagrama de variación Harker SiO_2 vs K_2O de las ignimbritas de las formaciones de Popayán y Guacacallo, de lavas del vulcanismo resurgente de la caldera de Paletará y de las ignimbritas y lavas de PISOJÉ ALTO. | 93 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Vuelos fotográficos IGAC, Formación Popayán, Meseta de Popayán, departamento del Cauca, Colombia..... | 5 |
| Tabla 2. Coordenadas geográficas de las columnas estratigráficas levantadas en campo..... | 7 |
| Tabla 3. Compilación de las edades de los depósitos de ignimbritas de los departamentos del Cauca y del Huila. | 21 |
| Tabla 4. Concentraciones de los elementos mayores en forma de óxidos. | 66 |
| Tabla 5. Concentraciones de los elementos menores..... | 67 |
| Tabla 6. Calculo de la Norma CIPW | 68 |
| Tabla 7. Resumen de los datos de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ datos: MS-10 experimentos de temperaturas controlados con aumento gradual de la temperatura..... | 76 |

Lista de Anexos

Anexo 1. Perfiles topográficos en la Meseta de Popayán con sus respectivas interpretaciones geológicas.

Anexo 2. Columnas estratigráficas de la Meseta de Popayán, correlaciones y columna estratigráfica tipo para la Formación Popayán.

Anexo 3. Mapa de las estaciones de trabajo de campo.

Anexo 4. Coordenadas geográficas de las diferentes estaciones de las campañas de campo.

Anexo 5. Lista Coordenadas geográficas de las muestras colectadas en las columnas estratigráficas y tipo de análisis realizado a cada una.

Anexo 6. Mapa geológico de la Meseta de Popayán.

Anexo 7. Mapa geomorfológico de la Meseta de Popayán.

Anexo 8. Análisis modales de las secciones petrográficas.

Anexo 9. Fichas descripciones petrográficas.

Anexo 10. Espectros e isócronas $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ de las dataciones realizadas.

Anexo 11. Datos análisis geoquímica Monsalve y Pulgarín, 1.999.

Anexo 12. Datos análisis geoquímica López, 2.009.

RESUMEN

Desde 1.932 se está discutiendo acerca de la estratigrafía y la composición de los depósitos y rocas que constituyen la Formación Popayán, surgiendo varias propuestas estratigráficas que se han venido actualizando de acuerdo a la evolución de los conceptos que, con el transcurrir del tiempo, ha tenido la vulcanología.

A partir de la caracterización de los depósitos de la Formación Popayán se plantea que está constituida primordialmente por depósitos de flujos de ignimbritas y por espesos depósitos de flujos de ceniza y bloques de hasta 200 m de espesor que rellenaron un paleorelieve, construido sobre rocas del Paleozoico al Paleoceno, conformando la Meseta de Popayán.

Se propone que la sección estratigráfica tipo de la Formación Popayán sea la levantada en la quebrada Sombrerillo, localizada al norte de la Meseta de Popayán en el Municipio de Morales, de muy fácil acceso, y donde está perfectamente representada ésta formación. Las columnas estratigráficas levantadas en la Chorrera del Club Campestre del municipio de Popayán y en la quebrada La Chorrera- río Hondo, al sur de la meseta, en el municipio de El Tambo, se consideran secciones estratigráficas de referencia. En la sección estratigráfica de la quebrada Sombrerillo se observa la base de la Formación Popayán conformada por depósitos de flujos de ignimbritas con un espesor máximo observado de 100 m; estas ignimbritas están suprayacidas por una serie de depósitos de flujos piroclásticos y depósitos vulcano sedimentarios, con un espesor máximo observado de 100 m, sobre los que se desarrolló un paleosuelo de color rojo que se propone constituye el techo de la Formación de Popayán.

Los análisis geoquímicos ubican las ignimbritas de la Formación Popayán en las series magmáticas calcoalcalinas, siendo su composición riolítica alta en potasio. Estas características las comparten con las ignimbritas de la Formación Guacacallo ubicadas en el valle geográfico del río Magdalena en el departamento del Huila; las dos formaciones tienen, igualmente, características cartográficas, geomorfológicas y estratigráficas comparables y esto permite su correlación.

De acuerdo con los estudios petrográficos realizados, los depósitos de flujos de ceniza y bloques estratigráficamente localizados hacia el techo de las ignimbritas son de composición andesítica.

Los volúmenes estimados para las ignimbritas de las formaciones de Popayán y Guacacallo son de aproximadamente 250 Km³, sin considerar los volúmenes de las cenizas acompañantes o co-ignimbriticas, cuyos cálculos pueden ser iguales a los de las ignimbritas propiamente dichas. Estos volúmenes son indicadores de la gran significancia que tiene el vulcanismo riolítico en el segmento volcánico central de la Cordillera Central de Colombia. Así mismo, su volumen y el alto contenido en potasio permite suponer que la génesis de los magmas que generaron los mantos ignimbriticos de las Formaciones de Popayán y Guacacallo está relacionada con la corteza continental.

Las ignimbritas denominadas en este trabajo de Pisoje Alto, ubicadas en el piedemonte occidental de la Cordillera Central y que bordean la Meseta de Popayán, de acuerdo con su información geoquímica, son de composición traquiandesítica-andesítica, altas en potasio y hacen parte de las series calcoalcalinas. Estas ignimbritas, de composición andesítica, no son correlacionables con las de la Formación Popayán y se propone que hacen parte de la Formación Coconuco.

De acuerdo a las dataciones de las ignimbritas del suroccidente de Colombia existentes en la literatura, y a las dataciones de ⁴⁰Ar/Ar³⁹ realizadas en esta investigación, consideradas referentes estratigráficos debido al alto contenido de argón atmosférico, el vulcanismo riolítico alto en potasio, del suroccidente de Colombia, se extiende desde hace 7.1±0.3 M.a hasta 2.1±0.4 M.a y sobre él se está construyendo el vulcanismo reciente.

ABSTRACT

from 1932 there has been discussion of the stratigraphy and composition of deposits and rocks that constitute the formation of Popayán; a number of proposals have emerged in accord with the progressive evolution of concepts in the field of volcanology.

The formation of Popayán was constituted of ignimbrites flows, ash deposits and 200 m blocks which filled a paleorelief, constructed between the Paleozoico and the Paleocene, forming the plateau of Popayán.

It is proposed that the typical stratigraphic formation of Popayán is the one which was shaped in the Sombrerillo Creek, located north of the plateau of Popayán in the municipality of Morales, easy access, where this formation is very well represented. The stratigraphic column erected on the Chorrera stream at the Country Club located in the municipality of Popayán and the one on the Hondo River, to the South of the plateau, in the municipality of El Tambo, are considered stratigraphic sections of reference.

In the stratigraphic section of the Sombrerillo Gorge, composed of ignimbrites deposits with an observed maximum thickness of 100 m, the base of the Popayán formation can be observed. These ignimbrites are superimposed by a number of pyroclastic deposits and volcanic sediment, with a maximum observed thickness of 100 m, upon which was developed a regional red paleosuelo extension proposed as the roof of the formation of Popayán.

Geochemical analyses locate the ignimbrites of the Popayán formation in magmatic calco-alkaline series, with rhyolitic composition high in potassium. These characteristics are shared with the Guacacallo ignimbrites located in the geographic Valley of the Magdalena River in the Department of Huila; these two formations also have comparable cartographic, geomorphologic and stratigraphic features that allow their correlation.

According to petrography studies, deposits of ash flow and block stratigraphic located towards the ceiling of the ignimbrites are of andesitic composition. Estimated ignimbrites volumes for the Popayán and Guacacallo formations are approximately 250 Km³, without considering the accompanying ash or co-ignimbrites, which may be

calculated as equal to the actual ignimbrites volume. These volumes indicate the significance of riolitic volcanism in the central volcanic segment of the Central Cordillera of Colombia. The total volume and high potassium content allow it to be assumed that the genesis of the magmas that generated the formations of Popayán and Guacacallo ignimbrites mantle is related to the continental crust.

The ignimbrites denominated in this work Upper PISOJÉ, located on the western foothills of the Cordillera Central and bordering the plateau of Popayán, according to their geochemical information are of trachandesitic-andesitic composition, high in potassium and are part of the calco-alkaline series. These ignimbrites are not correlated with the Popayán formation and it is proposed that they belong to the Coconuco formation. High in potassium, southern Colombian West riolitic volcanism extends from 7.1 ± 0.3 up to $2 \text{ M.a.} \pm 0.4 \text{ M.a}$ upon which recent volcanism is being built.

1. Introducción

Las grandes erupciones de ignimbritas, caracterizadas por presentar volúmenes de cientos a miles de km³ de magma por erupción, traducidos en índices de explosividad volcánica (IEV) altos (Newhall y Self, 1982), son consideradas los eventos naturales más catastróficos del planeta (de Silva et al., 2006a). Sin embargo, y posiblemente debido a que los períodos de recurrencia son muy espaciados en el tiempo, poco se conoce acerca de ellas.

En los Andes Centrales existen extensos mantos de ignimbritas de composición dacítica y riódacítica, calcoalcalinos altos en potasio, que constituyen un rasgo notable del volcanismo Cenozoico al reciente, asociado a la espesa corteza continental de la Zona Volcánica Central (Chile, Argentina, Bolivia) (de Silva y Francis, 1989; de Silva, 1989 a, 1989 b, Stern, 2004).

Sobre estas plataformas de ignimbritas se emplazan los conos volcánicos recientes, testigos de un cambio reciente en los procesos magmáticos y en el régimen termal del vulcanismo de los Andes Centrales, dominado en el Neógeno y el reciente por ignimbritas (de Silva et al, 2006a, 2006b).

En Colombia, en los Andes del Norte, existen importantes volúmenes de ignimbritas localizados en los departamentos de Cauca y Huila, pertenecientes a las formaciones de Popayán y Guacacallo, pero el conocimiento de estos depósitos es muy limitado. Tales depósitos cubren considerables extensiones en ambos flancos de la Cordillera Central y rellenan los valles intercordilleranos del Cauca-Patía y Magdalena.

Si bien, los depósitos de ignimbritas del suroccidente colombiano no presentan tan grandes proporciones como las provincias volcánicas silíceas de los Andes Centrales, sí son una manifestación de un estadio altamente explosivo y de gran significancia para la historia del vulcanismo Neógeno-Cuaternario del suroccidente de Colombia.

De acuerdo con caracterizaciones geoquímicas de los depósitos de flujos de ignimbritas de la Formación Guacacallo, estas son riolitas altas en potasio (Kroonenberg et al, 1981; Van der Wiel, 1991). Los depósitos de flujos de ignimbritas de la Formación de Popayán no han sido aún caracterizados geoquímicamente en forma sistemática; sin embargo, de acuerdo a los escasos estudios existentes su composición es riolítica alcalino feldespática (Schmitt, 1983).

Los resultados de este trabajo son un aporte al conocimiento de las secuencias de ignimbritas del suroccidente colombiano, así como, una contribución al entendimiento de la estratigrafía de la Formación Popayán.

En esta investigación se sintetizan los trabajos realizados por la autora a lo largo de varios años en la zona descrita, los que se complementan con datos obtenidos en el proyecto denominado Vulcanismo Neógeno y Cuaternario del suroccidente Colombiano, efectuado por INGEOMINAS y la Universidad EAFIT, en cuyo marco se desarrolla esta investigación.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Con base en las características geomorfológicas, petrográficas, estratigráficas, geocronológicas y geoquímicas de las ignimbritas de la Formación de Popayán aflorantes en los ríos Hondo, Cauca, Palacé y la quebrada Sombrerillo se pretende demostrar que ellas comparten una historia volcánica similar, de gran trascendencia en la evolución del vulcanismo del suroccidente de Colombia.

1.1.2 Objetivos específicos

- Elaborar a escala 1:25.000 el mapa geomorfológico para precisar los rasgos característicos de las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán en la Meseta de Popayán y su distribución.
- Complementar a escala 1:25.000 la cartografía geológica de los depósitos volcánicos y volcano-sedimentarios de la Formación Popayán en la Meseta de Popayán, con base en la cartografía propuesta por INGEOMINAS (Orrego y París 1.999).
- Levantar las columnas estratigráficas de las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán en la Meseta de Popayán y correlacionarlas con base en la estratigrafía, la petrografía, la geoquímica y la geocronología.
- Revisar la estratigrafía hasta el momento propuesta, para la Formación Popayán
- Evaluar y estimar la importancia que tiene el vulcanismo ignimbrítico en el vulcanismo del suroccidente de Colombia.

1.2 Localización

La zona de estudio se localiza en el suroccidente de Colombia, en el segmento volcánico central de Colombia, en el departamento del Cauca, municipios de Popayán y Morales, en la Meseta de Popayán. Las poblaciones más importantes son: Popayán, Cajibío, Morales, Piendamó (Figura 1).

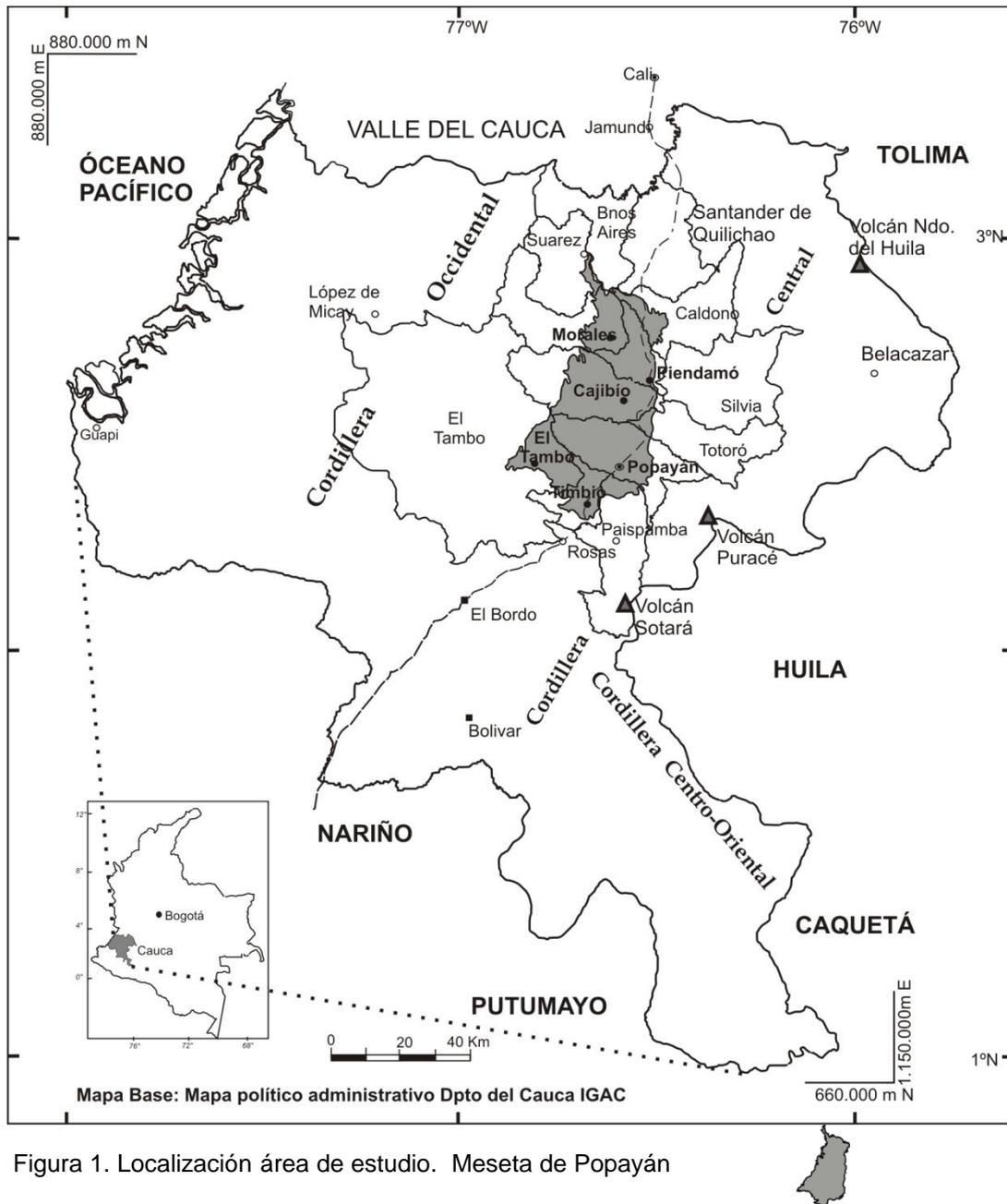


Figura 1. Localización área de estudio. Meseta de Popayán

La extensión de la zona de trabajo es de 1532 km² y la cartografía base del área, es la correspondiente a las planchas 342 II B, D; 342 IV B, D y parte de las planchas 343 I

A, C; 343 III A, C; 342 II A, C; 342 IV A, C y 364 II A, B, a escala 1:25.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (Figura 2). Las coordenadas planas son: X= 1020.505, Y= 819.815 y X= 1073.913, Y= 745.852.

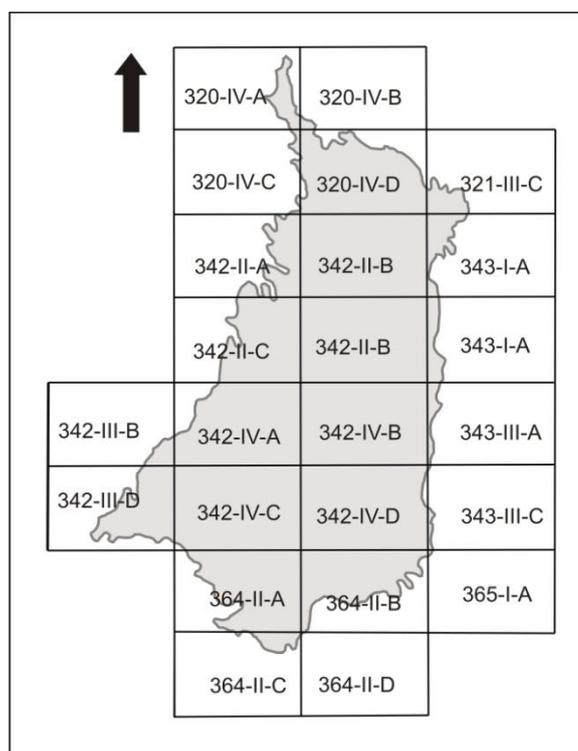


Figura 2. Cartografía base IGAC, planchas 1:25.000

1.3 Metodología

Con el propósito de caracterizar los depósitos de ignimbritas de la Formación de Popayán, en la Meseta de Popayán, se realizó la evaluación de la información existente sobre el volcanismo andino, y en particular, sobre las características geológicas, geomorfológicas y geoquímicas de secuencias ignimbríticas andinas y sus posibles fuentes (Ver Capítulo 2).

Para definir la distribución espacial de los depósitos de ignimbritas y sus rasgos geomorfológicos se interpretaron 10 vuelos fotográficos, los que aparecen detallados en la Tabla 1, igualmente se interpretaron las imágenes de satélite LANDSAT ETM 2001 y 2003 de propiedad de la Corporación Regional del Cauca (CRC), bandas 1,2,3,4,5,6,7; LANDSAT TM, bandas 1,2,3 de propiedad del Ministerio del Medio

Ambiente y el Modelo digital de terreno, corregido (90 m de precisión), suministrado por el Centro de Investigaciones de Agricultura Tropical (CIAT).

Tabla 1. Vuelos fotográficos IGAC, del área de la investigación. Formación Popayán, Meseta de Popayán, departamento del Cauca, Colombia

| NÚMEROS DE VUELO | NÚMEROS DE FOTOGRAFÍAS |
|------------------|------------------------|
| M1049 | 12588-12600 |
| M-1049 | 12547-12556 |
| M1098 | 16561-16580 |
| M1096 | 16451-16468 |
| M1052 | 12774-12786 |
| M1207 | 22950-22956 |
| M-1098 | 16561-16580 |
| C-2089 | 163-175 |
| C-2089 | 121-134 |
| C-2089 | 128-171 |

Con el software ARGIS 9.2 se construyó una geodatabase donde se consignó toda la información obtenida en las diferentes áreas de trabajo del proyecto Vulcanismo Neógeno y Cuaternario del suroccidente de Colombia al cual está adscrito este proyecto. Se elaboró el mapa de pendientes, el de aspecto y el modelo digital de elevación de la Meseta de Popayán, además de 7 perfiles topográficos con su debida interpretación geológica (Ver Anexo 1). Estos elementos cartográficos fueron la base para la identificación y caracterización de las diferentes unidades geomorfológicas y geológicas. Sobre el modelo de elevación, iluminando en diferentes ángulos y a distintas alturas, se definieron lineamientos, estructuras y fallas.

El trabajo de terreno se llevó a cabo en dos campañas de campo de 22 y 10 días respectivamente, en las que se levantaron de manera sistemática 600 m de columnas estratigráficas (Capítulo 3). Para facilitar las correlaciones estratigráficas, en cada columna estratigráfica se identificaron y agruparon unidades, correspondientes a eventos volcánicos y aluviales, que se nombraron con números romanos de I a V; y a

su vez, y de acuerdo a las columnas estratigráficas levantadas y a su localidad estas se agruparon en secuencias de depósitos de flujos de ignimbritas, nombradas cada una con asociaciones de nombres geográficos de la región de acuerdo a su localización (Anexo 2). En la Tabla 2 se sintetiza las coordenadas geográficas de las columnas estratigráficas levantadas, cuya ubicación se detalla en el mapa de estaciones (Anexo 3); en el Anexo 4 se consignan las coordenadas de las estaciones de trabajo de campo.

Se recolectaron 31 muestras (Ver Anexo 5) representativas de las diferentes secuencias ignimbríticas, roca dura y de los depósitos no consolidados con sus respectivas coordenadas geográficas obtenidas con la ayuda de un GPS Garmin 12 XL. Para la altura sobre el nivel del mar, se utilizó un altímetro Thommen Clase. El origen de las coordenadas para la georeferenciación es Oeste.

Los mapas geológico y geomorfológico con control de campo (Véase Capítulo 5, Anexos 6 y 7) y el de estaciones se elaboraron tomando como mapa base la cartografía a escala 1:25.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), digitalizada de acuerdo a estándares de INGEOMINAS y suministrada por el proyecto INGEOMINAS-EAFIT. Igualmente se consultó la cartografía geológica del Cuadrángulo N-6 y la plancha 364 Timbío (Orrego, 1.975; Orrego et al, 1.976; Orrego y Paris, 1991; Orrego, 1993, Orrego y Paris, 1.999).

En la elaboración del mapa geomorfológico se siguió la metodología propuesta por van Zuidan (1985). Se tuvo en cuenta el grado de disección del drenaje como criterio de datación relativa de las unidades geomorfológicas siendo las unidades más antiguas las que presentan drenajes con más de 50 m de profundidad y cuya disección se clasificó como alta, si la disección está entre 50 m y 20 m se clasificó como media y menos de 20 m como disección baja y por lo tanto las unidades geomorfológicas, serían en consecuencia las más recientes.

Finalmente, en los laboratorios de la Universidad EAFIT se llevó a cabo el trabajo de laboratorio, el cual incluyó la petrografía detallada de 31 secciones delgadas y la preparación de 20 muestras para análisis geoquímicos y 5 para geocronología $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Capítulo 3).

Tabla 2. Coordenadas geográficas de las columnas estratigráficas levantadas en campo.

| N. | ESTACIÓN | TIPO | UBICACIÓN | X | Y | Z |
|-----------|-----------------|---------------------------|--|----------|----------|----------|
| 1 | PKSW011 | Columna Estratigráfica | Club Campestre | 1055717 | 764056 | 1760 |
| 2 | PKSW012 | Columna Estratigráfica | Club Campestre | 1055990 | 764100 | 1750 |
| 3 | PKSW013 | Columna Estratigráfica | Club Campestre | 1055701 | 764055 | 1780 |
| 4 | PKSW014 | Columna Estratigráfica | Vereda La Claridad | 1056070 | 764040 | 1790 |
| 5 | PkSW015 | Columna Estratigráfica | Río Palacé | 1060554 | 769572 | 1870 |
| 6 | PKSW016 | Columna Estratigráfica | Mina Conexpe Diabasa | 1061164 | 761661 | 2055 |
| 7 | PKSW017 | Columna Estratigráfica | Vía El Tambo, Q. La Chorrera. | 1042566 | 765838 | 1650 |
| 8 | PKSW019 | Columna Estratigráfica | Cementerio Puelenje | 1050115 | 761395 | 1700 |
| 9 | PKSW020 | Columna Estratigráfica | Vía EL Tambo, Q. La Chorrera | 1042566 | 765838 | 1650 |
| 10 | PKSW024 | Columna Estratigráfica | Corte Este, vía La Yunga | 1040928 | 766326 | 1630 |
| 11 | PKSW025 | Columna Estratigráfica | Vereda El Tablón, vía La Yunga | 1040308 | 766753 | 1775 |
| 12 | PKSW028 | Columna Estratigráfica | Vía La Yunga | 1038855 | 767800 | 1725 |
| 13 | PKSW051 | Columna Estratigráfica | Galeón, V. Pomorroso, Escuela | 1033034 | 757630 | 1610 |
| 14 | PKSW052 | Columna Estratigráfica | Galeón, V. Pomorroso, Escuela | 1033130 | 757520 | 1710 |
| 15 | PKSW053 | Columna Estratigráfica | Galeón, V. Pomorroso, Escuela | 1033132 | 757450 | 1730 |
| 16 | PKSW054 | Columna Estratigráfica | Galeón, V. Pomorroso, Escuela | 1033122 | 757416 | 1740 |
| 17 | PKSW055 | Columna Estratigráfica | Galeón, Cancha de futbol | 1033078 | 757257 | 1775 |
| 18 | PKSW069 | Columna Estratigráfica | Vereda PISOJÉ Alto. Mina Conexpe | 1061164 | 761661 | 2055 |
| 19 | PKSW087 | Columna Estratigráfica | Vereda Los Llanos. sector Casas Viejas. | 1037349 | 765792 | 1670 |
| 20 | PKSW089 | Columna Estratigráfica | Vereda Los Llanos. Cantera Peñalozza | 1037172 | 766137 | 1665 |

La petrografía se realizó con el microscopio de luz Polarizada Leitz Laborlux 12 pol. En cada sección delgada se identificaron los minerales presentes y las relaciones micro texturas y microestructuras, teniendo en consideración que ellas ofrecen evidencias de

los procesos magmáticos involucrados en la formación de las rocas, tales como mezcla de magmas, orden de cristalización y evidencias de reabsorción (Vernon, 2.004; Shelley, 1.993). Se elaboraron los análisis modales sobre 500 puntos con el propósito de medir la cantidad relativa de los componentes minerales de las rocas en estudio (Hutchison, 1.974).

Los resultados de los análisis modales se llevaron a la gráfica QAPF para rocas volcánicas (Streckeisen, 1978), siguiendo las recomendaciones de Le Maitre (2.002). En el Anexo 8 se presentan los análisis modales y en el Anexo 9 las fichas de las descripciones petrográficas.

Las muestras para los análisis de elementos mayores y algunos elementos trazas, fueron inicialmente procesadas en los laboratorios de la Universidad EAFIT. Para este procedimiento se siguieron las recomendaciones de Rollinson (1.993). Cada una de las muestras fue triturada 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 gramos de los fragmentos de roca fresca las cuales se lavaron con alcohol 3 veces para limpiarlas de óxidos; finalmente se secaron a temperatura ambiente, y con un ágata se maceraron hasta obtener un polvo fino impalpable al tacto, el cual corresponde aproximadamente al tamaño arcilla.

La fracción arcilla fue enviada al laboratorio de INGEOMINAS (Bogotá) donde se realizó la caracterización química de la roca. El estudio 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, y gravimetría, para determinar la humedad (LOI) y P. Se realizó el análisis de algunas muestras por duplicado para verificar la reproducibilidad de los análisis; una vez verificado un mínimo error para las muestras, se normalizaron los datos incluyendo los valores de humedad reportados. Los resultados se presentan en el Capítulo 3.

Los análisis de los resultados se hicieron con el programa PetroGraph (Petrelli et al, 2007). La evaluación de los elementos mayores permitió clasificar químicamente las rocas y determinar la afinidad calcoalcalina y/o toleítica de los magmas asociados (Capítulo 4).

Para la clasificación de las rocas se emplearon los diagramas de álcalis y sílice total (TAS) (después de LeBas et al, 1.986); para definir la tendencia calcoalcalina y/o

toleítica del magma se utilizó el diagrama triangular AFM (después de Kuno, 1.968, en Le Maître, 2002). Los diagramas Harker permitieron analizar las variaciones en las series volcánicas (Wilson, 1.989; Gill, 1.981; Rollinson, 1.993).

Se dataron 5 muestras de las secuencias de ignimbritas (PKSW080a, PKSW087c, PKSW037a, PKSW043a, PKSW043b), (Anexos 10) para lo cual se concentraron anfíboles y biotitas por densidad, granulometría y susceptibilidad magnética, haciendo uso del separador magnético Franz. Para las muestras en las que el mineral empleado en la datación fue biotita se obtuvieron 200 mg del mineral, y en aquellas en las que los minerales empleados fueron anfíboles se separaron 400 mg. Las dataciones fueron realizadas con base en el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, en el laboratorio del Centro de Investigaciones Científicas y de Educación Superior de Ensenada-CICESE- México.

El método de datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ está basado en la formación de ^{39}Ar a partir de la irradiación con neutrones de muestras con K en un reactor nuclear. Después de la irradiación el Ar es liberado por fusión y la relación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ es medida por espectrometría de masa (Dickin, 1.995). Para definir esta relación se deben tener en cuenta, entre otros, que no puede haber ninguna pérdida de ^{40}Ar radiogénico del material desde su formación. Igualmente, no puede haber pérdida o ganancia de K si no por decaimiento radiactivo. Es decir, el sistema debe estar químicamente cerrado.

Las muestras recibieron una dosis de 30 MWH en el reactor nuclear de la Universidad de McMaster y fueron irradiadas con el monitor de irradiación Biotita CATAV 7-4 que es un estándar interno del laboratorio de CICESE de 88.53 ± 0.39 M.a.

Se realizaron experimentos de calentamiento en etapas con un horno de Ta de Modification Ltd, equipado con un sistema de control de temperatura.

La composición isotópica de argón se midió con un espectrómetro de masas tipo MS-10. La extracción de argón de los monitores de irradiación se realizó en una sola etapa a $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se utilizó el mismo equipo en el que se midieron las muestras. Los resultados se presentan en el capítulo 3 y se discuten en el Capítulo 4.

De acuerdo a la evaluación de los resultados de las dataciones realizadas por el laboratorio de ICESE, las muestras tienen un alto contenido de argón atmosférico, predecible por el alto porcentaje de vidrio de la matriz de las ignimbritas analizadas; por lo que los resultados deben ser tomados como guía en la estratigrafía de las

secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán localizadas en la Meseta de Popayán.

1.4 Alcances y limitaciones

Se conocen descripciones de erupciones ignimbríticas riolíticas prehistóricas e históricas como la explosión del Tambora (Indonesia) en 1.815 con un IEV de 7, que tuvo implicaciones de cambio climático mundial (Newhall y Self, 1.982), la del Krakatoa (Indonesia) en 1.883 (Simkin y Fiske, 1.983); del Santorini (Grecia) en el siglo XVII (Bond y Sparks, 1.976); del Vesubio en el año 79 (Sigurdsson y Carey, 1989); así como las erupciones del Mont Peleé de 1.902 y del St. Vincent, en las que murieron más de 30.000 personas (Latter, 1.989) alertaron a la comunidad científica de la alta peligrosidad de estas erupciones. A nivel mundial la zona volcánica de Taupo, en Nueva Zelanda, se ha convertido en una importante referencia para el volcanismo riolítico, dado el avance en sus estudios (Wilson, 1.985).

Con base en las características geomorfológicas, petrográficas, geoquímicas (elementos mayores y algunos trazas) y cronológicas trabajadas en esta investigación, se avanza en el conocimiento de las secuencias de ignimbritas riolíticas de la quebrada El Charco- río Hondo, del río Cauca, del río Palacé, de la quebrada Sombrerillo y de la secuencia de ignimbritas de Pisojé Alto. Estos criterios permitieron establecer que las ignimbritas localizadas en la Meseta de Popayán se correlacionan entre si y hacen parte de la Formación Popayán, y a la vez se propone que son correlacionables con las secuencias ignimbríticas de la Formación Guacacallo. Las ignimbritas de Pisojé Alto localizadas en el piedemonte occidental de la Cordillera Central se presentan como parte de la Formación Coconuco.

Sin embargo, se requiere mayor número de dataciones para definir con más certeza la estratigrafía de las secuencias ignimbríticas de la Formación Popayán. Igualmente, estudios sistemáticos multi-isotópicos (Sr, Sm, Nd y Pb) y de minerales trazas de los depósitos de estas secuencias de rocas volcánicas, ofrecerán criterios más certeros en la definición de la fuente de los magmas generadores de los depósitos de las secuencias de ignimbritas, así como de los mecanismos y de los procesos de formación, aspectos de gran peso para las correlaciones estratigráficas, pero sobre todo para la construcción de un modelo evolutivo del vulcanismo del suroccidente de Colombia.

2. Estudios Anteriores

En este numeral se discute, en el contexto del vulcanismo de la Cordillera de los Andes, la importancia del vulcanismo riolítico y se realiza una revisión de la definición del término ignimbrita; finalmente se presenta una síntesis del estado del conocimiento de las ignimbritas de los departamentos del Cauca y del Huila.

2.1 Introducción

La actual cadena volcánica de los Andes con su origen asociado a la subducción de la placa oceánica debajo de la placa continental es el ejemplo típico de zona de colisión Océano-Continente o margen continental activa (Wilson, 1.989) (Figura 3).

En Colombia los Andes están constituidos por tres cordilleras, las cuales de Este a Oeste se denominan Cordillera Oriental, Central y Occidental. La Cordillera Occidental está separada de la Central por el valle intercodillerano Cauca-Patía y a su vez la Cordillera Central de la Oriental por el valle del Magdalena (Figura 4).

En el Cinturón Circumpacífico en general y en particular en los Andes hay importantes registros de vulcanismo ignimbrítico riolítico relacionado a grandes eventos explosivos (Ferrari et al, 1.999; Sigurdsson et al, 2.000; Ferrari et al, 2.002; Ferrari et al, 2.005; de Silva et al, 2.006a;) y a mega estructuras caldericas de colapso (Francis, 1.983; Araña, 1.993; Spinks et al, 2.005; Cole et al, 2.005; Geyer et al, 2.006). Sin embargo en Colombia no existe registro de vulcanismo riolítico de volumen significativo y parece poco relevante.

2.2 Ignimbritas

Las ignimbritas, habitualmente, exhiben rasgos estructurales muy variables, a tal punto que su carácter piroclástico se puede confundir en muchas ocasiones con el de flujos de depósitos de lavas, lo cual ha creado controversias con respecto al uso del término ignimbrita (Fisher y Schmincke, 1.984). Este vocablo se deriva del latín *ignis* fuego e *imber* lluvia, utilizado por primera vez en 1.931 en Nueva Zelanda por Marshall, (1.935) para designar rocas derivadas de coladas piroclásticas. En 1.961, Ross y Smith demostraron la abundancia de ignimbritas en los terrenos volcánicos, sus importantes espesores y extensiones, así como la gran variedad de texturas y estructuras que pueden presentar. Estos autores relacionaron las anteriores características a su emplazamiento por coladas piroclásticas de gran volumen.

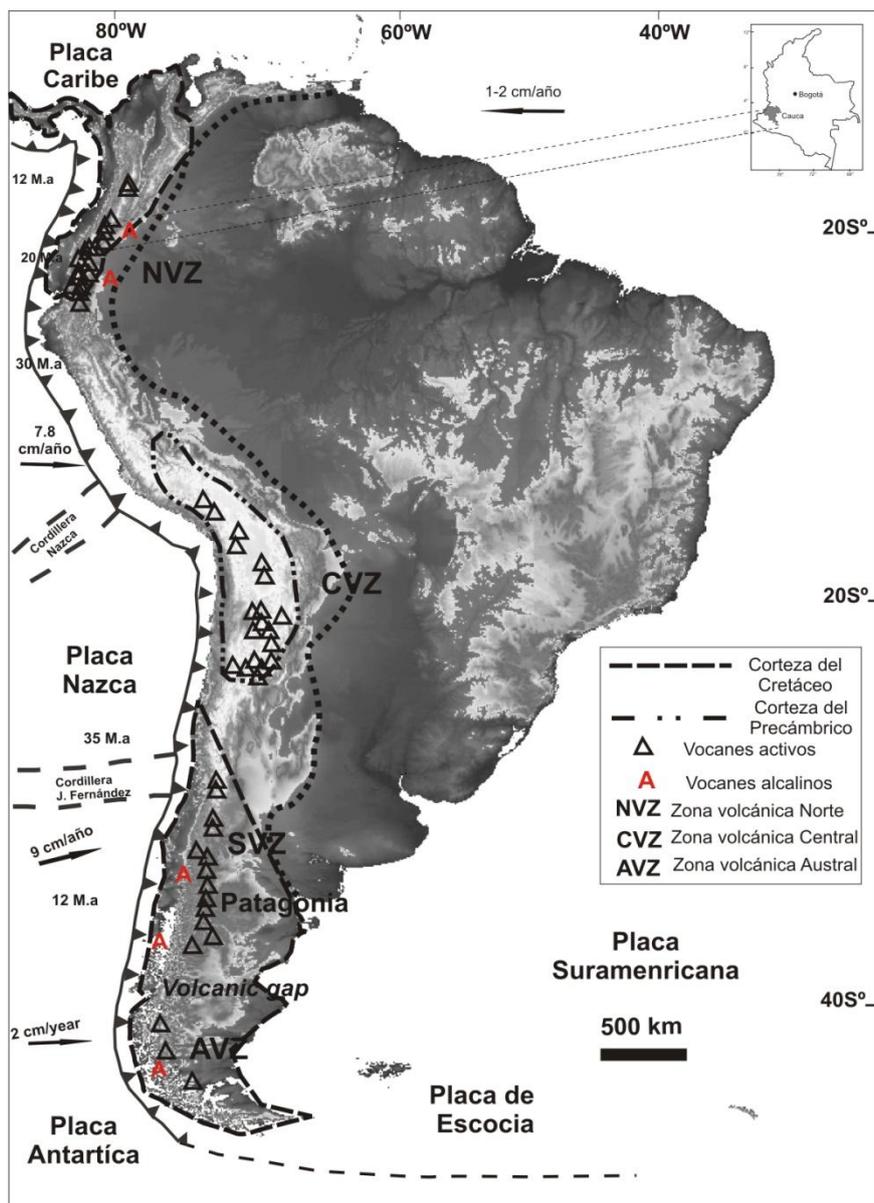


Figura 3. Distribución de los cuatro segmentos volcánicos activos de los Andes modificado de: Gansser (1973); Tasas de convergencia y dirección de las placas a lo largo de los Andes (Angermann, et al., 1.999); edad del basamento de las zonas volcánicas andinos y pre-andinos (Ramos, 1.999); Ramos y Alemán (2.000); Cordilleras Oceánicas (Gutscher, 2.002).

En general, el término ignimbrita es usado algunas veces en sentido litológico para significar tobas soldadas y, otras veces, en sentido genético para el depósito o roca formada por flujos piroclásticos (Cas y Wright, 1.987) que se deben caracterizar de acuerdo al mecanismo eruptivo que los produce. Desde este punto de vista, las ignimbritas, soldadas o no, deben clasificarse como ignimbritas de colapso de columna eruptiva, de colapso de domo o lava, o de colapso de aparato volcánico.

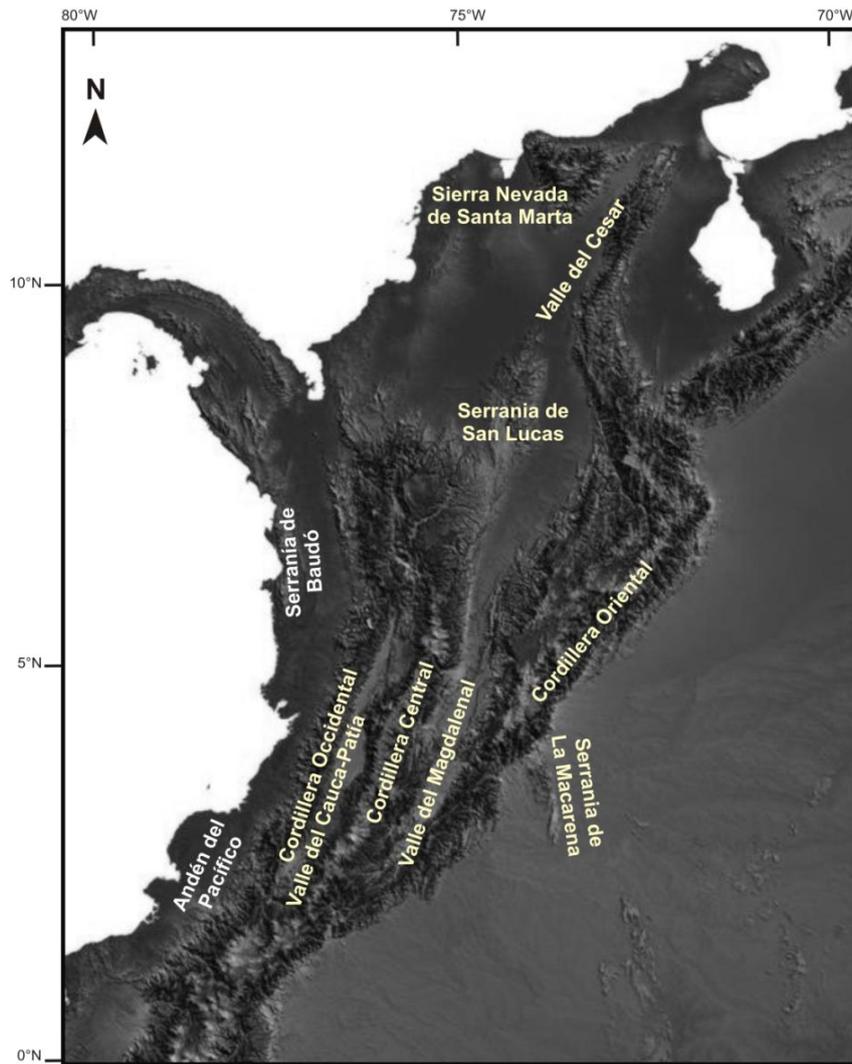


Figura 4. Andes de Colombia: Cordillera Occidental, Cordillera Central, Cordillera Oriental, Valles Intercordillerranos, Serranías.

Arnosio (2.007), denomina ignimbrita a los depósitos de flujos piroclásticos que están formados por material juvenil, representados por esquirlas de vidrio “shards” y cristales (fracción ceniza) y por pómez y escorias en la fracción bloque y lapilli; además de fragmentos líticos derivados del conducto del cráter o recolectados por el flujo piroclástico a partir del cual se depositó la ignimbrita. En general, son depósitos macizos, escasamente seleccionados, sin gradación de sus componentes, de espesor variable: desde pocos cm a varios metros y que en ocasiones presentan conductos de desgasificación.

Las ignimbritas pueden estar o no soldadas; el soldamiento se produce por la cohesión, la deformación plástica y la eventual coalescencia de los componentes

juveniles (pómez y fragmentos vítreos) a elevadas temperaturas (Fischer y Schminke, 1.984). El grado de soldamiento depende principalmente de la viscosidad del vidrio, la composición del magma y la temperatura; pero también de las condiciones después de el emplazamiento como son la carga litostática y la tasa de enfriamiento del depósito (Cas y Wright, 1.987). El soldamiento se reconoce macroscópicamente y microscópicamente por el desarrollo de la textura “fiamme” definida por el colapso de los fragmentos pumíticos (Shelley, 1.993; Mcphie et al, 1993; Fisher y Schmincke, 1.984).

La correlación de extensas secuencias de ignimbritas ha sido un desafío importante en los estudios de vulcanología de diferentes regiones, especialmente en áreas tropicales donde las ignimbritas se encuentran generalmente meteorizadas y la mayoría de las veces cubiertas por vegetación. Es así como el deficiente estado de conservación de las secuencias de ignimbritas, como también, la similitud química y mineralógica de los depósitos de ignimbritas en las tres dimensiones, dificulta su correlación. El trabajo tiende a complicarse, aún más, si la recurrencia de las erupciones es mayor que la resolución de las técnicas de datación utilizadas y si los depósitos presentan un fuerte control estructural.

Existe un espectro de tipos de emplazamientos de las ignimbritas, cuyo rango se ha definido desde las convencionales denominadas “High-Aspect Ration” (H.A.R.I) emplazadas tranquila y pausadamente en los valles hasta las “Low-Aspect Ration” (L.A.R.I), emplazadas cataclísmicamente y que tienen la habilidad de remontar obstáculos debido a que avanzan a grandes velocidades y tienen importantes tasas de descarga de magma (Walker, 1.983).

En estudios de extensos mantos de ignimbritas en el Complejo Volcánico del Altiplano-Puna, en los Andes Centrales, con una extensión aproximada de 70.000 km² y cuyas características, en general, son similares se sugiere evaluar diferentes criterios para su correlación, entre los que se destacan las particularidades cartográficas, físicas, petrográficas, mineralógicas, cronológicas y geoquímica de elementos mayores en roca total y en minerales y evaluación de elementos traza en vidrio (de Silva, 1.989b; de Silva y Francis, 1.989).

Es efectivo realizar los análisis químicos en roca total evitando así, la separación del vidrio que es muy laborioso (de Silva y Francis, 1.989).

2.3 Ignimbritas y estructuras caldericas en los Andes

En la actualidad el arco volcánico andino lo componen una serie de volcanes cuaternarios activos e importantes sistemas de calderas e ignimbritas, que se localizan en cuatro zonas discontinuas denominadas zona volcánica Austral (ZVA), Sur (ZVS), Central (ZVC) y Norte (ZVN) (Gansser, 1.973) (Figura 3). En la ZVN y en la ZVS predominan las andesitas basálticas y andesitas y hay un menor porcentaje de dacitas y riolitas; no así en la ZVC donde hay un predominio de rocas de composición intermedia a acida con un incremento importante en el contenido de Potasio (Lindsay et al, 2.001a, 2.001b).

Es claro entonces, que el vulcanismo de la ZVC tiene importantes diferencias composicionales con respecto al de las otras provincias volcánicas, principalmente por la existencia de extensos volúmenes de mantos de ignimbritas, siendo esta la diferencia fundamental con las zonas volcánicas norte y sur. Autores como Gill (1.981); Thorpe et al (1.984) y Wilson (1.989) atribuyen estas diferencias al mayor espesor de la corteza, a su fusión y a la edad.

En los años 80, con la ayuda de imágenes de satélite Landsat, investigadores como Francis et al. (1.978), Francis y Baker (1978) y Francis (1.983), detectaron en los Andes Centrales grandes estructuras caldericas, algunas anidadas y en la mayoría de los casos multiciclica con depósitos de ignimbritas asociados (de Silva et al, 2.006a; 2.006b). Una de ellas, la caldera del Cerro Galán, localizada al Noroeste de Argentina, tiene 34 km de diámetro y está rodeada por un extenso manto de ignimbritas; en Bolivia se identificó la caldera Kan Kan la cual tiene un diámetro de 36 km (Francis, 1983).

La caldera más grande del Complejo Volcánico del Altiplano-Puna, en Argentina, y posiblemente la mejor expuesta, es la de La Pacana (Figura 5); a ella se relacionan las ignimbritas de la Atana y la Toconao (Lindsay et al, 2.001a, 2.001b). Son también relevantes las calderas de Panizos (de Silva y Francis, 1.989; de Silva, 1.989a, 1.989b; de Silva y Gosnold, 2.007) y la de Aguas Calientes cuyas ignimbritas asociadas son Verde, Chorrillo, Tajamar y Abra del Gallo (Petrinovic, 1.999).



Figura 5. Calderas de los Andes Centrales y extensión de los depósitos de ignimbritas asociados. Modificado de Lindsay et al (2001a).

2.4 Ignimbritas de Colombia

En el Suroccidente de Colombia los primeros reportes de posibles depósitos de ignimbritas fueron realizados por Grosse en 1.935, que describió las rocas de las nacientes del río Magdalena, entre San Agustín y Quinchana, como tobas aglomeráticas. Petrográficamente encontró que estas rocas estaban compuestas por una pasta muy vítrea y estratigráficamente las ubicó en el Neoterciario.

Sin embargo, Tricart y Trautman, en 1.974, en estudios sobre el cuaternario del alto Magdalena, identificaron las rocas de esta región como coladas de lavas y solo en 1.976, Tello y Hernández clasificaron las rocas de San Agustín como ignimbritas.

Kroonenberg et al, en 1.981, avanzaron en el conocimiento de las ignimbritas del valle alto del río Magdalena y las agruparon en la Formación Guacacallo. Ellos de acuerdo a estudios petrográficos las clasificaron como riolitas o riodacitas e igualmente calcularon un volumen de 100 km^3 y una extensión de 1000 km^2 para estos depósitos. Murcia y Pichler en 1.987, con base en análisis químicos, confirmaron la composición riolítica de estas ignimbritas y precisaron espesores y volúmenes de hasta 400 m y 300 km^3 respectivamente (Figura 6).

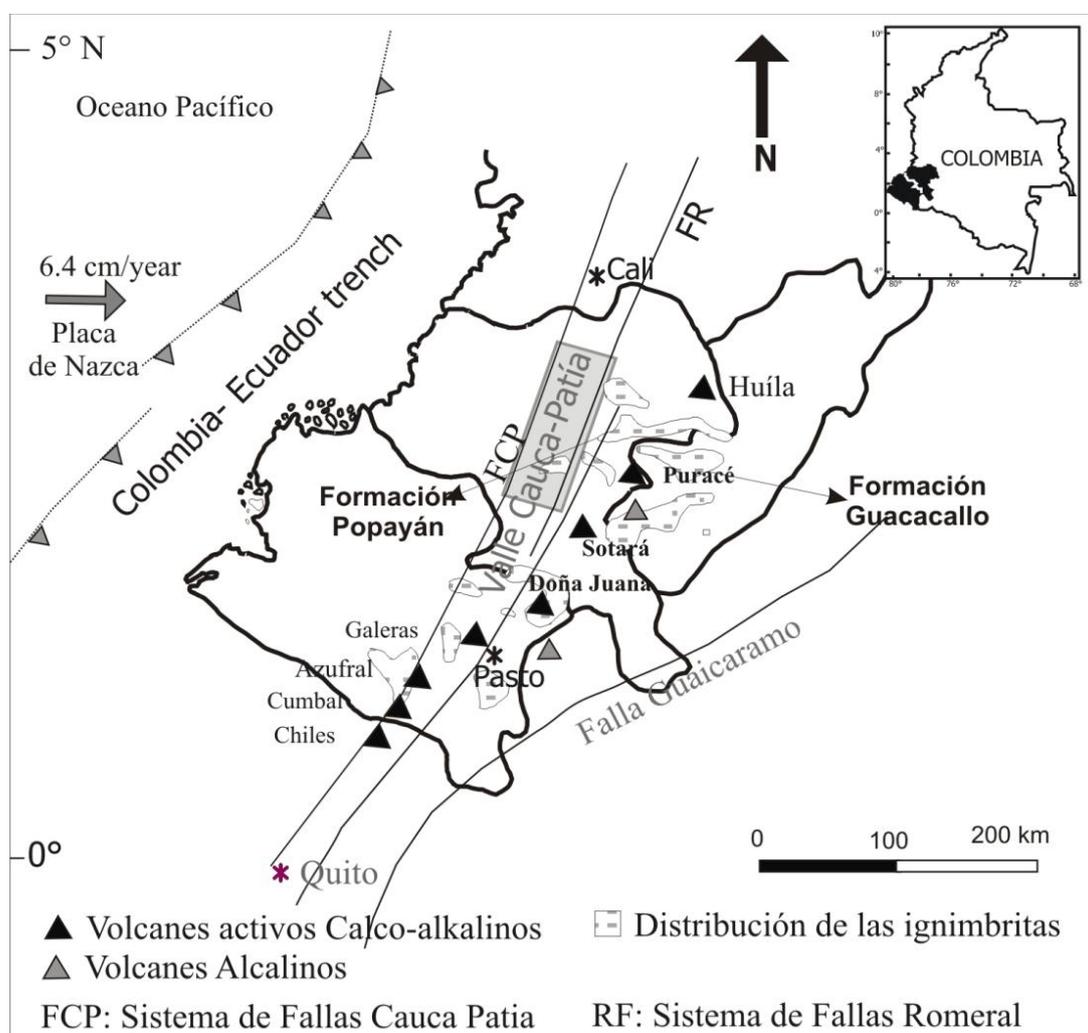


Figura 6. Distribución de los depósitos de ignimbritas en el suroccidente de Colombia. Modificado de Murcia y Pichler, 1987.

Finalmente estudios sistemáticos de geoquímica de elementos mayores de los depósitos de la Formación Guacacallo en las localidades de La Plata-La Argentina y Guacacallo- Salado blanco, permitieron a Van Der Wiel, (1.991) precisar su composición y clasificarlas como riolitas, alcalinoriotitas y riolitas altas en potasio.

En el valle interandino del Cauca-Patía afloran también extensos depósitos de ignimbritas pertenecientes a la Formación Popayán (Alvarado y Hubach, 1.932; Hubach y Alvarado, 1.934; Hubach, 1.957; Orrego, 1.975; Orrego y Rossman, 1.976; Torres et al, 1.992, Torres, 1.997, James et al., 1.986). Estas ignimbritas de acuerdo a análisis geoquímicos han sido clasificadas como riolitas y andesitas de la serie calco alcalina (Schmitt, 1.983). Las ignimbritas de la Formación Popayán han sido correlacionadas con las ignimbritas de la Formación Guacacallo (Van Der Wiel, 1.991, Torres et al, 1.999) (Figura 7).

En lo que al origen de las ignimbritas se refiere Van Der Wiel, 1.991, ha planteado como fuente de las ignimbritas de la Formación Guacacallo la extinta caldera de Cutanga o de El Letrero, pero ella no define la cartografía en sus publicaciones. Torres et al (1.999) con ayuda de imágenes de sensores remotos definen la Caldera de Paletará y proponen a su vez que es el área fuente de las ignimbritas de las formaciones de Popayán y Guacacallo (Figura 7). Posteriormente, Ruiz y Marquinez, 2.002, proponen como fuente de las secuencias ignimbríticas localizadas al norte de Popayán, la caldera de Gabriel López y la cartografían en la plancha 342 Silvia.

En el departamento de Nariño hay también registros de grandes volúmenes de ignimbritas en el valle del río Guisa, localizado en el flanco occidental de la Cordillera Occidental, asociados posiblemente a estructuras volcánicas pre volcán Azufral (Mapa de amenaza volcánica del volcán Azufral, en preparación). También hay registros de depósitos de ignimbritas cerca al sector Escandoy- San Gerardo y en El Tablón, relacionadas con el volcán Doña Juana (Cepeda y Murcia, 1.991), y al Sureste de Pasto en la sección Santa Bárbara-Casa de máquinas del río Bobo (Murcia, 1.982)

2.5 Edad del vulcanismo ignimbrítico en Colombia

Si bien es cierto que en los Andes la actividad volcánica del Cenozoico es el resultado de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Suramericana, en el extremo Noroeste de América del Sur, donde se localizan los Andes colombianos, se suman características que aumentan la complejidad tectónica de la región, debido a la

presencia de la placa Caribe y de la micro placa de Panamá (Kellog y Vega, 1.995) (Figura 8).

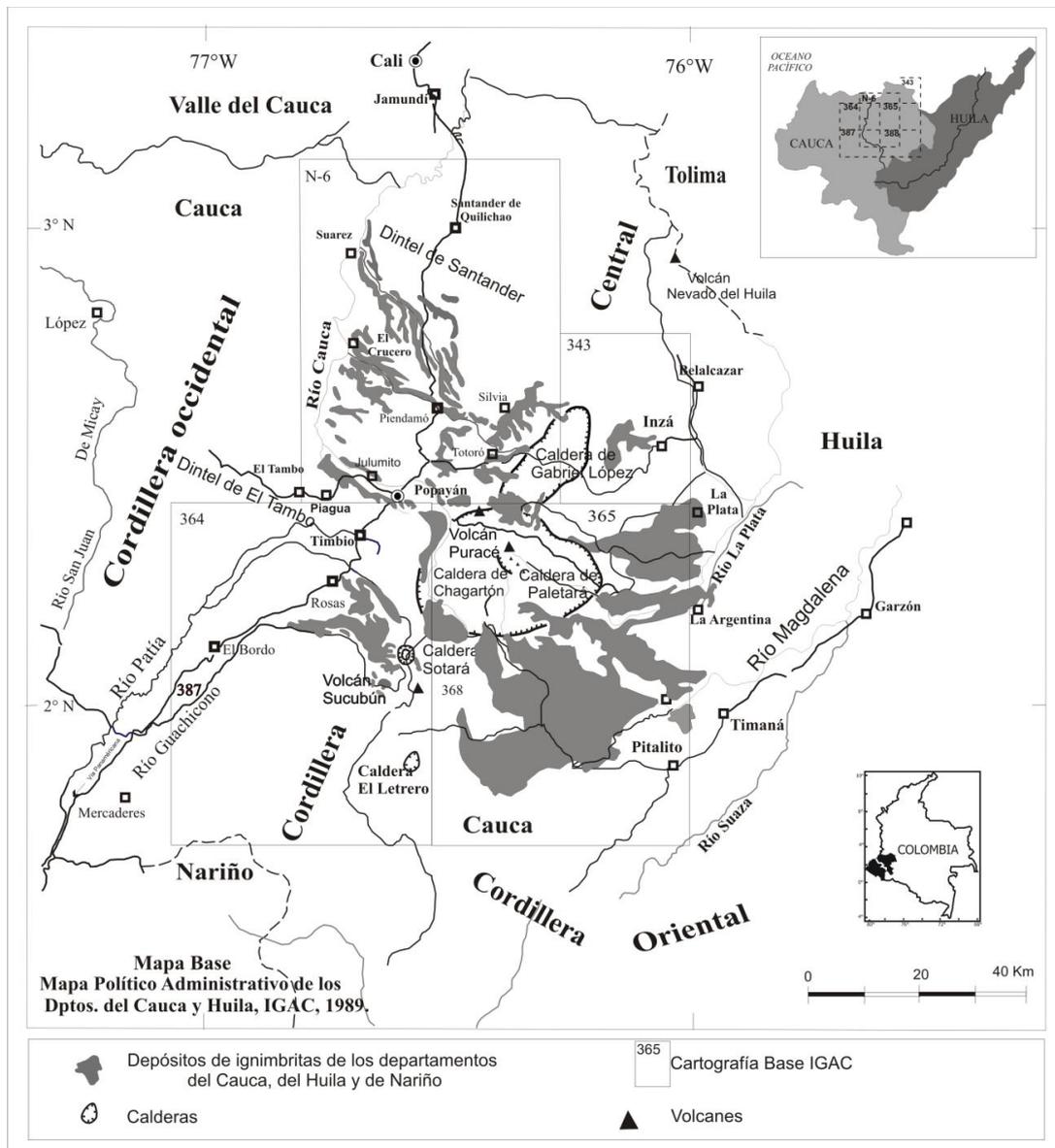


Figura 7. Distribución de los depósitos de ignimbritas y de las estructuras caldéricas en los departamentos del Cauca y del Huila. Construido con base en la información de Kroonenberg et al (1.981,1.982); Van Der Wiel (1.991), Torres et al (1.992); Torres (1.997); Torres et al (1.999); Ruiz y Marquinez (2.002).

Los datos geocronológicos del magmatismo del Cenozoico en Colombia y algunas características geológicas, permite a Ordoñez en 2.001, de acuerdo a la evaluación de las dataciones existentes, reunir estos eventos magmáticos en tres conjuntos y localizarlos entre el Paleoceno y el Eoceno (Evento I) con edades entre 65 y 33.7 M.a, entre el Oligoceno y el Mioceno Medio (Evento II) cuyas edades se encuentran entre

33.7-11 M.a y el evento III con edades menores de 11 M.a. Es interesante anotar que en el departamento del Cauca registros de este vulcanismo se ha reconocido en rocas y depósitos de la Formación Esmita de edad Mioceno (Grosse, 1.935; León et al, 1.973).

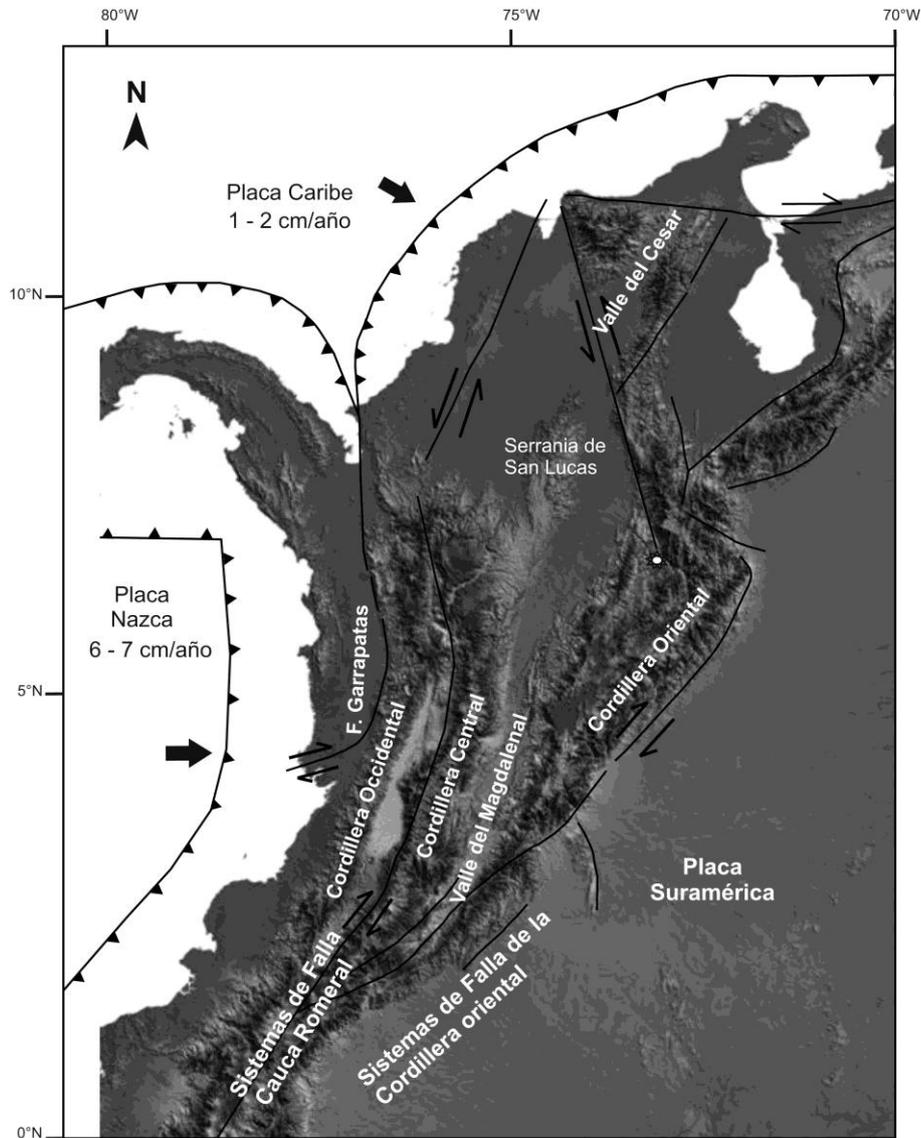


Figura 8. Marco geodinámico de los Andes del Norte. Se indican los principales sistemas de fallas y se muestra la dirección y velocidad promedio de convergencia para la placa Nazca. Modificado de: Taboada et al (2.000); Corredor (2.003).

Las dataciones de las secuencias de ignimbritas de las formaciones de Popayán y Guacacallo, que hasta el momento han sido publicadas se reportan en la Tabla 3.

Tabla 3. Compilación de las edades de los depósitos de ignimbritas de los departamentos del Cauca y del Huila.

| Edad (m.a) | Método | Mineral | Roca/Material | Unidad de roca, volcán, depósito | Localidad | Autor |
|-------------|---------------|-----------|---|--|--|-----------------------------------|
| 2 ± 0,3 | K/Ar | | Ignimbrita | Miembro Julumito, Formación Popayán | Club Campestre Popayán | Wagner, 1.990 (Comunicación oral) |
| 2,1±0,4 | Trazas Fisión | Circón | Ignimbrita | Formación Guacacallo | Candelaria-Bellavista | Van der Wiel, 1.991 |
| 2,3 ± 0,4 | Trazas Fisión | Circón | Ignimbrita | Formación Guacacallo | El Carmen, Huila | Van der Wiel, 1.991 |
| 2,3 ± 0,4 | Trazas Fisión | Circón | Ignimbritas | Formación Guacacallo | Cachipay | Van der Wiel, 1.991 |
| 2,3± 0,4 | Trazas Fisión | Circón | Ignimbrita | Formación Guacacallo | Belén | Van der Wiel, 1.991 |
| 2,4 ± 0,2 | K/Ar | Biotita | Ignimbrita | Formación Guacacallo | La Laguna-Salto de Bordes | Van der Wiel, 1.991 |
| 2,5 ± 0,2 | K/Ar | Biotita | Ignimbrita | Formación Guacacallo | Guacacallo | Van der Wiel, 1991 |
| 2,6 ± 0,3 | K/Ar | Biotita | Ignimbrita | Formación Guacacallo | El Carmen, Huila | Van der Wiel, 1.991 |
| 2,8 ± 0,2 | K/Ar | Biotita | Ignimbrita | Formación Guacacallo | Tarqui, Huila | Van der Wiel, 1.991 |
| 2,8 ± 0,1 | K/Ar | Biotita | Ignimbrita | Formación Guacacallo | Río Loro- Huila | Van der Wiel, 1.991 |
| 2,8 ± 0,2 | K/Ar | Biotita | Ignimbrita | Formación Guacacallo | Candelaria-Bellavista | Van der Wiel, 1.991 |
| 2,9 ± 0,2 | K/Ar | Biotita | Ignimbrita | Formación Guacacallo | Area La Argentina - La Plata | Van der Wiel, 1.991 |
| 3,3 ± 0,2 | K/Ar | Biotita | Ignimbrita | Formación Guacacallo | Area Guacacallo - Oporapa | Van der Wiel, 1.991 |
| 3,46 ± 0,12 | Trazas Fisión | Obsidiana | | | Río Granates, Cauca | Bellot - Gurlet, et al, 2.008. |
| 3.54 | Trazas Fisión | Obsidiana | | | Río Hondo | Bellot - Gurlet, L. 1.999a |
| 3,54 ± 0,07 | Trazas Fisión | Obsidiana | | | Río Hondo | Bellout - Gurlet, et al, 2.008. |
| 3.7 | Trazas Fisión | Obsidiana | | | El Pital, Cauca | Bellot-Gurlet et al, 1.999b |
| 3.7 | Trazas Fisión | Obsidiana | | | San Isidro | Bellot-Gurlet, L et al, 1.999b |
| 3.7 | Trazas Fisión | Obsidiana | | | La Elvira | Bellot-Gurlet, L et al, 1.999b |
| 3,7 ± 0,2 | K/Ar | Biotita | Ignimbrita riolítica de feldespato alcalino | | Área de La Plata, Huila | Murcia, y Pichler, 1987 |
| 4,12 ± 0,13 | Trazas Fisión | Obsidiana | | | Las Balsas (Localidad Arqueologica, Cauca) | Bellout – Gurlet et al, 2.008. |
| 4,27 ± 0,14 | Trazas Fisión | Obsidiana | | | Río Hondo | Bellout – Gurlet et al, 2.008. |
| 4.5 | K/Ar | | Canto de roca volcánica | Miembro Sombrerillo, Formación Popayán | Piendamó | Woodward Clyde Consultants, 1.983 |
| 4.76 | Trazas | Obsidiana | | | Río Hondo | Bellout - Gurlet, |

| Edad (m.a) | Método | Mineral | Roca/Material | Unidad de roca, volcán, depósito | Localidad | Autor |
|-------------|---------------|-----------|----------------------|---|--|---------------------------------|
| | Fisión | | | | | L., 1.999 a,b. |
| 4.76 | Trazas Fisión | Obsidiana | | | Río Hondo | Bellout - Gurlet, L., 1.999a,b. |
| 5,54 ± 0,07 | Trazas Fisión | Obsidiana | | | Río Hondo | Bellot-Gurlet, L et al, 2.008 |
| 7,1 ± 0,3 | K/Ar | Biotita | Ignimbrita riolítica | Ubicada debajo de volcanes de composición alcali-basálticos | Área San José de Isnos - San Agustín, vía La Laguna salto de Bordonos, 2 km w de La Laguna | Kroonenberg, S et al, 1.982 |

Estos reportes confirman la existencia de un vulcanismo ignimbrítico, en el arco volcánico de la Cordillera Central de Colombia, en el Mioceno superior, asociado con la orogenia andina y uno posterior que generó un vulcanismo Plio-Cuaternario post-orogénico.

Si se considera la importante extensión y volumen de las secuencias de ignimbritas en los valles del Cauca-Patía y del Magdalena, la información cronológica disponible es insuficiente para aclarar la estratigrafía detallada de estas secuencias piroclásticas. Sin embargo, la evaluación de la información existente, permite confirmar una actividad volcánica ignimbrítica más o menos continua desde hace 7 Ma.

2.6 Modelos Vulcano-tectónicos propuestos para el emplazamiento de grandes volúmenes de ignimbritas.

Existen muchos interrogantes sobre los procesos genéticos y los mecanismos generadores de grandes provincias volcánicas silíceas sobre la tierra. En términos generales, ellas constituyen un rasgo común, en espacio y tiempo en las márgenes continentales activas del Cinturón Circum-Pacífico como el complejo volcánico del Altiplano-Puna (de Silva et al, 2.006a); pero se registran también en ambientes extensivos o de ruptura del continente como en la Zona Volcánica de Taupo (Cole, 1.990; Wilson et al, 1.995; Cole et al, 1.998; Acocella et al, 2.003) y la Sierra Madre Occidental en Méjico (Ferrari et al, 2.002); de transtensión como en Long Valley (Moos y Zoback, 1.993; Bosworth et al, 2.003) y de transpresión como muy posiblemente sucede en el Cerro Galán en Argentina (Francis y Baker, 1.978; Francis et al, 1978).

De acuerdo a estudios isotópicos de Sr y Nd de las ignimbritas del Complejo Volcánico del Altiplano-Puna se proponen modelos donde al menos el 30% de magmas manto derivados se mezclan con material fundido de la corteza (Lucassen et al 1.999a;

1.999b). En otras palabras, se producen importantes modificaciones de los magmas manto derivados en su ascenso a través de una corteza continental muy espesa, como ocurre en la Zona Volcánica de los Andes Centrales (Hawkesworth y Clarke, 1.994) y en la Sierra madre Occidental. En esta última provincia volcánica y particularmente refiriéndose a las ignimbritas de Chiguagua, Smith et al (1.996) sugirieron modelos en los que se integran historias de cristalización fraccionada de magmas máficos con alguna intervención de la corteza como mecanismo generador. Pero Ruiz et al (1.998) proponen para la formación de estas ignimbritas mayor intervención de la corteza por anatexis y los análisis de isótopos de Sr, Rb y Pb indican que la corteza está involucrada en un 70%, lo que ha sido corroborado por (Ferrari et al, 2.002). De acuerdo a los cuales, si la fusión parcial de la corteza no está involucrada en la formación de los campos silíceos, se requeriría de gran cantidad de magmas máficos primario para su producción.

2.7 Características de la Subducción, composición y aspectos estructurales de la corteza continental en Colombia

Para avanzar en la construcción de un modelo vulcanológico para el Neógeno en el suroccidente de Colombia que incluya, entre otros, la génesis de los extensos mantos de ignimbritas, es importante identificar las características físicas de la subducción; así como la composición y estructura de la corteza en el Plioceno y el Pleistoceno.

Es sabido que entre los factores que controlan la configuración de una zona de subducción y su magmatismo asociado, juegan un papel preponderante la edad de las placas, el ángulo de la placa oceánica subducente, las tasas de convergencia de las placas y el espesor (Pilger 1.984; Aspden et al, 1.987; Freymuller, et al, 1.993).

En cuanto a la edad de la corteza en los Andes del norte, esto es en Colombia y Ecuador, la edad es mesozoica a cretácica (Thorpe, 1.984). Por el contrario, en el norte de los Andes Centrales, en Argentina, Bolivia y Chile es de edad Proterozoica, mientras que al sur la edad es paleozoica a mesozoica temprana

Del ángulo de subducción de la Placa de Nazca se sabe que en los segmentos donde hay actividad volcánica, este es relativamente inclinado (25°) y es prácticamente uniforme hasta una profundidad de 90-100 Km; a mayores profundidades el ángulo es variable, disminuye significativamente (10°) y está relacionado con áreas donde no hay volcanismo (Wilson, 1.989; Stern, 2.004). Las tasas de convergencia actuales están ilustradas en la Figura 3, pero poco se conoce de sus variaciones en el pasado.

Es sabido que los modelos evolutivos de los Andes colombianos tuvieron un nuevo rumbo a partir de los trabajos de McCourt et al. (1.984) al plantear que la porción Noroeste de América del sur, está constituida por un mosaico de terrenos acrecionados a la plataforma de América del Sur en diversos períodos geológicos (Etayo et al, 1.986; Toussaint y Restrepo, 1.989).

Con respecto al espesor de la corteza continental en Colombia, estudios geofísicos permitieron identificar el límite entre una corteza densa y delgada de afinidad oceánica al Oeste y una continental espesa al Este, coincidente con lo que se denomina “alto gravimétrico del occidente colombiano”. El límite de estos dos grandes dominios lo constituye el Sistema de Fallas de Romeral (Case et al, 1.971, 1.973). Así mismo Cediél et al, 1.998 demostraron claramente, con base en perfiles geofísicos, que hacia el Oeste del sistema de Falla Romeral-Peltec no hay basamento continental conforme con lo planteado por el modelo de corteza de Meissner et al (1.976) (Figura 9).

La existencia de xenolitos básicos con abundante hornblenda en las tobas granatíferas de Mercaderes respalda el modelo de una corteza profunda formada por componentes basálticos (Weber et al, 2.002) coherente con el modelo de Meissnar et al, 1.976 que impulsan la idea de crecimiento de la corteza continental por procesos de subducción-acreción, los que incluyen arcos de islas, cuencas marginales y en particular plateau oceánicos, propuestas documentadas en varios trabajos (Abbott y Mooney, 1.995; White et al, 1.999).

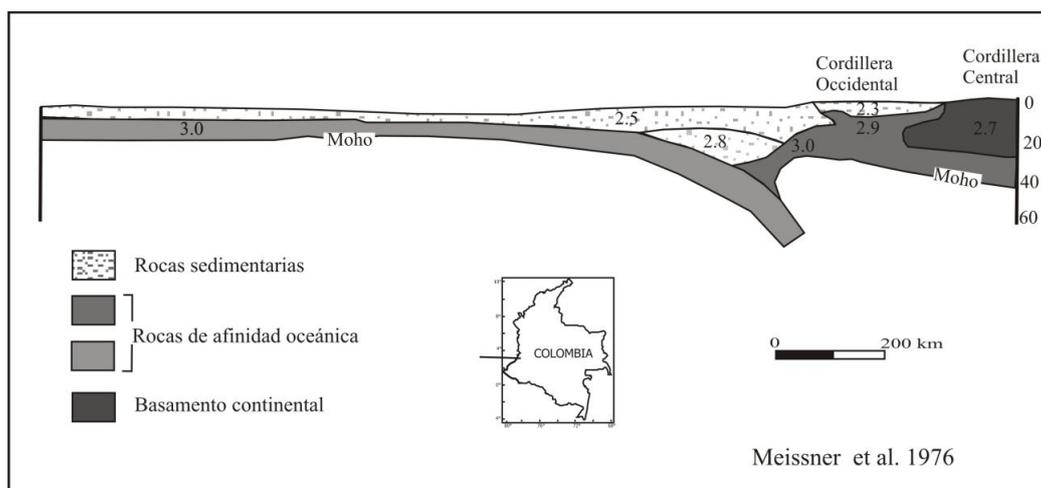


Figura 9. Modelo de corteza, tomado de Meissner et al. (1.976).

Por el contrario Kellogg y Vega (1.995) con base en datos gravimétricos y de velocidades sísmicas proponen para los Andes de Colombia un modelo de construcción de corteza fundamentado en procesos de obducción. De acuerdo a ellos durante el Cretáceo tardío, los terrenos oceánicos de la Cordillera Occidental colombiana obduccieron sobre rocas de la corteza continental de edad paleozoica a cretácica localizadas hacia el oriente y delimitadas por el sistema de Fallas de Romeral. Finalmente, ellos plantean un espesor de 45 Km para la corteza que infrayace el Macizo Colombiano, localizado desde luego al Oeste de Colombia y para los Andes occidentales de Colombia 28 Km de espesor (Figura 10).

Como se expone, estos modelos proponen estilos de construcción y posibles estructuras de la corteza de los Andes colombianos. Los espesores promedio propuestos para la corteza son de 35 km a 45 km con una profundidad de la zona de Benioff de 150 km debajo de la zona donde hay actividad volcánica (James y Murcia 1.984), incluso se ha sugerido espesores de 50 km en la Cordillera Oriental, debido a la colisión del arco de Panamá con parte del Noroeste de América del Sur, que produjo un acortamiento de 120 km en esta cordillera (Taboada et al, 2.000; Corredor, 2.003; Cortés et al, 2.006). Para Hernández, 2.006, el espesor de la corteza en Colombia puede llegar a los 55 km y en los Andes Centrales se ha estimado de 70 km (Harmon et al, 1.984).

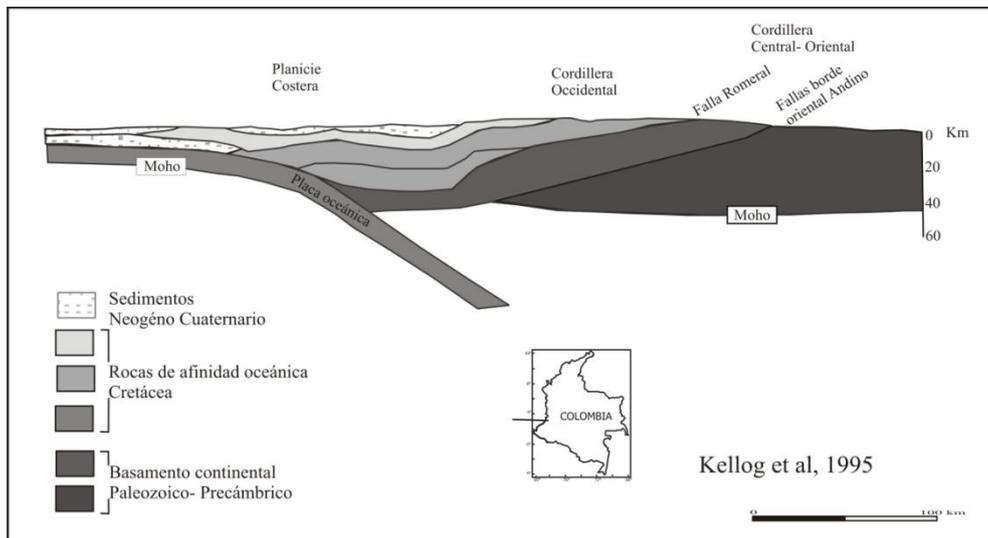


Figura 10. Modelo de corteza tomado de Kellogg y Vega (1995).

Droux y Delaloye (1.996) corroboran la existencia de dos tipos de basamento en Colombia y con base en datos de geoquímica isotópica avanzaron en este

planteamiento, definiendo la existencia de dos clases de lavas, cuyas composiciones están estrechamente relacionadas con las dos categorías de basamentos propuestos, y que, a su vez vinculan las diferencias composicionales del vulcanismo con la ubicación de los volcanes respecto a las fallas del Sistema Romeral que, como se aclaró anteriormente, marcan en Colombia el límite entre los dos tipos de basamento. Las composiciones de los dos tipos de lavas según los anteriores autores son:

Lavas tipo Noreste: Correspondiente a las lavas de los volcanes Puracé y Doña Juana y caracterizadas por altos contenidos de TiO_2 y ricas en K, Ba, Rb, Sr y tierras raras livianas, y una relación alta de Ce/Yb que refleja contaminación de los magmas en la corteza. Este tipo de vulcanismo es compatible con la presencia de un basamento metamórfico al Este de la falla Romeral

Lavas tipo Suroeste: Correspondiente a las lavas de los volcanes Chiles, Cumbal y Azufral, las cuales tienen bajos contenidos de TiO_2 y son pobres en K, Ba, Rb, Sr, la relación Ce/Yb es baja y son ricas en elementos traza, indicando poca participación de material de la corteza en la generación de los magmas del vulcanismo localizado al occidente de la falla Romeral, comparado con las lavas del tipo Noreste.

Ordoñez (2.001), retoma la propuesta de Case et al. (1.971, 1.973) y el modelo geoquímico de Droux y Delaloye (1.996) para la interpretación del vulcanismo del Neógeno en Colombia y reafirma que los procesos magmáticos-volcánicos localizados al Oeste de la falla Romeral se desarrollan sobre un basamento de afinidad oceánica, y los localizados al Este de ésta, sobre un basamento de afinidad continental. Sin embargo admite, que las rocas volcánicas de la Cordillera Occidental y Central no presentan diferencias en cuanto al contenido de elementos mayores, lo que sugiere poca interacción de los magmas básicos generados en la zona de subducción, con las rocas del basamento de cada una de estas dos regiones.

Este autor agrega, además, que el vulcanismo del Neógeno de la Cordillera Central de Colombia debería tener mayores contenidos de K, Ba, Rb, Sr y elementos traza para reflejar una importante asimilación de la Corteza.

2.8 Aspectos estructurales relacionados con el vulcanismo de los Andes en general y en Colombia en particular.

En los Andes varios investigadores identifican una estrecha correlación entre los sistemas de fallas longitudinales y transversales y el vulcanismo. Sin una explicación

concluyente aún, es claro que sobre fallas de dirección Noreste y el cruce de éstas con las transversales de tendencia Este-Noreste y Norte-Este se localizan varios volcanes (Case et al, 1.971; Ponce, 1.979; Murcia y Marín, 1.981).

Hall y Wood (1.985) reafirman esta propuesta y dividen el arco volcánico de los Andes de Colombia en cuatro segmentos con actividad volcánica coincidentes con segmentos delimitados por fallas de dirección Norte-Oeste. Estos segmentos de Norte a Sur constituyen los grupos volcánicos Ruiz-Machín; volcán Nevado del Huila; Grupo volcánico Puracé- Doña Juana y Grupo volcánico Galeras-Cerro Negro al sur. El área de esta investigación se localiza en el grupo volcánico Puracé-Doña Juana (Figura 11).

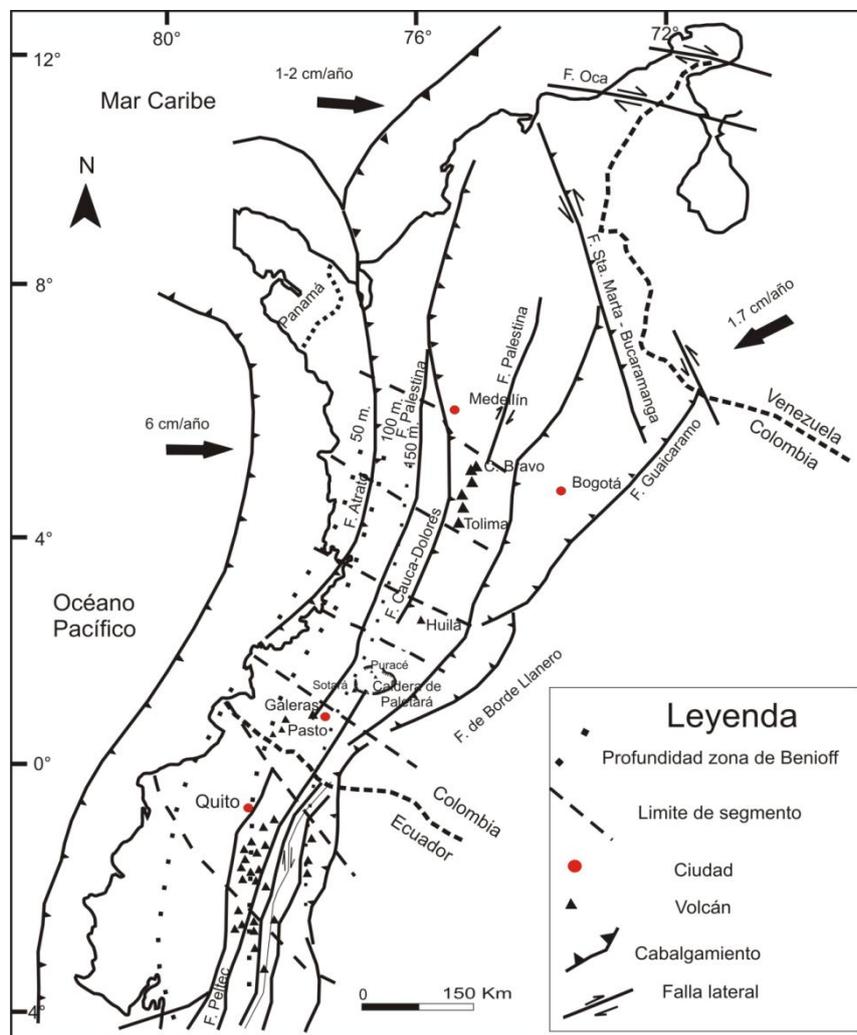


Figura 11. Zonas volcánicas activas de los Andes del Norte (ZVN). Modificado de Hall y Wood (1.985).

En el Sur de los Andes Centrales, en Argentina, algunos investigadores han reportado, como en Colombia, la estrecha relación que existe entre la mayoría de calderas y los sistemas de fallas de rumbo de dirección Norte-Oeste-Sur-Este, tales como la Zona de Falla Lipez, la Olacapato-El Toro, Archibarca y Culampaja, que definen cuatro importantes zonas de volcanismo transversal (Viramonte et al, 1990). La coincidencia entre la ubicación espacial de las zonas volcánicas transversales y el vulcanismo insinúa la existencia de una relación genética entre el fallamiento y la formación de calderas en los Andes Centrales (Riller et al, 2.001) (Figura 12).

2.9 Unidades litológicas de la zona de estudio

En este numeral se sintetiza la información geológica de la zona de estudio atendiendo a la composición de las rocas del basamento y a los aspectos fundamentales y conocidos sobre la Formación Popayán, con especial énfasis en las ignimbritas, ya que constituyen el objetivo de la investigación.

Acatando las recomendaciones discutidas en el I Simposio de Geología Regional de la Cordillera Central, realizado en 1.988 (Maya y González, 1.995) se emplea la nomenclatura propuestas por Orrego y París (1.999) para las rocas del basamento

En el mapa anexo, Mapa Geológico en bolsillo (Anexo 6) se presentan los detalles cartográficos de las rocas del basamento según Orrego y París (1.999). Este mapa fue modificado durante el desarrollo del presente trabajo sólo en los aspectos relacionados con la cartografía de los depósitos volcánicos del Neógeno Cuaternario.

2.9.1 Rocas del Complejo Arquía (Pz?ecm)

Afloran al Oriente de la ciudad de Popayán y corresponden a una secuencia de rocas metamórficas que constituyen el núcleo de la Cordillera Central, denominadas Complejo Arquía por McCourt et al. (1.984).

Estas rocas están limitadas por las fallas Silvia-Pijao y Cauca-Almaguer, y en el departamento del Cauca afloran al Oeste de las cordilleras Central y Centro-Oriental. Este complejo está constituido por anfibolitas, metagabros, serpentinitas, esquistos verdes, esquistos cuarzo micáceo, esquistos grafiticos y cuarcitas.

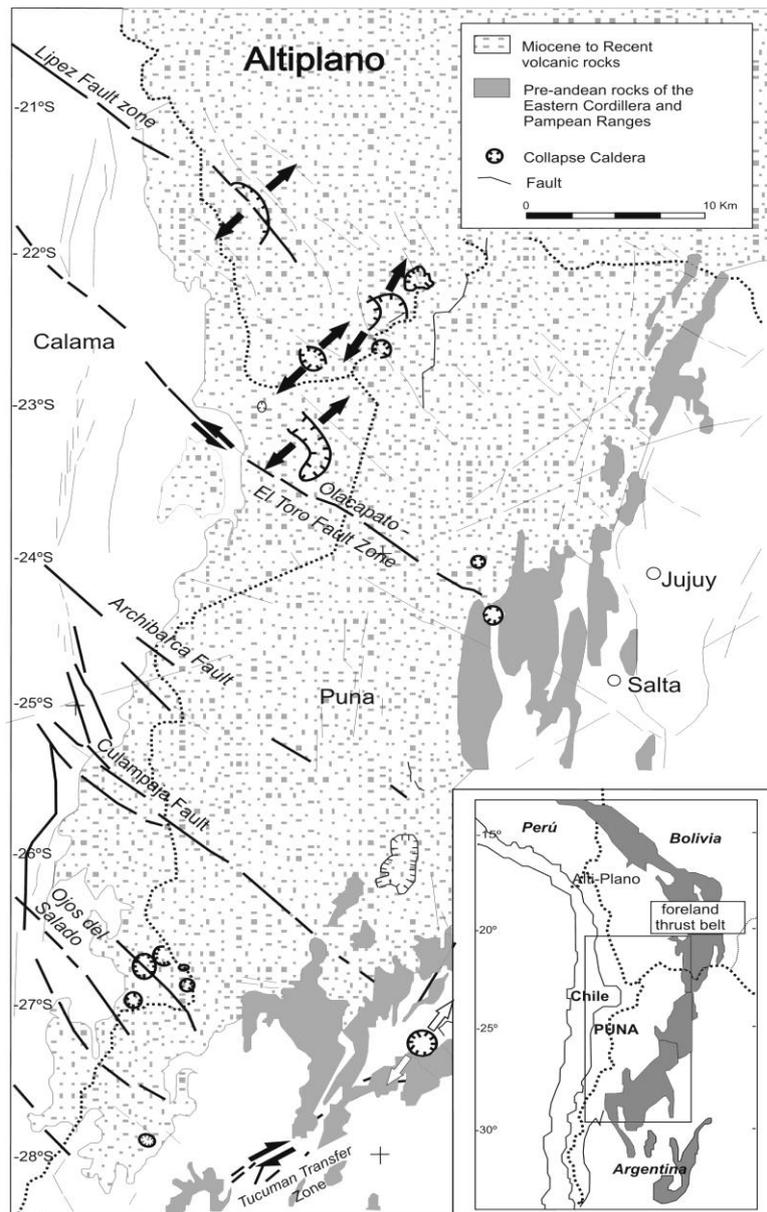


Figura 12. Principales zonas volcánicas transversales de los Andes Centrales. (Modificado de Riller et al, 2.001).

La fusión de estas rocas en presencia de fluidos acuosos se inicia a 660°, mientras las rocas basálticas necesitan mayores temperaturas casi hasta 800 C°. En condiciones secas los rangos de temperaturas de fusión son considerablemente elevados esto es 1.000C° para granitos y 1.120C° para basaltos (Bucher y Frey, 1.994).

2.9.2 Rocas basálticas, ultrabásicas y los sedimentos asociados de edad mesozoíca

En la zona de estudio, estas rocas afloran en la parte central (Anexo 6) y constituyen el basamento de la Formación Popayán en este sector. Son rocas de dominio oceánico que fueron acrecionadas al continente al occidente de la Falla Cauca-Almaguer (McCourt et al, 1.984). Nivia (1.993) agrupó todas las rocas de afinidad oceánica y las denominó Provincia Litosférica Oceánica Cretácica Occidental (PLOCO).

Forman parte de este grupo la secuencia de rocas **Ofiolíticas (Kiot) de la Tetilla** que conforman un cinturón de rocas ofiolíticas y afloran al Noroeste de la ciudad de Popayán, delimitado al Oeste y al Este por las fallas río Hondo y La Tetilla respectivamente, de dirección Noreste; ambas pertenecientes al sistema Cauca-Almaguer (Orrego y Paris, 1.991). En esta secuencia ofiolítica se encuentran wehrlitas, gabros, diques básicos, lavas almohadilladas, esporádicas y delgadas intercalaciones de brechas básicas y sedimentitas, con un incipiente grado de metamorfismo (Orrego y París, 1.999) Estos son fragmentos ofiolíticos discontinuos asociados a zonas tectónicas o de “melange” generados en dorsales meso-oceánicas y emplazados posteriormente como fragmentos de corteza oceánica o manto superior durante la convergencia de placas (Nivia, 1.989).

Al grupo de rocas de edad Mesozoico pertenecen, igualmente, las rocas del **Complejo Barroso-Amaine (Kiba)**. Este nombre fue propuesto por Orrego y Mosquera (1.989).

En el área de trabajo, las rocas de esta unidad, afloran como una faja longitudinal localizada al occidente del municipio de Morales, la cual bordea las márgenes del río Cauca a la altura de la vereda Pan de Azúcar.

2.9.3 Rocas del Grupo del Cauca (Pgech, Pgog, Pgof, Ngme)

Estas rocas afloran en la parte Noroeste de la zona de estudio. De acuerdo al mapa de Orrego y París (1.999) a este grupo pertenecen las rocas sedimentarias a las que inicialmente Hubach (1.957) dio el nombre de Grupo del Cauca. Orrego (1.975) redefinió el Grupo del Cauca y lo dividió en la Formación Chimborazo (Pgech), Formación Guachinte (Pgog), Formación Ferreira (Pgof) y Formación Esmita (Ngme) del Paleógeno y del Neógeno.

Las rocas de la Formación Chimborazo (Pgech) están constituidas por limonitas, arcillolitas, grauvacas, protocuarcitas, shale carbonáceos y conglomerados polimícticos (Orrego, 1975). Las rocas de la Formación Guachinte (Pgog) son limonitas, arcillolitas, areniscas micáceas, shale carbonáceo y mantos de carbón y las de la Formación Esmita (Ngme) areniscas y shale carbonáceos algunas de las cuales contienen fósiles (Anexo 6).

2.9.4 Intrusivos del Neógeno (Ngi)

En la zona afloran cuerpos intrusivos asociados a fallas del sistema Cauca-Romeral y del sistema Cali- Patía. Los cuerpos intrusivos La Yunga (Ngy), Palacé (Ngpa) y PISOJÉ (Ngp) se cartografían en este trabajo; los del Rosario-Seguengue (Ngr) y Santa Ana (Ngsa) aparecen cartografiados en Orrego y Paris (1.991).

El intrusivo de la Yunga presenta cuarzos bipiramidales de tamaño centimétrico, que generalmente se encuentran esparcidos sobre el suelo cuando el feldespatos presente en el intrusivo se meteoriza a arcillas blancas.

2.9.5 Formaciones volcano sedimentarias del Neógeno

Bajo esta denominación se agrupan las formaciones de Galeón y de Popayán. Si bien la Formación de Galeón no aparece cartografiada en la zona, es importante mencionarla por su carácter volcánico y volcano sedimentario y su estrecha relación topográfica, geológica y geomorfológica con la Formación Popayán. La evaluación de los documentos existentes sobre esta formación es importante en el contexto del vulcanismo del Suroeste colombiano.

La Formación de Galeón fue definida por Grosse (1.935), quien le asigna una edad Neoterciaria; Hubach (1.957), la denominó Formación Pedregal y finalmente se denominó Formación de Galeón (van der Hammen, 1.955 en De Porta, 1.974).

Esta unidad al igual que la Formación Popayán, está constituida por intercalaciones de depósitos de flujos piroclásticos y capas de rocas volcano-sedimentarias que reflejan periodos alternos de actividad y de quietud volcánica. Para Grosse (1.935), y Hubach (1.957), la Formación de Galeón es anterior a la Formación Popayán.

Como Formación Popayán se denomina en la literatura actual, los depósitos volcánicos que Grosse (1.935), describió y que ocupan la altiplanicie de Popayán. Este autor las denominó Capas Túficas de Popayán y de acuerdo con su

nomenclatura estratigráfica son del Eocuaternario. Es importante retomar la descripción de Grosse (1.935) de estos depósitos: “Está compuesta por tobas volcánicas y aglomeráticas, cuyas bombas son principalmente andesíticas, las cuales se encuentran intercaladas con tobas volcánicas ordinarias, sin bombas ni lapilli con bancos de capas de cascajo”; Grosse asegura que en el altiplano de Popayán las tobas están muy meteorizadas.

Alvarado y Hubach (1.932) agruparon estos depósitos en el denominado Piso de Popayán. Ellos proponen que la base de esta unidad al Oeste, al Sur y al Noroeste de la ciudad de Popayán está constituida por un “derrame de andesitas”, y el techo lo constituyen tobas rosadas con gran abundancia de guijarros arrojados por volcanes; y concluyen que sobre el Piso de Popayán se deposita una greda tobácea de color ocre a pardo.

Posteriormente, Hubach y Alvarado (1.934) definen el piso de Popayán y fue finalmente Hubach (1957) quien agrupa estos depósitos y define la Formación Popayán. Para este autor la Formación Popayán se divide, en la planicie de Popayán, en dos miembros: el Superior con un espesor de hasta 100 m, que consta de gredas pardas con pocos troncos silificados y proviene de la meteorización de cenizas finas; y el inferior, con un espesor de hasta 500 m, formado de cenizas, aglomerados, conglomerados y bloques con un banco de lava andesítica al Sur y al Norte de Popayán. Por estar afectada levemente por el orogenismo, se juzga que su edad sea del Plioceno, admitiendo que la parte superior puede ser del Pleistoceno.

En estudios posteriores (Orrego, 1.975; Orrego et al, 1.976, James et al, 1.986; Schmitt, 1.983) se realizan descripciones estratigráficas y algunos análisis geoquímicos sobre la Formación Popayán, pero no presentan una columna estratigráfica detallada. Torres et al (1.992) y Torres (1.997), redefinen la Formación Popayán y proponen dividirla en 7 miembros, los que de base a techo son Polindara, Julumito, Sombrerillo, Cajibío, Palacé, La Venta y Caldon.

En la Figura 13 se sintetiza la información estratigráfica publicada sobre la Formación Popayán que resume los trabajos arriba mencionados, y en el mapa geológico en bolsillo (Anexo 6) los detalles de su distribución, siendo ello uno de los resultados de esta investigación en la que se detalla no sólo los aspectos estratigráficos, petrográficos y geoquímicos de las ignimbritas de la Formación Popayán, sino también los aspectos cartográficos. Tales aportes se sintetizan en el Capítulo 3.

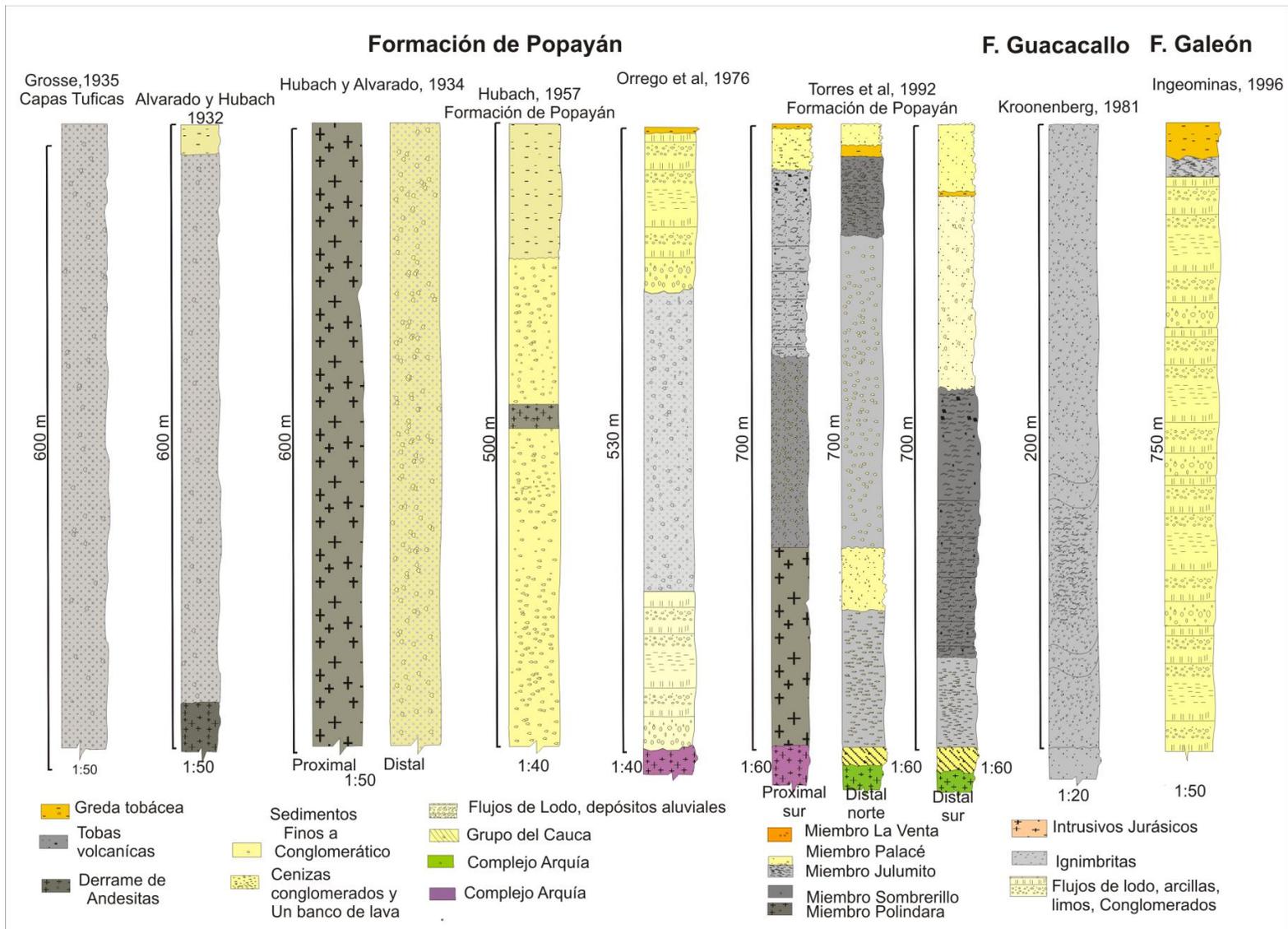


Figura 13. Síntesis de la información estratigráfica de las formaciones Popayán y Guacacallo.

2.9.6 Depósitos de flujos de escombros volcánicos

En el piedemonte de la Cordillera Central de Colombia, en el departamento del Cauca, la actividad volcánica asociada a los centros de emisión actuales han generado una sucesión de depósitos volcánicos que se interdigitan con depósitos de flujos de escombros torrenciales, de desglaciación y fluviales, los cuales se extienden de Este a Oeste, a lo largo de los cauces de los ríos Cauca, Blanco, Cofre y Palacé. Estos depósitos cubren en parte las secuencias ignimbríticas de la Formación Popayán.

En el mapa geológico, en bolsillo (Anexo 6), se delimitaron con mayor detalles los depósitos de flujo de escombros volcánicos del río Palacé, depósitos de flujos de escombros volcánicos del río Piendamó (Q_{spi}), depósitos de flujos de escombros volcánicos del río Cajibío (Q_{fca}), depósitos de flujos de escombros volcánicos de los ríos Blanco y Cofre (Q_{fbc}), depósitos de flujos de escombros volcánicos de Calibío (Q_{fclb}) y los depósitos de flujo de escombros de San Isidro (Q_{fsi}). Descripciones de los depósitos del río Palacé y San Isidro se encuentran en Arango y Gómez (1.990) y Torres et al (1992). Los demás depósitos de flujos de escombros volcánicos fueron delimitados en este estudio con base en características geomorfológicas, pero no se definieron detalles estratigráficos.

2.9.7 Depósitos aluviales y depósitos de vertiente (Q_{alca}, Q_{al}, Q_t, Q_v)

En el mapa geológico aparecen cartografiados el cono aluvial del río Cauca (Q_{alca}), las llanuras de inundación y las terrazas aluviales de los ríos Cauca, Palacé y Molino (Q_{al}, Q_t); así como los depósitos de vertiente (Q_v).

Es notoria la forma triangular vista en planta y el bajo grado de disección del cono aluvial del río Cauca, descrito durante los estudios de microzonificación sismo geotectónica de Popayán (Orrego et al, 1.992).

3. Resultados

En este capítulo se sintetizan los resultados de esta investigación. Los estudios geomorfológicos se especifican en el numeral 3.1; ellos permitieron definir la extensión de las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán y delimitar la Meseta de Popayán y por lo tanto elaborar su cartografía. Son la base para la discusión del Capítulo 4.

En el numeral 3.2, se detalla la estratigrafía, petrografía y geoquímica de las secuencias ignimbríticas de la Formación Popayán.

3.1 Geomorfología

A partir de una primera definición de macro unidades geomorfológicas se presentan los resultados de la cartografía geomorfológica a escala 1:100.000 (ver mapa geomorfológico en bolsillo, Anexo 7) y se realizó la descripción de unidades geomorfológicas. Los aspectos relacionados con la definición de las edades de las unidades geomorfológicas con base en la disección, se discuten en el Capítulo 1.

La Meseta de Popayán, con una extensión de 1.532 km² y una altura aproximada de 1.750 msnm, se extiende desde el Dintel de Suarez-Santander al Norte (Stutzer, 1.934), hasta la Cuchilla de El Tambo al Sur (Acosta, 2.003), donde el escarpe casi vertical de la meseta es la divisoria de las cuencas de los ríos Cauca y Patía (Ver mapa en bolsillo). La Meseta es un rasgo geomorfológico a nivel regional localizada en el flanco Occidental de la Cordillera Central, hecho ya mencionado por Alvarado y Hubach (1.932).

Los estudios geomorfológicos realizados en este trabajo permitieron delimitar la Meseta de Popayán, a escala 1:100.000, y definir cuatro macrounidades geomorfológicas (Figura 14). Fallas longitudinales y transversales de dirección, especialmente, ENE, NW y E-W y los cauces de los ríos Hondo, Palacé y Piendamó, controlados estructuralmente por estas fallas, son los límites de las grandes unidades, denominadas de sur a norte como Unidad del Sector Sur o de los ríos Hondo- Cauca (SS-RHC), Unidad del Sector Centro-Sur o del río Blanco (SCS-RB), Unidad del Sector Centro-Norte o de los ríos Palacé-Piendamó (SCN-PP) y Unidad del Sector Norte o de los ríos Piendamó-Ovejas (SN-PO). En la Figura 14 se presentan las macrounidades geomorfológicas de la Meseta de Popayán, las fallas y los lineamientos que las controlan.

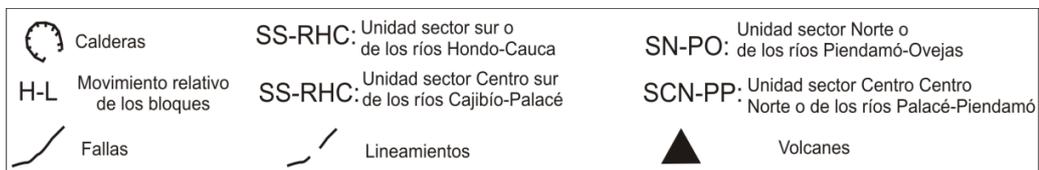
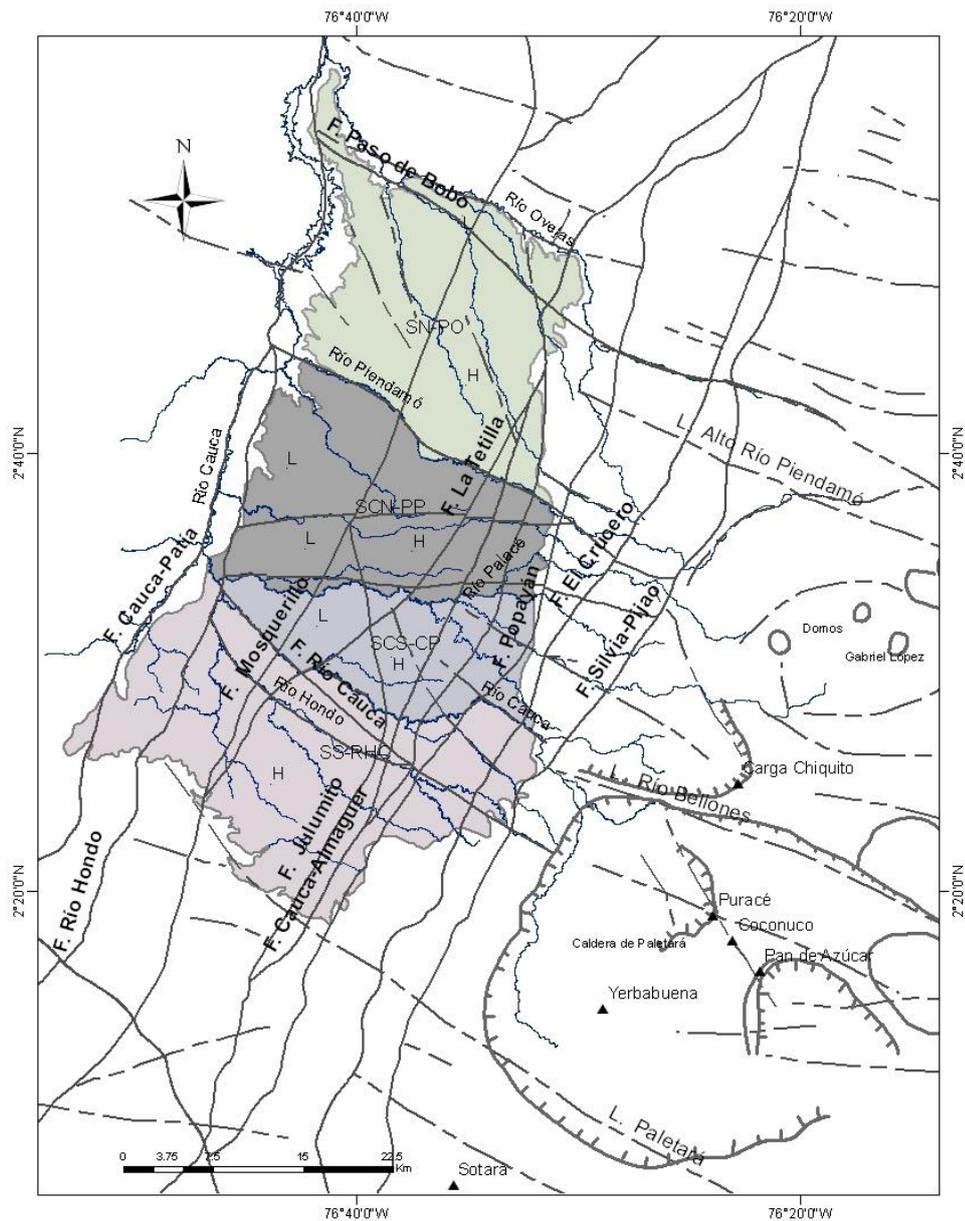


Figura 14. Macrounidades geomorfológicas de la Meseta de Popayán. Se presentan los sistemas de fallas de dirección Norte Este (NE) y las fallas de dirección Norte Oeste (NW) y Este- Norte-Este (ENE), los movimientos relativos de las diferentes fallas y las estructuras volcánicas localizadas en el eje de la Cordillera Central, en el departamento del Cauca.

Es evidente el control estructural de las fallas de dirección Norte-Oeste (NW) y Este-Norte Este (ENE) que permiten su delimitación, así como también su intervención en la definición de los patrones de drenaje. Estas grandes unidades geomorfológicas pueden corresponder a bloques levantados y hundidos de la Meseta de Popayán y/o abanicos interdigitados de los ríos Cauca, río Hondo, río Blanco, río Palacé y río Piendamó.

El origen de las fallas que delimitan las macrounidades geomorfológicas muy seguramente está asociado a fracturas del basamento de dirección NW y ENE, reactivadas durante el Cuaternario y documentadas por Hall y Wood (1.985); París et al. (1.992); INGEOMINAS (2.000); Acosta et al. (2.004); Velandia et al. (2.005); Rovida y Tibaldi (2.005); Acosta et al. (2.007).

Desde el punto de vista genético, las cuatro macrounidades geomorfológicas son de carácter agradacional producto de la depositación continua de depósitos de flujos de ignimbritas y de flujos de escombros volcánicos y volcano torrenciales en el Neógeno Cuaternario.

El drenaje de la macrounidad Cauca-Río Hondo es dendrítico denso y subparalelo en dirección NW; en la macrounidad río Blanco sobresale el patrón de drenaje subparalelo con dirección ENE y NW con variaciones de drenaje dendrítico y radial. En las macrounidades Palacé-Piendamó y Piendamó-Ovejas el drenajes es subparalelo y distributivo con direcciones Norte-Oeste y Este-Noreste. La disección de los ríos que delimitan las macrounidades es alta pero sus afluentes presentan una disección media a baja.

Los cortes geológicos con sus respectivas interpretaciones (Anexo 1) constituyen una herramienta de apoyo muy útil para la delimitación cartográfica de las macrounidades y unidades geomorfológicas de la Meseta de Popayán. En los cortes se identificaron, sobre la Meseta de Popayán, por lo menos, tres diferentes niveles, localizados a 1.600, a 1.700 y 1.800 m.s.n.m. Hacia el extremo Oriental se observa un cuarto nivel ubicado a 1.900 m.s.n.m. La información de los cortes permite concluir que algunos de estos niveles son producto de la actividad de las fallas del sistema Mosquerillo-La Tetilla, pertenecientes al Sistema de Fallas del Cauca-Romeral y a depósitos de flujos de escombros volcánicos ubicados en el borde Este de la meseta.

A continuación se describen las unidades geomorfológicas de la Meseta de Popayán, muchas de las cuales corresponden a abanicos sucesivos de flujos de escombros

volcánicos. Los detalles cartográficos se presentan en el mapa a escala 1:100.000 del anexo 7 (En bolsillo). Todas las unidades geomorfológicas son de acumulación, y sobre ellas han actuado procesos erosivos.

3.1.1 Unidad de montañas con laderas largas y rectas (Mllr)

Esta unidad ocupa un área de 21 km² y está labrada sobre las rocas básicas y ultrabásicas del Complejo Ofilítico de La Tetilla, sobresaliendo los cerros de La Tetilla y La Peña. Se localiza entre la traza de las fallas de Mosquerillo - La Tetilla y Julumito, ambas de dirección NE.

Esta unidad corresponde a un bloque levantado con respecto al nivel base de la Meseta de Popayán que constituyó una barrera para los depósitos de los flujos que originaron el abanico de Cajibío.

La unidad tiene forma semicircular, con un patrón de drenaje radial de densidad media y disección alta. Los valles de los ríos son en forma de V cerrada, observándose trayectos levemente sinuosos. Las pendientes de las montañas tienen inclinaciones que varían entre 10 y 25° y son largas y rectas.

Su alta disección permite definir una edad relativa, siendo ella la unidad geomorfológica más antigua de la meseta de Popayán.

3.1.2 Unidad de colinas aisladas (Ca)

Esta unidad ocupa un área de 6 km². Está labrada sobre ignimbritas de las secuencias de la quebrada El Charco-río Hondo y del río Cauca cubiertas por cenizas volcánicas de caída.

Las colinas aisladas se localizan al SE de la Meseta de Popayán y sobresalen en el paisaje. Su altura promedio sobre el nivel base de la Meseta de Popayán es entre 5 y 10 m. Las cimas son redondeadas; las laderas son cortas y tienen un drenaje incipiente con poca disección.

Por su similitud con pequeños peñones, su origen se asocia a levantamiento y/o hundimiento de bloques de secuencias ignimbríticas que han generado a su vez procesos denudativos, siendo éstos muy marcados.

El avanzado estado de los procesos de erosión en esta unidad permite suponer una edad relativamente menor que la de la unidad (Mllr).

3.1.3 Unidad de cañones y valles (Crca, Crpa, Ceb, Crpipe; Vrpt, Vrca, Vrh, Vrpa)

Se agrupan en este numeral una serie de cañones estrechos y profundos y valles estrechos y amplios labrados, la mayoría sobre las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán.

Los principales cañones de la Meseta de Popayán de sur a norte son los de los ríos Cauca, Palacé, Blanco y Piendamó-La Pedregosa, y los principales valles los de los ríos Pescador-Tunía, Calibío, Palacé y Hondo. Los valles y cañones están casi siempre controlados por fallas transversales de dirección NW y ENE.

Los Cañones de los ríos Piendamó, la Pedregosa y Cauca son los que presentan mayor disección, su profundidad es superior a los 50 m. La génesis de estos cañones y valles está estrechamente relacionada con actividad tectónica de la región.

3.1.4 Unidad bloque de Piendamó (Bpi)

Se denomina unidad bloque de Piendamó al conjunto de escarpes y colinas de cima plana que se recuestan contra el piedemonte Oeste de la Cordillera Central. Esta unidad sobresale en el paisaje de la meseta de Popayán, siendo muy evidente a la altura de la localidad de Piendamó.

La unidad bloque de Piendamó está controlada estructuralmente por las fallas de Piendamó y Popayán de dirección ENE, que la levantan con respecto al nivel de la Meseta de Popayán. Su origen se relaciona con la actividad de estas fallas.

3.1.5 Unidad de escarpes (Ess, Esn, EsfPo, Esfpi)

En esta unidad se agrupan los escarpes de origen tectónico localizados al Norte, Este y Sur de la Meseta de Popayán, los cuales se denominan en forma general escarpes (Es) y se les asigna una tercera sigla que permite su localización. Estos escarpes constituyen los límites de la Meseta de Popayán y ocupan un área de 120 km².

La unidad de escarpes al sur (Ess) ocupa un área de 13 km²; está construida sobre las ignimbritas y los flujos de escombros de las formaciones Popayán y Galeón. La secuencia de escarpes constituye la divisoria de aguas de las cuencas de los ríos Cauca y Patía, rasgo geomorfológico importante conocido como el Dintel ó la Cuchilla de El Tambo (Acosta, 2.003), el cual constituye un mirador hacia el valle del Patía, localizado al sur de la meseta.

La unidad geomorfológica denominada escarpes al norte (Esn) bordea el río Ovejas y ocupa un área aproximada de 44 km². Está labrada sobre rocas intrusivas y depósitos de flujos de escombros.

La unidad geomorfológica de escarpes asociados a las fallas Piendamó y Popayán (Espí y Espo) se desarrolla sobre las secuencias de ignimbritas y se localiza en el piedemonte Oeste de la Cordillera Central. Su origen se asocia con la actividad de las fallas de Piendamó y Popayán, que se evidencia por el levantamiento del piedemonte Oeste de la Cordillera Central y hundimiento relativo de la Meseta de Popayán.

3.1.6 Unidad de Colinas de cimas redondeadas (Ccr)

Esta unidad es la de mayor extensión de la Meseta de Popayán. Ocupa un área aproximada de 447 km² y está modelada sobre la secuencia de ignimbritas de la quebrada El Charco- río Hondo y sobre la del río Cauca.

El patrón de drenaje es dendrítico denso, con disección moderada; las laderas de las colinas son cortas y convexas y las pendientes son de bajo grado con inclinaciones que varían entre 5 y 10°. Los cauces de los ríos principales tienen una orientación preferencial NW.

La influencia estructural es evidente y es posible diferenciar bloques con levantamientos relativos con respecto a otros, como el que se observa entre el río Hondo y el río Cauca (Anexo 6) en bolsillo.

De acuerdo con su grado de disección y con los procesos erosivos que se observan en esta unidad, su edad debe ser relativamente menor que las anteriores.

3.1.7 Unidad de Superficies onduladas con control estructural (Soce)

Esta unidad ocupa un área de 53 km² y se localiza al Sur de la Meseta de Popayán; el drenaje es paralelo a subparalelo, poco denso, conformado por zanjones y quebradas menores que presentan, a pesar de su escaso caudal, llanuras de inundación extensas que no corresponden con las características hidrológicas actuales.

El origen de esta unidad, seguramente, se relaciona con el control estructural de fallas de dirección NE, NW y ENE.

3.1.8 Unidad del Abanico de escombros volcánicos del río Piendamó (Api)

Este abanico ocupa un área de 210 km² y se localiza al Norte de la Meseta de Popayán; está limitado al Sur por el río Piendamó y al Norte por el río Tunía.

Su patrón de drenaje es subparalelo con variaciones a dendrítico denso, y una tendencia preferencial al Noroeste. La disección es alta y semejante a la de la unidad de colinas de cima plana, aspecto por lo cual es difícil definir la edad relativa entre estas dos unidades.

Como la unidad de colinas de cima plana, está conformada por colinas de tope plano orientadas en dirección N20°W a N80°W y casi norte sur.

3.1.9 Unidad de Colinas de cima plana (Ccp)

La unidad de colinas de cima plana se localiza al Norte de la Meseta de Popayán; tiene un área de 13 km² y está limitada al Sur por el río Tunía y al Norte por el río Ovejas.

Su patrón de drenaje es paralelo a subparalelo pero presenta variaciones locales a dendrítico denso; la disección es alta. El patrón de drenaje tiene un control estructural de dirección Noroeste.

3.1.10 Unidad de Ápices de abanicos sucesivos (Aas)

En esta unidad se agrupan los remanentes de los ápices de los abanicos de escombros que se describen a continuación (Asi, Acab, Acaj, Abcof). Está unidad cubre un área de 105 km² y está localizada en el piedemonte Oeste de la Cordillera Central. Al Oeste está limitada por el escarpe de la falla de Popayán.

El patrón de drenaje es subparalelo con dirección Noroccidental, y el grado de disección es alto. Su edad relativa está relacionada con la edad de los abanicos (Asi, Acab, Acaj, Abcof) y con la actividad de la falla de Popayán.

3.1.11 Unidad del Abanico de escombros volcánicos de los ríos Blanco y Cofre (Abcof)

Esta unidad, con un área de 52 km², limita al Norte con el río Cofre y al Sur con el río Blanco. Tiene forma de abanico, el cual está truncado hacia el piedemonte Oeste de la Cordillera Central por la falla de Popayán, la que enmascara su ápice y genera un escarpe.

Los rasgos geomorfológicos que caracterizan esta unidad son las superficies suavemente onduladas con laderas de longitudes muy cortas y formas convexas. Las pendientes tienen inclinaciones de 1° a 2° y los valles tienen forma de V abierta.

Los drenajes son levemente sinuosos con dirección N30°W y N40°E; su patrón es paralelo a subparalelo, localmente dendrítico, con una disección alta, mayor que la de los abanicos de Cajibío y Calibío.

El origen de esta unidad está asociado con material volcánico retrabajado que fluyó por los cauces de los ríos Blanco y Cofre y se emplazó sobre los depósitos de escombros volcánicos del abanico de Calibío descrito en el numeral 3.1.13.

3.1.12 Unidad del Abanico de escombros volcánicos del río Cajibío (Acaj)

El abanico del río Cajibío ocupa un área cartografiable de 139 km²; está limitado al norte por el río Piendamó y al Sur por el río Palacé.

El drenaje está controlado estructuralmente y tiene una dirección Este-Oeste. La disección es alta y la densidad media. Los lomos que constituyen las divisorias de los drenajes que disectan esta unidad tienen cimas planas orientadas en la dirección del drenaje.

El abanico de escombros volcánicos de Cajibío se depositó sobre el abanico de Piendamó y su disección es mayor que la del abanico de Calibío.

3.1.13 Unidad del Abanico de escombros volcánicos de Calibío (Acab)

Esta unidad, con un área de 73 km², limita al Norte con el cañón del río Palacé, al Noreste con el abanico del río Cofre, al Sur con el abanico de San Isidro y con el cono aluvial del río Cauca, y al Oeste termina abruptamente contra la unidad de montañas con laderas largas y rectas (Mllr) que constituyó una barrera para la distribución hacia el Oeste de estos depósitos.

Se caracteriza por su forma de abanico aluvial con el ápice cubierto por los depósitos del abanico de San Isidro. Su drenaje es denso con tributarios de dirección N60°W en cercanías al río Palacé y N60°W, variando a Este-Norte- Este en proximidades del río Cauca.

La disección del drenaje es media, mayor que la observada sobre la superficie del cono aluvial del río Cauca, y esto permite su diferenciación. Presenta tributarios alargados, levemente sinuosos y de una longitud hasta de 7 km.

Los lomos alargados en la dirección del drenaje, y que constituyen las divisorias de aguas tienen pendientes con inclinaciones entre 1° y 2°, forma convexa y cimas redondeadas.

Si se compara la disección de drenaje de este abanico con la de los anteriores, se puede determinar que su edad relativa es menor que la de los abanicos de escombros del río Cajibío, y que la del abanico de los ríos Blanco y Cofre; pero mayor que la del cono aluvial del río Cauca y que el abanico de San Isidro que lo cubre.

3.1.14 Unidad del Abanico de escombros volcánicos de San Isidro (Asi)

Esta unidad ocupa un área de 16 km²; se localiza al Sureste de la Meseta de Popayán, sobre el material del abanico de Calibío, cerca del frente montañoso de la Cordillera Central.

La unidad del abanico de San Isidro posee drenaje paralelo con variaciones a subparalelo poco denso y bajo grado de incisión; se observan capturas de drenaje. Las fallas de El Crucero y Popayán ejercen un destacado control estructural sobre este abanico (Arango y Gómez, 1.990).

Tiene forma cónica con un perfil longitudinal cóncavo; su pendiente es de aproximadamente 5 grados decreciendo desde el ápice, localizado en el cauce del río Cauca en el Este, hasta sus partes más distales al Oeste donde su pendiente es de 1° a 2°. Es una unidad de acumulación.

3.1.15 Unidad del Cono aluvial del río Cauca (Carc)

Ocupa un área de 20 km² y se localiza al sureste de la Meseta de Popayán; sobre ella está asentada la ciudad de Popayán.

Es una superficie con pendientes entre 0° y 10° de inclinación hacia el río Cauca, con forma triangular, disectada hacia el Norte por el cauce principal del río Cauca y hacia el Este controlada estructuralmente por la Falla de Popayán.

Se caracteriza por su forma triangular, su patrón de drenaje subparalelo poco denso y disección muy baja. Su origen es agradacional por acumulación de depósitos aluviales.

3.1.16 Unidad de Llanuras de inundación y terrazas aluviales (LLita)

El área total de la unidad es de 11 km² y en ella se agrupan tanto las terrazas aluviales como las llanuras de inundación asociadas a los cursos de ríos principales y secundarios de la Meseta de Popayán como son los ríos Cauca, Hondo, Ejido, Palacé, Cajibío, Piendamó y Ovejas.

Estos depósitos tienen forma rectangular cuando el cauce de los ríos es recto, y redondeada cuando se relacionan a cauces meandriformes. Presentan superficies horizontales levemente inclinadas hacia el cauce de los ríos. El patrón de drenaje es subparalelo, poco denso y con disección muy bajo. Los anteriores criterios permiten establecer que es la unidad geomorfológica más joven de la Meseta de Popayán.

3.2 Caracterización de las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán

De acuerdo al Mapa Geológico del área de trabajo modificado de Orrego y París (1.991) que se discute en el numeral 3.2.1, se presentan las características estratigráficas, petrológicas, geoquímicas y cronológicas de las ignimbritas de la Formación Popayán. En el Capítulo 4 se abordará el análisis y la discusión de los resultados fundamentada en el marco teórico presentando en el Capítulo 2.

3.2.1 Geología

Rocas del basamento de la Formación Popayán

El Mapa Geológico en bolsillo (Anexo 6), modificado del mapa del INGEOMINAS (1.991), sintetiza los avances que a nivel cartográfico se presentan sobre la extensión de los depósitos de la Formación Popayán y los abanicos que la recubren. Es importante anotar que no se realizaron trabajos sobre las rocas antiguas, ni trabajos estratigráficos de detalle de los abanicos actuales.

Las rocas del Paleozoico afloran como pequeñas ventanas localizadas al oriente de Popayán a lo largo de los cauces de los ríos El Salado, Molino, Cauca y Las Piedras. Por otro lado, las rocas del Cretácico afloran como altos topográficos en las localidades de La Tetilla, La Peña, La Yunga y la Vereda Río Hondo, y en tramos cortos de los cauces de los ríos Hondo, Cauca, Piendamó y Palacé (ver Mapa Geológico en bolsillo, Anexo 6). En resumen, en la zona de estudio el basamento únicamente aflora en un 0.3%.

Sólo en dos sectores recostados al Oeste de la zona de estudio aparecen rocas

sedimentarias del Grupo Cauca que constituyen altos topográficos y conformaron barreras para los depósitos volcánicos de la Formación Popayán.

Formación Popayán

La Formación Popayán, entendida en los términos redefinidos en el numeral 3.2.2 (cf. infra), comprende las secuencias ignimbríticas de la Formación Popayán (Ngpip), los depósitos de flujos de ceniza y bloques (Ngpfc) y los depósitos de flujos de escombros sin diferenciar (Ngpfes). Estos depósitos están cubiertos en la Meseta de Popayán, por cenizas volcánicas de caída, las cuales en los cañones de los ríos están erosionadas. Las secuencias ignimbríticas afloran en las cuencas de los ríos Hondo-Robles, Cauca, Palacé, Piendamó, Pescador y en la Quebrada Sombrerillo.

En la Meseta de Popayán, las secuencias de ignimbritas se extienden desde el piedemonte Occidental de la Cordillera Central hasta el piedemonte Oriental de la Cordillera Occidental y cubren un área de 1.256 km². Los depósitos de flujos de ceniza y bloques (Ngpfc) se localizan principalmente al norte de la Meseta de Popayán, especialmente en las cuencas de los ríos Piendamó y La Pedregosa; su área es de 390 km².

Los depósitos de flujos de escombros (Ngpfes) están localizados al norte de la zona de estudio y son en parte producto del retrabajamiento de depósitos volcánicos; su extensión es de 57 km² y ocupan principalmente los cauces de los drenajes cuyo nacimiento se localiza en la Meseta de Popayán como son la quebrada Carpintero y el río Pescador.

Depósitos de flujos de escombros volcánicos Cuaternarios (?)

En el mapa geológico, en bolsillo (Anexo 6), se delimitaron con mayor detalle los depósitos de flujo de escombros volcánicos del río Palacé, los depósitos de flujos de escombros volcánicos del río Piendamó (Q?fpi), los depósitos de flujos de escombros volcánicos del río Cajibío (Q?fca), los depósitos de flujos de escombros volcánicos de los ríos Blanco y Cofre (Q?fbco), los depósitos de flujos de escombros volcánicos de Calibío (Q?fclb) y los depósitos de flujo de escombros de San Isidro (Q?fsi). Descripciones de los depósitos del río Palacé y San Isidro se encuentran en Arango y Gómez (1.990). Estas unidades fueron delimitadas con base en sus características geomorfológicas, pero no cuentan con detalles estratigráficos.

Depósitos aluviales, terrazas y depósitos de vertiente (Qal, Qt, Qv, Qalca)

Se describen en el numeral 2.9.7.

3.2.2 Estratigrafía de las secuencias ignimbríticas de la Formación Popayán

Durante el trabajo de campo, se levantaron 20 columnas estratigráficas de los depósitos de flujos de ignimbríticas que hacen parte de la Formación Popayán y que se encuentran localizadas en la Meseta de Popayán y en el pie de monte Oriental de la Cordillera Central. Las estaciones de trabajo se denominan quebrada El Charco (PKSW017), ladrillera Vereda Río Hondo (PKSW-084), Cantera Peñalosa (PKSW-084, PKSW-089), Club Campestre sección Sur (PKSW-011), Club Campestre sección Este (PKSW-012), Club Campestre sección Norte (PKSW-013), ladrillera Pueblillo (PKSW-091, PKSW-093), río Palacé (PKSW-104), Quebrada Sombrerillo (PKSW-031-043) y Pisojé Alto Conexpe (PKSW-069) (Ver coordenadas geográficas de las columnas estratigráficas en la Tabla 2, su localización en el Anexo 3, columnas estratigráficas en el Anexo 2 y descripción petrográfica en el Anexo 9).

De acuerdo a las características litoestratigráficas, cartográficas y geomorfológicas de los depósitos de flujos de ignimbríticas de la Formación Popayán descritas en cada estación de trabajo de campo, las columnas estratigráficas se agruparon en las siguientes secuencias ignimbríticas: Secuencia ignimbrítica de la quebrada El Charco-Río Hondo; Secuencia de ignimbríticas del río Cauca; Secuencia de ignimbríticas del río Palacé; Secuencia de ignimbríticas de la quebrada Sombrerillo y Secuencia de ignimbríticas de Pisojé Alto. Igualmente, en cada columna estratigráfica los depósitos de flujos de ignimbríticas se agruparon en unidades que representan eventos de depósitos de flujos ignimbríticos o eventos sedimentarios.

De Sur a Norte, el espesor visible de las secuencias ignimbríticas es variable, presentando espesores de 82 m observados en la estación de la quebrada El Charco, 10 en la ladrillera de la vereda río Hondo, 50 m en la cantera Peñalosa, 54 m en la Quebrada El Cedral, en el Club Campestre a la altura de Popayán, 22 m en la vereda Pueblillo, 40 m en el río Palacé, 25 m en Pisojé Alto en la cantera de Conexpe y 100 m, el máximo visible, en la quebrada Sombrerillo al norte de la zona de trabajo, en el municipio de Morales.

Es importante anotar que en las secciones estratigráficas levantadas en el Sur de la Meseta de Popayán no se observó el contacto inferior de las ignimbríticas y

perforaciones realizadas después del sismo de Popayán de 1983, que alcanzaron profundidades de hasta 170 m no lo reportan (Tenjo et al, 1.983). Por esto se propone el transecto entre la quebrada Sombrerillo y el Crucero de Pan de Azúcar, ubicado en el norte de la Meseta de Popayán, como localidad estratigráfica tipo para la Formación Popayán, dado que en esta localidad la secuencia estratigráfica es la más completa, y se observa el techo y la base de la formación.

Las secciones estratigráficas de las ignimbritas del Club Campestre, donde afloran tres unidades de flujos ignimbríticos constituidos hasta por ocho capas y la de la quebrada El Charco - Río Hondo, constituyen unidades auxiliares de referencia. Para efectos de la descripción y posterior correlación de las unidades diferenciadas en campo, se conserva el número de las estaciones de campo de las secciones estratigráficas.

A continuación se describen de Sur a Norte las características físicas de las secuencias de ignimbritas de cada sector de la Meseta de Popayán y finalmente la secuencia estratigráfica del pie de monte Oeste de la Cordillera Central. En los numerales 3.2.4 y 3.2.5 se discuten las características petrográficas y geoquímicas de estas secuencias y, con base en estas características se realiza la correlación de las secciones estratigráficas de la Formación Popayán (Anexo 2).

De acuerdo a las características macroscópicas se puede concluir que existen dos tipos de depósitos de flujos de ignimbritas, unos de color gris localizados hacia la base y que constituye la unidad I y otros de color rosado ubicados en el techo de las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán, y que integran las unidades II y III. La unidad IV corresponde a eventos sedimentarios conformados generalmente por materiales volcánicos retrabajados. Las cenizas de caída y un suelo color naranja, común hacia el techo de las secuencias, se incluyen en la unidad V. La columna estratigráfica tipo de la Formación Popayán se observa en la Figura 15.

Secuencia de ignimbritas de la Quebrada El Charco - Río Hondo

En la secuencia de ignimbritas de la quebrada El Charco-Río Hondo se agrupan las secciones del Charco-Río Hondo, la de la ladrillera de la vereda Río Hondo y la de la Cantera Peñalosa. En la sección de la quebrada El Charco, localizada sobre la vía que del municipio de Popayán conduce a El Tambo, afloran tres unidades de depósitos de flujos ignimbríticos (I, II y III) con contactos erosivos netos entre ellos, donde se aprecian por lo menos cinco capas. La unidad I o de la base está constituida por tres

capas de ignimbritas densamente soldadas de color gris, con espesores de 50 m, 9 m, 11 m respectivamente (PKSW-017) (Figura 16, Anexo 2).

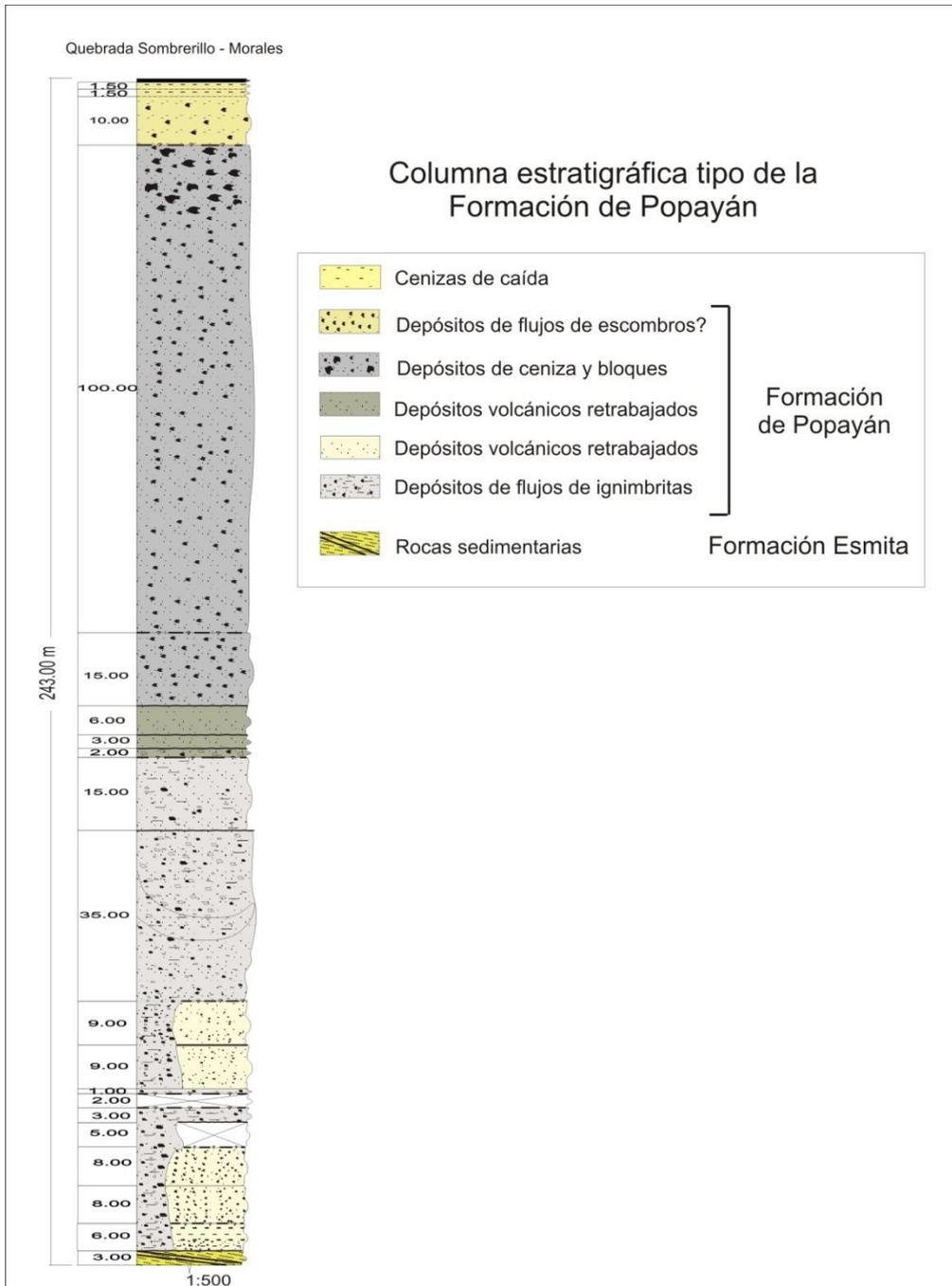


Figura 15. Columna estratigráfica tipo de la Formación Popayán, Morales, Cauca.

Hacia el techo las ignimbritas de la quebrada El Charco-río Hondo están suprayacidas por la unidad II, constituida por depósitos de ignimbritas meteorizada de color gris rosado con un espesor de 6 m, en la que se observa una capa, caracterizada, al igual que las anteriores, por presentar cristales de cuarzo bipiramidal y biotita. La unidad II está recubierta por la unidad de ignimbritas III de color rosado con características de depósito de flujo de escombros (Figura 16, Anexo 2). Su matriz es limo-arcillosa de color gris rosáceo, donde macroscópicamente se observan cristales de biotita, magnetita, plagioclasa, cuarzo y líticos de ignimbritas y lavas en la mayoría de los casos también meteorizados. Su espesor es de aproximadamente 6 m.



Figura 16. Imágenes de la secuencia de depósitos de flujos de ignimbritas de la quebrada El Charco-Río Hondo. Municipio de El Tambo, Cauca

Sobre estas unidades (I, II y III) se localiza la unidad IV que corresponde a un evento sedimentario, constituido aproximadamente por 3 m de arcillas de color blanco grisáceo finamente estratificadas.

Finalmente el techo de la secuencia de la quebrada El Charco-río Hondo, unidad V, está constituida por 3 cm de espesor de ferricreta, la cual está recubierta por aproximadamente 4 m de material volcánico estratificado, alterado, con restos de pómez de tamaño lapilli; sobre estos se desarrolla un suelo con un espesor promedio de 0.70 m, laterítico, derivado de cenizas de caída volcánica que posiblemente marca un cambio climático importante en el área y define el final de la depositación de las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán (Torres et al, 2009). Este suelo y las cenizas de caída que recubren la secuencias ignimbríticas son comunes, no solo en la secuencia de la quebrada de El Charco-Río Hondo, si no en toda la Meseta de Popayán (Figura 16, Anexo 2).

En la sección estratigráfica denominada la ladrillera de la vereda de río Hondo (PKSW-084) (Figura 16, Anexo 2), perteneciente a la secuencia de ignimbritas de la quebrada El Charco-río Hondo, sólo afloran dos unidades de flujos de ignimbritas con un espesor total visible aproximado de 10 m. Las ignimbritas inferiores son de color gris (unidad I), y las superiores de color gris rosáceo, unidad II, constituida por dos capas.

En la sección de la cantera Peñalosa (PKSW-089), también perteneciente a la secuencia de ignimbritas de la quebrada El Charco-río Hondo, se pueden identificar cuatro unidades de flujos de ignimbritas, con un espesor total de 50 m. Las ignimbritas de la base constituyen la unidad I conformada por dos capas. Son masivas, tienen espesores de 15 m, y 20 m respectivamente, presentan estructuras columnares y diaclasamiento. En muestra de mano, las rocas son de color gris y presentan pómez y vidrio negro vesículado y aplanado que permite definir su soldamiento. (Figura 16, Anexo 2). Sobre éstas se depositan 10 m de ignimbritas de color gris claro, casi blanco sin soldamiento (unidad II). Hacia el techo de la sección (unidad III) se observa un depósito de 5 m de espesor, de color rosado altamente meteorizado, que por su aspecto de flujo de escombros parece corresponder a depósitos de ignimbritas retrabajadas, y se caracteriza por el alto porcentaje de líticos (30%). Recubriendo el techo de la secuencia de Peñalosa sobresalen cenizas volcánicas de caída de 5 m de espesor (unidad V).

Secuencia de ignimbritas del río Cauca

Los depósitos de ignimbritas del río Cauca afloran especialmente en la ciudad de Popayán, al Oeste de ella y a lo largo y ancho del cauce del río Cauca. En esta secuencia se incluyen las secciones estratigráficas levantadas en la quebrada El Cedral (Club Campestre de la ciudad de Popayán), en Pueblillo y en el río Palacé.

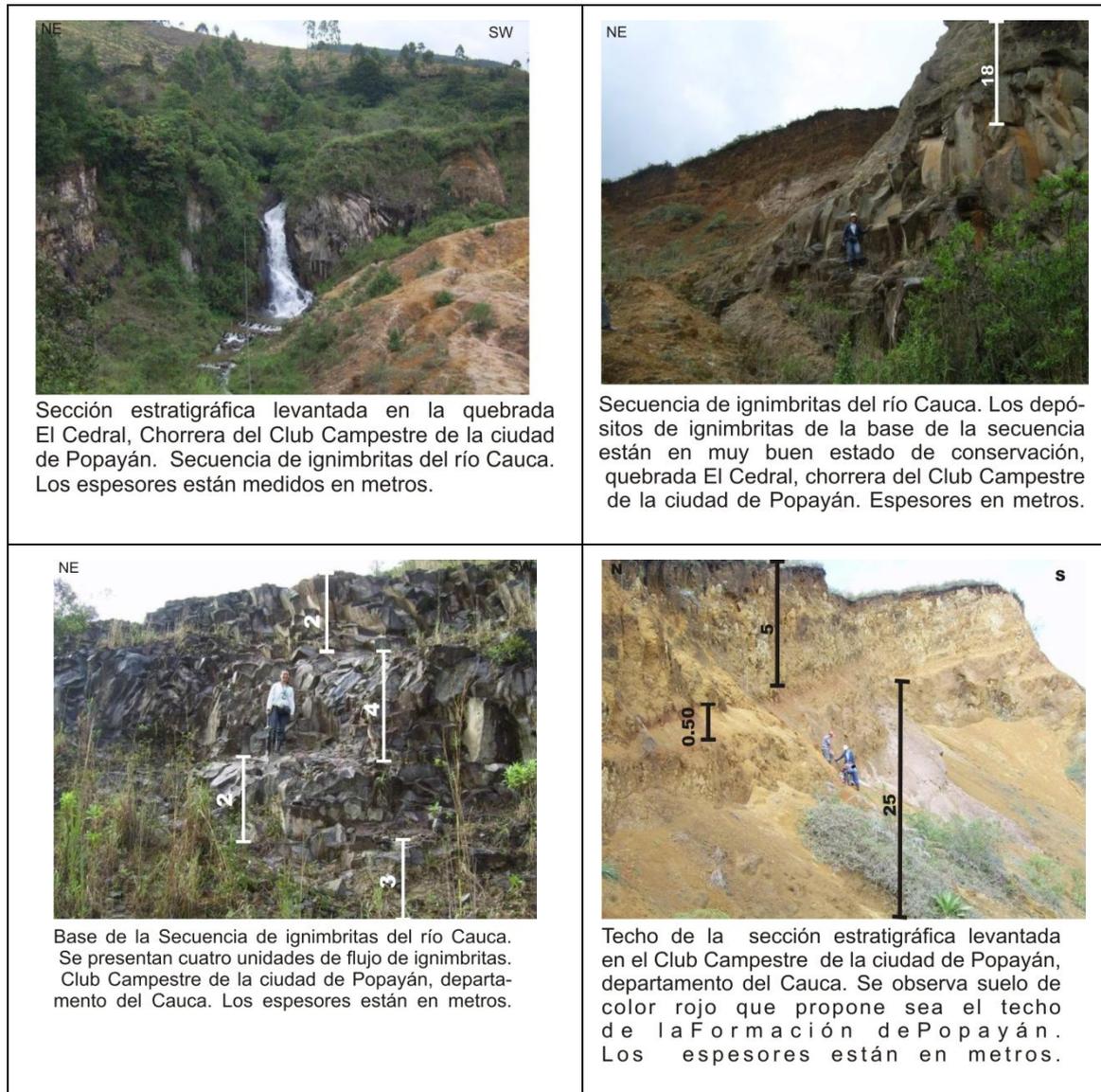


Figura 17. Imágenes de los afloramientos de los depósitos de las Secuencia de ignimbritas del río Cauca. Quebrada el Cedral. Municipio de Popayán, departamento del Cauca

En la quebrada El Cedral, en alrededores del Club Campestre de la ciudad de Popayán, se levantaron tres secciones estratigráficas, nombradas como secciones Sur (PKSW-011), Este (PKSW-012) y Norte (PKSW-013) de la quebrada El Cedral. Esta quebrada es uno de los lugares donde están mejor expuestos los depósitos de flujos de ignimbritas de la Formación Popayán.

La sección estratigráfica quebrada El Cedral Sur (PKSW-011) exhibe tres unidades de flujos de ignimbritas (I, II, III) conformadas por ocho capas de un espesor total visible de 54 m y contactos netos entre ellas (Figura 17, Anexo 2).

Hacia la base se aprecian cuatro capas de depósitos de flujos de ignimbritas de la unidad I (Anexo 2), hacia el techo de esta unidad afloran dos capas de ceniza de depósitos de oleadas piroclásticas de 10 cm y un 1 cm de espesor que luego se acuñan, ellas separan claramente las ignimbritas de la unidad I de las de la II (Anexo 2).

Macroscópicamente los depósitos de flujos de ignimbritas de la Unidad I tienen color gris oscuro a medio; su textura es porfirítica con una matriz vítrea lustrosa, y su aspecto en muestra de mano es muy parecido al de una lava. Las obsidias se encuentran aplanadas, formando lentes de 1 cm de longitud y a veces sólo se observa una raya de color negro. Esta deformación de la obsidiana se denomina textura “fiamme” y es una importante señal del soldamiento de los depósitos de ignimbritas. Estas ignimbritas tienen una meteorización incipiente, y en los sectores donde el grado de meteorización es mayor se genera un material tamaño arena medio de color gris oscuro en el que aún se conservan los cristales de biotitas y plagioclasas.

Cuando se asciende en la secuencia de depósitos de flujos de ignimbritas de la sección Sur de la quebrada El Cedral, el grado de meteorización de las ignimbritas aumenta; es por esto que las ignimbritas del techo de la unidad I son arenos arcillosas, pero en algunos sectores se conserva su textura porfirítica. Macroscópicamente, presentan una matriz de color gris rosáceo y blanco con fenocristales de biotita, plagioclasas, pómez y algunos líticos.

En forma concordante y sobre la unidad I reposan los depósitos de ignimbritas de la unidad II también meteorizadas; con un espesor total visible de 18 m.

Cubriendo las ignimbritas anteriores, reposan ignimbritas retrabajadas similares a depósitos de flujos de escombros (unidad III). Estas son de color rosado, matriz

soportado, arcillosas, con un alto contenido de biotitas, las que todavía se conservan a pesar del alto grado de meteorización. Se observan líticos con diámetros entre 0.1 mm y 0.9 mm muy alterados.

Hacia el techo de las anteriores ignimbritas se encuentra un depósito de arcillas de color blanco correspondiente a un evento sedimentario (unidad IV), y finalmente, y recubriendo todas las unidades anteriores se presentan las cenizas de caída de la unidad V. Hacia la base de esta unidad se aprecia un suelo de 0.50 m de color anaranjado, arcilloso, de amplia distribución en el área de estudio.

La sección estratigráfica Norte de la quebrada El Cedral es similar a la sección Sur; presenta tres unidades de flujo (I, II, III) pero la base (unidad I) está constituida por cinco capas de depósitos de flujos de ignimbritas y no se observa los depósitos de oleadas piroclásticas que en la sección estratigráfica Sur separan la unidad I de la unidad II (Anexo 2).

La sección estratigráfica El Cedral Este, la conforman cuatro capas de depósitos de flujos de ignimbritas (unidad I), correlacionables con los depósitos de flujo de la base de las secuencias Sur y Norte (Anexo 2).

En la localidad de Pueblillo (PKSW-091, PKSW-093), se levantaron dos secciones estratigráficas. La nombrada como Pueblillo, está conformada por tres unidades de depósitos de flujos de ignimbritas con un espesor total visible de 12 m. correspondientes a las unidades I y II. Se encuentran meteorizadas, son de color gris rosáceo pero se pueden identificar cristales de plagioclasas y de biotitas. Cubriendo estas ignimbritas se encuentra la unidad III constituida por ignimbritas muy meteorizadas con características similares a las de un depósito de flujo de escombros.

Suprayaciendo éste depósito se encuentra un paquete de aproximadamente 4 m de espesor total de material altamente meteorizado perteneciente a las unidades IV y V, constituido por arcillas blancas hacia la base, seguido por un depósito de color amarillo donde se observan relictos de pómez, por un suelo rojo con un espesor de 20 cm y cenizas de caída con un espesor de 2.20 m.

En la ladrillera de Pueblillo se levantó la otra sección estratigráfica, donde afloran las unidades I y II cuyo espesor visible es de 20 m. Sobre estas unidades se encuentran 2 m de ceniza volcánica de caída meteorizada.

Secuencia de ignimbritas del río Palacé

La secuencia de ignimbritas de Palacé está constituida por tres unidades de depósitos de flujos de ignimbritas con un espesor visible de 15 m. En el cauce del río Palacé, conformando un cañón de por lo menos 25 m de profundidad, se encuentra el resto de la secuencia de depósitos de flujos de ignimbritas.

Macroscópicamente estos depósitos presentan textura porfirítica, con matriz afanítica y fenocristales de plagioclasa, biotita, pómez con textura “fiamme”, y fragmentos líticos. Las estructuras columnares son comunes (Figura 18).



Figura 18. Secuencia de ignimbritas del río Palacé. Vía Popayán-Totoró. Municipio de Popayán, departamento del Cauca.

Secuencia de ignimbritas de la quebrada Sombrerillo

La sección estratigráfica de la quebrada Sombrerillo es la más representativa de la Formación Popayán en la Meseta de Popayán, por esto se propone como columna estratigráfica tipo de la Formación Popayán. En esta sección inclusive afloran rocas sedimentarias del Paleoceno sobre las cuales reposan los depósitos de ignimbritas de la base de la Formación Popayán. La columna estratigráfica de la localidad de Sombrerillo tiene un espesor total de 243 m (Figura 19, Anexo 2).

Las rocas del Paleoceno sobre las cuales se depositan, discordantemente, las secuencias volcánicas de Sombrerillo, son capas de arcillolitas limosas fosilíferas, pertenecientes a la Formación Esmita de edad Mioceno.



Figura 19. Depósitos de flujos de ignimbritas de la secuencia de la quebrada Sombrerillo. Municipio de Morales, departamento del Cauca.

La secuencia de flujos de ignimbritas de la base, en la quebrada Sombrerillo tiene un espesor de 100 m y allí están representadas las unidades I, II y III. Macroscópicamente estas ignimbritas son similares a las secuencias de ignimbritas de la quebrada El Charco-río Hondo y a la de los ríos Cauca y Palacé.

Recostado a las ignimbritas y hacia la base de la secuencia, se observa un paquete de aproximadamente 21 m de espesor de rocas volcánicas retrabajadas; constituido de base a techo por capas de arenas, arcillas con hojas fósiles, depósitos de flujos de escombros y capas de ceniza y pómez también retrabajados (Anexo 2). Hacia el techo de las ignimbritas y también recostadas a ellas se depositan nuevamente paquetes de material volcánico retrabajado con un espesor de 11 m, conformados principalmente por depósitos de flujos de escombros (Anexo 2). Estos depósitos representan eventos sedimentarios asociados a periodos de quietud volcánica y muy posiblemente a represamiento de los drenajes por acción de los flujos de ignimbritas.

Suprayaciendo los depósitos volcánicos retrabajados y las ignimbritas se encuentran depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y bloques con un espesor total de 130 m los cuales se distribuyen ampliamente al Norte de la Meseta de Popayán. Estos depósitos piroclásticos están constituidos por una matriz de ceniza (76%), tamaño arena media a gruesa, de color gris con vestigios de pómez donde sobresalen fragmentos líticos volcánicos de tamaño bloque, grava y arena gruesa. Los bloques principalmente volcánicos (24%) son subangulares a subredondeados, y tienen diámetros que alcanzan hasta 3 m, y megabloques con textura "jigsaw".

Hacia el techo de la secuencia, y cubriendo los depósitos de flujos de ceniza y bloques, se presenta un depósitos de color naranja arcilloso, con fragmentos líticos, de un espesor de 10 m.

Sobre los depósitos anteriores se encuentra un suelo de color rojo con un espesor de 1.5 m y en el techo de la columna estratigráfica cenizas de caída alteradas de color amarillo ocre con 1.4 m de espesor. Todos los depósitos están dispuestos sub horizontalmente.

Secuencia de ignimbritas de Pisojé Alto

La secuencia de ignimbritas de la vereda Pisojé Alto se localiza en la margen Sur del río Cauca, en la cantera de propiedad de Conexpe S.A. hacia el piedemonte Este de la Cordillera Central, bordeando la Meseta de Popayán. En esta secuencia las

ignimbritas se depositan sobre lavas andesíticas basálticas (Figura 20, Anexo 2); sin embargo el contacto no es claro.

La sección estratigráfica de Pisojé Alto (PKSW-069) tiene un espesor visible de aproximadamente 85 m (Anexo 2). En la base se presentan 3 depósitos de lavas andesíticas basálticas con espesores de 25 m, 25 m y 10 m respectivamente que descansan sobre rocas metamórficas del Complejo Arquía.



Figura 20. Imágenes de la secuencia de ignimbritas de Pisojé Alto, cantera Conexpe. Municipio de Popayán, departamento del Cauca.

Estas lavas se caracterizan por presentar abundantes xenolitos basálticos. Sobre ellas reposan los depósitos de la secuencia de ignimbritas de Pisojé cuyo espesor es de 25 m. Macroscópicamente las ignimbritas tienen textura porfirítica y matriz afanítica de color gris verdoso en la que sobresalen diminutos fragmentos de obsidiana y vesículas.

3.2.3 Caracterización petrográfica de las secuencias de ignimbritas

La petrografía de las secuencias de los depósitos de flujos de ignimbritas de la Formación Popayán se detalla en los Anexos 8 y 9 de Fichas petrográficas. En general, las características petrográficas de los depósitos de flujos piroclásticos son muy similares y las pocas diferencias existentes se relacionan con las texturas que presentan los fragmentos de vidrio en la matriz, la cual, en las secciones analizadas, representa hasta casi el 90% del volumen total. Inmersos en la matriz se observan cristales de cuarzo, plagioclasa y biotita fracturados y fragmentados, proceso que ocurre durante la erupción.

Las secciones delgadas analizadas corresponden a las muestras de los depósitos de flujos de ignimbritas con menor grado de meteorización que generalmente son los de la base de las secuencias.

A continuación se resaltan las características petrográficas principales de la matriz y de los cristales constituyentes de las secuencias de los depósitos de flujos de ignimbritas de la quebrada El Charco-río Hondo, río Cauca, río Palacé, Sombrerillo y Pisojé Alto.

Matriz. Las muestras de las secuencias de los depósitos de flujos de ignimbritas se caracterizan por presentar de un 70% a un 87% de matriz, la que está constituida por fragmentos de vidrio “shards” isotrópicos, de color rosado o café muy pálido, y cristalitos de cuarzo, plagioclasa y biotita.

Los fragmentos de vidrio tienen formas “cusplate” y “platy” (Figura 21) propias de erupciones magmáticas explosivas (Fisher y Shminke, 1.984). En ellos todavía se reconocen las paredes de las burbujas de gas reventadas. Comúnmente presentan textura “fiamme” caracterizada por la deformación de los fragmentos de vidrio que se evidencia, entre otros, por el redondeamiento de sus bordes. La deformación de los fragmentos de vidrio es notoria en las secciones donde el vidrio está rodeando los

cristales de cuarzo y plagioclasa, debido a que el vidrio aparece achatado en el contacto con estos cristales (Figura 21).

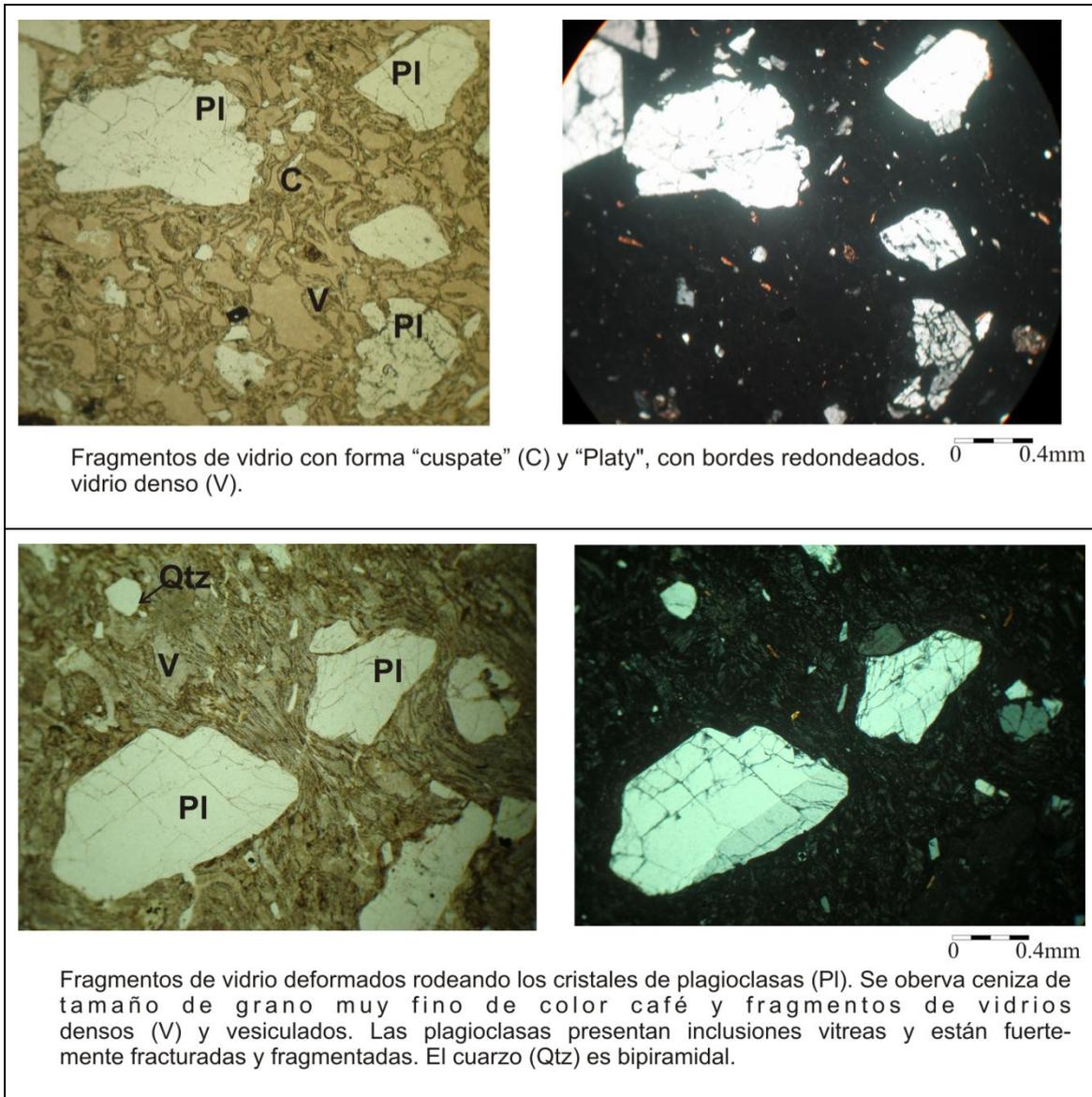


Figura 21. Detalles petrográficos de la matriz de los depósitos de ignimbritas de la Meseta de Popayán.

En las secciones delgadas se observan diferentes tipos de fragmentos vítreos: fragmentos de vidrio denso de color rosado pálido con un tamaño que varía entre 0.5 y 3 mm; fragmentos de vidrio bandeado de color rosado pálido con bandas de vidrio y vesículas con un tamaño que varía de 1.5 a 3.2 mm; fragmentos de vidrio de color negro con textura "fiamme" con un tamaño entre 0.6 y 1.2 mm; fragmentos de vidrio de un tamaño de 0.8 a 1.2 mm de color rosado pálido, redondeados, con una o dos

vesículas esféricas en su interior; fragmentos de vidrio blanco, pómez, con diferentes grados de vesicularidad y fragmentos de vidrio de tamaño ceniza de color café, que rellena los espacios entre los fragmentos de vidrio y los cristales, y en ocasiones las vesículas (Figura 22)

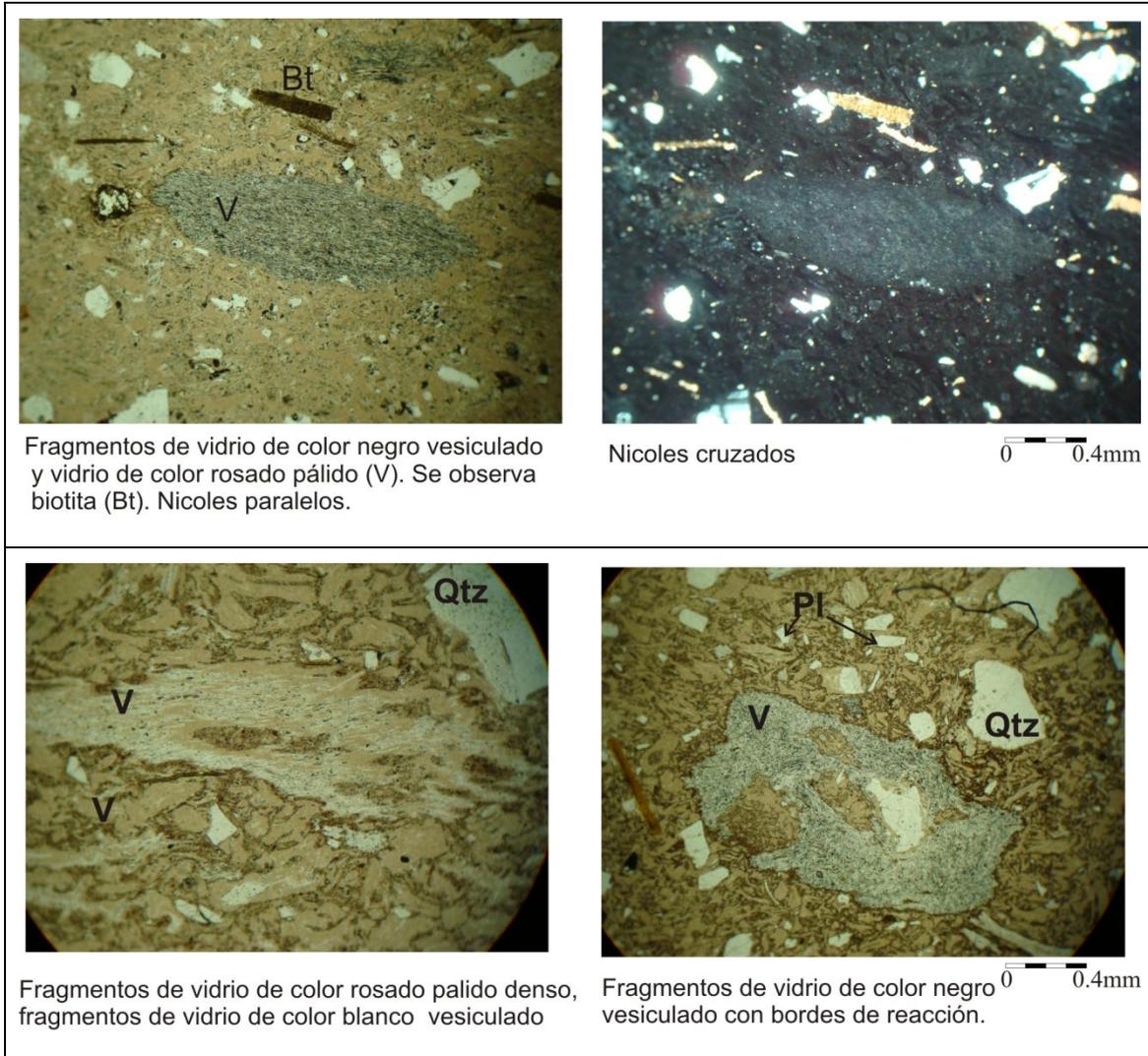


Figura 22. Detalle petrográfico de los diferentes tipos de vidrio que se observan en las ignimbritas de los depósitos de la Meseta de Popayán

Comúnmente se observa que los fragmentos vítreos aplanados tienen una orientación preferencial presentando una laminación fina. Ellos envuelven a los cristales de cuarzos, de plagioclasas y de biotitas y en ocasiones, se puede deducir que el flujo vítreo, ahora la matriz, los envolvió y los giró.

En las secciones delgadas de las secuencias de ignimbritas de la quebrada El Charco-Río Hondo y Palacé los fragmentos de vidrio de la matriz tienen textura esferulítica (Figura 23). Las esferulitas son el resultado de la devitrificación de vidrio natural a altas temperaturas, constituyendo agregados cristalinos generalmente de feldespatos alcalinos y polimorfos de sílice (Lofgren, 1.970; Mcphiel et al, 1.993; Vernon, 2.004; Watkins et al 2.008). En las muestras analizadas, este proceso se manifiesta por la presencia de hilos y agujas muy finas con birrefringencia de los bordes hacia el interior.

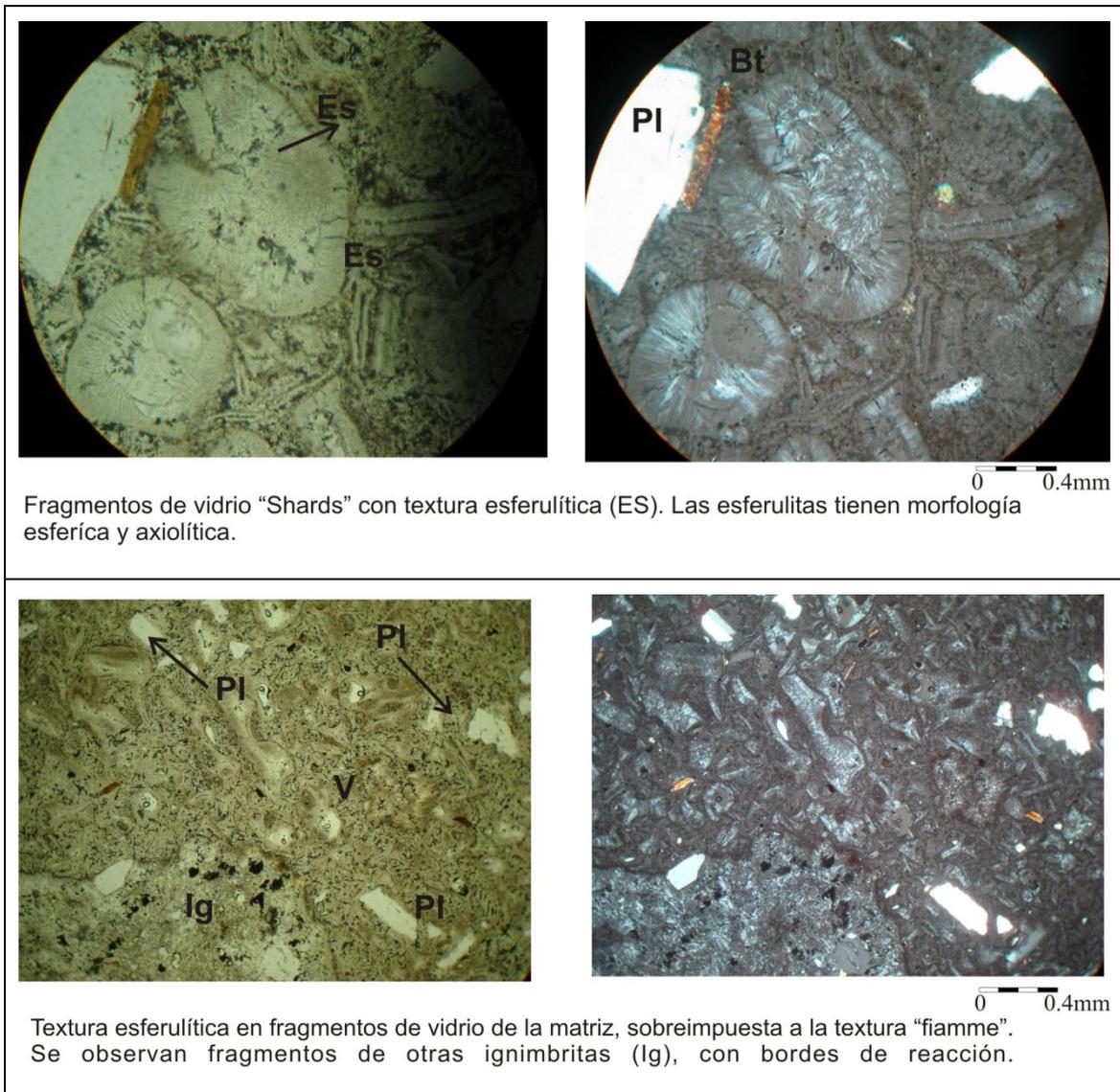


Figura 23. Detalle de fragmentos de vidrio con textura esferulítica.

En los núcleos de los fragmentos de vidrio de mayor tamaño se conserva vidrio isotrópico.

Es normal que la textura esferulítica se genere sobre la textura "fiamme" (Figura 23). Las esferulitas presentan colores café claro a oscuro debido a la oxidación. Las formas son esferoidales, axiolíticas y de abanico (Figura 23). Su tamaño varía de 0.20 a 0.70 mm y su empaquetamiento es denso.

Cristales de Cuarzo. Los cristales de cuarzo constituyen entre el 1 y el 5% del volumen total. Son subhedrales y en muchos casos bipiramidales; algunos tienen sus aristas redondeadas. Se encuentran fracturados y fragmentados y soldados a los fragmentos de vidrio, lo que reafirma el carácter piroclástico de las rocas. Sus tamaños varían entre 0.2 y 1.30 mm y entre 3.80 y 14.00 mm. Es común observar cristales de cuarzo con bahías de disolución y cavidades rellenas de fragmentos de vidrio (Figura 24).

Cristales de plagioclasa. Los cristales de plagioclasa son euhedrales y subhedrales y representan entre el 5 y el 11% del volumen total; su composición varía desde oligoclasas a andesinas con An_{15-30} . Las maclas Albita y Albita Carlsbad son comunes. En las secciones de algunas muestras de las secuencias de depósitos de flujos piroclásticos del Charco-Río Hondo y la quebrada Sombrerillo (PKSW084a, PKSW038a) se aprecian microlitos de sanidina con macla Carlsbad.

El tamaño de los cristales de plagioclasa varía entre 0.30 y 5.30 mm, pero se observan plagioclasas con tamaños mayores que varían entre 6.70 y 8.20 mm, como sucede en los depósitos de flujos de ignimbrita de la Cantera Peñalosa (PKSW089a, PKSW089b, PKSW089c) y del río Palacé (PKSW104a). Es común observar plagioclasas con bahía de disolución e inclusiones vítreas.

Cristales de biotita. Los cristales de biotita se encuentran en un porcentaje de 1 y 5% del volumen total. Su forma es acicular y tabular; algunas son subhedrales y su tamaño varía entre 0.10 y 2.20 mm.

Los cristales de biotita presentan bahías de reacción, inclusiones vítreas y reemplazamiento de opacos (Figura 22)

Minerales accesorios. Además de los cristales de cuarzo, plagioclasa y biotita en las secciones delgadas analizadas, se observan opacos que rellenan las fracturas y

vesículas; en algunas muestras alcanzan porcentajes hasta del 5 %, como ocurre en la cantera Casas Viejas (secciones PKSW087b*, PKSW087c).

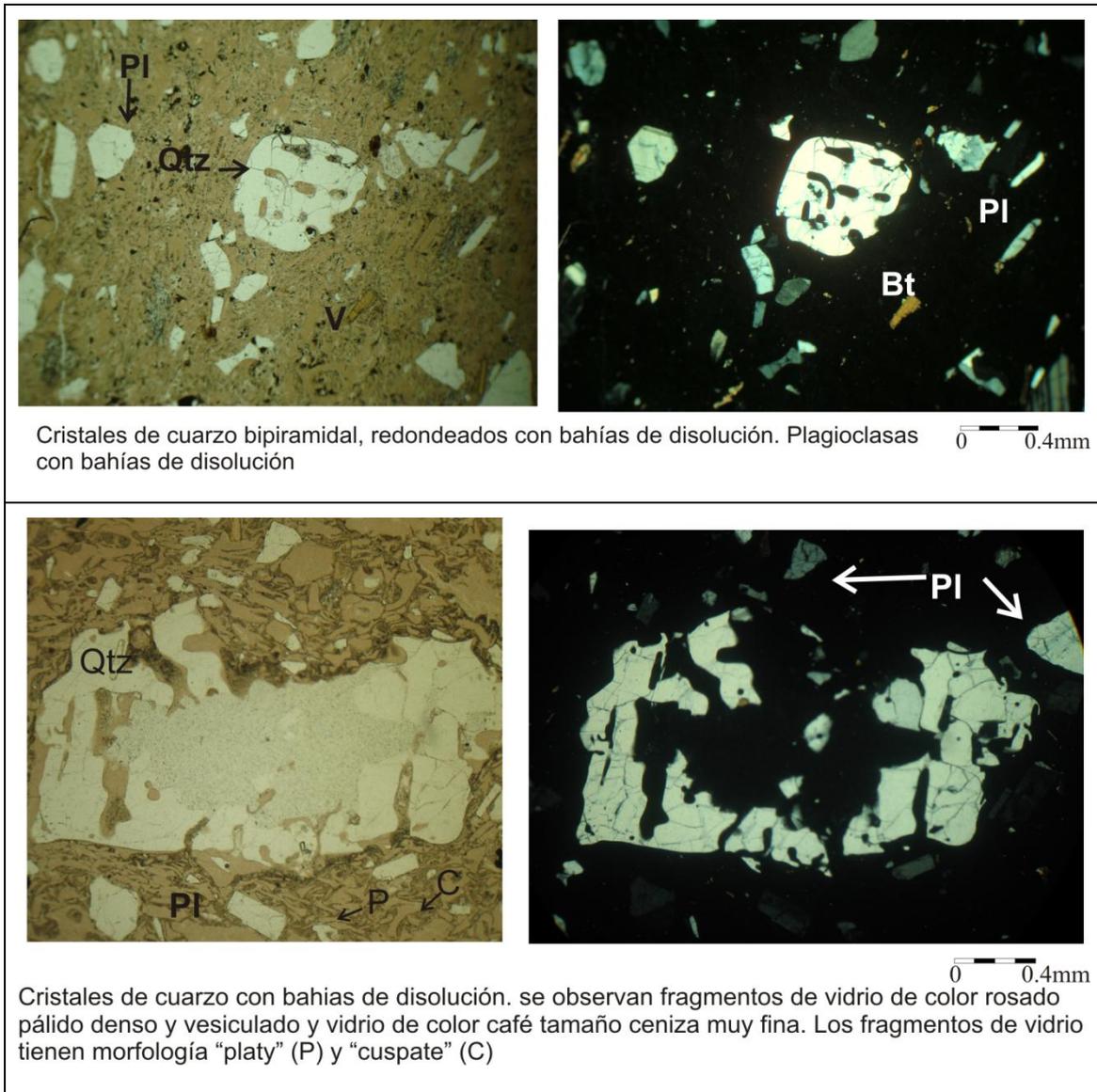


Figura 24. Detalle de cristales de cuarzo con bahías de disolución.

En las secciones delgadas de los depósitos de ignimbritas de la secuencia de la quebrada Sombrerillo y del Charco-río Hondo (secciones PKSW038a, PKSW080a, PKSW089f) se observan unos pocos cristales de hornblendas de color verde pálido. El mineral accesorio común es el circón.

Se presentan fragmentos líticos (1-7%) de rocas metamórficas, intrusivas y de ignimbritas. También son comunes las vesículas (1-8%).

En la Figura 25 (Diagrama de Streckessen, 1.978) se muestra la clasificación de las secuencias de ignimbritas de acuerdo a su composición mineralógica, con base en la cual se clasifican como fenoandesitas basálticas y fenodacitas.

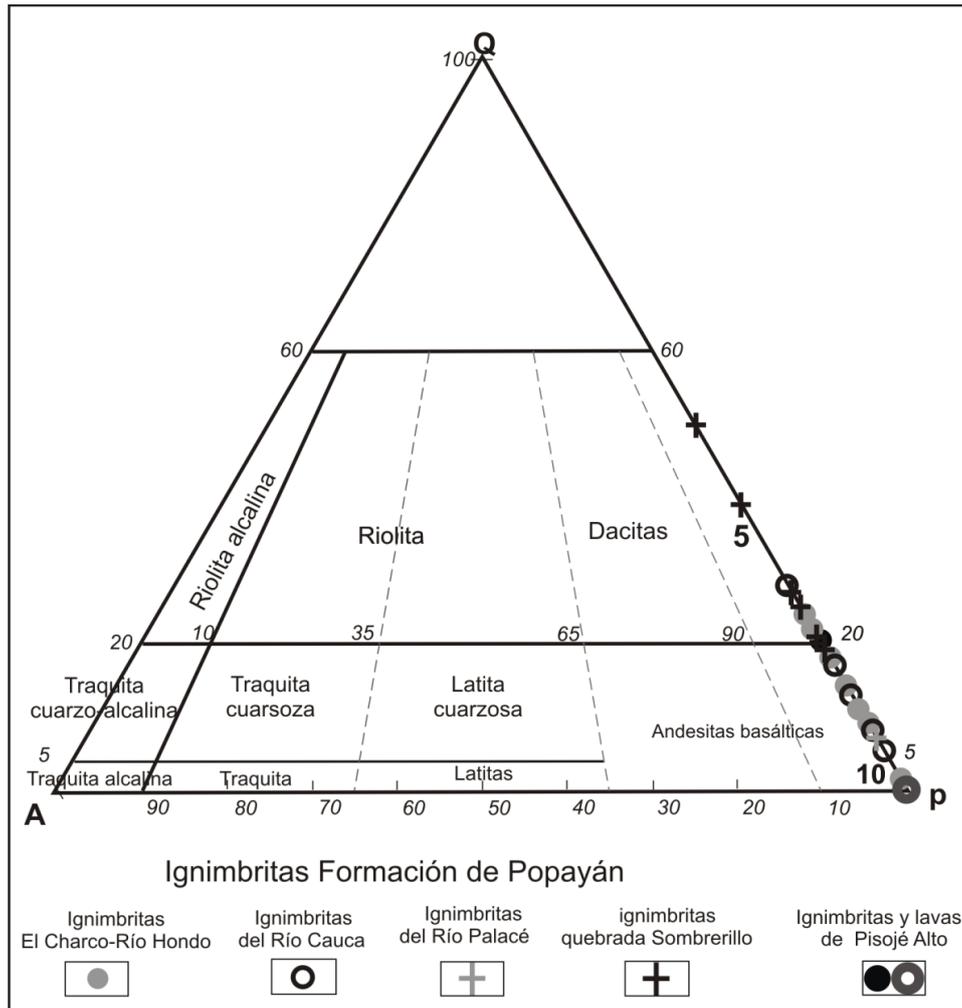


Figura 25. Clasificación Modal QAP de las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán y de las ignimbritas y las lavas de Pisojé Alto de acuerdo a Streckeisen (1978).

3.2.4 Caracterización geoquímica de las ignimbritas

Un total de 20 muestras fueron analizadas en los laboratorios de INGEOMINAS Bogotá (Tablas 4 y 5). La ubicación de las muestras se puede observar en los Anexo 3, 4 y 5). Los detalles metodológicos fueron descritos en el capítulo 1.

Los volátiles tales como H₂O, CO₂ y S son normalmente incluido en los análisis de elementos mayores (Rollison, 1993) y en algunas ocasiones se determinan por "ignition" encontrando el valor "*loss on ignition*" (L.O.I) (Lechler y Desilets, 1.987). Este valor indica el grado de meteorización química, alteración hidrotermal o procesos metamórficos. De acuerdo a las técnicas usadas en los laboratorios de INGEOMINAS los valores menores de 1% son aceptables.

Como se observa en la Tabla 4 el tenor de agua en las muestras analizadas es inferior a 0.5 % con excepción de la muestra PKSW017c con casi 1% de agua, que indica una mayor hidratación asociada posiblemente a procesos de meteorización química.

De acuerdo al cálculo de la norma CIPW (Tabla 6) se pueden agrupar las secuencias de ignimbritas en dos conjuntos. Uno correspondiente a las ignimbritas de la Formación Popayán localizadas en la Meseta de Popayán y cuyo arreglo mineral está constituido por cuarzo (32.6%- 44.4%), ortoclasa (21.2%- 24.3%) y albita (31%-41%), como minerales esenciales y apatito (1%- 7%), circón (0.3%-0.4%), ilmenita (0.14%- 0.19%), Hematita (0.7%- 1.3%), rutilo (0.1%- 0.2%), hipersteno (0.4%- 0.7%) como accesorios. El otro grupo (PKSW016a, PKSW069a, c, d), localizado en el piedemonte Oeste de la Cordillera Central, Pisojé Alto en la cantera Conexpe, que presenta un arreglo mineral un tanto diferente comparativamente con el primer grupo. En este conjunto el porcentaje de ortoclasa (13.8%-16.3%) y de cuarzo (13.9%-14.3%) disminuye significativamente y el contenido de anortita (18.8%-16.3%) y el de hipersteno (7.5%-7%) aumenta y aparece el diópsido (0.3%-3.5%).

El arreglo de minerales que arroja la norma CIPW coincide con el definido en la petrografía; sin embargo existen diferencias en el contenido de feldespato potásico ya que petrográficamente solo se alcanzan a reconocer algunos cristales de éste mineral, por lo tanto su porcentaje petrográficamente es más bajo que el calculado por la norma CIPW.

Las tendencias composicionales de los elementos mayores de las secuencias de depósitos de flujos de ignimbritas son muy similares, sin embargo es claro que las ignimbritas de la Formación Popayán en la Meseta de Popayán presentan contenidos de SiO₂ que varían entre 72.4 y 76% y por el contrario los valores de SiO₂ de las ignimbritas de Pisojé Alto, en la cantera Conexpe se encuentran entre 60.4 y 61.4%.

Tabla 4. Concentraciones de los elementos mayores en forma de óxidos.

| MUESTRAS | SiO2 | TiO2 | Al2O3 | Fe2O3 | MnO | MgO | CaO | Na2O | K2O | P2O5 | LOI |
|-----------------|-------------|-------------|--------------|--------------|------------|------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| PKSW011a | 73.72416 | 0.21725 | 12.68299 | 1.27478 | 0.07761 | 0.18274 | 0.70089 | 4.15950 | 3.99458 | 2.94542 | 0.04007 |
| PKSW011d | 73.97684 | 0.20123 | 12.91641 | 0.93421 | 0.06490 | 0.20003 | 0.56263 | 4.48543 | 4.04460 | 2.35235 | 0.26137 |
| PKSW012a | 73.35370 | 0.25088 | 13.07195 | 0.94609 | 0.07250 | 0.21613 | 0.70145 | 3.96006 | 4.11853 | 3.16834 | 0.14037 |
| PKSW013a | 74.30575 | 0.25192 | 12.74599 | 0.69094 | 0.06500 | 0.15026 | 0.56350 | 3.94943 | 4.19634 | 2.93992 | 0.14095 |
| PKSW016b | 61.38524 | 0.80056 | 16.24711 | 5.44629 | 0.10328 | 2.88481 | 5.87570 | 4.12422 | 2.43290 | 0.63990 | 0.05999 |
| PKSW017b | 75.90920 | 0.21737 | 12.87940 | 1.08918 | 0.05177 | 0.16622 | 0.56102 | 4.28340 | 3.90018 | 0.84201 | 0.10024 |
| PKSW017c | 73.60296 | 0.23358 | 13.98505 | 1.34418 | 0.05166 | 0.23219 | 0.41984 | 3.45156 | 3.57837 | 2.14042 | 0.96019 |
| PKSW038a | 73.14244 | 0.18345 | 13.22321 | 1.72951 | 0.09036 | 0.24867 | 0.83931 | 3.63869 | 3.68516 | 3.15921 | 0.05999 |
| PKSW049a | 74.78186 | 0.16661 | 13.39930 | 1.18522 | 0.03869 | 0.29812 | 0.69876 | 4.03913 | 3.87414 | 1.31841 | 0.19976 |
| PKSW069a | 60.34621 | 0.58821 | 15.80031 | 6.61147 | 0.11708 | 3.00711 | 5.35678 | 4.25084 | 2.33015 | 1.06794 | 0.52389 |
| PKSW069c | 60.82376 | 0.70141 | 16.07938 | 6.24072 | 0.10342 | 2.60639 | 4.90288 | 4.31860 | 2.76173 | 1.10128 | 0.36042 |
| PKSW069d | 60.79816 | 0.75120 | 16.26170 | 6.16656 | 0.10337 | 3.06994 | 5.32089 | 3.97954 | 2.62797 | 0.86064 | 0.06004 |
| PKSW080a | 72.82886 | 0.20162 | 13.32234 | 1.32485 | 0.09104 | 0.25053 | 0.70467 | 4.18192 | 3.99185 | 2.92101 | 0.18130 |
| PKSW080b | 73.06526 | 0.16611 | 13.17075 | 1.32402 | 0.09000 | 0.23117 | 0.69665 | 4.10749 | 3.86246 | 3.02719 | 0.25890 |
| PKSW080c | 72.32646 | 0.26856 | 13.49932 | 1.39548 | 0.09095 | 0.26697 | 0.84477 | 4.35413 | 3.73336 | 3.13950 | 0.08050 |
| PKSW084a | 75.06085 | 0.21678 | 13.22208 | 1.12909 | 0.06454 | 0.21549 | 0.55949 | 4.47387 | 4.05815 | 0.67977 | 0.31989 |
| PKSW087c | 73.21539 | 0.24967 | 13.38635 | 1.06995 | 0.07730 | 0.19855 | 0.55847 | 4.34460 | 3.84636 | 2.73406 | 0.31931 |
| PKSW089c | 73.55840 | 0.25011 | 13.22109 | 1.22904 | 0.09035 | 0.23205 | 0.69931 | 4.27141 | 3.88927 | 2.39902 | 0.15993 |
| PKSW090a | 73.48534 | 0.20047 | 13.05723 | 1.14549 | 0.09052 | 0.23250 | 0.70066 | 4.23911 | 3.76403 | 2.84429 | 0.24036 |
| PKSW104a | 75.52381 | 0.30115 | 13.07633 | 1.20452 | 0.07770 | 0.18294 | 0.70168 | 4.89427 | 3.57622 | 0.42125 | 0.04012 |

Tabla 5. Concentraciones de los elementos menores.

| MUESTRAS | SiO2 | V | Cr | Co | Ni | Cu | Zn | Rb | Sr | Zr | Ba | Pb |
|-----------------|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| PKSW011a | 73.72416 | 6.00 | 6.00 | 4.00 | 2.00 | 2.00 | 36.00 | 113.83 | 112.85 | 155.06 | 1863.98 | 1.20 |
| PKSW011d | 73.97684 | 2.00 | 1.00 | 6.00 | 2.00 | 1.00 | 20.00 | 114.24 | 126.63 | 154.04 | 2004.91 | 1.60 |
| PKSW012a | 73.35370 | 1.00 | 1.00 | 4.00 | 2.00 | 2.00 | 22.00 | 110.52 | 113.70 | 153.03 | 2030.52 | 1.60 |
| PKSW013a | 74.30575 | 2.00 | 1.00 | 4.00 | 2.00 | 1.00 | 16.00 | 133.82 | 134.41 | 175.50 | 1844.41 | < 1 |
| PKSW016b | 61.38524 | 98.00 | 18.00 | 14.00 | 14.00 | 46.00 | 38.00 | 69.24 | 678.46 | 227.01 | 1358.82 | 8.40 |
| PKSW017b | 75.90920 | 6.00 | 1.00 | 6.00 | 8.00 | 2.00 | 30.00 | 99.78 | 94.44 | 155.74 | 1798.07 | < 1 |
| PKSW017c | 73.60296 | 2.00 | 1.00 | 6.00 | 6.00 | 2.00 | 36.00 | 98.59 | 90.91 | 167.77 | 2368.74 | 1.80 |
| PKSW038a | 73.14244 | 1.00 | 1.00 | 4.00 | 2.00 | 1.00 | 22.00 | 110.81 | 149.47 | 199.60 | 2108.18 | 1.40 |
| PKSW049a | 74.78186 | 1.00 | 1.00 | 4.00 | 2.00 | 1.00 | 30.00 | 99.00 | 82.68 | 185.35 | 1789.84 | < 1 |
| PKSW069a | 60.34621 | 108.00 | 32.00 | 16.00 | 12.00 | 58.00 | 62.00 | 64.28 | 677.64 | 220.43 | 1483.59 | 6.60 |
| PKSW069c | 60.82376 | 116.00 | 20.00 | 14.00 | 10.00 | 58.00 | 50.00 | 70.29 | 727.43 | 277.35 | 1611.75 | 1.60 |
| PKSW069d | 60.79816 | 104.00 | 18.00 | 12.00 | 10.00 | 86.00 | 28.00 | 73.07 | 665.41 | 244.16 | 1714.30 | < 1 |
| PKSW080a | 72.82886 | 4.00 | 1.00 | 6.00 | 4.00 | 2.00 | 22.00 | 99.73 | 144.67 | 178.17 | 2164.29 | 2.00 |
| PKSW080b | 73.06526 | 2.00 | 1.00 | 6.00 | 4.00 | 2.00 | 18.00 | 108.31 | 123.02 | 156.13 | 1882.79 | < 1 |
| PKSW080c | 72.32646 | 4.00 | 2.00 | 6.00 | 4.00 | 2.00 | 22.00 | 107.36 | 148.23 | 166.00 | 2088.81 | < 1 |
| PKSW084a | 75.06085 | 6.00 | 1.00 | 8.00 | 2.00 | 2.00 | 24.00 | 118.32 | 81.87 | 130.32 | 1932.97 | 1.80 |
| PKSW087c | 73.21539 | 6.00 | 1.00 | 8.00 | 2.00 | 2.00 | 16.00 | 118.70 | 148.47 | 183.13 | 2299.83 | < 1 |
| PKSW089c | 73.55840 | 1.00 | 1.00 | 6.00 | 4.00 | 2.00 | 20.00 | 120.49 | 153.49 | 172.53 | 2486.96 | < 1 |
| PKSW090a | 73.48534 | 2.00 | 1.00 | 6.00 | 4.00 | 2.00 | 20.00 | 115.00 | 115.63 | 152.52 | 2033.07 | < 1 |
| PKSW104a | 75.52381 | 2.00 | 1.00 | 6.00 | 4.00 | 2.00 | 28.00 | 94.67 | 133.14 | 179.89 | 2328.06 | 1.60 |

Tabla 6. Calculo de la Norma CIPW

| MUESTRAS | Apat. | Zrn | Ilm | Esf. | Ort. | Alb | Anrt. | Crn | Hem | Diop. | Hipsr. | Qtz | Rut. | %peso-Oxidos | % peso fase | Ox_Ph |
|----------|-------|------|------|------|-------|-------|--------|------|------|-------|--------|-------|------|--------------|-------------|-------|
| PKSW011a | 6.98 | 0.03 | 0.17 | 0 | 23.61 | 35.2 | -15.33 | 7.14 | 1.27 | 0 | 0.46 | 40.58 | 0.13 | 100.2 | 100.2 | 0 |
| PKSW011d | 5.57 | 0.03 | 0.14 | 0 | 23.9 | 37.95 | -12.11 | 5.6 | 0.93 | 0 | 0.5 | 37.33 | 0.13 | 100 | 100 | 0 |
| PKSW012a | 7.5 | 0.03 | 0.16 | 0 | 24.34 | 33.51 | -16.75 | 8.24 | 0.95 | 0 | 0.54 | 41.46 | 0.17 | 100.1 | 100.1 | 0 |
| PKSW013a | 6.96 | 0.04 | 0.14 | 0 | 24.8 | 33.42 | -15.98 | 7.56 | 0.69 | 0 | 0.37 | 41.94 | 0.18 | 100.1 | 100.1 | 0 |
| PKSW016b | 1.52 | 0.05 | 0.22 | 1.68 | 14.38 | 34.9 | 18.63 | 0 | 5.45 | 3.46 | 5.58 | 14.25 | 0 | 100.2 | 100.1 | 0.1 |
| PKSW017b | 1.99 | 0.03 | 0.11 | 0 | 23.05 | 36.24 | -2.32 | 2.46 | 1.09 | 0 | 0.41 | 36.81 | 0.16 | 100.1 | 100 | 0.1 |
| PKSW017c | 5.07 | 0.03 | 0.11 | 0 | 21.15 | 29.21 | -11.38 | 8.6 | 1.34 | 0 | 0.58 | 44.39 | 0.17 | 99.3 | 99.3 | 0 |
| PKSW038a | 7.48 | 0.04 | 0.19 | 0 | 21.78 | 30.79 | -15.98 | 9.11 | 1.73 | 0 | 0.62 | 44.39 | 0.08 | 100.2 | 100.2 | 0 |
| PKSW049a | 3.12 | 0.04 | 0.08 | 0 | 22.89 | 34.18 | -4.75 | 4.3 | 1.19 | 0 | 0.74 | 38.06 | 0.12 | 100 | 100 | 0 |
| PKSW069a | 2.53 | 0.04 | 0.25 | 1.12 | 13.77 | 35.97 | 17.15 | 0 | 6.61 | 1.07 | 6.99 | 14.16 | 0 | 99.8 | 99.7 | 0.1 |
| PKSW069c | 2.61 | 0.06 | 0.22 | 0.96 | 16.32 | 36.54 | 16.33 | 0 | 6.24 | 0 | 6.49 | 13.88 | 0.19 | 99.9 | 99.9 | 0 |
| PKSW069d | 2.04 | 0.05 | 0.22 | 1.56 | 15.53 | 33.67 | 18.75 | 0 | 6.17 | 0.3 | 7.51 | 14.34 | 0 | 100.2 | 100.1 | 0.1 |
| PKSW080a | 6.92 | 0.04 | 0.2 | 0 | 23.59 | 35.39 | -15.08 | 7.65 | 1.32 | 0 | 0.62 | 39.36 | 0.1 | 100.1 | 100.1 | 0 |
| PKSW080b | 7.17 | 0.03 | 0.19 | 0 | 22.82 | 34.76 | -15.88 | 8.05 | 1.32 | 0 | 0.58 | 40.9 | 0.06 | 100 | 100 | 0 |
| PKSW080c | 7.44 | 0.03 | 0.2 | 0 | 22.06 | 36.84 | -15.83 | 8.1 | 1.4 | 0 | 0.66 | 39.14 | 0.17 | 100.2 | 100.2 | 0 |
| PKSW084a | 1.61 | 0.03 | 0.14 | 0 | 23.98 | 37.86 | -1.24 | 1.93 | 1.13 | 0 | 0.54 | 33.72 | 0.14 | 99.9 | 99.8 | 0.1 |
| PKSW087c | 6.48 | 0.04 | 0.17 | 0 | 22.73 | 36.76 | -14.56 | 7.41 | 1.07 | 0 | 0.49 | 39.21 | 0.16 | 100 | 100 | 0 |
| PKSW089c | 5.68 | 0.03 | 0.19 | 0 | 22.98 | 36.14 | -11.64 | 6.25 | 1.23 | 0 | 0.58 | 38.5 | 0.15 | 100.2 | 100.1 | 0.1 |
| PKSW090a | 6.74 | 0.03 | 0.19 | 0 | 22.24 | 35.87 | -14.64 | 7.37 | 1.15 | 0 | 0.58 | 40.39 | 0.1 | 100 | 100 | 0 |
| PKSW104a | 1 | 0.04 | 0.17 | 0 | 21.13 | 41.41 | 1.25 | 0.7 | 1.2 | 0 | 0.46 | 32.55 | 0.21 | 100.3 | 100.1 | 0.2 |

De acuerdo al diagrama de clasificación general de las rocas después de LeBas et al. (1.986), al de Harker SiO₂ vs K₂O después de Peccerillo y Taylor, 1976 y el AFM después de Kuno (1968) (en Le Maitre, 2.002) las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán localizadas en la Meseta de Popayán, son riolitas, de la serie Calco-Alcalina, altas en K₂O (Figuras 26, 27, 28). Las ignimbritas de Pisojé Alto, cantera de Conexpe, según los anteriores diagramas de clasificación, se localiza en el límite de las traqui-andesitas y las andesitas altas en sílice o ácidas (61.4%) y son de la serie Calco-Alcalina, alta en potasio (Figuras 26, 27, 28).

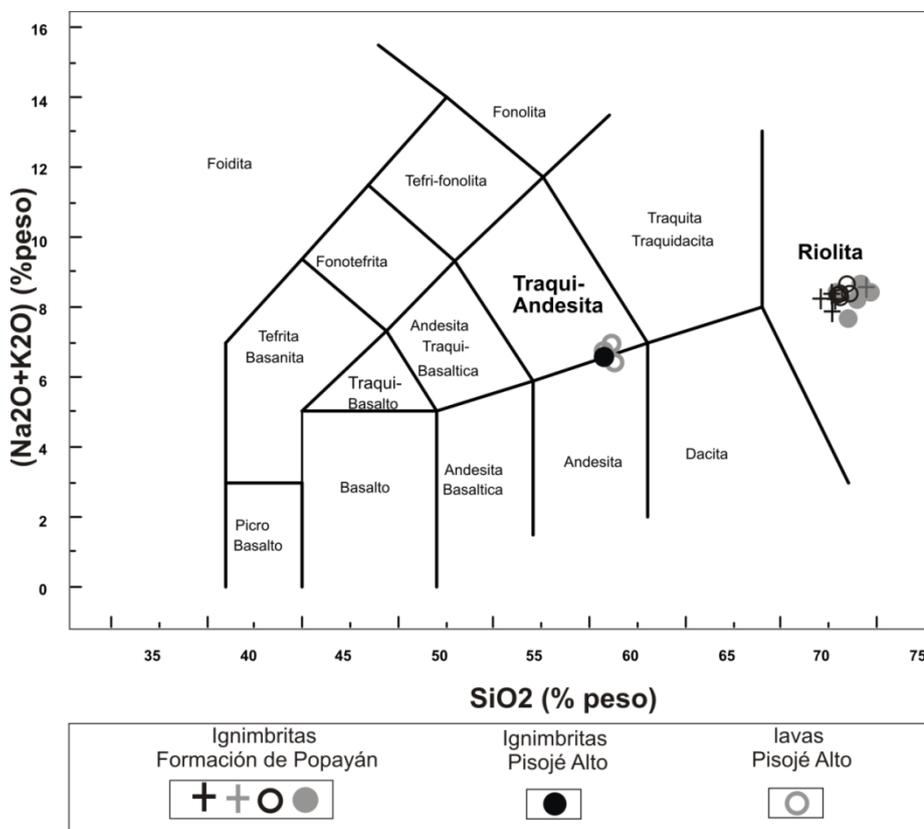


Figura 26. Diagrama de clasificación general de las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto (Después de LeBas et al, 1986). Los depósitos de las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán son de composición riolítica.

Los diagramas Harker (Figura 29, 30, 31) muestran que las variaciones de los contenidos de los óxidos mayores de las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán en la Meseta de Popayán con respecto al contenido de SiO₂ son similares, por lo que se agrupan en un único conjunto con diferencias menores entre ellas que se

evidencian en las variaciones continuas de los contenidos de Na_2O , MnO y P_2O_5 que pueden relacionarse con producto de diferentes pulsos volcánicos de un mismo sistema magmático.

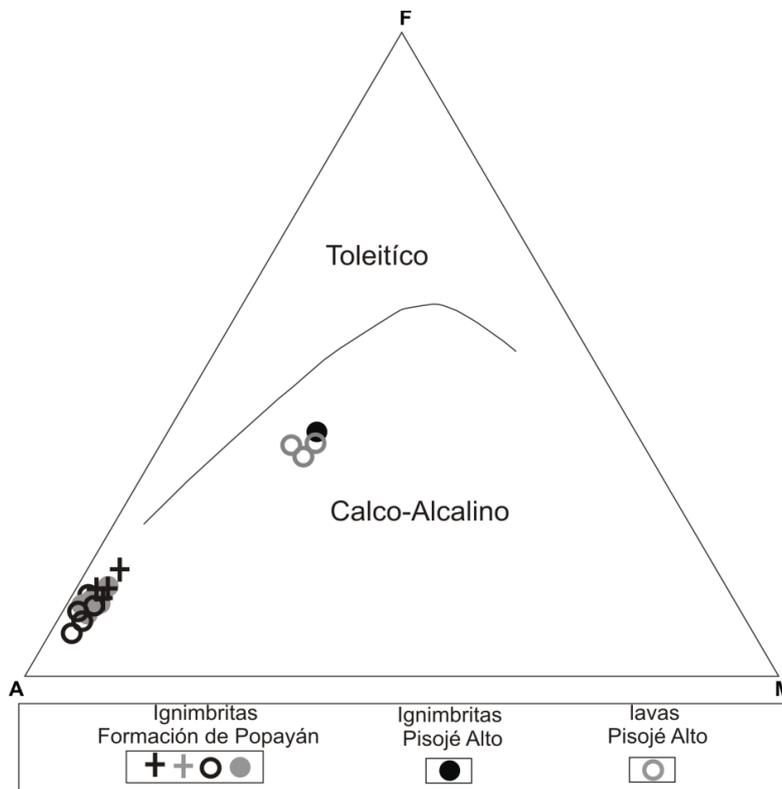


Figura 27. Diagrama de Clasificación de la serie magmática de las ignimbritas de la Formación Popayán y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto (después de Kuno, 1976).

Con base en el contenido de Fe_2O_3 las ignimbritas de la quebrada El Charco- Río Hondo y las del río Palacé (PKSW049a, PKSW084a, PKSW017b) conforman un grupo diferente a las del río Cauca y a las de Sombrerillo. Sin embargo, los conjuntos ocupan espacios muy cercanos entre ellos, debido a que las variaciones son mínimas (Figura 29).

Por el contrario en el comportamiento de los óxidos mayores de las ignimbritas de la Formación Popayán localizadas en la Meseta de Popayán con respecto al de los óxidos de las ignimbritas de Pisojé Alto, si existen evidencian que permiten separar los dos conjuntos. Las secuencias de depósitos de flujos de ignimbritas de la Meseta de Popayán tienen menores contenidos de TiO_2 (0.17%-0.27%) (Figura 31), así como de

CaO, MgO, Fe₂O₃ y Al₂O₃ que las de Pisojé Alto (0.59%), y los valores de K₂O (3.6%-4.2%) de aquellas son mayores que los de las de Pisojé Alto (2.3%). El contenido del Ba y del Rb, elementos del grupo del K, en las ignimbritas de la Meseta de Popayán sigue la misma tendencia que el K₂O. Los valores de Na₂O de las ignimbritas de la Formación Popayán en la Meseta de Popayán presentan una amplia variación (3.4%-5.0%), pero los de Pisojé Alto tienen poca variación (4.0%-4.9%) (Figuras 29, 30, 31). Los contenidos de Al₂O₃ de las ignimbritas de la Meseta de Popayán son mayores que los de las ignimbritas de Pisojé Alto (Figura 29).

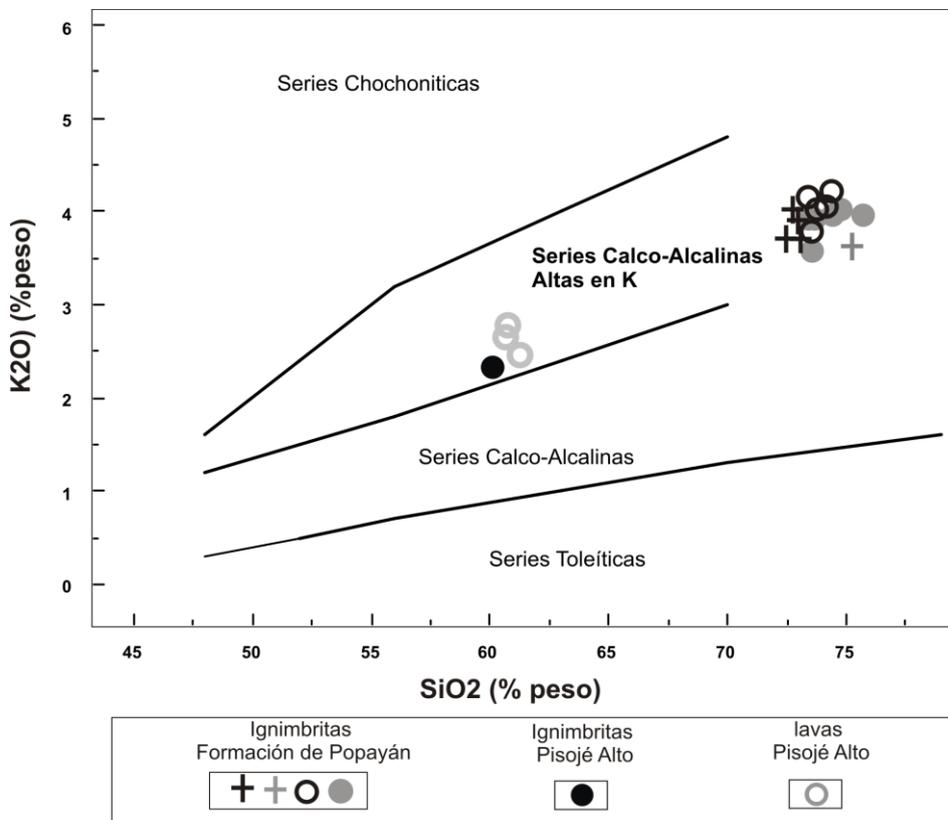


Figura 28. Diagrama TAS de las ignimbritas de la Formación Popayán y de las ignimbritas y lavas de Pisojé alto.

En las ignimbritas de la Formación Popayán en la Meseta de Popayán el Sr muestra disminución de sus valores con el aumento del contenido de SiO₂ (Figura 30, 31), y en las de Pisojé Alto el contenido es mayor.

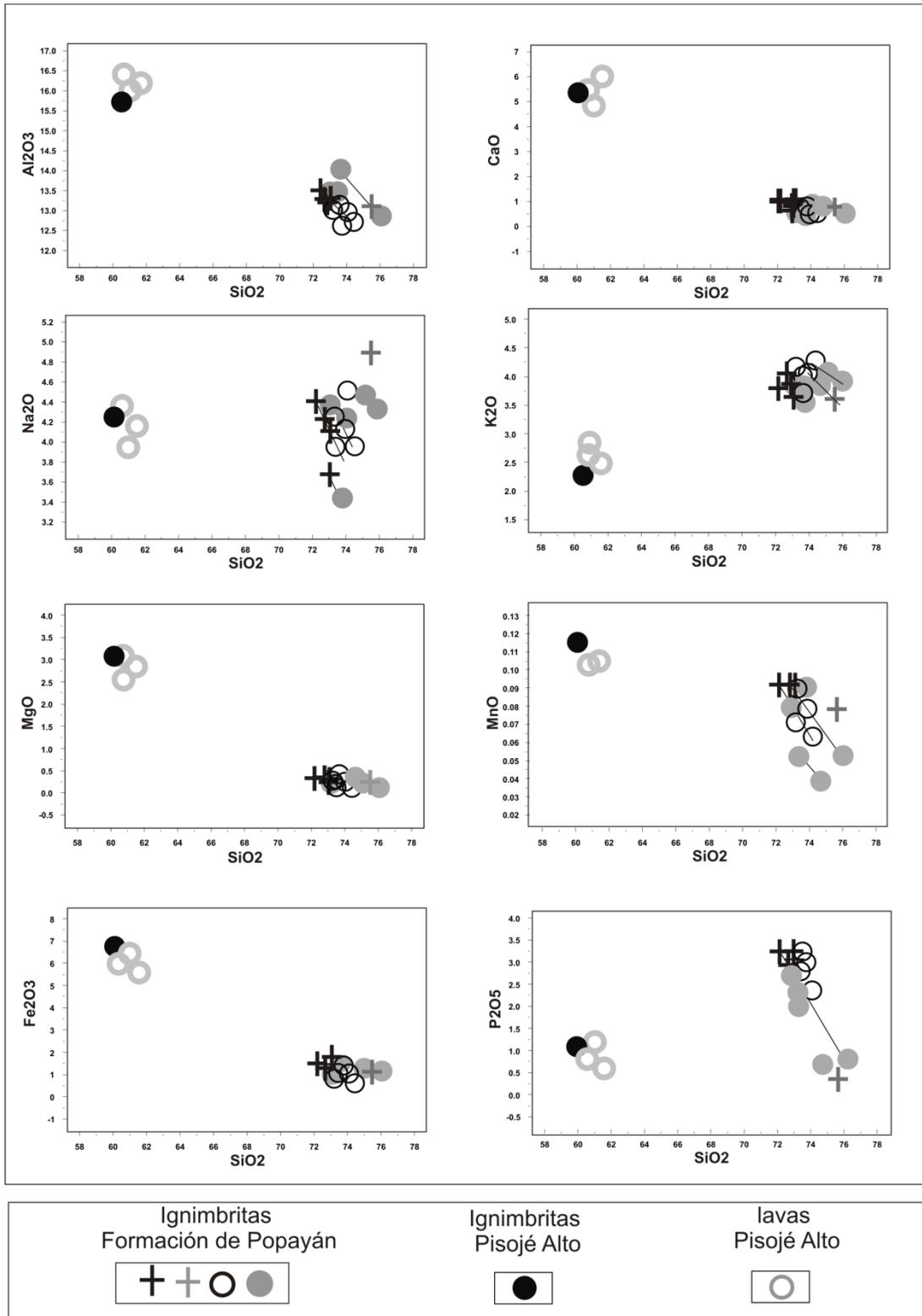


Figura 29. Diagramas Harker de variación de los óxidos mayores con respecto a SiO₂ de las ignimbritas de la Formación Popayán y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto.

El decrecimiento del Sr con la diferenciación indica un fraccionamiento de la plagioclasa, lo que sugiere que el Sr fue compatible y la plagioclasa fue una fase residual significativa. Esta tendencia conlleva a definir un arreglo mineral con predominio de minerales félsicos posiblemente de baja presión como cuarzo, plagioclasa, biotita, óxidos de Fe-Ti y ocasionalmente sanidina y algo de apatito.

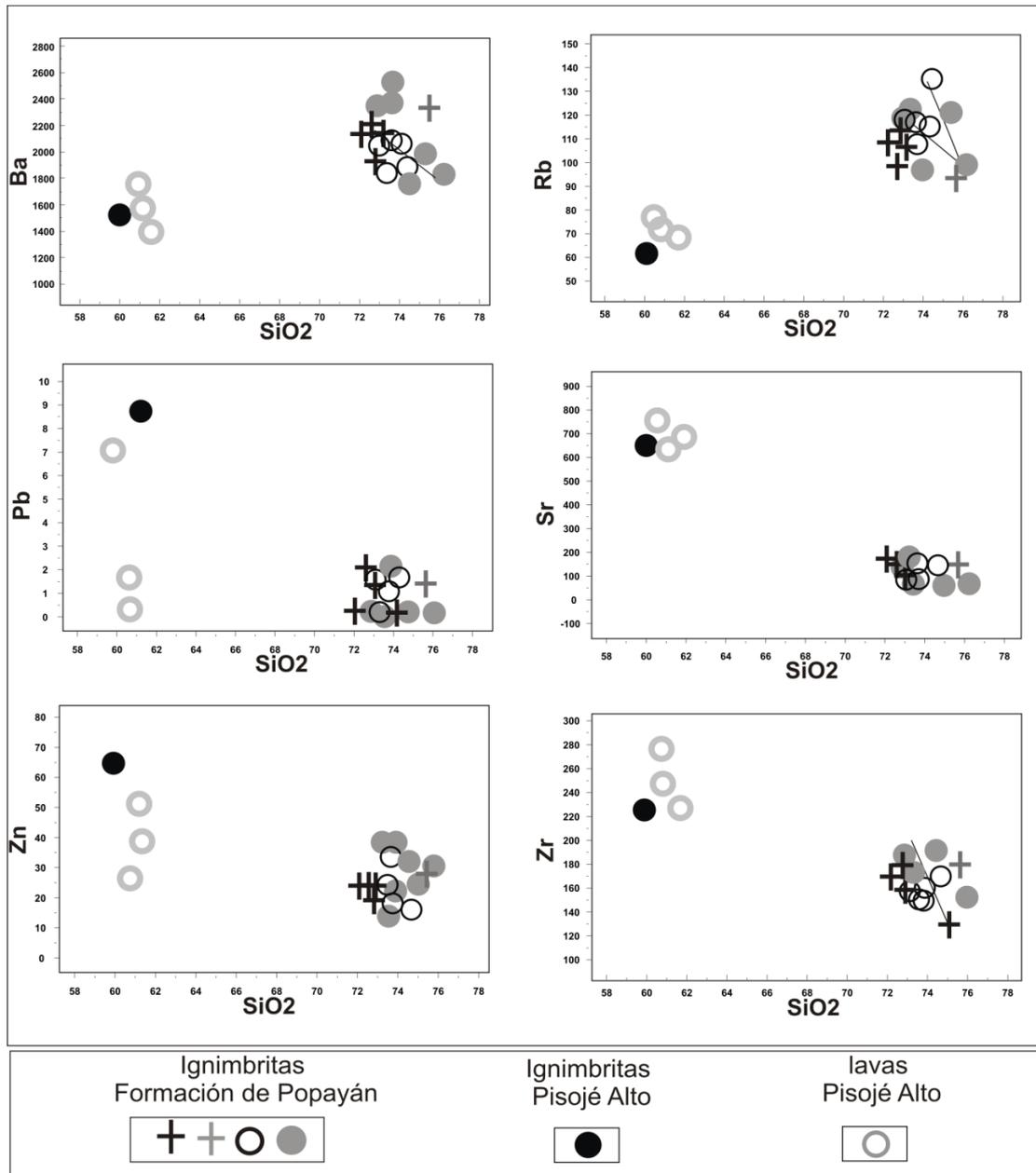


Figura 30. Diagrama Harker de variación de algunos elementos menores con respecto al contenido de SiO₂ de las ignimbritas de Formación Popayán y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto.

La tendencia de los óxidos mayores de las ignimbritas de Pisojé Alto es similar a la de las lavas sobre las cuales están depositadas

De acuerdo al análisis anterior, es claro que existen dos grupos de ignimbritas, las de la Meseta de Popayán, con variaciones químicas menores y los depósitos de ignimbritas de Pisojé Alto, cantera Conexpe.

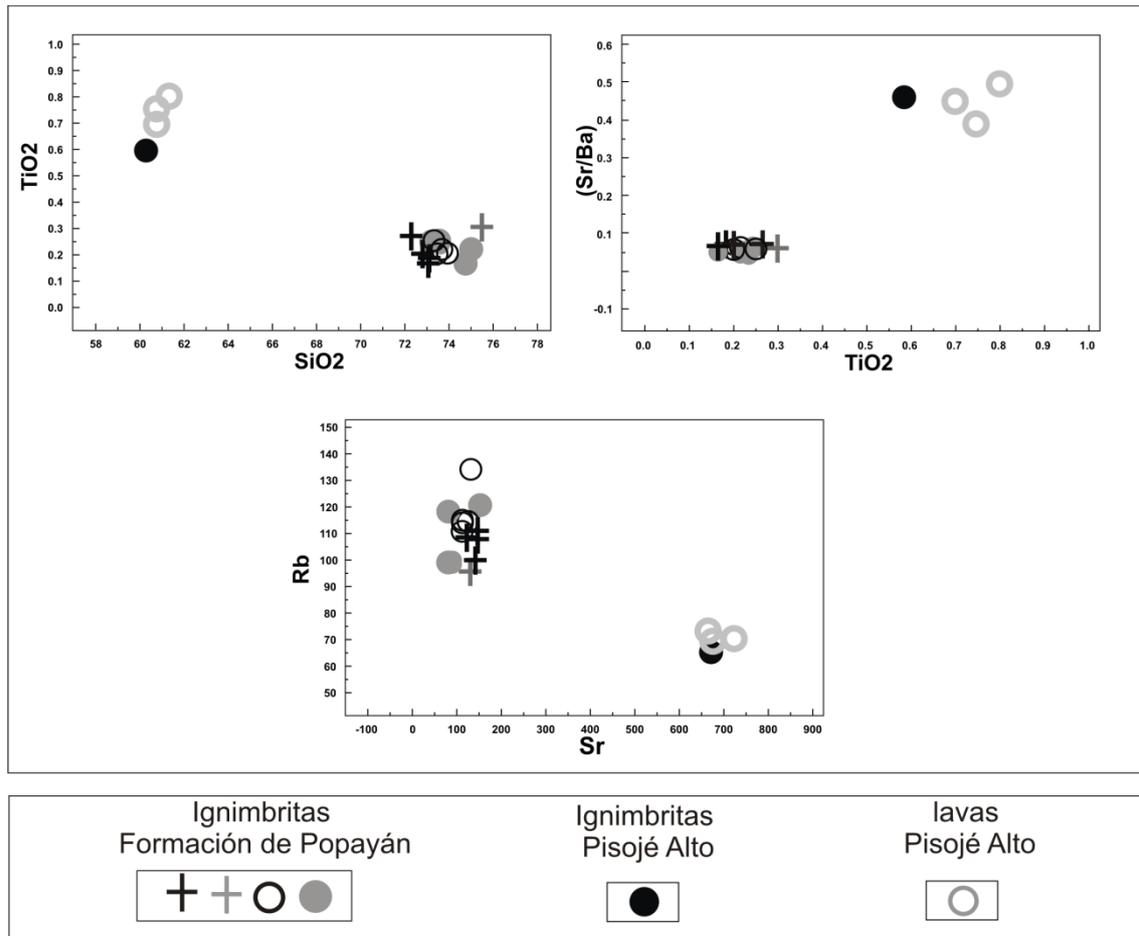


Figura 31. Diagrama Harker de variación SiO₂ vs TiO₂ y diagramas de variación TiO₂ vs Sr/Ba y Sr/Rb de las ignimbritas de la Formación Popayán en la Meseta de Popayán y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto

3.2.5 Cronología

En los laboratorios del Centro de Investigaciones Científicas y de Educación Superior de Ensenada-CICESE- México se realizaron 5 dataciones Ar³⁹/Ar⁴⁰ de muestras colectadas en las secciones estratigráficas de las secuencias de ignimbritas,

levantadas en la Meseta de Popayán. Los protocolos de trabajo de laboratorio se describieron en el numeral 1.3 de la metodología.

En la Tabla 7 se reportan las edades individuales de cada fracción colectada, la edad integrada (t_i), la edad de meseta (t_p) y la edad de isócrona (t_c). Las temperaturas a las que se colectó cada fracción de argón y el tamaño de la muestra se reportan en la Tabla 7. La mejor estimación de la edad de cada muestra se resalta en negrillas y en el Anexo 10 se presentan los espectros e isócronas $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ de las muestras analizadas.

Las dataciones de las muestras PKSW037a y PKSW080a colectadas en la sección levantada en la quebrada Sombrerillo (Anexo 2), en el municipio de Morales fueron realizadas en biotita y su edad es de 2.88 ± 0.26 y 2.62 ± 0.21 y M.a respectivamente (Tabla 7).

La datación de la muestra PKSW087c, fue también, realizada en biotitas y se colectó en la sección estratigráfica de la cantera Los Llanos (Anexo 2), localizada en la vereda Los Llanos en el municipio de El Tambo, perteneciente a la secuencia de ignimbritas de la quebrada El Charco- Río Hondo. Su edad es de 2.56 ± 0.24 M.a

En los depósitos de flujos de cenizas y bloques de la quebrada Sombrerillo, se realizaron dataciones en anfíboles de la matriz y de un lítico (PKSW-043a, PKSW-043b) (Anexo 2). Las edades arrojadas son de 2.2 ± 6.3 M.a y 1.6 ± 0.8 M.a respectivamente. La edad de la muestra PKSW-043a no se tendrá en cuenta en el análisis porque el error es muy grande.

Algunas muestras se caracterizaron por alto contenido de argón atmosférico; por esta razón los diagramas de correlación no fueron de gran utilidad (Eide et al, 1.999). En el caso de la muestra PKSW043a se observa forma de "U" en el espectro de edad, indicativo de la presencia de exceso de argón (Anexo 10) En términos generales los resultados de su diagrama de correlación están de acuerdo con esta interpretación; sin embargo las incertidumbres de los datos son demasiado grandes por lo que se tomó la edad de la cuarta fracción como la mejor estimación de la edad de esta muestra. Es importante hacer notar que la concentración de potasio de los anfíboles de las muestras PKSW043a y PKSW043b es muy baja. Se estima un contenido menor a 0.1 % de K con base en el ^{39}Ar liberado.

Tabla 7. Resumen de los datos de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ datos: MS-10 experimentos de temperaturas controlados con aumento gradual de la temperatura.

| PKSW 037a biotite 0.2976 g Secuencia de Ignimbritas quebrada Sombrerillo | | | | | | | | | | | |
|---|--------|-------------|------------|--------|-----------|--------------|-----------|------------------|-----------|--------------------------|----------------|
| Temp °C | F 39Ar | 40Ar*/39ArK | Age in m.a | %40Ar* | 40Ar/36Ar | 37ArCa/39ArK | ti in M.a | tp in M.a | tc in M.a | (40Ar/36Ar) _i | SumS±(n-2) / n |
| 600 | 0.0483 | 0.15±0.28 | 0.87±1.64 | 0.27 | 296.3 | 0.097 | | | | | |
| 700 | 0.1384 | 0.68±0.09 | 4.01±0.51 | 2.6 | 303.39 | 0.039 | | | | | |
| 800 | 0.2227 | 0.50±0.005 | 2.95±0.31§ | 3.6 | 306.52 | 0.017 | | | | | |
| 900 | 0.1564 | 0.46±0.08 | 2.73±0.47§ | 5.16 | 311.57 | 0.012 | | | | | |
| 1050 | 0.1482 | 0.33±0.09 | 1.95±0.52 | 2.34 | 302.58 | 0.019 | | | | | |
| 1200 | 0.2557 | 0.64±0.05 | 3.79±0.27 | 5.27 | 311.95 | 0.015 | | | | | |
| 1350 | 0.0303 | 0.02±0.44 | 0.11±2.58 | 0.02 | 295.57 | 0.054 | 2.94±0.26 | 2.88±0.26 | 3.44±0.67 | 295±2 | 3.77/7 |

| PKSW 080a biotite 0.2245 g Secuencia de Ignimbritas quebrada Sombrerillo | | | | | | | | | | | |
|---|--------|-------------|------------|--------|-----------|--------------|-----------|------------------|-----------|--------------------------|----------------|
| Temp °C | F 39Ar | 40Ar*/39ArK | Age in m.a | %40Ar* | 40Ar/36Ar | 37ArCa/39ArK | ti in M.a | tp in M.a | tc in M.a | (40Ar/36Ar) _i | SumS±(n-2) / n |
| 600 | 0.0723 | 0.58±0.16 | 0.34±0.9 | 3.1 | 286.61 | 0.208 | | | | | |
| 700 | 0.1806 | 0.01±0.07 | 0.1±0.4 | 0.12 | 295.15 | 0.057 | | | | | |
| 800 | 0.2099 | 0.42±0.06 | 2.5±0.3§ | 4.07 | 308.03 | 0.034 | | | | | |
| 900 | 0.1924 | 0.52±0.06 | 3.1±0.4§ | 6.09 | 314.66 | 0.021 | | | | | |
| 1050 | 0.1588 | 0.35±0.07 | 2.1±0.4§ | 2.9 | 304.34 | 0.032 | | | | | |
| 1200 | 0.1625 | 0.46±0.07 | 2.7±0.4§ | 3.8 | 307.16 | 0.039 | | | | | |
| 1350 | 0.0235 | 1.81±0.49 | 10.7±2.9 | 3.41 | 285.75 | 0.478 | 1.37±0.22 | 2.62±0.21 | 4.3±1.3 | 287±6 | 0.9/4 |

Tabla 7 .Resumen de los datos de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ datos: MS-10 experimentos de temperaturas controlados con aumento gradual de la temperatura.

| KSW 087c biotite 0.1842 g Secuencia de Ignimbritas La Chorrera-Río Hondo | | | | | | | | | | | |
|--|--------|-------------|------------|--------|-----------|--------------|-----------|------------------|-----------|--------------------------|----------------|
| Temp °C | F 39Ar | 40Ar*/39ArK | Age in m.a | %40Ar* | 40Ar/36Ar | 37ArCa/39ArK | ti in M.a | tp in M.a | tc in M.a | (40Ar/36Ar) _i | SumS±(n-2) / n |
| 600 | 0.0622 | 0.47±0.22 | 2.8±1.3 | 2.78 | 287.5 | 0.067 | | | | | |
| 700 | 0.1502 | 0.07±0.09 | 0.4±0.6 | 0.71 | 297.61 | 0.021 | | | | | |
| 800 | 0.2063 | 0.28±0.07 | 1.6±0.4 | 3.04 | 304.76 | 0.014 | | | | | |
| 900 | 0.2507 | 0.44±0.06 | 2.6±0.3 | 6.43 | 315.79 | 0.01 | | | | | |
| 1050 | 0.149 | 0.44±0.09 | 2.6±0.5 | 4.82 | 310.47 | 0.012 | | | | | |
| 1200 | 0.1705 | 0.42±0.08 | 2.5±0.5 | 6.12 | 314.75 | 0.009 | | | | | |
| 1350 | 0.0111 | 2.20±1.27 | 13.0±7.5 | 1.32 | 291.64 | 1.81 | 1.54±0.23 | 2.56±0.24 | 2.36±0.35 | 297±3 | 0.04/3 |

| PKSW 043a anfíbol 0.2584 g Lítico de depósito de flujo de ceniza y bloque de la quebrada Sombrerillo | | | | | | | | | | | |
|--|--------|-------------|------------|--------|-----------|--------------|-----------|----------------|-----------|--------------------------|----------------|
| Temp °C | F 39Ar | 40Ar*/39ArK | Age in m.a | %40Ar* | 40Ar/36Ar | 37ArCa/39ArK | ti in M.a | tp in M.a | tc in M.a | (40Ar/36Ar) _i | SumS±(n-2) / n |
| 800 | 0.0662 | 5.38±7.72 | 31.5±44.8 | 41.65 | 506.41 | 0.31 | | | | | |
| 1000 | 0.0705 | 1.75±7.25 | 10.4±43.1 | 57.71 | 187.37 | 0.84 | | | | | |
| 1150 | 0.3211 | 0.98±1.56 | 11.1±9.9 | 80.94 | 515.47 | 6.26 | | | | | |
| 1250 | 0.4815 | 0.38±1.06 | 2.2±6.3 | 15.11 | 348.08 | 7.44 | | | | | |
| 1350 | 0.0547 | 16.22±9.36 | 93.4±52.5 | 23.11 | 384.3 | 8.06 | 11.3±6.8 | 2.2±6.3 | 1.7±7.4 | 385.69 | 0.3/5 |

Tabla 7. Resumen de los datos de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ datos: MS-10 experimentos de temperaturas controlados con aumento gradual de la temperatura.

| PKSW 043b anfibol 0.2644 g Matriz del depósito de flujo de ceniza y bloque de la quebrada Sombrerillo | | | | | | | | | | | |
|---|--------|-------------|------------|--------|-----------|--------------|-----------|----------------|-----------|--------------------------|----------------|
| Temp °C | F 39Ar | 40Ar*/39ArK | Age in m.a | %40Ar* | 40Ar/36Ar | 37ArCa/39ArK | ti in M.a | tp in M.a | tc in M.a | (40Ar/36Ar) _i | SumS±(n-2) / n |
| 800 | 0.0438 | 3.42±1.88 | 20.3±11.2 | 4.77 | 282.05 | 0.93 | | | | | |
| 1000 | 0.0568 | 1.21±1.44 | 7.2±8.6 | 13.54 | 260.25 | 1.62 | | | | | |
| 1150 | 0.3504 | 0.36±0.22 | 2.1±1.3 | 12.78 | 338.81 | 7.69 | | | | | |
| 1250 | 0.4994 | 0.23±0.16 | 1.4±0.9 | 5.48 | 312.62 | 7.81 | | | | | |
| 1350 | 0.0496 | 2.06±1.66 | 12.2±9.8 | 3.54 | 285.41 | 7.69 | 0.5±1.1 | 1.6±0.8 | 1.5±0.1 | 295.5 | 2.2/3 |

A pesar del alto contenido de argón atmosférico reportado, por el laboratorio de CICESE, en la mayoría de las muestras datadas estos resultados constituyen una importante guía, para la estratigrafía de las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán.

3.2.6 Correlación estratigráfica de las ignimbritas de la Formación Popayán

Con base en las particularidades observadas en las diferentes secciones estratigráficas de la Formación Popayán levantadas en la Meseta de Popayán, es evidente que los depósitos de ignimbritas de las secuencias basales, unidades I, II presentan características mineralógicas y texturales similares que permiten su correlación; así como el evento de la unidad III, correspondiente a un depósito de ignimbrita meteorizado posiblemente retrabajado, que en ocasiones se asemeja a depósitos de flujos de escombros y que aparece frecuentemente en los afloramientos de las secuencias de ignimbritas de la Formación Popayán localizados en la Meseta de Popayán. De acuerdo, también, a características mineralógicas y texturales definidas macroscópicamente, se puede correlacionar las cenizas de caída de la unidad V, donde es evidente la presencia del suelo arcilloso rojo de color naranja, que se propone constituye el techo de la Formación Popayán. Todos estos depósitos son de amplia distribución, y solo tienen variaciones de espesor, no así los depósitos de la unidad IV constituida por materiales de eventos sedimentarios que a diferencia de las demás, no tienen una distribución amplia y continua.

Cartográficamente las ignimbritas de las secuencias del El Charco-río Hondo, río Cauca, río Palacé y Sombrerillo conforman en su gran mayoría extensos mantos de ignimbritas distribuidos en forma más o menos continua, existiendo sin embargo algunos afloramientos dispersos y aislados, donde las ignimbritas presentan un alto grado de meteorización que dificulta su correlación. Sin embargo, en general, se puede considerar que, las ignimbritas de la Formación Popayán tienen un buen estado de conservación.

De acuerdo a la caracterización petrográfica y geoquímica de las secuencias de ignimbritas de la quebrada El Charco-río Hondo, del río Cauca, del río Palacé y de la quebrada Sombrerillos se correlacionan entre sí. Las edades reportadas para las ignimbritas de Sombrerillo (2.88 ± 0.26 y 2.62 ± 0.21), localizadas al norte de la Meseta de Popayán y la edad arrojada para las ignimbritas de la quebrada El Charco-río Hondo (2.56 ± 0.24) ubicadas al sur de ésta, permiten corroborar las anteriores

correlaciones, precisar su distribución al norte y al sur de la Meseta de Popayán, y establecer que constituyen la base de la Formación Popayán (Anexos Mapa Geológico 6 y Correlaciones 2).

Las ignimbritas de Pisojé Alto, localizadas en el piedemonte Oeste de la Cordillera Central aunque macroscópicamente y petrográficamente no son tan diferentes la geoquímica de elementos mayores si permiten diferenciarla de las de la Meseta de Popayán.

4. Análisis y discusión de los resultados

Con base en las propuestas de investigaciones y trabajos de varios autores sobre las ignimbritas y las rocas y depósitos de la Formación Popayán, resumidos en el capítulo 2, y los resultados de esta investigación, presentados en el capítulo 3, se discuten e interpretan las relaciones cartográficas, geomorfológicas, estratigráficas, petrográficas, geoquímicas y cronológicas de dichas rocas, con especial interés en las ignimbritas. Estas nuevas consideraciones constituyen un aporte al entendimiento y construcción de modelos evolutivos del vulcanismo del Neógeno del suroccidente de Colombia.

Desde 1932 se ha venido discutiendo acerca de la estratigrafía y la composición de los depósitos y rocas que constituyen la Formación Popayán. Han surgido muchas propuestas, que finalmente han creado confusión. Existían algunos datos estratigráficos, geoquímicos y dataciones, pero se requería hacer mayores precisiones y aportar criterios que permitieran redefinir la Formación Popayán y, a su vez, avanzar en un modelo genético de las ignimbritas que la constituyen, para integrarlo a modelos evolutivos del vulcanismo del suroccidente de Colombia

La sección estratigráfica levantada en la quebrada Sombrerillo, en el municipio de Morales, muestra la base de la Formación Popayán conformada por depósitos de ignimbritas con un espesor máximo observado de 100 m; estas ignimbritas están suprayacidas por una serie de depósitos piroclásticos y vulcano sedimentarios, con un espesor máximo observado de 100 m, sobre los que se desarrolló un paleosuelo rojo que se propone constituye el techo de la Formación de Popayán.

Los análisis geoquímicos realizados en las ignimbritas que conforman la Meseta de Popayán y que pertenecen a la Formación Popayán muestran que ellas corresponden a las series calcoalcalinas propias de las márgenes continentales activas y son riolitas altas en potasio y de acuerdo con la caracterización cartográfica, geomorfológica, petrográfica, geoquímica y geocronológica estas ignimbritas se correlacionan y cubren un área de 1.256 Km².

Macroscópicamente, las ignimbritas en la Meseta de Popayán presentan una matriz de color gris lustroso cuando no están meteorizadas, o de color rosado cuando están meteorizadas. En ellas sobresalen fenocristales de plagioclasa, cuarzo, biotita, pómez y fragmentos líticos, y en ocasiones sanidina. Es notoria la textura “fiamme” del vidrio.

Petrográficamente, las ignimbritas del El Charco-río Hondo y las del río Palacé presentan una matriz vítrea esferulítica de color café, sobreimpuesta a la textura “fiamme”. Las ignimbritas del río Cauca y de la quebrada Sombrerillo se caracterizan por presentar una matriz vítrea de color rosado pálido con textura “fiamme”.

La textura esferulítica común en las ignimbritas del Charco- ríos Hondo y del río Palacé no se presenta en las ignimbritas del río Cauca y de la quebrada Sombrerillo, pero esta textura es común en rocas vítreas silíceas, derivada de procesos de devitrificación del vidrio natural a altas temperaturas, y su presencia no indica condiciones magmáticas diferentes.

Así pues, mineralógicamente, las cuatro secuencias de ignimbritas de la Meseta de Popayán son correlacionables y su arreglo mineral está constituido por cristales de cuarzo, plagioclasa y biotita, y en ocasiones sanidina, hornblenda y circón.

Con base en la evaluación de los diagramas de variación de Harker, entre las secuencias de ignimbritas, localizadas en la Meseta de Popayán, no existen diferencias importantes en los contenidos de los óxidos mayores con respecto al contenido de SiO₂, y sólo se pueden definir grupos muy cercanos; por lo que las secuencias de ignimbritas de la quebrada La Chorrera-río Hondo, Cauca, Palacé y las de la quebrada Sombrerillo, constituyen un único grupo.

En el piedemonte Oriental de la Cordillera Central, en la vereda Pisojé Alto, bordeando la Meseta de Popayán, en el municipio de Popayán, se reconocieron las ignimbritas denominadas en este trabajo de Pisojé Alto. Macroscópicamente, presentan rasgos un tanto diferentes a las ignimbritas de la Meseta de Popayán; su matriz es de color amarillo pálido y tienen diminutos fragmentos de obsidiana. Petrográficamente, su arreglo mineral es similar al de las secuencias de ignimbritas de la Meseta de Popayán; sin embargo, los análisis geoquímicos revelan que pertenecen igualmente a las series calcoalcalinas, pero se encuentran en el límite del campo de las traquiandesitas- andesitas, altas en sílice, con un contenido en potasio alto. De acuerdo con estas características, las ignimbritas de Pisojé Alto conforman un grupo aparte y no son correlacionables con las de la Formación Popayán.

Si se evalúan las caracterizaciones de las ignimbritas de la Formación Guacacallo, realizadas en diferentes investigaciones (Capítulo 2), su estratigrafía, petrografía, geoquímica y las dataciones, permiten correlacionarlas con la ignimbritas de la Formación Popayán. Es así como, tanto las ignimbritas de la Formación Guacacallo,

ubicadas en el valle del Magdalena, departamento del Huila, como las de la Formación Popayán, localizadas en la Meseta de Popayán, pertenecen a las series calcoalcalinas y son también riolitas altas en potasio (Figura 32, 33, 34).

Las muestras de ignimbritas MW359, 359a y 360 de la Laguna y la MW378 de Salado Blanco, con un contenido de $\text{SiO}_2 < 70\%$, no fueron consideradas en los análisis de Van der Wiel (1991) por tener un comportamiento anómalo con respecto al resto. Cuando se grafican los análisis de elementos mayores de Van der Wiel (1991) y los realizados en este trabajo, el comportamiento anómalo de estas muestras se mantiene con respecto al grupo de ignimbritas que se concentran en el área media del campo de las riolitas del diagrama de clasificación de Le Bas et al. (1986) (Figuras 32). Sin embargo, es interesante estudiar detalladamente el porqué del comportamiento anómalo de estas muestras.

Los diagramas Harker de variación de SiO_2 con respecto a óxidos mayores de las ignimbritas de las formaciones Gauacacallo y de Popayán son similares, (Figura 35) y en ellos se observa que el incremento de SiO_2 va acompañado de la disminución de Ca, MgO, TiO_2 , FeO y del aumento de álcalis (K_2O y Na_2O) lo que es coherente con un proceso de cristalización fraccionada en el magma.

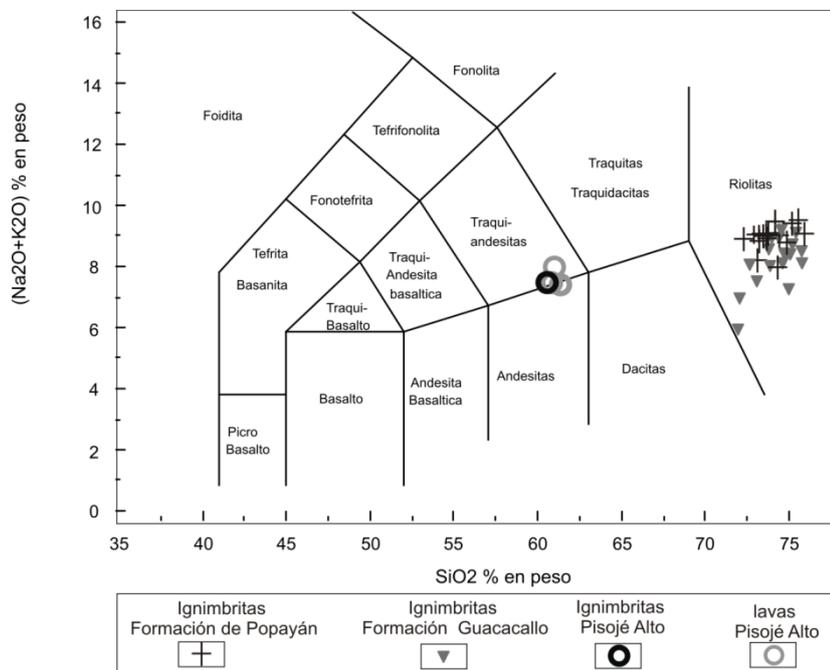


Figura 32. Diagrama Harker de variación de $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ con respecto al SiO_2 de las ignimbritas de las formaciones de Popayán y Guacacallo y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto (Después de Le Bas et al. (1986).

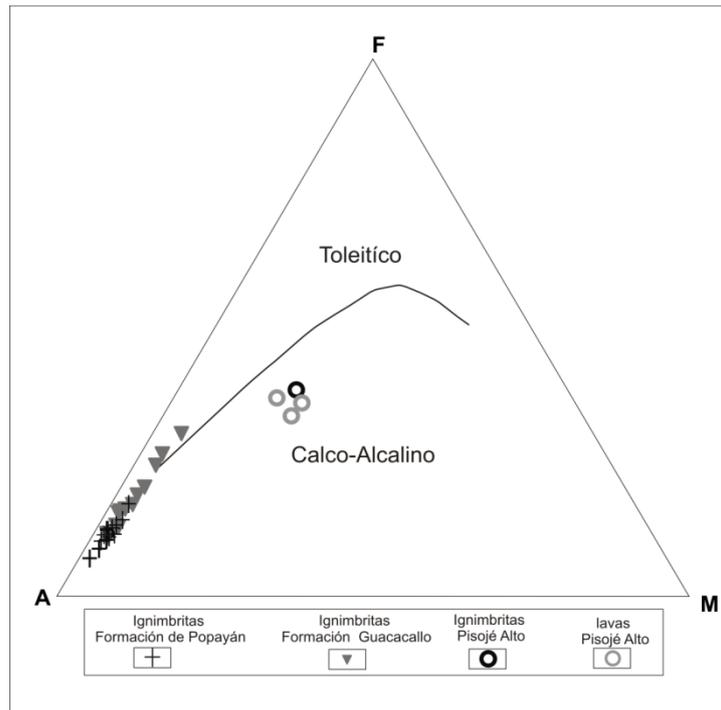


Figura 33. Diagrama de Clasificación de la serie magmática de las ignimbritas de las formaciones Popayán y Guacacallo y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto (después de Kuno, 1976).

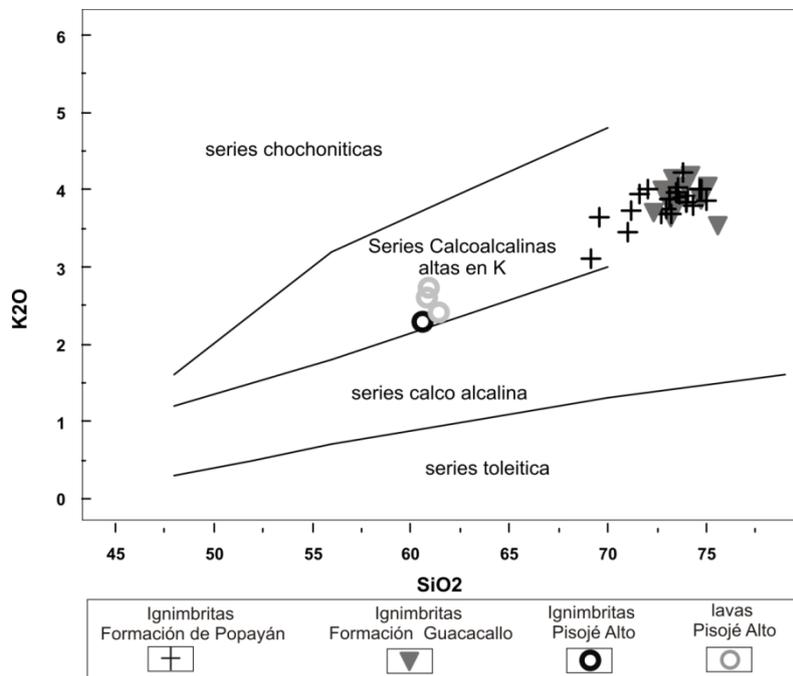


Figura 34. Diagrama Harker de variación de SiO_2 con respecto al contenido de K_2O de las ignimbritas de las formaciones Popayán y Guacacallo y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto (Pecerillo y Taylor, 1976).

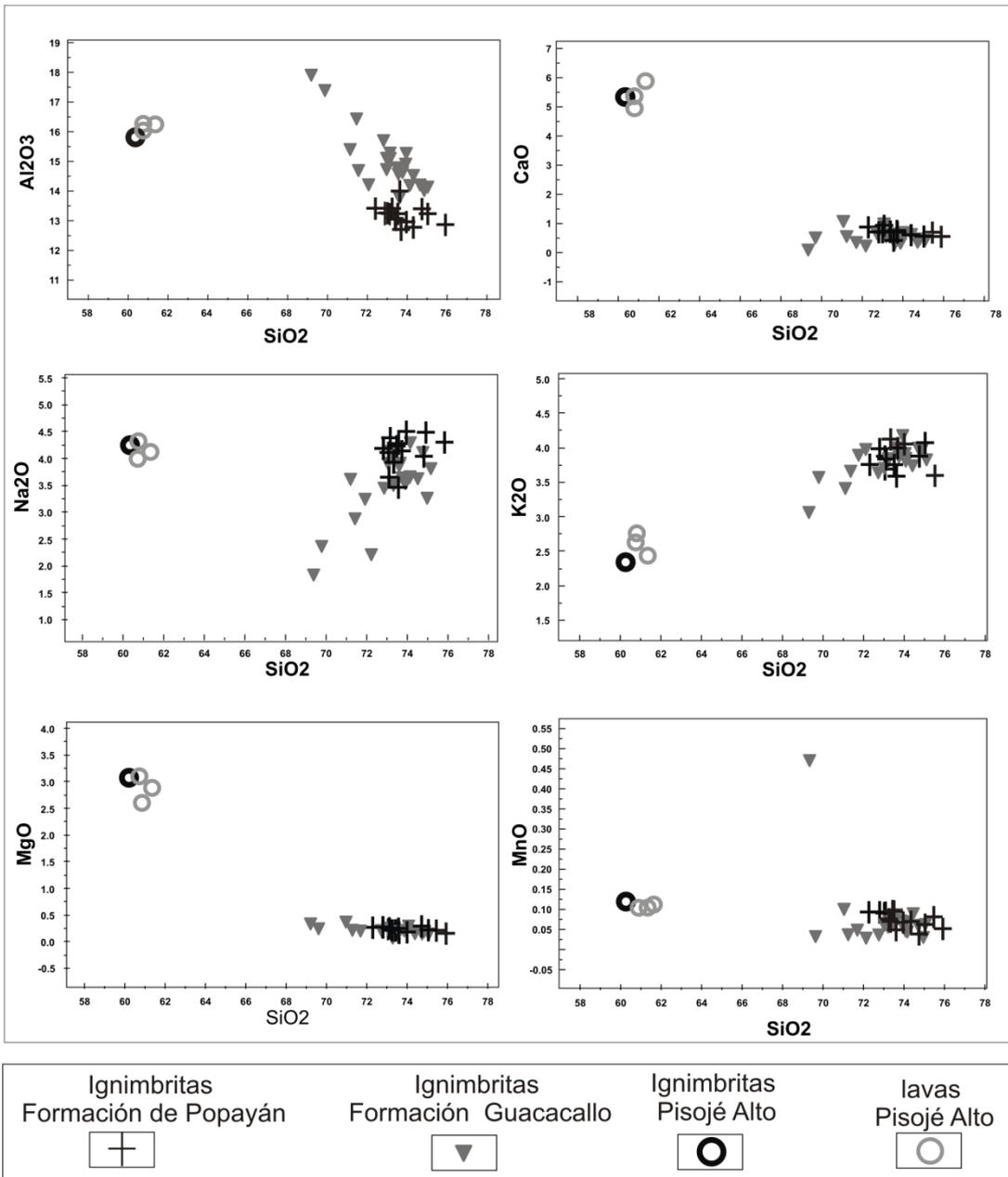


Figura 35. Diagramas de variación Harker de los óxidos mayores con respecto a SiO₂ de los depósitos de ignimbritas de las formaciones Popayán y Guacacallo y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto.

Las dataciones de las ignimbritas de las formaciones Guacacallo y de Popayán, consignadas en la Tabla 7, indican que el vulcanismo ignimbrítico de la región se inició hace 7.1 ± 3 M.a y se ha extendido hasta 2.56 ± 0.24 M.a. En las dataciones, realizadas en este trabajo por el laboratorio CICESE de Méjico, se reportan altos contenidos de argón atmosférico que crean incertidumbre en los datos obtenidos; sin embargo, estas dataciones son coherentes con la estratigrafía de las ignimbritas y de los depósitos de

flujos de ceniza y bloques localizados hacia el techo de la Formación Popayán, así como también con las dataciones que se han reportado para la Formación Guacacallo; por lo tanto estas dataciones ofrecen una orientación estratigráfica para la región.

Con base en estos resultados, las ignimbritas de la base de la Formación Popayán se encuentran dentro de un rango de edades de 2.62 ± 0.21 M.a, 2.56 ± 0.24 M.a y 2.88 ± 0.26 M.a, y la matriz de los depósitos de flujos de ceniza y bloques localizados hacia el techo de la Formación Popayán tiene una edad probable de 1.6 ± 0.8 M.a.

De otro lado, si se considera la similitud de las edades de los depósitos de flujos de ignimbritas de la base de la Formación Popayán, localizados al Sur de la Meseta de Popayán, y las de las ignimbritas del Norte de la Meseta, en Morales, se refuerza la propuesta de que tanto las ignimbritas del Norte como las del Sur son correlacionables entre sí y corresponden a varios pulsos de una misma unidad de flujos de ignimbritas, siendo claro que ellas comparten historias volcánicas similares.

De acuerdo con la cartografía geológica y geomorfológica realizada, los depósitos de ignimbritas de la Formación de Popayán se emplazaron sobre un paleorelieve construido en rocas basálticas, y ultrabásicas, y en sedimentos asociados de edad Mesozoico, así como sobre rocas sedimentarias del Paleoceno, y originaron mantos continuos que conformaron la Meseta de Popayán. Es por esto que los espesores de las unidades de flujos de las ignimbritas presentan variaciones, como también el número de capas que integran éstas unidades de flujo (Anexo 2).

Los flujos de ignimbritas, que constituyen los depósitos de las formaciones de Popayán y Guacacallo, viajaron a una gran distancia desde la fuente localizada en la Cordillera Central, alcanzando distancias máximas medidas de hasta 70 Km hacia el Oeste y de hasta 50 Km hacia el Este. Como se dijo anteriormente, la extensión de las ignimbritas de la Formación Popayán es de 1.250 Km^2 , y la extensión de las ignimbritas de Guacacallo, reportadas por Kroonenberg, et al. (1.981), es de 1.000 Km^2 ; igualmente estos autores reportan para estas ignimbritas espesores promedios observados de 100 m, y los espesores promedios observados para las de la Formación Popayán son también de 100 m; lo cual permite estimar un volumen promedio total para las ignimbritas de la Formación Popayán y las de Guacacallo de 225 Km^3 . Éste es un cálculo conservador, pues el espesor sería mayor, si se tuviera en cuenta los volúmenes de las cenizas de caídas que acompañaron las erupciones

ignimbríticas y que pueden ser comparables con los volúmenes calculados para las ignimbritas (Walker, 1.983).

Las cenizas acompañantes de los depósitos de flujos de ignimbritas de la Formación Popayán o cenizas “co-ignimbríticas” se distribuyen ampliamente en ambos flancos de la Cordillera Central en los departamentos del Cauca y del Huila, y en las secciones estratigráficas levantadas en el trabajo se denominaron Unidad V. Ellas cubren los depósitos de las ignimbritas y otras rocas de la región, formando capas subhorizontales, y se presume que buena parte de estas cenizas están actualmente erosionadas.

Siguiendo nuevamente a Walker (1.983) la relación entre el espesor de una ignimbrita (V) y el diámetro (H) de una circunferencia con centro en la posible fuente, que incluya los depósitos de ignimbritas cartografiados, define la “relación de aspecto”, que tiene un significado no genético y permite definir la morfología de una ignimbrita, la que a su vez está relacionada con el número de unidades de flujo presentes en ella. Este último criterio sirve para interpretar la energía involucrada en la erupción que originó la ignimbrita (Araña, 1.993).

Para las ignimbritas de la Formación Popayán y las de la Formación Guacacallo, con un espesor (V) de 100 m, medido para ambas formaciones en las secciones estratigráficas levantadas en el terreno y el diámetro (H) de una circunferencia con centro en la posible fuente, y que incluye los depósitos de ignimbritas cartografiados en ambos flancos de la Cordillera Central, se calcula una relación V/H de 0.0001, permitiendo clasificar las ignimbritas de estas dos formaciones como ignimbritas “Low-aspect ration” (L.A.R.I) con capacidad de sobrepasar barreras topográficas y consideradas cataclísmicas. Igualmente, de acuerdo a su espesor y a su alto soldamiento, se interpretan como ignimbritas de alto grado, emplazadas a temperaturas promedio entre 500 °C y 900°C.

Por su extensión y volumen, las ignimbritas de las formaciones de Popayán y Guacacallo constituyen un significativo evento magmático en el contexto del vulcanismo Neógeno-Cuaternario del suroccidente de Colombia, y por esto es de vital importancia su comprensión.

El origen de las ignimbritas, en general se relaciona con la formación de calderas de colapso, y en la interpretación de las imágenes de satélite y el modelo digital de elevación del área de trabajo, y con fundamento en la cartografía de las ignimbritas de

las formaciones de Popayán y Guacacallo, se definieron mantos de ignimbritas a ambos lados de la Cordillera Central inclinados hacia el Oeste y hacia el Este, distribuidos en forma radial y rodeando una estructura común casi circular localizada en el eje de la Cordillera Central, algunos de cuyos bordes están actualmente erosionados (Figura 36).

Esta estructura, denominada caldera de Paletará, es una caldera de colapso con vulcanismo resurgente, evidenciado, entre otros, por los productos del vulcanismo de la Cadena Volcánica de Los Coconucos; su diámetro es de 35 km y ha sido considerada la fuente, si no de todas, de gran porcentaje de las ignimbritas del Cauca y del Huila (Torres et al, 1.999).

Sobre las imágenes de satélite, hacía los bordes Sur y Norte de la caldera de Paletará, se observa que ella tiene un importante control estructural definido por lineamientos de dirección Noroeste que coinciden, respectivamente, con las denominadas falla Robles-Mazamorra y la falla Bedón o Palacé - Bedón (Acosta, 2.003.) En el interior de la gran estructura de Paletará se destaca un lineamiento de dirección Noroeste que controla el volcán Puracé y la Cadena volcánica de Los Coconucos, que Murcia (1.987) denominó como Fractura de Puracé - Coconuco, relacionada con la falla de Palacé - La Plata (Figura 36).

A partir de la distribución geográfica de las ignimbritas y la interpretación de las imágenes de satélite, se ha planteado la existencia de otras fuentes caldéricas para las ignimbritas del Cauca y del Huila, tales como la caldera de Cutanga (Kroonembreg et al 1.981,1.982; Van der Wiel, 1.991) y la caldera de Gabriel López (Torres et al, 1.992; Torres et al, 1.997; Ruiz y Marquinez, 2.002); esta última estructura relacionada posiblemente con las ignimbritas y flujos de ceniza y bloques de la Formación Popayán que suprayacen las ignimbritas de la base. Es inclusive posible la existencia de secuencias de ignimbritas relacionada a otros sistemas magmáticos.

La construcción de modelos de generación de magmas en ambientes geotectónicos de márgenes continentales activos es complicada porque involucra demasiadas variables. Los magmas calcoalcalinos propios de estas zonas de compresión como a la que se asocian las ignimbritas de las formaciones de Popayán y Guacacallo son hidratados, y éste carácter, junto al elevado grado de diferenciación que alcanzan los productos, hace que el vulcanismo sea explosivo y violento (Araña y Ortiz, 1.984).

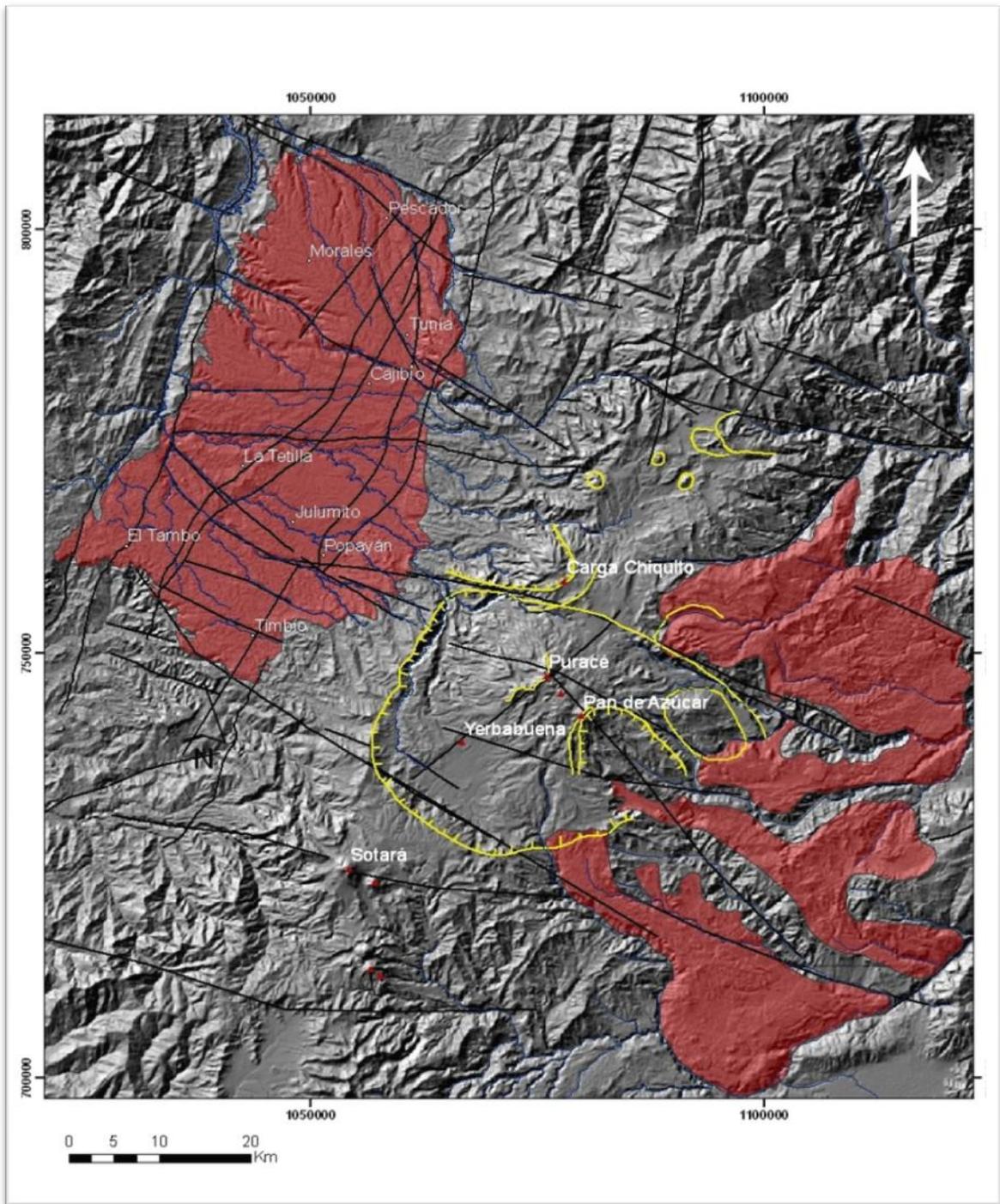


Figura 36. Depósitos de ignimbritas de las formaciones de Popayán y Guacacallo, Caldera de Paletará (Torres et al, 1.999), lineamientos y fallas.

Las ignimbritas de las formaciones de Popayán y Guacacallo son una importante exhibición de magmas formadores enfriados rápidamente. Sin embargo, en las pómez de estas ignimbritas está mejor representado la composición del magma. El arreglo mineral de estas ignimbritas, constituido por cuarzo, plagioclasas, anfíboles, biotitas, óxidos de Fe y Ti y ocasionalmente sanidina, los que son minerales de baja presión, es comparable con el de muchas otras ignimbritas cuya historia se ha relacionado con cámaras magmáticas de dimensiones batolíticas ubicadas cerca de la superficie.

Estas ignimbritas tienen la particularidad de presentar un aumento en el contenido de potasio, con el aumento en el contenido de sílice, relación que las ubica en el campo de altas en potasio, comparable con las ignimbritas de la Zona Volcánica Central de los Andes. Las lavas del vulcanismo reciente del volcanes Puracé y de la Cadena volcánica de los Coconucos tienen también esta característica, la que no se observa en los productos de otros volcanes del suroccidente de Colombia.

El alto contenido de potasio en las ignimbritas de la Zona Volcánica Central se ha relacionado con el importante espesor de la corteza continental presente en este segmento, y la integración de datos geocronológicos, petrológicos y geofísicos ha permitido plantear, entre otros, un modelo que incluye intrusión, asimilación y fusión de la corteza con subsecuente diferenciación (de Silva et al, 2.006a); y en general, la génesis de este tipo de ignimbritas se asocia a la asimilación con cristalización fraccionada y asimilación de material de la corteza (Demant, 2.005).

El espesor de la corteza continental, propuesto para los Andes colombianos, no es despreciable, y es muy valioso recordar que en la Cordillera Oriental se vienen dando procesos de acortamiento que han espesado la corteza continental; por esto en la generación de los magmas silíceos de las formaciones de Popayán y Guacacallo no se puede descartar que la corteza continental este comprometida en una alta proporción, lo que permitiría, además, justificar los importantes volúmenes de estas ignimbritas.

Ya desde 1.984, James y Murcia, al comparar los contenidos de Pb isotópico del vulcanismo de los Andes Centrales con los de los Andes del Norte, encontraron variaciones mínimas entre ambos contenidos; además, en sus investigaciones concluyeron que las rocas andesíticas del Cenozoico de los Andes colombianos se caracterizan por pequeñas pero sistemáticas y bien correlacionadas variaciones en $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ y $\delta^{18}\text{O}$, y concluyen que esto refleja una significativa

contaminación cortical del vulcanismo de los Andes del Norte, lo que explicaría el alto contenido de potasio, en las lavas recientes asociadas al vulcanismo del Neógeno de la Zona Andina Norte, y que podría ampliarse a las ignimbritas.

Tratando de explicar el alto contenido de potasio de las lavas del volcán Puracé y de la cadena volcánica de Los Coconucos, Droux y Delalouye (1.996), proponen un aporte cortical a los magmas que refleja la posible asimilación de la corteza superior, constituida por rocas del Precámbrico y del Paleozoico que conforman el núcleo de la Cordillera Central. Ellos comparan el comportamiento geoquímico de las lavas del volcán Puracé con las del volcán Doña Juana, que no presenta este enriquecimiento en potasio, a pesar de que ambos volcanes están localizados a la misma profundidad de la zona de Benioff y a la misma distancia de la trinchera. Es por esto que para diseñar modelos petrogenéticos de los depósitos de las ignimbritas del Cauca y del Huila, y tratar de explicar los procesos generadores de este vulcanismo riolítico, se requiere de estudios multi-isotópicos sistemáticos de Sr, Nd y Pb y de elementos trazas.

En la petrografía realizada en las muestras de ignimbritas de la Formación Popayán y en los estudios de Kroonenberg, et al (1981) y Van der Wiel (1.991), se describen cristales de cuarzo con bahías de disolución interpretadas como corrosión magmática (reabsorción, disolución) por mezcla de magmas (Shelley, 1.993; Vernon, 2.004); otra característica petrográfica observada e indicativa de éste proceso magmático son las inclusiones de vidrio en las plagioclasas. Estos procesos magmáticos, que eventualmente puede relacionarse con el origen de los magmas fuente de las ignimbritas, puede explicarse a la luz de la posible existencia de grandes cámaras magmáticas evolucionadas que reciben aportes de magmas máficos (Araña, 1.993). Marín-Cerón, 2007, explica la mezcla de magmas a partir de un suministro constante de magma desde la corteza inferior.

Para complementar el escenario y utilizar los datos geoquímicos de las lavas y las ignimbritas de Pisojé Alto se compararon los óxidos mayores de las ignimbritas riolíticas de las formaciones Guacacallo y de Popayán y los del vulcanismo de las ignimbritas andesíticas calcoalcalinas altas en potasio de Pisojé Alto con las lavas andesíticas de la cadena volcánica de los Coconucos (Monsalve y Pulgarín, 1.999, López, 2009), utilizando los diagramas de clasificación general de las rocas volcánicas de LeBas et al, 1986, el de Harker SiO_2 vs K_2O después de Peccerillo y

Taylor (1976) y el de AFM después de Kuno (1968) y los diagramas de Harker. (Figura 37, 38)

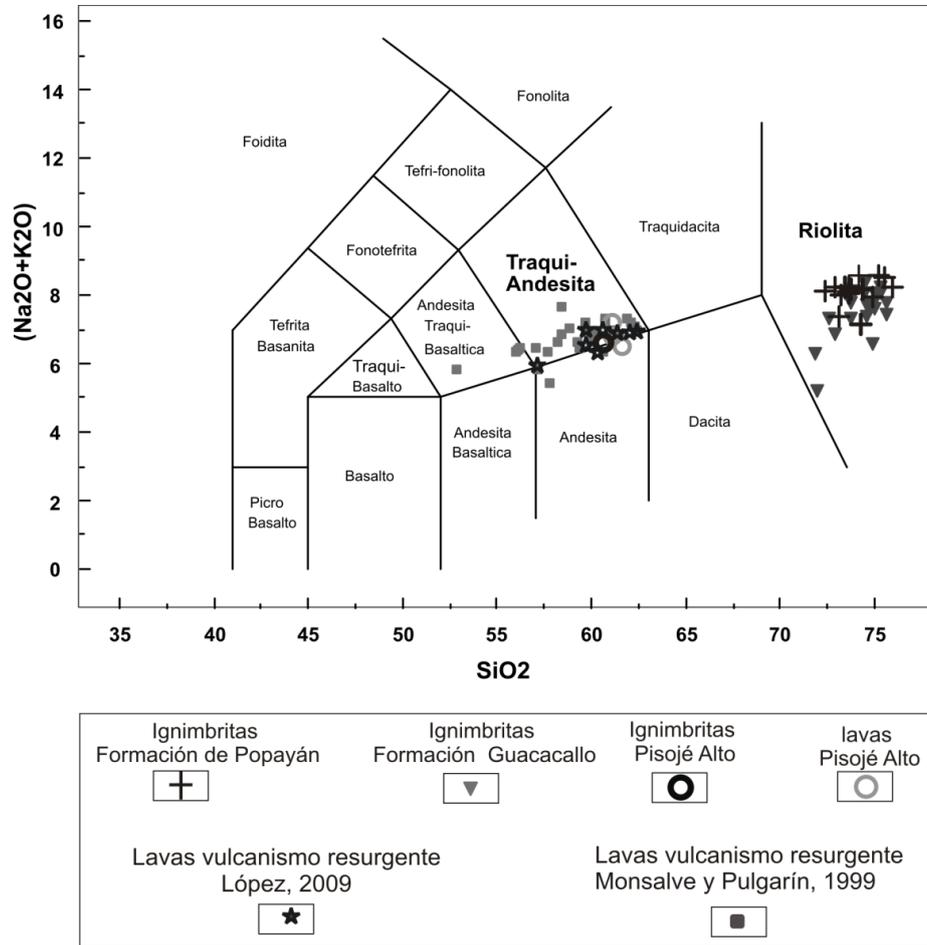


Figura 37. Diagrama TAS de las ignimbritas de las formaciones Popayán y Guacacallo; del vulcanismo resurgente de la cadena volcánica de Paletará y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto (Después de LeBas et al, 1968).

De esta evaluación se puede concluir que los óxidos mayores de las ignimbritas andesíticas de Pisojé Alto son correlacionables con los de las lavas que Monsalve y Pulgarín (1999) y López (2009), (Anexo 11 y 12), asocian con el vulcanismo intracaldérico de la Caldera de Paletará.

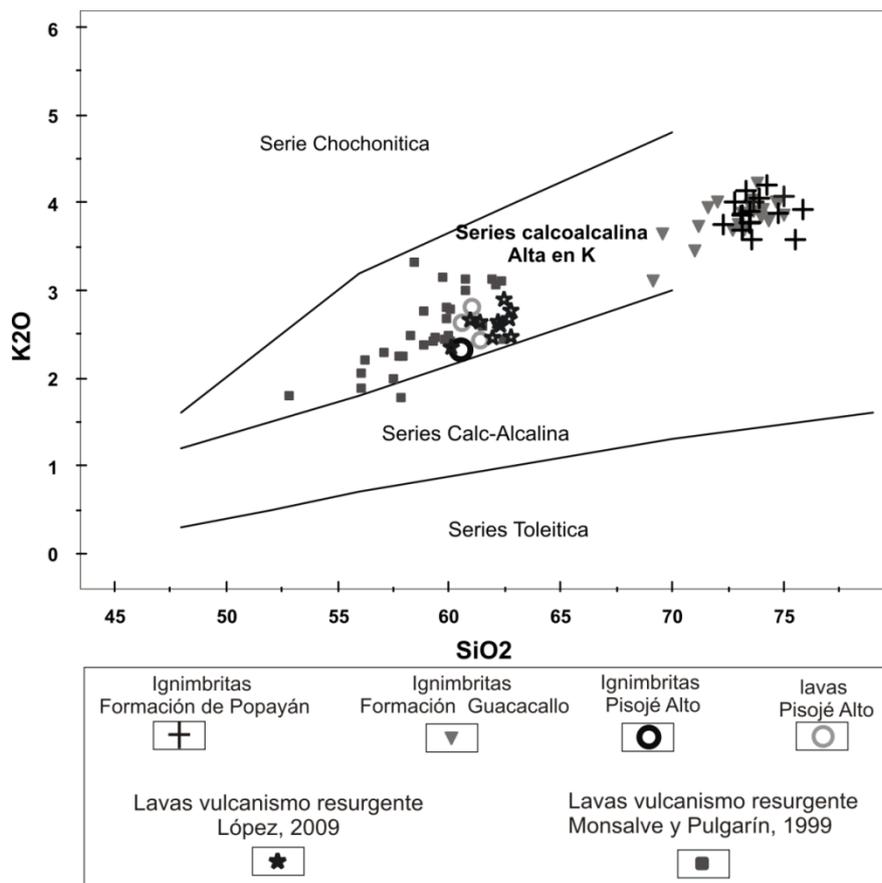


Figura 38. Diagrama de variación Harker SiO_2 vs K_2O de las ignimbritas de las formaciones Popayán y Guacacallo, de lavas del vulcanismo resurgente de la caldera de Paletará y de las ignimbritas y lavas de Pisojé Alto.

Con base en los datos se reconstruyen en forma general los eventos volcánicos que constituyen los depósitos de la Formación Popayán, de la siguiente manera: el vulcanismo ignimbrítico riolítico explosivo, que se asocia a la Caldera de Paletará, es un evento de gran significado en el vulcanismo del Neógeno del Suroeste de Colombia y se refleja, entre otros, por los potentes volúmenes de ignimbritas aún conservados, a pesar de las condiciones tropicales de la región, y que constituyen la base del vulcanismo reciente. El vulcanismo ignimbrítico riolítico se iniciaría a finales del Mioceno (7.1 ± 0.3 M.a) y se extendería al Plioceno con edades reportadas entre 3.54 ± 0.07 de acuerdo a Bellot-Gurlet, et al (2.008); 2.88 ± 0.26 M.a y 2.56 ± 0.24 M.a dataciones logradas en este trabajo y 2.1 ± 0.4 aportadas por van der Wiel (1.991). Este vulcanismo estaría en gran parte asociado a la Caldera de Paletará y aportó el material que conforma los depósitos de las formaciones de Popayán y Guacacallo.

Los depósitos piroclásticos de flujos de ceniza y bloques que suprayacen las ignimbritas de la Formación Popayán, pueden corresponder a parte del material de colapso de la Caldera de Paletará y de otras posibles estructuras caldéricas, así como material de colapso de domos asociados a esta importante etapa volcánica. Recostados, tanto a los depósitos de ignimbritas como a los de ceniza y bloques, se observa depósitos volcano sedimentarios de edades recientes.

Al tiempo del vulcanismo ignimbrítico riolítico o posterior a éste, se produce el vulcanismo ignimbrítico andesítico y efusivo intracalderíco cuyos productos conforman la Formación Coconuco (Monsalve, 2.000); de éste vulcanismo hacen parte, entre otros, las ignimbritas de Pisojé Alto. La base de la Formación Coconuco en el sector de Pisojé Alto la constituyen las lavas andesíticas depositadas sobre rocas metamórficas de Complejo Arquía que poseen xenólitos ultrabásicos.

5. Conclusiones

- De acuerdo con las características litoestratigráficas y cartográficas de las secuencias de ignimbritas del norte y del sur de la Formación Popayán, en la Meseta de Popayán, son correlacionables y su historia vulcanológica es comparable.
- Se propone como localidad estratigráfica tipo de la Formación Popayán el transecto localizado entre la quebrada Sombrerillo y el Crucero de Pan de Azúcar, ubicado al Oeste del municipio de Morales, al norte de la Meseta de Popayán, y en el departamento del Cauca. En esta localidad se observa la base y el techo de la formación, la secuencia estratigráfica es la más completa. Además, está ubicada en un sitio de fácil acceso.
- Las secuencias estratigráficas del Club Campestre de la ciudad de Popayán y la de la quebrada El Charco-río Hondo, ubicadas al sur de la Meseta de Popayán, en los municipios de Popayán y El Tambo respectivamente, se proponen como unidades de referencia auxiliares.
- La Formación Popayán está constituida por depósitos de ignimbritas sobre los que reposan discordantemente depósitos de flujos de ceniza y bloques que, a su vez, están suprayacidos por cenizas de caída. El techo lo constituye un suelo de color rojo derivado de cenizas volcánicas que representa un evento climático importante en la zona. Recostados contra las ignimbritas o los depósitos de ceniza y bloques se encuentran depósitos volcano sedimentarios asociados con épocas de quietud volcánica.
- Las ignimbritas de la Formación Popayán están constituidas, por lo menos, por cuatro unidades de flujo, lográndose identificar en las unidades de flujos inferiores por lo menos cinco capas.
- El vulcanismo de las ignimbritas de la Formación Popayán es un vulcanismo riolítico alto en potasio de la serie calcoalcalina, característico de márgenes continentales activas, sobre el cual se construyó el vulcanismo de la cadena volcánica de los Coconucos.
- El vulcanismo riolítico del segmento volcánico central de la Cordillera Central colombiana se inició por lo menos hace 7.1 ± 0.3 M.a, de acuerdo con dataciones K/Ar en biotita, reportadas por Kroonenberg et al (1982) y se extendió hasta hace

2.1±0.4 de acuerdo a las dataciones de trazas de fisión aportadas por van der Wiel (1.991).

- Los depósitos de ceniza y bloques que suprayacen a los depósitos de flujos de ignimbritas, de acuerdo a estudios petrográficos son de composición andesítica.
- Los depósitos riolíticos, altos en Potasio, de la serie calcoalcalina de las ignimbritas de la Formación de Guacacallo, localizada en el valle del Magdalena en el departamento del Huila, se correlacionan con los de la Formación Popayán, ubicadas en el departamento del Cauca
- Los depósitos de flujos de ignimbritas de la Formación Popayán y los de la Formación Guacacallo tienen una extensión de 2.250 Km² y un volumen de 225 Km³, cálculo considerado muy moderado, si se tiene en cuenta que no incluye los volúmenes de las cenizas co-ignimbríticas o acompañantes que en la mayoría de los casos son comparables con los de los depósitos de flujos de ignimbritas.
- Las ignimbritas de las Formaciones de Popayán y Guacacallo se clasifican como ignimbritas de alto grado, o sea emplazadas a altas temperaturas y de bajo aspecto, que en la literatura geológica se consideran cataclísmicas.
- De acuerdo a los volúmenes de las ignimbritas de las formaciones de Popayán y Guacacallo y a su alto contenido en potasio, se presume que la génesis de los magmas que dieron origen al vulcanismo riolítico del segmento central volcánico de la Cordillera Central colombiana tiene una gran influencia de la corteza continental.
- Las ignimbritas localizadas en el pie de monte Oeste de la Cordillera Central, en el municipio de Popayán, denominadas en este trabajo ignimbritas de Pisojé Alto, son traquiandesitas-andesitas altas en sílice de la serie calcoalcalina, y hacen parte de la Formación Coconuco. Se asocian al vulcanismo intracalderico de la Caldera de Paletará.

6. Recomendaciones

- Es inminente continuar con el programa de geoquímica de elementos trazas (Nb, Y, Nd) y geoquímica isotópica en las ignimbritas de las formaciones de Popayán y Guacacallo, para precisar sus orígenes y evaluar los procesos magmáticos involucrados, así como, para valorar el grado de intervención de la corteza continental, en el origen de los magmas generadores de éstas ignimbritas riolíticas del segmento volcánico Central, de la Cordillera Central.
- Realizar cartografía geológica y estratigrafía en las ignimbritas del piedemonte Oeste de la Cordillera Central, así, como geoquímica de elementos mayores, elementos trazas (Nb, Y, Nd) y geoquímica isotópica, permitirá definir si es correcta la relación propuesta en este trabajo, entre estas ignimbritas y las de las formaciones de Popayán y Coconuco.
- Realizar trabajos de geofísica en el eje de la Cordillera Central, permitirá definir la existencia de la Caldera de Paletará y de otras estructuras calderícas relacionadas con la génesis de los voluminosos mantos de ignimbritas.
- Establecer un programa sistemático de dataciones, en los depósitos de las ignimbritas de las formaciones de Popayán y Guacacallo y en los productos de la Formación Coconuco con especial énfasis en las ignimbritas de la Formación Popayán, que posee menor número de dataciones hasta el momento. Es pertinente que el programa que se propone aproveche el trabajo estratigráfico realizado en este trabajo.
- Escoger métodos de dataciones que permitan obviar la dificultad relacionada con el estado de meteorización de las ignimbritas, problema que obedece al elevado grado de vulnerabilidad a la meteorización química, de las ignimbritas de estas formaciones, debido su alto contenido de vidrio, que alcanza casi hasta el 90%, lo que hace que las dataciones de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y K/Ar presenten altos contenidos de Ar atmosférico. También hay que recordar que el laboratorio de CICESE, reportó bajo contenido de K en las hornblendas y en las biotitas de las muestras analizadas, lo que crea una limitación más en la utilización de las técnicas de datación de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y K/Ar

7. Referencias

- Abbott, D., Mooney, W., 1.995.** The structural and geochemical evolution of the continental crust: support for the oceanic plateau model of continental growth. *Reviews of Geophysics*, 33, 231–242.
- Acocella, V., Spinks, K., Cole, J.W., Nicol, A., 2.003.** Oblique back arc rifting of Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Tectonics* 22, 1045.
- Acosta, J., Velandia, F., Osorio, J., Lonergan, L., Mora, H., 2007.** Strike-slip deformation within the Colombian Andes. *Journal of the Geological Society, London, Special Publications*, 272, p 303-319.
- Acosta, J., Lonergana, L., Coward, M. P., 2004.** Oblique transpression in the western thrust front of the Colombian Eastern Cordillera. *Journal of South American Earth Sciences*, 17, p 181-194.
- Acosta, A. C. E., 2.003.** La Cordillera de los Andes. Ingeominas, Publicaciones Especiales, No.26, Bogotá, 290 p.
- Alvarado, B., Hubach, E., 1.932.** Estudio geológico alrededor de Popayán. Ingeominas, Informe 205, Popayán, p 4-7.
- Angermann, D., Klotz, J., Reiberg, C., 1.999.** Space-geodetic estimation of the Nazca-South America Euler vector. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. 171, p. 329-334
- Arango, M., y Gómez, B., 1.990.** Depósitos de flujos de escombros de San Isidro, Popayán, Departamento del Cauca. Universidad EAFIT, Medellín. 158 p.
- Araña, V., 1993.** La volcanología actual. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid. 578 p.
- Araña, V., Ortiz, R. R., 1.984.** Volcanología. Consejo Superior de investigaciones científicas. Ed. Rueda. 509 p.
- Arnoso, M., 2.007.** Tipos de depósitos piroclásticos. Ponencia. XIV Curso Internacional de Volcanología de los Andes Centrales del Sur. Salta, Argentina.
- Aspden, J. A., McCourt, W., Brook, M., 1.987.** Geometrical control of ubduction related magmatism: The Mesozoic and Cenozoic plutonic history of western Colombia: *Journal of the Geological Society, London*, v 144, p 893 – 905.
- Aspden, J. A., McCourt, W. J., 1.986.** Mesozoic oceanic terrane in the central Andes of Colombia. *Geology* 14, p 415–418.
- Bellot-Gurlet, L., Dorighel, O., Poupeau, G., 2.008.** Obsidian provenance studies in Colombia and Ecuador: obsidian sources revisited. *Journao of Archaeological Science*, 35, p 272-289.
- Bellot-Gurlet, L., Calligaro, Th., Dorighel, O. , Dran, J.-C. , Poupeau, G. , Salomon, J., 1.999a.** Pixe analysis and fission track dating of obsidian from South American prehispanic cultures (Colombia, Ecuador). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 150. p 616-621.
- Bellot-Gurlet, L. , Poupeau, G., Dorighel, O., 1.999b.** A pixe/fission-track dating approach to sourcing studies of obsidian artefacts in Colombia and Ecuador. *Journal of Archaeological Science*. No. 26, p 855–860. Article No. jasc.1999.0396, available online at <http://www.idealibrary.com> on.
- Bond, A., Sparks, R. S. J., 1.976.** The Minoan eruption of Santorini, Greece. *Geological Society of London, Journal*, 132, p 1-16.
- Bosworth, W., Burke, K., Strecker, M., 2.003.** Effect of stress fields on magma chamber stability and the formation of collapse calderas. *Tectonics* 22, 1042.

- Bucher, K., Frey, M., 1.994.** Petrogenesis of metamorphic rocks. 6th. Ed. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. New York. 318 p.
- Cas, R. A. F., Wright, J. V., 1.987.** Volcanic successions modern and ancient. Allen & Unwin, London, 528 p.
- Case, J. E., Barnes, J., Paris, G., Gonzalez, I. H. & Viña, A., 1.973.** Trans-Andean geophysical profile, southern Colombia. Geological Society of America Bulletin 84, p 2895–2904.
- Case, J. E., Duran, S. L. G., Lopez, A., Moore, W., R. 1.971.** Tectonic investigations on western Colombia and eastern Panamá. Geological Society of America Bulletin 82, p 2685–2712.
- Cediel, F., Barrero, D., Cáceres, C., 1.998.** Seismic atlas of Colombia: seismic expression of structural styles in the basins of Colombia: Robertson Reserch International. UK, ed., Geotec Ltda., Bogotá, v.1 to 6.
- Cepeda, H., Murcia, A., 1.991.** Geología de la plancha 410 La unión. Escala 1:100.000. INGEOMINAS. Bogotá. 18 p.
- Cole, J.W., 1.990.** Structural control and origin of volcanism in the Taupo volcanic zone, New Zealand. Bull. Volcanology, 52, p 445 – 459.
- Cole, J. W., Milner, D. M., Spinks, K. D., 2.005.** Calderas and calderas structures: a review. Earth-Sciences Review. Earth-Science Reviews, 69, p 1-26.
- Cole, J.W., Brown, S.J.A., Burt, R.M., Beresford, S.W., Wilson, C.J.N., 1.998.** Lithic types in ignimbrites as a guide to the evolution of a caldera complex, Taupo volcanic centre, New Zealand. Journal of Volcanology and Geothermal Research 80, p 217–237.
- Corredor, F., 2.003.** Eastward extent of the Late Eocene-Early Oligocene onset of deformation across the northern Andes: constraints from the northern portion of the Eastern Cordillera fold belt, Colombia. Journal of South American Earth Sciences, 16, p 445-457.
- Cortés, M., Colletta, B., Angelier, J., 2.006.** Structure and tectonics of the central segment of the Eastern Cordillera of Colombia. Journal of South American Earth Sciences, 21, p 437–465.
- De Porta, J., 1.974.** Lexique straiographique international Amerique Latine. Vol. V, Fascículo 4B, Colombia, 689 p.
- de Silva, S.L., Gosnold, W. D., 2.007.** Episodic construction of batholiths: Insights from the spatiotemporal development of an ignimbrite flare-up. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Article in Press, p 1-16.
- de Silva, S.L., Zandt, G., Trumbull, R., Viramonte, J.G., Salas, G., Jiménez, N., 2.006a.** Large ignimbrite eruptions and volcano-tectonic depressions in the Central Andes: a thermomechanical perspective. Geological Society, London, Special Publications, 269, p 47–63.
- de Silva, S. L., Zandt, G., Trumbull, R., Viramonte, J., 2.006b.** Large-scale silicic volcanism- the result of thermal maturation the crust. Advances in Geosciences, Vol. 1, p 215-230.
- de Silva, S.L., 1.989a.** Altiplano-Puna volcanic complex of the Central Andes. Geology Vol.17 (12), p 1102-1106.
- de Silva, S. L., 1.989b.** Geochronology and stratigraphy of the ignimbrites from the 21° 30'S to 23° 30'S portion of the central Andes of northern Chile. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 37, p 93-131.
- de Silva, S. L., Francis, P. W., 1.989.** Correlation of large volume ignimbrites- two case studies from the Central Andes of N. Chile. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 37, p 133–149.
- Demant, A., 2.005.** Ignimbrites: stratigraphic marker and record of the magmatic and tectonic evolution. C.R Geoscience, 337, p 1301-1302.

- Dickin, A., 1.995.** Radiogenic isotope geology. Departament of geology. Cambridge. University press. p 246-276.
- Droux, A., Delaloye, M., 1.996.** Petrography and Geochemistry of Plio-Quaternary Calc-Alkaline Volcanoes of Southwestern Colombia. *Journal of South America Earth Sciences*. 9, No. 1-2, p 27-41.
- Eide, E. A., Torvik, T.H., Andersen, T. B., Arnaud, N., O., 1.999.** Early carboniferous unroofing in western Norway: a tale of alKali feldspar thermochronology. *Journal Geology*. 107. P 353-354.
- Etayo, F. (y 20 autores más), 1.986.** Mapa de terrenos geológicos de Colombia. Publicaciones geológicas especiales del INGEOMINAS, 14, 235p.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S., 2.005.** Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LVII, No. 3, p 343-378.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Rosas-Elguera, J., 2.002.** Ignimbrite flare-up and deformation in the southern Sierra Madre Occidental, western Mexico: Implications for the late subduction history of the Farallon plate. *Tectonics*, Vol. 21, No. 4, p 1-24.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G., Carrasco-Núñez, G., 1.999.** Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: From the Sierra Madre occidental to the Mexican Volcanic Belt, *Geology*, 27, p 303-307.
- Fisher, R. V., Schmincke, H. U., 1.984.** Pyroclastic rocks. Springer-Verlag, Berlín. Heidelberg-New Cork. 472 p.
- Francis, P., 1.983.** Giant volcanic calderas. *Scientific American*, 248 (6), p 46-60.
- Francis, P.W., Hammill, M., Kretzschmar, G., Thorpe, R., 1.978.** The Cerro Galan Caldera. North-west Argentina and its tectonic setting. *Nature* 274, p 749-751.
- Francis, P. W., Baker, M. C. W., 1978.** Sources of two large volume ignimbrites in the Central Andes: some Landsat evidence. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 4, p 81-87.
- Freytmuller, J. T., Kellog, J. N., Vega, V., 1.993.** Plate motion in the North Andean region. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98, p 853-863.
- Gansser, A., 1.973.** Facts and theories on the Andes. *Geology Society. London*, 129, p 93-131.
- Geyer, A., Folch, A., Martí, J., 2.006.** Relationship between caldera collapse and magma chamber withdrawal: An experimental approach. *Journal of Volcanology and geothermal Research*, 157, p 375-386.
- Gill, J. B., 1.981.** Orogenic Andesites and Plate Tectonics, Heidelberg: Springer, 330 p.
- Grosse, E., 1.926.** El Terciario Carbinifero de Antioquia. Ed Dietrich Reimer, Ernesto Vohsen, Berlín, 361 p.
- Grosse, E., 1.935.** Acerca de la geología del sur de Colombia II. Compilación de los estudios oficiales en Colombia. Bogotá. Tomo III. p 139-23.
- Grosser, J. R., 1.989.** Geotectonic evolution of the Western Cordillera of Colombia: new aspects from geochemical data on volcanic rocks. *Journal of South American Earth Sciences* 2, p 359-369.
- Gutscher, M.A., 2.002.** Andean subduction styles and their effect on thermal structure and interpolate coupling. *Journal of South American earth sciences*. Vol. 15. P 3-10.
- Hall, M y Wood, C. A., 1.985.** Volcano-tectonic segmentation of the northern Andes. *Geology*, 13(3).pp. 203-207.
- Harmon, R.S., Barreiro, B., Moorbath, S., Hoefs, J., Francis, P.W., Thorpe, R.S., Deruelle, B., McHugh, J. and Viglino, J.A., 1.984.** Regional O-, Sr-, and Pb-isotope relationships in late

Cenozoic calc-alkaline lavas of Andes Cordillera. *Journal of the Geological Society*, Vol.141, no. 5, p 803-822.

Hawkesworth, C., Clarke, C., 1.994. Partial melting in the Lower crust: new constraints on crustal contamination processes in the Central Andes, in Reutter, K.J., Scheuber, E. and Wigger, P.J., eds, *Tectonics of the Southern Central Andes, Structure and Evolution of an Active Continental Margin*: Berlin, Springer Verlag, p 93-101.

Hernández, P., O., 2.006. Crustal analysis of the Colombian territory with support from potential field anomalies. *Sociedad Minera Kedadha. S.A. Colombia*. 60 p.

Hubach, E., 1.957. Contribución a las unidades estratigráficas de Colombia. Informe No. 1212. Ingeominas. Bogotá. p 3-9.

Hubach, E., Alvarado, B., 1.934. Geología de los departamentos del Valle y del Cauca, en especial del carbón. Ingeominas, Popayán, Informe 224, p 174-189.

Hutchison, C., 1.974. *Laboratory handbook of petrographic techniques*, 527 p.

INGEOMINAS, 2.000. Atlas de amenaza volcánica de Colombia.

James, D.E., Murcia A., 1.984. Crustal contamination in northern Andean volcanics. *Journal of the Geological Society*, London, Vol. 141, p 823-830.

James, M., Orrego, L. A., Murcia, L. A., Page, W., Giraldo, M., Marín, W., 1.986. El sismo de Popayán del 31 de marzo de 1983. *Ingeominas y otros*, Bogotá, p 3-38.

Kellog J. N., Vega V., 1.995. Tectonic development of Panama, Costa Rica and the Colombian Andes: constraints from Global Positioning System geodetic studies and gravity. *Geological Society of America. Special paper 295*, p 75-90.

Kroonenberg, S., León, L. A., Pastana, J. M. do N., Pastana, do N, J. M., Pessoa, M. R., 1.981. Ignimbritas pilo-pleistocénicas en el suroeste del Huila, Colombia y su influencia en el desarrollo morfológico. *Rev. CIAF*, 6 (1-3), p 293-314.

Kroonenberg, S., Pichlerh, H., y Diederix, H., 1.982. Cenozoic alkalibasaltic to ultrabasic volcanism in the uppermost Magdalena Valley, Southern Huila Department, Colombia: *Geologia Norandina*, v 5, p 19-26.

Latter, J., H., 1.989. *Volcanic hazards: assessment and monitoring*. Vol. 1., IAVCEI. Ed. Springer-Verlag. Universidad de California. Digitalizado 2.009. 625p.

Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeinsen, A., Zanettin, B., 1.986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica diagram. *Journal of Petrology*. Oxford. Vol. 27, p 745 – 750.

Lecheler, P., J., Desilets, M. O., 1.987. A Review of the use of loss on ignitions as a measurement of total volatiles in whole rocks analysis. *Chemical Geology*. Elsevier. Vol. 63. 3-4. P. 341-344.

Le Maitre, R. W., 2.002. *Igneous rocks a classification and glossary of terms Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. Cambridge University Press, 236 p.

León, A., Padilla, E. y Marulanda, N., 1.973. Geología, recursos minerales y geoquímica de la parte NE del Cuadrángulo O-5, El Bordo, departamento del Cauca. Informe 1652. Ingeominas. Bogotá.

Lindsay, J. M., de Silva, S.L., Trumbull, R. B, Emmermann, R., Wemmer, K., 2.001a. La Pacana Caldera: a re-evaluation of the stratigraphy and volcanology of one of the world's largest resurgent calderas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106, p 145-173.

Lindsay, J. M., Schmitt, A. K., Trumbull, R. B., de Silva, S. L., Siebel, W., Emmermann, R., 2.001b. Magmatic evolution of the La Pacana caldera system, Central Andes, Chile:

Compositional variation of two cogenetic large-volume felsic ignimbrites. *Journal of petrology*, Vol. 42, N 3, p 459-486.

Lofgren, G., 1.970. Experimentally produced devitrification textures in natural rhyolitic glass. *Geological Society of American Bulletin*, 82, p 111-124.

López, C. S., 2009. Estratigrafía, petrografía y geoquímica de las rocas volcánicas del flanco occidental del volcán Puracé, alrededores de Coconuco. Sin publicar. Tesis de Maestría. Universidad Eafit. Medellín. Colombia. 96p.

Lucassen, F., Franz, G., Thirlwall, M., Metzger, K., 1.999a. Crustal recycling of metamorphic basement: Late Paleozoic granites of northern Chile (c. 22°S), implications for the composition of the Andean crust. *Journal of Petrology*, 40, p 1527–1551.

Lucassen, F., Lewerenz, S., Franz, G., Viramonte, J. G., Metzger, K., 1.999b. Metamorphism, isotopic ages and composition of lower crustal granulite xenoliths from the Cretaceous Salta rift, Argentina. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134, p 325–341.

Maya, M., González, H., 1.995. Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico INGEOMINAS*, 35 (2-3), Bogotá, p 43-53.

McCourt, W., Aspden, J., Brook, M., 1.984. New geological and geochronological date from the Colombian Andes: Continental growth by multiple accretion. *Journal Geological Society*, London, Vol. 141, p 831-845.

Marín-Cerón, M.I., 2.007. Major, trace and multi-isotopic systematic of SW Colombian volcanic arc, northern Andes: Implication 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. 161p.

Mcphie, J., Doyle, M., Allen, R., 1.993. Volcanic textures: a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks. Centre for Ore Deposit and Exploration Studies, University of Tasmania. 196p.

Meissner, R.O., Flueh, E.R., Stibane, F., Berg, E., 1.976. Dynamics of the active plate boundary in southwest Colombia according to recent geophysical measurements. *Tectonophysics* 35, p 115- 136.

Moos, D., Zoback, M.D., 1.993. State of stress in the Long Valley caldera, California. *Geology* 2, p 837– 840.

Monsalve, M. L., 2.000. Catalogo de las rocas volcánicas Neógenas de Colombia. Fascículo Formación Coconucos: INGEOMINAS, 32 p.

Monsalve, M.L., Pulgarín, B., 1999. Cadena volcánica de los Coconucos (Colombia), centros eruptivos y productos recientes. *Boletín geológico INGEOMINAS*. 37. p 17-51.

Marshall, P., 1.935. Acid rocks of the Taupo-Rotorua volcanic district. *Trans. R. Soc. Nueva Zelanda*. 64. 323p.

Murcia, A., Pichler, H., 1.987. Geoquímica y Dataciones radiométricas de las ignimbritas cenozoicas del Sw de Colombia. *Revista CIAF*, Bogotá, Tomo II (1-3), Vol. 11, p 346-363.

Murcia, L. A., 1.987. Vulcanismo activo y terremotos asociados a Megafallamiento en el SW de Colombia. *Simp. Internac. Neotectónica y Riesgos Volcánicos*, 1986. *Rev. CIAF*, 11(2), Bogotá, p 161-178.

Murcia, A., 1.982. El vulcanismo Plio-Cuaternario de Colombia: Depósitos piroclásticos asociados y mediciones isotópicas de Sr^{87}/Sr^{86} , Nd^{144}/Nd^{144} y $\delta^{18}O$ en lavas de los volcanes Galeras, Puracé y Nevado del Ruiz. *Publicaciones Geológicas Especiales del Ingeominas*, Bogotá, No.10, p 3-17.

Murcia, L. A., Marín, P. A., 1.981. Petrología y petroquímica en lavas recientes de algunos volcanes de Colombia. *Revista CIAF*, 6(1-3), Bogotá, p 349-363.

- Newhall, C. G., Self, S., 1.982.** The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, Vol.87, (C2), p 1231-1238.
- Nivia, A., 1.993.** Evidencias de obducción en el Complejo Ultramáfico de Bolívar. *Memorias VI Congreso de Geología*, Tomo I, Medellín, p 63-79.
- Nivia, A., 1.989.** El terreno Amaimé volcánico una provincia acrecionada de basaltos de meseta oceánica. *V Congreso Colombiano de Geología*, 1:1-30. Bucaramanga.
- Ordoñez, O., 2.001.** Caracterización isotópica Rb-Sr e Sm-Nd dos principais eventos magnéticos nos Andes Colombianos. Doctoral thesis. Brasília University. Brasília. 139 p.
- Orrego, L., A., París, G., 1999.** Cuadrángulo N-6 Popayán: Geología, Geoquímica y Ocurrencias Minerales (Versión resumida). *Publicaciones geológicas especiales de INGEOMINAS*. No. 22. Bogotá. 57p.
- Orrego, L. A., 1.993.** Plancha geológica 364 – Timbio, escala 1:100.000. INGEOMINAS, Bogotá.
- Orrego, A. y París, G., 1.991.** Cuadrángulo N-6, Popayán: Geología, geoquímica y ocurrencias minerales. Informe interno. Ingeominas. Bogotá.
- Orrego, L. A., Agudelo, A., Bles, J., James, M., Vásquez, E., 1.992.** Microzonificación sismogeotéctica de Popayán. *Ingeominas, Publicaciones especiales*, No.2, p 28-49.
- Orrego, L. A., Mosquera, D., 1.989.** Primero y segundo simposio de geología regional (Cordillera Central y Occidental) informe N° CC-068. Bogotá, 33 p.
- Orrego, A., Rossman, D., París, G., 1.976.** Geología del cuadrángulo N-6 Popayán. Informe 1711 Ingeominas. Popayán. 129 p.
- Orrego, L. A., 1.975.** Geología y Ocurrencias Minerales de la parte oeste del Cuadrángulo N-6 Popayán. *Ingeominas, Popayán, Informe 1690*, 121 p.
- París, Q. G., Marín, W., Sauret, B., Vergara, H., Bles, J.L., 1.992.** Neotectónica. Microzonificación sismogeotéctica de Popayán, *Ingeominas, Publicaciones especiales*, No.2, p 28-49.
- Pecerillo, A., Taylor, S., 1.976.** Geochemistry of Eocene calco-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to mineralogy and Petrology*. V. 58. p 63-81.
- Petrelli, M., Poli, G., Perugini, D, Peccerillo, A., 2.007.** Petrograph: New Software to Visualize, Model, and Present Geochemical Data in Igneous Petrology. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, vol 6, Q07011, DOI 10.
- Petrinovic, I. A., 1.999.** La caldera de colapso del cerro Aguas Calientes, Salta, Argentina: evolución y esquema estructural. *Argentina*. 34 (2-3). p 243-253.
- Pilger, R. H., 1.984.** Cenozoic plate kinematics, subduction and magmatism: South American Andes. *Journal Geological Society, London*, Vol. 141, p 793-802.
- Ponce, Á., 1.979.** Anotaciones sobre geología de la parte SE del departamento de Nariño. *Ingeominas, Bogotá, Informe 1769*, 53 p.
- Ramos, V. A., Alemán, A., 2.000.** Northern Andes. *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro. p 453-480.
- Ramos, V. A., 1.999.** Plate tectonic setting of the Andean Cordillera. *Episodes*. Vol 22. N 3. p 183-190.
- Riller, U., Petrinovic, I., Ramelow, J., Strecker, M., Oncken, O., 2.001.** Late Cenozoic tectonism, collapse caldera and plateau formation in the central Andes. *Earth and Planetary Science Letters* 188, p 299-311.

- Rollinson, H., 1.993.** Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Pearson, Prentice Hall, England, Longman Group UK Limited, 352 p.
- Ross, C. y Smith, R., 1.961.** Ash flow tuffs: their origin geologic, relations and identification. Geological Survey Professional, Washington. Paper 366. 77 p
- Rovida, A., Tibaldi, A., 2.005.** Propagation of strike-slip faults across Holocene volcano-sedimentary deposits, Pasto, Colombia. *Journal of Structural Geology.*, 27, p 1838-1855.
- Ruiz, S., Marquínez, G., 2.002.** Geología de la Plancha 343 Silvia. Ingeominas. Bogotá.
- Ruiz, J., Patchett, P. J., Arculus, R. J., 1.998.** Nd-Sr isotopic composition of lower crustal xenoliths. Evidence for the origin of mid-Tertiary felsic volcanics in Mexico, *Contrib. Mineral. Petrol.* 99, 36 – 43.
- Schmitt, C., 1.983.** Petrologische untersuchungen junger vulcanite in sudkolumbien. Tesis de doctorado Universidad de Tubingen. Refo. Druck Hans Volver Tubingen. Alemania, 207 p.
- Shelley, D., 1.993.** Igneous and metamorphic rocks under the microscope: classification, textures, microstructures and mineral preferred orientations. Chapman & Hall, London, 445 p.
- Sigurdsson, H., Kelley, S., Leckie, R.M., Carey, S., Bralower, V., King, J., 2.000.** History of Circum-Caribbean explosive volcanism:⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of tephra layers. *Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results, Vol. 165, p 299-314.*
- Sigurdsson, H, Carey, S. N., 1.989.** Plinian and co-ignimbrite tephra fall from the 1815 eruption of Tambora volcano. *Bulletin of Volcanology*, 51, p 243-270.
- Simkin, T, Fiske, R. S., 1.983.** Krakatau 1883: The volcanic eruption and its effects. Washington D.C., Smithsonian Institution Press, 464p.
- Smith, R. D., Cameron, K. L., McDowell, F. W., Nyemeyer, S., Sampson, D. E., 1.996.** Generation of voluminous silicic magmas and formation of mid Cenozoic crust beneath north-central Mexico: Evidence from ignimbrites, associated lavas, deep crustal granulites, and mantle pyroxenites, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123, p 375 – 389.
- Spinks, K. D., Acocella, V., Cole, J. W., Bassett, K. N., 2.005.** *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 144, p 7– 22.
- Stern, 2.004.** Active Andean volcanism: its geological and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 31, No.2, p 161-206.
- Streckeisen, A., 1.978. Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres carbonatites and melilitic rocks.** IUGS Subcommission on the Systematic of igneous rocks Recommendations and suggestions. *Neues Jahrbuch fur Mineralogie. Stuttgart. Abhandlungen*, Vol.134, p 1-14.
- Stutzer, O., 1.934.** Observaciones geológicas durante una doble travesía por la Cordillera Central de Colombia. CEGOC, 2, Bogotá, p 17- 38.
- Taboada, A., Rivera L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, J., Olaya, J. Rivera, C., 2.000.** Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia): *Tectonics*, 19 (5), p 787-813.
- Tenjo, S., 1.983.** Estudios básicos de geofísica y geotecnia para la ciudad de Popayán y alrededores, posteriores al terremoto. C.V.C. Cali. 52 p.
- Thorpe, R.S., 1.984.** The tectonic setting of active Andean volcanism. In *Andean magmatism: Chemical and Isotopic Constraints* (Harmon, R.S. Barreiro, B.A., editors). Shiva Geological Series, Shiva Publications, Nantwich, U.K., p 4-8.
- Thorpe, R.S., Francis, P.W., O'Callaghan, L., 1.984.** Relative roles of source composition, fractional crystallisation and cristal contamination in the petrogenesis of Andean volcanic rocks. *Royal Society of London, Philosophical Transactions*, A310, p 75-92.

- Toussaint, J., F., Restreo, J., J., 1.989.** Acreciones sucesivas en Colombia: Un Nuevo modelo de evolución geológica. V Cong. Col. Geol. Bucaramanga. Tomo I. p 127-146.
- Tello, H., Hernández, T., 1.976.** Investigación geológica en el Parque Arqueológico de San Agustín (Huila). Tesis de grado. Inédito. Universidad nacional de Colombia. Bogotá. 30 p.
- Torres, M., P., Jerez, K., Toro, G., Pulgarín, B., 2.009.** Formación Popayán, Departamento del Cauca, Nuevas Consideraciones. XII Congreso Colombiano de Geología. Boyacá.
- Torres, M. P., Monsalve, M. L., Pulgarín, B., Cepeda, H., 1.999.** Caldera de Paletará: aproximación a la fuente de las ignimbritas del Cauca y del Huila (Colombia). Boletín Geológico. Ingeominas. Bogotá. 37. (1-3). P 1-15.
- Torres, M. P., 1.997.** Aporte al conocimiento de la geología y la estratigrafía de la Formación Popayán departamento del Cauca. Novedades Colombianas, Nueva época. Popayán. p 4-28.
- Torres, P., Ibáñez, D., Vásquez, E., 1.992.** Geología y estratigrafía de la Formación Popayán. Informe Interno. Ingeominas, Popayán, 85 p.
- Tricart, J., Trautman, 1.974.** Quelques aspects de l'évolution geomorphologique quaternarie de haut bassin du Magdalena (Colombia). Bull. Inst. Fr. Et. And., 3, 4, p 37-58.
- Van der Wiel, A. M., 1.991.** Uplift and volcanism of the SE Colombian Andes in relation to Neogene sedimentation in the upper Magdalena valley. The Quaternary of Colombia, Vol. 18, p 139-167.
- Van Zuidan, R., 1.985.** Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. International Institute for aerospace survey and earth sciences-ITC. Smits Publishers. The Hague. The Netherland. 442 p.
- Velandia, F., Acosta, J., Terraza, R., Villegas, V., 2.005.** The current tectonic motion of the Northern Andes along the Algeciras Fault System in SW Colombia. Tectonophysics, in press.
- Vernon, R.H., 2.004.** A practical guide to rocks microstructure. Cambridge, University press. 594 p.
- Viromonte, J. G., Petrinovic, I. A., 1.990.** Calderas asociadas a megafracturas transcurrentes en los Andes Centrales del Sur. XI Congreso Geológico Argentino, Actas, II, p 369–372.
- Walker, G. P. L., 1.983.** Ignimbrite type and ignimbrite problems. Journal of Volcanology and geothermalresrch. No.17. p 65-88.
- Watkins, J., Manga, M., Martin, M., 2.008.** Diffusion-controlled spherulite growth in obsidian inferred from H₂O concentration profiles. IAVCEI, General Assembly- Reykjavík – Iceland, 89 p.
- Weber, M.B.I., Tarney, J., Kempton, P.D., Kent, R. W., 2.002.** Crustal make-up of the northern Andes: evidence based on deep crustal xenolith suites, Mercaderes, SW Colombia. Tectonophysics 345, p 49-82.
- White, R.V., Tarney, J., Kerr, A.C., Saunders, A.D., Kempton, P.D., Pringle, M.S., Klaver, G.T., 1.999.** Modification of an oceanic plateau, Aruba, Dutch Caribbean: implications for the generation of continental crust. Lithos, 46, 43–68.
- Wilson, C. J. N., Houghton, B.F., McWilliams, M.O., Lanphere, M.A., Weaver, S.D., Briggs, R.M., 1.995.** Volcanic and structural evolution of Taupo Volcanic Zone, New Zealand: a review. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 68, p 1 –28
- Wilson, C. J. N., 1.985.** The Taupo Eruption, New Zealand II. The Taupo Ignimbrite. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 314, No. 1529, p 229-310.
- Wilson, M., 1.989.** Igneous petrogenesis. A global tectonic approach. Unwin Hyman, 466 p.
- Woodward Clyde Consultants, 1.983.** Seismic hazard evaluation Calima III project: Consorcio Integral-Planes, Ltda., Corporación Autónoma Regional del Cauca (CVC), Cali, 116 p. N0 69. P.

ANEXOS

INFORMACIÓN DE CAMPO

A continuación se describe la ubicación geográfica, las coordenadas X, Y, Z de las estaciones de campo representadas en el mapa de estaciones.

Anexo 4. Coordenadas geográficas de las diferentes estaciones de las campañas de campo.

| ESTACIÓN | TIPO | UBICACIÓN | X | Y | ALTURA |
|----------|------------------------|--|---------|--------|--------|
| PKSW011 | Columna Estratigráfica | Club Campestre | 1055717 | 764056 | 1760 |
| PKSW012 | Columna Estratigráfica | Club Campestre | 1055990 | 764100 | 1750 |
| PKSW013 | Columna Estratigráfica | Club campestre | 1055701 | 764055 | 1780 |
| PKSW014 | Columna Estratigráfica | Vereda la claridad | 1056070 | 764040 | 1790 |
| PkSW015 | Columna Estratigráfica | Río Palacé | 1060554 | 769572 | 1870 |
| PKSW016 | Columna Estratigráfica | Mina Conexpe Diabasa | 1061164 | 761661 | 2055 |
| PKSW017 | Columna Estratigráfica | Vía el Tambo, Q. la Chorrera. | 1042566 | 765838 | 1650 |
| PKSW018 | Geomorfología | Valle Q. La Chorrera | 1042488 | 765960 | 1660 |
| PKSW019 | Columna estratigráfica | Cementerio Puelenje | 1050115 | 761395 | 1700 |
| PKSW020 | Columna Estratigráfica | Vía EL Tambo, Q. la Chorrera | 1042566 | 765838 | 1650 |
| PKSW021 | Roca dura | Mina Diabasa | 1036012 | 772885 | 1550 |
| PKSW022 | Geomorfología | Cerca de la mina de diabasa. río Cauca. | 1036797 | 771990 | 1625 |
| PKSW023 | Deposito | Vía el Tambo, Quebrada la Chorrera | 1042610 | 765855 | 1690 |
| PKSW024 | Columna Estratigráfica | Corte E, vía la Yunga | 1040928 | 766326 | 1630 |
| PKSW025 | Columna Estratigráfica | Vereda El tablón, vía la Yunga | 1040308 | 766753 | 1775 |
| PKSW026 | Roca dura | Vía a la cantera de Diabasas | 1037422 | 770084 | 1665 |
| PKSW027 | Roca dura | Intrusivo, la Yunga. | 1037922 | 769030 | 1735 |
| PKSW028 | Columna Estratigráfica | Vía la Yunga | 1038855 | 767800 | 1725 |
| PKSW045 | Deposito | Club campestre, Bloque E | 1055911 | 763970 | 1810 |
| PKSW046 | Deposito | Club campestre, Bloque W | 1055825 | 763937 | 1820 |
| PKSW047 | Deposito | Vía Totoró- río Palace | 1060554 | 769572 | 1870 |
| PKSW048 | Geomorfología | Geleón, Cerro del Credo | 1034270 | 755561 | 1700 |
| PKSW049 | Columna Estratigráfica | Galeón, Río Timbio, V. Pomorroso | 1033341 | 756608 | 1730 |
| PKSW050 | Deposito | Galeón, V. Pomorroso, Escuela | 1033200 | 757654 | 1570 |
| PKSW051 | Columna Estratigráfica | Galeón, V. Pomorroso, Escuela | 1033034 | 757630 | 1610 |
| PKSW052 | Columna Estratigráfica | Galeón, V. Pomorroso, Escuela | 1033130 | 757520 | 1710 |
| PKSW053 | Columna Estratigráfica | Galeón, V. Pomorroso, Escuela | 1033132 | 757450 | 1730 |
| PKSW054 | Columna Estratigráfica | Galeón, V. Pomorroso, Escuela | 1033122 | 757416 | 1740 |
| PKSW055 | Columna Estratigráfica | Galeón, Cancha de futbol | 1033078 | 757257 | 1775 |
| PKSW057 | Deposito | Margen sur de la Q. Sombrerillo. Municipio de Morales. | 1043006 | 796175 | 1310 |

| ESTACIÓN | TIPO | UBICACIÓN | X | Y | ALTURA |
|----------|------------------------|--|---------|--------|--------|
| PKSW058 | Deposito | Margen sur de la Q. Sombrerillo. Municipio de Morales. | 1044827 | 796870 | 1600 |
| PKSW059 | Deposito | Alto del Credo. Municipio de El Tambo. | 1034595 | 755341 | 1750 |
| PKSW060 | Depósito | Alto del Credo. Municipio de El Tambo. | 1034063 | 755723 | 1750 |
| PKSW069 | Columna Estratigráfica | Vereda Pisoje alto. Mina Conexpe S.A | 1061164 | 761661 | 2055 |
| PKSW070 | Depósito | Vereda Pisoje alto. Mina Conexpe S.A | 1061275 | 761275 | 2010 |
| PKSW071 | Depósito | A 20m de la porteria de Conexpe. S.A. Vereda Pisoje Alto. | 1061140 | 761656 | 2016 |
| PKSW072 | Depósito | Margen sur de la Q. Sombrerillo. | 1043448 | 796572 | 1455 |
| PKSW073 | Depósito | Margen sur de la Q. Sombrerillo. | 1044827 | 796870 | 1600 |
| PKSW074 | Geomorfología | Margen Norte de la Q. La Porquera | 1048561 | 796119 | 1660 |
| PKSW075 | Depósito | Margen sur de la Q. Sombrerillo. | 1043013 | 795866 | 1270 |
| PKSW076 | Depósito | Margen sur de la Q. Sombrerillo. | 1043070 | 796158 | 1290 |
| PKSW077 | Depósito | Margen sur de la Q. Sombrerillo. | 1042902 | 796212 | 1340 |
| PKSW078 | Depósito | Margen sur de la Q. Sombrerillo. | 1042834 | 796223 | 1340 |
| PKSW079 | Depósito | Margen sur de la Q. Sombrerillo. | 1043349 | 796553 | 1430 |
| PKSW080 | Depósito | Margen sur de la Q. Sombrerillo. Municipio de Morales. | 1043421 | 796587 | 1440 |
| PKSW081 | Depósito | Margen sur de la Q. Sombrerillo. | 1043618 | 796579 | 1500 |
| PKSW082 | Depósito | Margen sur de la Q. Sombrerillo. | 1044005 | 796587 | 1570 |
| PKSW083 | Geomorfología | Margen sur vía El Tambo | 1040643 | 765958 | 1570 |
| PKSW084 | Depósito | Talud sobre la vía a El Tambo. Vereda Rio Hondo | 1040568 | 765942 | 1590 |
| PKSW085 | Geomorfología | Vereda Los Llanos | 1037909 | 766751 | 1560 |
| PKSW086 | Depósito | Vereda Los Llanos. Sector Casas Viejas. | 1037496 | 765885 | 1630 |
| PKSW087 | Columna Estratigráfica | Vereda Los Llanos. Sector Casas Viejas. | 1037349 | 765792 | 1670 |
| PKSW088 | Geomorfología | Vereda Los Llanos | 1035089 | 768957 | 1640 |
| PKSW089 | Columna Estratigráfica | Vereda los Llanos. Cantera Peñaloza | 1037172 | 766137 | 1665 |
| PKSW090 | Roca dura | Vereda Julumito. Puente sobre el río Cauca. | 1048165 | 764674 | 1675 |
| PKSW091 | geomorfología | Vía a Pueblillo. margen S. del río Molino. | 1054506 | 763056 | 1740 |
| PKSW092 | Depósito | Vía a Pueblillo. margen N del río Molino. | 1055861 | 761901 | 1785 |
| PKSW093 | Depósito | Cantera ubicada al margen E del Río Molino, sector Pueblillo Alto | 1055029 | 761997 | 1775 |
| PKSW094 | Roca dura | Cauce de la Q. Pisojé | 1058374 | 763748 | 1840 |
| PKSW095 | Roca dura | Vereda San Lorenzo. Corregimiento El rosario. Municipio de Cajibío | 1034519 | 780778 | 1500 |
| PKSW096 | Depósito | Vereda San Lorenzo. Corregimiento El Rosario. Municipio de Cajibío | 1035402 | 778983 | 1695 |
| PKSW097 | Roca dura | Vereda la Balastrea. Corregimiento de El Rosario. Municipio de Cajibío | 1035640 | 779532 | 1710 |
| PKSW098 | Roca dura | Vereda La Tetilla. Puente sobre el río Palacé. | 1043275 | 774826 | 1485 |
| PKSW099 | Geomorfología | Verda Santa Rosa, Finca Santa Lucía. | 1045527 | 771178 | 1785 |
| PKSW101 | Depósito | Q. Honda Vía la Yunga | 1038641 | 767455 | 1690 |
| PKSW102 | Depósito | Camino que de la vía Principal La Yunga conduce al W (rio Hondo) | 1038458 | 767719 | 1715 |
| PKSW103 | Roca dura | Camino que de la vereda La Yunga conduce al Río Hondo | 1037896 | 768934 | 1710 |

| ESTACIÓN | TIPO | UBICACIÓN | X | Y | ALTURA |
|----------|-----------|--|---------|--------|--------|
| PKSW104 | Roca dura | Margen W del río Palacé. Vía Popayan-Totoró. | 1061047 | 769480 | 1820 |
| PKSW105 | Depósito | Casa de máquinas represa Florida II | 1063251 | 758730 | 2000 |
| PKSW106 | Depósito | Vía Popayán-Quintana | 1063559 | 763080 | 2150 |
| PKSW107 | Depósito | Vía que de la Vereda Las Guacas conduce a la Vereda Quintana | 1070117 | 761801 | 2500 |
| PKSW108 | Depósito | Puente sobre el Río Piedras, Vereda Quintana | 1069969 | 761075 | 2450 |

Anexo 5. Lista Coordenadas geográficas de las muestras colectadas en las columnas estratigráficas y tipo de análisis realizado a cada una de las muestras.

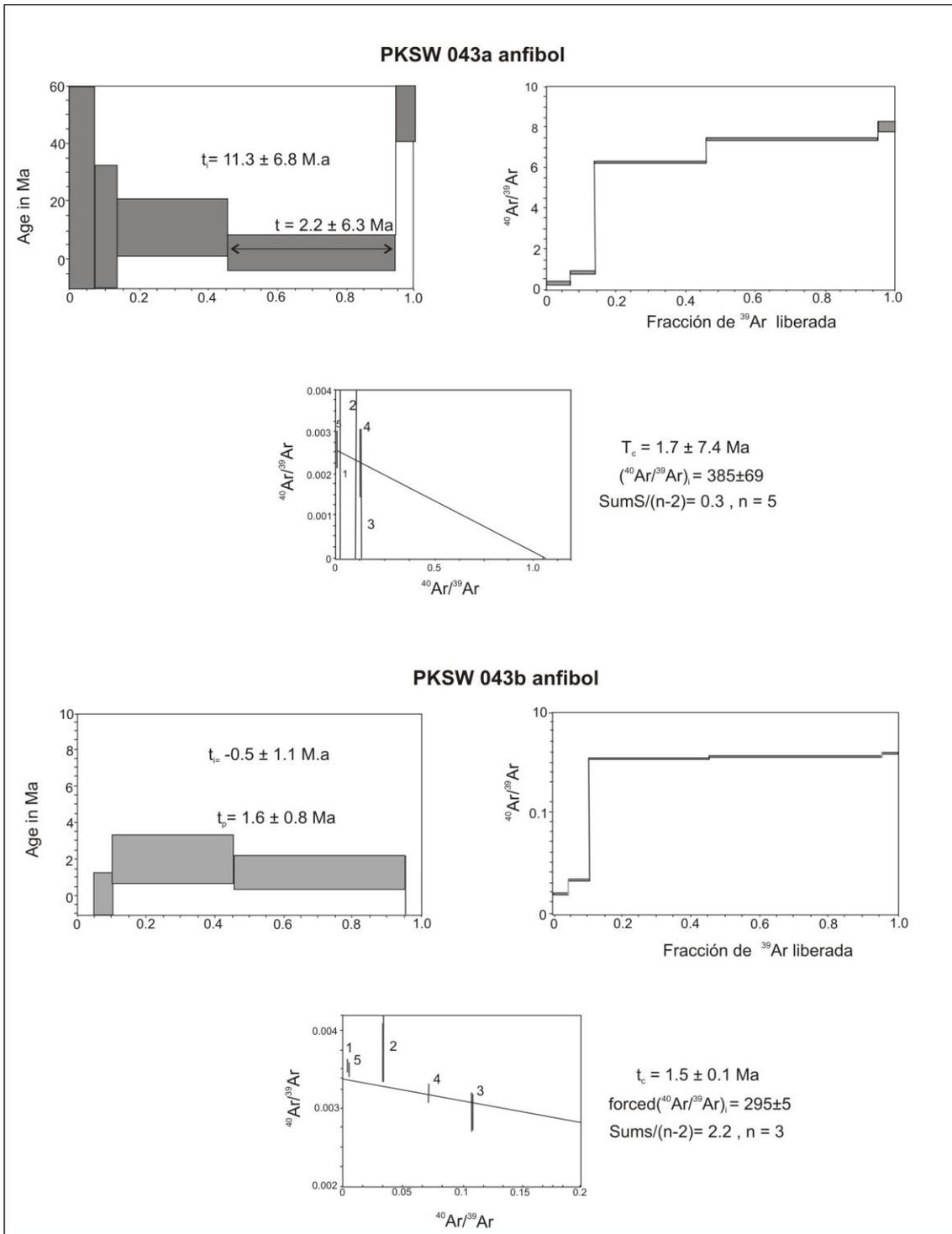
| MUESTRAS | SECUENCIA IGNI-MBRÍTICA | TIPO DE ANÁLISIS |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| PKSW011a | Río Cauca | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW011b | Río Cauca | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW012a | Río Cauca | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW013a | Río Cauca | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW090a | Río Cauca | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW104a | Río Palacé | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW017a | Río Hondo | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW017b | Río Hondo | Petrografía |
| PKSW017c | Río Hondo | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW016b | Río Hondo | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW084a | Río Hondo | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW049a | Río Hondo | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW087c | Río Hondo | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW087b | Río Hondo | Petrografía |
| PKSW087b | Río Hondo | Petrografía |
| PKSW089a ₁ | Río Hondo | Petrografía |
| PKSW089a | Río Hondo | Petrografía |
| PKSW089c | Río Hondo | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW089f | Quebrada Sombrerillo | Petrografía |
| PKSW037a | Quebrada Sombrerillo | Petrografía |
| PKSW038a | Quebrada Sombrerillo | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW040a | Quebrada Sombrerillo | Petrografía |
| PKSW043a | Quebrada Sombrerillo | Petrografía |
| PKSW080a | Quebrada Sombrerillo | Petrografía |
| PKSW080b | Quebrada Sombrerillo | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW080c | Quebrada Sombrerillo | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW080d | Quebrada Sombrerillo | Petrografía |
| PKSW016a | Pisojé Alto | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW069a | Pisojé Alto | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW069c | Pisojé Alto | Petrografía-Geoquímica |
| PKSW069d | Pisojé Alto | Petrografía-Geoquímica |

Anexo 8. Análisis modales de las secciones petrográficas.

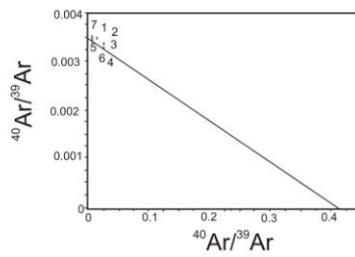
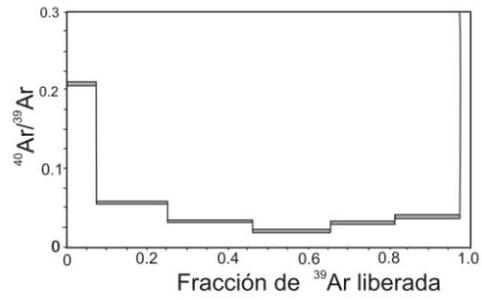
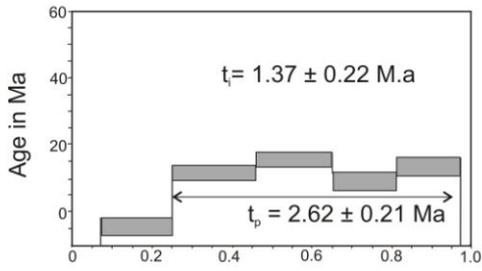
| MUETRA | SECUENCIA | FENOCRISTALES | | | | | | | | | | | Composición | | | |
|-----------|-------------|---------------|---------|----------|---------|---------|-----------|--------|------|-------|-----|-----|-------------|-----|----|------------------------|
| | | Mtz | % Pl | % Qtz | % Bt | % Pómez | % Fr.roca | % Opa. | Ves. | Amig. | Pix | Mtz | | Hbl | OI | |
| PKSW011a | Río Cauca | Vidrio | 10 | 1 | 5 | 2 | 1 | 1 | | | | | | | | Fenoandesita |
| PKSW011b | Río Cauca | 80 | 6 | 2 | 4 | 4 | 1 | 1 | | | | | | | | Fenoandesita |
| PKSW012a | Río Cauca | 82 | 9 | 1 | 3 | | 1 | 1 | 5 | | | | | | | Fenoandesita |
| PKSW013a | Río Cauca | 80 | 7 | 3 | 1 | 4 | | 1 | 1 | | | | | | | Fenodacita |
| PKSW090a | Río Cauca | 83 | 10 | 3 | 1 | 4 | 2 | 1 | 1 | | | | | | | Fenodacita |
| PKSW017a | Río Hondo | 78 | 11 | 3 | 4 | | 1 | 1 | | | | | | | | Fenodacita |
| PKSW017b | Río Hondo | 80 | 10 | 2 | 1 | | 1 | 1 | | | | | | | | Fenodacita |
| PKSW017c | Río Hondo | 85 | 8 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | Fenoandesita |
| PKSW084a | Río Hondo | 84 | 6 | 2 | 2 | | 7 | | | | | | | | | Fenoandesita |
| PKSW049a | Río Hondo | 83 | 8 | 2 | 3 | | | | | | | | | | | Fenodacita |
| PKSW087c | Río Hondo | 87 | 8 | 3 | 2 | | 1 | 10 | | | | | | | | Fenodacita |
| PKSW087b* | Río Hondo | 76 | 10 | 3 | 1 | 1 | | 20 | 5 | | | | | | | Fenodacita |
| PKSW087b | Río Hondo | 60 | 5 | 1 | 1 | | | | 50 | | | | | | | Fenoandesita |
| PKSW089a1 | Río Hondo | 43 | 2 | 1 | 1 | | | | 83 | 7 | | | | | | Fenoandesita |
| PKSW089b | Río Hondo | 6 | 11 | 3 | 1 | | | | 6 | | | | | | | Fenoandesita |
| PKSW089c | Río Hondo | 79 | 11 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | Fenoandesita |
| PKSW089f | Río Hondo | 79 | 10 | 2 | 1 | | | | 7 | | | | | | | Fenoandesita |
| PKSW037a | Morales | 80 | 6 | 3 | 3 | 3 | 2 | | 3 | | | | | | | Fenodacita |
| PKSW038a | Morales | 80 | 6 | 2 | 3 | 4 | 2 | 1 | 2 | | | | | | | Fenodacita |
| PKSW080a | Morales | 80 | 10 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | Fenodacitas |
| PKSW080b | Morales | | 10 | 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | | | | | | | Fenodacitas |
| PKSW080c | Morales | | 5 | 2 | 1 | 3 | 1 | | 8 | | | | | | | Fenodacitas |
| PKSW080d | Morales | 80 | | | | | | | | | | | | | | Fenodacitas |
| PKSW 040a | Morales | 79 | 14 | | 1 | | 1 | 1 | | | 70 | 13 | | | | Fenoandesitas |
| PKSW 043a | Morales | 80 | 16 | | 1 | | 1 | 1 | | | 70 | 11 | | | | Fenoandesitas |
| PKSW104a | Río Palacé | | 11 | 1 | 2 | | 1 | 1 | | | | | | | | Fenodacitas |
| PKSW 069c | Pisojé Alto | | 17 | | | | | 1 | | | 7 | 75 | | | | Fenoandesita |
| PKSW 069d | Pisojé Alto | | 16 | | | | | 2 | | | 12 | 70 | | | | Fenoandesita |
| PKSW016a | Pisojé Alto | | 35 | | | | | 4 | | | 10 | | 1 | 1 | | Fenoandesita-basáltica |
| PKSW016b | Pisojé Alto | | 45 | | | | | 3 | | | 7 | | | 1 | | Fenoandesita-basáltica |

Anexo 9. Fichas descripciones petrográficas.

Anexo 10. Espectros e isócronas $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ de las dataciones realizadas

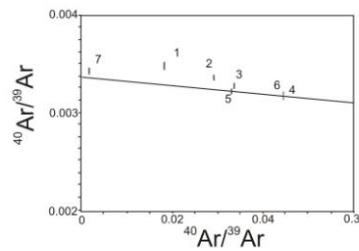
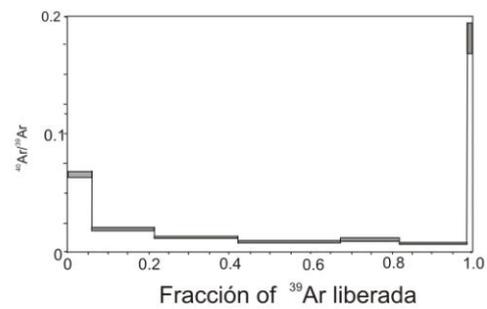
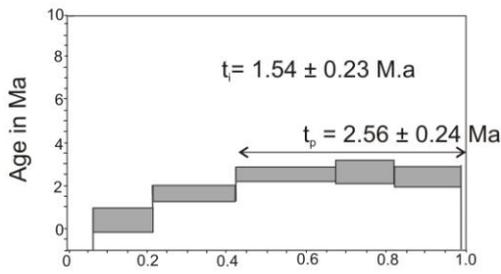


PKSW 080a biotita



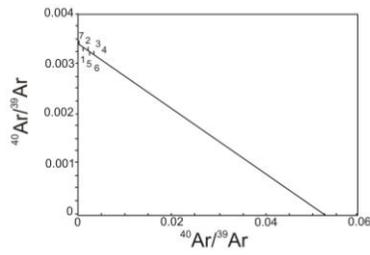
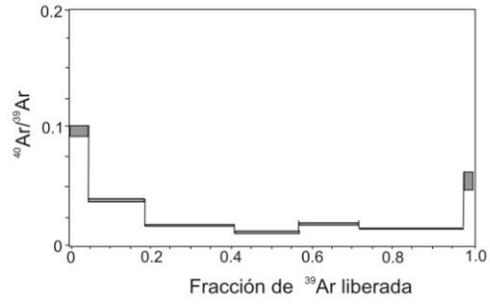
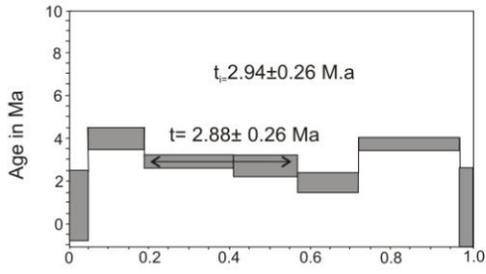
$T_c = 4.3 \pm 1.3 \text{ Ma}$
 $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_i = 287 \pm 6$
 $\text{SumS}/(n-2) = 0.9, n = 4$

PKSW 087c biotita



$T_c = 2.38 \pm 0.35 \text{ Ma}$
 $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_i = 297 \pm 3$
 $\text{SumS}/(n-2) = 0.04, n = 3$

PKSW 037a Biotita



$T_c = 3.44 \pm 0.67 \text{ Ma}$
 $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_i = 295 \pm 2$
 Sums/(n-2) = 3.77, n = 7

Anexo 11. Datos análisis geoquímica Monsalve y Pulgarín, 1.999.

| MUESTRAS | SiO2 | Al2O3 | Fe2O3 | CaO | MgO | MnO | K2O | Na2O | TiO2 | P2O5 |
|-------------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| Curiqinga | 62.68 | 16.81 | 5.58 | 4.34 | 2.82 | 0.16 | 3.12 | 3.96 | 0.73 | 0.28 |
| Curiqinga | 57.36 | 17.57 | 6.72 | 6.58 | 3.81 | 0.07 | 2.23 | 4.04 | 0.89 | 0.04 |
| Curiqinga | 55.86 | 17.94 | 6.86 | 7 | 4.14 | 0.07 | 2.19 | 4.18 | 0.98 | 0.04 |
| Paletará | 57.79 | 17 | 7.15 | 6.72 | 4.64 | 0.05 | 1.77 | 3.64 | 1.04 | 0.04 |
| Paletará | 57.36 | 17.76 | 7.15 | 6.86 | 3.64 | 0.07 | 2.3 | 4.18 | 1.03 | 0.08 |
| Calambás | 58.22 | 17.19 | 5.72 | 6.02 | 3.32 | 0.06 | 2.41 | 3.91 | 0.91 | 0.28 |
| Quintín | 58.65 | 17.38 | 5.4 | 5.6 | 3.32 | 0.05 | 2.61 | 4.04 | 0.84 | 0.04 |
| Shaka | 58.22 | 17.19 | 6.86 | 7.74 | 4.48 | 0.19 | 2.01 | 3.91 | 0.84 | 0.3 |
| Shaka | 58.65 | 17.38 | 6.43 | 6.58 | 3.48 | 0.06 | 2.26 | 4.58 | 0.8 | 0.17 |
| Shaka | 60.97 | 18.13 | 5.86 | 5.04 | 3.48 | 0.16 | 2.85 | 4.18 | 0.8 | 0.27 |
| Shaka | 60.76 | 17.94 | 5.72 | 4.9 | 3.48 | 0.16 | 2.81 | 4.12 | 0.81 | 0.37 |
| Machángara | 59.29 | 17.19 | 6.43 | 6.16 | 3.32 | 0.07 | 2.42 | 4.18 | 0.89 | 0.04 |
| Machángara | 59.26 | 16.24 | 6.29 | 4.9 | 3.98 | 0.16 | 3.11 | 4 | 0.92 | 0.34 |
| Machángara | 61.4 | 16.81 | 6 | 4.76 | 3.48 | 0.19 | 3.14 | 4.08 | 0.88 | 0.3 |
| Killa | 59.72 | 17 | 6 | 5.74 | 3.32 | 0.05 | 2.43 | 4.45 | 0.85 | 0.31 |
| P. de Azúcar | 63.11 | 17.38 | 5.43 | 4.2 | 2.98 | 0.14 | 3.1 | 4.18 | 0.75 | 0.28 |
| P. de Azúcar | 62.07 | 17 | 5.58 | 5.6 | 2.82 | 0.05 | 2.6 | 4.31 | 0.82 | 0.04 |
| P. de Azúcar | 62.04 | 17.38 | 5.43 | 4.06 | 2.82 | 0.14 | 3.13 | 4.18 | 0.76 | 0.26 |
| P. de Azúcar | 58.43 | 17.38 | 8.43 | 8.16 | 3.98 | 0.07 | 2.13 | 4.45 | 0.95 | 0.18 |
| Pukará | 59.48 | 16.43 | 5.29 | 5.32 | 2.85 | 0.04 | 2.92 | 4.21 | 1.1 | 0.27 |
| Pukará | 58.66 | 17.44 | 5.98 | 6.26 | 3.13 | 0.06 | 3.31 | 4.37 | 0.79 | 0.3 |
| Pukará | 57.98 | 17 | 6 | 6.02 | 3.37 | 0.05 | 2.7 | 4.21 | 0.9 | 0.29 |
| Pukará | 53.08 | 17.57 | 8.29 | 8.4 | 5.64 | 0.08 | 1.8 | 4.04 | 1.12 | 0.34 |
| Amancay | 55.86 | 18.04 | 7.01 | 7.28 | 3.65 | 0.08 | 1.87 | 4.45 | 0.91 | 0.39 |
| Piki | 59.08 | 17.19 | 8.29 | 6.02 | 3.15 | 0.06 | 2.51 | 4.18 | 0.83 | 0.04 |
| Puracé | 59.13 | 16.5 | 5.89 | 5.84 | 3.41 | 0.1 | 2.43 | 4.09 | 0.86 | 0.28 |
| 25* P. de Azúcar | 60.71 | 16.88 | 5.89 | 5.01 | 2.79 | 0.08 | 2.63 | 4.23 | 0.73 | 0.26 |
| 26* Coconucos | 59.51 | 16.66 | 6.58 | 5.41 | 3.24 | 0.11 | 2.38 | 4.18 | 0.75 | 0.27 |
| 27* Coconucos | 61.96 | 16.95 | 6.23 | 4.26 | 2.02 | 0.15 | 2.42 | 4.45 | 0.59 | 0.21 |
| 28* Coconucos | 58.48 | 16.16 | 6.09 | 5.32 | 3.14 | 0.1 | 2.35 | 3.73 | 0.72 | 0.26 |

Anexo 12. Datos análisis geoquímica López, 2.009. Elementos Mayores

| MUESTRAS | SiO2 | TiO2 | Al2O3 | Fe2O3 | FeO | MnO | MgO | CaO | Na2O | K2O | P2O5 | 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 |

Elementos Menores

| MUESTRAS | 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 |