

**Centro de Investigación Científica y de Educación  
Superior de Ensenada, Baja California**



---

**Programa de Posgrado en Ciencias  
de la Tierra con orientación en Geología**

---

**Temporalidad y características geoquímicas del vulcanismo  
cretácico del sector norte de la Cordillera Occidental  
Colombiana: implicaciones tectónicas**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

**Carolina Villarraga Morales**

Ensenada, Baja California, México  
2016

Tesis defendida por

**Carolina Villarraga Morales**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dra. Margarita López Martínez**  
Codirector de tesis

---

**Dr. Agustín Cardona Molina**  
Codirector de tesis

**Dr. Jesús Arturo Martín Barajas**

**Dra. Maria Lucila del Carmen Lares Reyes**

**Dr. Luca Ferrari**



---

**Dr. Juan García Abdeslem**  
Coordinador del Posgrado en Ciencias de  
la Tierra

---

**Dra. Rufina Hernández Martínez**  
Directora de Estudios de Posgrado

*Carolina Villarraga Morales © 2016*

*Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor*

Resumen de la tesis que presenta **Carolina Villarraga Morales** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geología

### **Temporalidad y características geoquímicas del vulcanismo cretácico del sector norte de la Cordillera Occidental Colombiana: implicaciones tectónicas**

Resumen aprobado por:

---

Dra. Margarita López Martínez  
Codirector de tesis

---

Dr. Agustín Cardona Molina  
Codirector de tesis

La corteza oceánica de la placa Caribe ha sido considerada como un plateau oceánico y los datos geocronológicos sugieren por lo menos dos pulsos magmáticos de formación entre 87-90 Ma y 72-78 Ma. La temporalidad de la colisión a la margen suramericana no ha sido resuelta y los diferentes modelos proponen edades desde el Cretácico Superior hasta el Mioceno Inferior.

En el sector norte de la Cordillera Occidental de Colombia se encuentra expuesta la Formación Barroso, compuesta por flujos masivos de basaltos con frentes de lava almohadillada, diabasas e intercalaciones de tobas y lodolitas hacia la parte superior de la secuencia. Ha sido considerada como un fragmento acrecionado del Plateau Caribe. La caracterización del registro magmático y de la temporalidad de su acreción es escasa debido a la dificultad de encontrar rocas sin evidencia de procesos sobreimpuestos, la meteorización química y la accesibilidad a los afloramientos. Dos edades de  $105 \pm 10$  Ma (K-Ar) y  $84,2 \pm 1.4$  Ma ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) son las únicas reportadas hasta la fecha para esta unidad.

Con el fin de caracterizar la Formación Barroso y aportar a la historia de formación magmática del Caribe y su acreción a la margen continental, se colectaron en un muestreo regional 9 muestras de basaltos para geocronología  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y 14 para geoquímica, en un segmento de 200 km entre los departamentos de Antioquia y Caldas, en la Cordillera Occidental colombiana. Se obtuvieron edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  entre 45 y 67 Ma que estarían asociadas a eventos posteriores a su emplazamiento más que a la cristalización magmática. El análisis de mineralogía secundaria revela que la presencia de sericita genera en algunos casos espectros escalonados con fracciones individuales de edad aparente menor que pueden ser correlacionadas con un menor valor en la relación Ca/K. Al ser una fase mineral rica en K (~15%) la sericita domina la señal del  $^{39}\text{Ar}$  aun cuando el porcentaje de ésta en la muestra sea bajo y/o su distribución no sea homogénea. La interpretación de los resultados  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  obtenidos permite relacionar la disminución de las edades obtenidas con la presencia de pequeñas cantidades de sericita y clorita que no es evidente a nivel macroscópico. Las edades entre 63 y 67 Ma estarían relacionadas a la sericitización causada por la colisión del Plateau Caribe a la margen continental suramericana a finales del Cretácico superior y principio del Paleoceno. Las edades más jóvenes entre 45 y 53 Ma podrían estar relacionadas a la alteración durante la reactivación tectónica en la margen occidental de la placa Suramérica debido al

incremento en la tasa de convergencia entre las placas Farallón y Suramérica entre 45 y 30 Ma o a eventos hidrotermales locales.

Las características geoquímicas sugieren dos suites magmáticas, una con afinidad de plateau oceánico, correlacionable con las unidades hacia el sur de la Cordillera Occidental; y otro con una composición que sugiere una componente de subducción y es restringido geográficamente a la cercanía con intrusivos cretácicos como el batolito de Sabanalarga y la tonalita de Buriticá, pudiendo ser el resultado de la contaminación de ambas fuentes.

La evidencia fósil y la edad de la tonalita de Buriticá publicada por otros autores sugieren una edad > 100 Ma para el magmatismo de plateau en este sector indicando una historia magmática más extensa. La correlación con las unidades volcánicas en el sur, sugiere fragmentos de plateau de diferentes edades acrecionados a la margen continental a finales del Cretácico Superior como indica las edades entre 63 y 67 Ma obtenidas en este trabajo.

**Palabras clave:** Formación Barroso,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , Sericitización, Colisión, Plateau Caribe

Abstract of the thesis presented by **Carolina Villarraga Morales** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Science with orientation in Geology

**Temporality and geochemical characteristics of the cretaceous volcanism north sector of the Western Colombian Cordillera: tectonic implications**

Abstract approved by:

---

Dra. Margarita López Martínez  
Thesis Codirector

---

Dr. Agustín Cardona Molina  
Thesis Codirector

The oceanic crust of the Caribbean plate has been regarded as an oceanic plateau, geochronological data suggest at least two magmatic pulses between 87-90 Ma and 72-78 Ma. The timing of the collision on the South American margin has not been resolved and the different models proposed age from Late Cretaceous to Early Miocene.

In the northern part of The Western Cordillera of Colombia, Barroso Formation it is exposed. The formation is composed of massive flows basalts, pillow lava, diabase, tuffs and interbedded mudstone towards the top of the sequence. It has been regarded as an accreted fragment of the Caribbean Plateau. The magmatic record and temporary of their accretion is limited due to the difficulty to finding rocks with no evidence of overlaid processes, chemical weathering and accessibility outcrops. Two ages of  $105 \pm 10$  Ma (K-Ar) and  $84.2 \pm 1.4$  Ma ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) are only reported until the date for this unit.

In order to characterize The Barroso Formation and contribute to the magmatic history of The Caribbean and the accretion to continental margin, we were collected on a regional sampling, 9 samples of basalts for  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology and 14 for geochemistry analyses, in a segment of 200 km between Antioquia and Caldas, in the Western Cordillera of Colombia. The  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages between 45 and 67 Ma could be related with post-magmatic events rather than magmatic crystallization. Secondary mineralogy analysis reveals that the presence of sericite in some cases can produce a staircase-shaped age spectra, wherein the individual fractions with lower apparent age can be correlated with a lower value in the Ca/K ratio. Owing to that the sericite is a K-rich mineral phase (~ 15%), the  $^{39}\text{Ar}$  signal can be overprint the signal of the true volcanic event, even with low percentage of sericite in the sample and/or its distribution is not homogeneous. The interpretation of the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  results obtained allows relate the decrease ages obtained with small amounts of presence of sericite and chlorite that is not evident at the macroscopic level. Ages between 63 and 67 Ma would be related to the sericitization caused by the collision of the Caribbean Plateau to the South American margin at Late Cretaceous and Early Paleocene. Younger ages between 45 and 53 Ma may be related to alteration during tectonic reactivation in the western margin of the South America plate caused by an increase in convergence rates between the Farallon and South America plates during 45 and 30 Ma or by local hydrothermal events.

The geochemical characteristics suggest two magmatic suites: the first one with affinity of oceanic plateau, correlated with units in the south of Western Cordillera; the second one

with a composition that suggests an arc-related component, geographically restricted to the proximity with Cretaceous intrusive, like Sabanalarga batholith and Buriticá tonalite. This geochemistry signature may be the result of contamination from both sources.

Fossil evidence and age of the Buriticá tonalite reported by other authors, suggest an age > 100 Ma for the plateau magmatism in the zone, and it would indicate a more extensive magmatic history. The correlation with volcanic units in the south, suggests a docking of plateau fragments of different ages accreted to the continental margin at late Cretaceous as indicated ages between 63 and 67 Ma obtained in this work.

**Keywords:** Barroso Formation,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , Sericitization, Collision, Plateau Caribe

## Dedicatoria

*Para mi madre*

*Siempre que haya alternativas ten cuidado  
No optes por lo cómodo por lo respetable  
por lo socialmente aceptable por lo honroso...  
Opta por lo que hace a tu corazón vibrar  
Opta por lo que te gustaría hacer  
a pesar de todas las consecuencias"*

## Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por apoyar financieramente, no solo a mí, sino a todos los estudiantes nacionales y, sobretodo, extranjeros que venimos a este país con anhelos de aprender y desarrollar habilidades de investigación. La ventaja que conlleva dedicarse exclusivamente a un proyecto como estos durante dos años es algo que no es tan fácil en países donde, lamentablemente, la educación no es el principal motor o preocupación del Estado.

De igual forma, agradezco al Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, CICESE, por aceptarme y permitir llevar a cabo mis estudios. Es ahora mi segunda *Alma Mater*.

A la Dra. Margarita López Martínez, por poner a mi disposición todos sus conocimientos con una paciencia sin igual, por su apoyo en tantos momentos y por la confianza que depositó en mí y en este proyecto: Gracias!

A Agustín Cardona Molina por todos sus conocimientos que hicieron posible contextualizar todos los resultados obtenidos, por dar siempre tantas posibilidades, por su creatividad y por permitirme divagar y no coaccionar el conocimiento.

A los sinodales por sus excelentes correcciones, opiniones y sugerencias que permitieron el enriquecimiento de este escrito

A los técnicos, Susana Rosas, Miguel García, Víctor Pérez, Gabriel Rendón y Luis Gradilla por su colaboración en la preparación de las muestras, las mediciones en el laboratorio de geocronología, la descripción en lámina delgada y la adquisición de imágenes en el microscopio electrónico de barrido.

A estudiantes y amigos en Colombia que me ayudaron en las fases de campo con la recolección de las muestras y el levantamiento de datos estructurales.

A todas esas personas cercanas que han aguantado, aguantan y sé que seguirán aguantando mi mal genio. Por favor, nunca desfallezcan!

## Tabla de contenido

<b>Resumen español</b> .....	ii
<b>Resumen inglés</b> .....	iv
<b>Dedicatorias</b> .....	vi
<b>Agradecimientos</b> .....	vii
<b>Lista de figuras</b> .....	x
<b>Lista de tablas</b> .....	xv
<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Objetivo general.....	2
1.1.1 <i>Objetivos específicos</i> .....	3
1.2 Marco geológico Regional .....	3
1.3 Marco geológico Cordillera Occidental de Colombia .....	5
<b>Capítulo 2. Metodología</b> .....	<b>8</b>
2.1 Fase de campo: Muestreo .....	8
2.2 Geocronología .....	10
2.2.1 <i>Método <math>^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}</math></i> .....	10
2.2.2 <i>Argón atmosférico</i> .....	11
2.2.3 <i>Experimentos de calentamiento por pasos- Espectros de edad</i> .....	13
2.2.4 <i>El rol de la Difusión vs. Alteración</i> .....	13
2.2.5 <i>Preparación de muestras</i> .....	15
2.2.6 <i>Definición de edades representativas</i> .....	18
2.3 Petrografía y Microscopía Electrónica de Barrido .....	19
<b>Capítulo 3. Resultados</b> .....	<b>22</b>
3.1 Geología .....	22
3.1.1 <i>Basaltos</i> .....	22
3.1.2 <i>Rocas volcanoclásticas</i> .....	24
3.1.3 <i>Gabros</i> .....	26
3.2 Geocronología .....	28
3.2.1 <i>Análisis petrológico y geocronológico</i> .....	28

3.2.2 <i>Discusión</i> .....	52
3.3 Geoquímica.....	65
3.3.1 <i>Clasificación y serie magmática</i> .....	65
3.3.2 <i>Discusión</i> .....	75
<b>Capítulo 4. Conclusiones</b> .....	<b>87</b>
<b>Lista de referencias bibliográficas</b> .....	<b>89</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>96</b>

## Lista de figuras

- Figura 1. Mapa geocronológico generalizado para el sector Occidental de Colombia. FG: Falla Garrapatas; FCP: Falla Cauca-Patía; FCA: Falla Cauca-Almaguer; FSP: Falla Silvia-Pijao; FSJ: Falla San Jerónimo.....7
- Figura 2. Mapa geológico generalizado del área de norte de la Cordillera Occidental de Colombia. Las muestras analizadas en este trabajo se indican en azul.....9
- Figura 3. Espectros de edad. a) En un caso ideal de sistema cerrado se forma una meseta o “plateau”; b) Pérdida de argón; c) Exceso de argón ..... 13
- Figura 4. Porcentaje de seritización vs Porcentaje de reducción de la edad en metodología K-Ar o  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . Modelo de Verati y Jourdan, 2013..... 15
- Figura 5. A. Sobres de aluminio mandados a irradiar. B. Montaje de las muestras en la charola después de la irradiación. .... 16
- Figura 6. Espectrómetro de masas VG5400 marca Micromass ..... 18
- Figura 7. Discriminación microscópica de: a) plagioclasas sanas. Muestra CVM 006. b) Plagioclasas alteradas levemente (<25%). Muestra CVM 015. c) Plagioclasas alteradas fuertemente (>25%). Muestra CVM 048. ....20
- Figura 8. a) Pillow lavas en la sección Altamira. b). Flujo de basaltos con diaclasamiento pervasivo y silicificación en la sección Salgar. c) Flujo masivo de basaltos altamente fracturados en la sección Belén de Umbría. ....23
- Figura 9. Perfil interpretativo de la sección Altamira. Las líneas punteadas inferidas representan límites entre flujos de lava indicando el plegamiento leve de las unidades. ....24
- Figura 10. a) Afloramiento de tobas en la sección Altamira. b). Microfotografía de la muestra de toba CVM 024 en la sección Salgar donde se observan líticos volcánicos con texturas microlíticas; c) Microfotografía de la muestra de toba CVM 021 en la sección Salgar donde se observan líticos volcánicos con texturas amigdalares y cuarzo microcristalino. ....25
- Figura 11. Perfil interpretativo de la sección Salgar. Las líneas punteadas inferidas representan límites entre flujos de lava o estratos indicando un plegamiento más pronunciado de las unidades respecto a la sección Altamira. ....26
- Figura 12. a) Dique basalto intruyendo el gabro de Hispania, con pliegue de arrastre. b). Fractura vertical rellena de calcita en gabro de Altamira. c) Fotografía

microscopio petrográfico CVM 065 del gabro de Belén de Umbría evidenciando su grado de alteración, con piroxenos (pxn) uralizados y cloritizados y plagioclasas (plg) alteradas a arcillas. d) Fotografía microscopio petrográfico CVM 031 del gabro de Hispania con olivino (olv) fracturado y serpentizado. ....27

- Figura 13. 1) Espectros de edad en roca total. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  para las muestras del grupo 1. a) CVM 052; b) CVM 085 .....34
- Figura 14. Muestra CVM 052: 1) Microfotografía de electrones retrodispersados a 90x. 2) Microfotografía con nícoles cruzados evidenciando la fuerte cloritización en la muestra. 3) Mapa de distribución de K mostrando sólo interferencia de baja intensidad. ....34
- Figura 15. Muestra CVM 083-roca total: 1) Espectro de edad. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . En gris: fracción utilizada para el cálculo de la isocrona; en rojo: fracción ignorada para el cálculo de la isocrona.....36
- Figura 16. Muestra CVM 083: 1) Microfotografía de electrones retrodispersados a 200x. 2) Microfotografía con nícoles cruzados. 3) Mapa de distribución de K. a: Prehnita; b,e,g: Alteración de K (2.5%); c: Plagioclasa intermedia; d: epidota; f,h: Anfíbol-Actinolita.....37
- Figura 17. Muestra CVM 054-plagioclasa: 1) Espectro de edad. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . En gris: fracción utilizada para el cálculo de la isocrona; en rojo: fracción ignorada para el cálculo de la isocrona.....38
- Figura 18. Muestra CVM 048. a) Matriz. b) Plagioclasa; 1) Espectro de edad. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . En gris: fracción utilizada para el cálculo de la isocrona; en rojo: fracción ignorada para el cálculo de la isocrona. ....41
- Figura 19. Matriz de la muestra CVM 048: 1) Microfotografía de electrones retrodispersados a 200x. 2) Microfotografía con nícoles cruzados. 3) Mapa de distribución de K. a,e: Clorita; b,c: Alteración de K (5.0%); d: Augita. ....42
- Figura 20. Fenocristales de la muestra CVM 048: 1) Microfotografía de electrones retrodispersados a 50x. 2) Microfotografía con nícoles cruzados. 3) Mapa de distribución de K. a,b: Augita; c,f,h,j: Plagioclasa albitizada; d,e: Clorita; d: epidota; g,i: Alteración de K (15.0%). ....42

- Figura 21. Muestra CVM 015-roca total: 1) Espectro de edad. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . En gris: fracción utilizada para el cálculo de la isocrona; en rojo: fracción ignorada para el cálculo de la isocrona.....44
- Figura 22. Muestra CVM 067-roca total: 1) Espectro de edad. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . En gris: fracción utilizada para el cálculo de la isocrona; en rojo: fracción ignorada para el cálculo de la isocrona.....46
- Figura 23. Muestra CVM 067: 1) Microfotografía de electrones retrodispersados a 150x. 2) Microfotografía con nícoles cruzados. 3) Mapa de distribución de K. En círculos azules se indican zonas con K ~1.5%.....46
- Figura 24. Muestra CVM 006-roca total: 1) Espectro de edad. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . En gris: fracción utilizada para el cálculo de la isocrona; en rojo: fracción ignorada para el cálculo de la isocrona.....48
- Figura 25. Muestra CVM 006: 1) Microfotografía de electrones retrodispersados a 80x. 2) Microfotografía con nícoles cruzados. 3) Mapa de distribución de K. En círculos azules se indican zonas con K ~1.5%. .....48
- Figura 26. Muestra CVM 008-roca total: 1) Espectro de edad. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . En gris: fracción utilizada para el cálculo de la isocrona; en rojo: fracción ignorada para el cálculo de la isocrona.....50
- Figura 27. Muestra CVM 008 con los tres experimentos integrados: 1) Espectro de edad. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . En gris: fracción utilizada para el cálculo de la isocrona para los 2 primeros experimentos; en azul: Fracciones del tercer experimento; en rojo: fracción ignorada para el cálculo de la isocrona. La edad de isocrona mostrada en la figura corresponde al tercer experimento. ....51
- Figura 28. Muestra CVM 008: 1) Microfotografía de electrones retrodispersados a 200x. 2) Microfotografía con nícoles cruzados. 3) Mapa de distribución de K. En círculos azules se indican zonas con K. La segunda fila de fotos representa un aumento a 600x de la zona en el recuadro negro en 1. a: augita; b,f: plagioclasa cálcica; c: clorita; d,e: alteración de K (13.0%); g: cuarzo; h: adularia.....52
- Figura 29. Mapa de localización de fechamientos  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  obtenidos en este estudio. Las referencias de las localidades fosilíferas se encuentran en la Tabla 1.....55

- Figura 30. Sericitización vs. Reducción de edad (Modificado de (Verati y Jourdan, 2013) .....57
- Figura 31. Síntesis de edades U-Pb,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y K/Ar reportadas como eventos termales o edad de enfriamiento para rocas volcánicas e intrusivas del Plateau Caribe. El rango propuesto para la colisión es de Villagomez y Spikings (2013). Las líneas punteadas representan el rango de edades establecido en este estudio. En la Tabla 9 se indica el método usado y el mineral fechado en estos datos. ....63
- Figura 32. Localización de muestras de geoquímica de este estudio. ....67
- Figura 33. Diagramas de variación MgO vs Elementos mayores. En negro: Basaltos secciones Umbría, Concordia, Salgar, Altamira. Azul: Basaltos Sección Caicedo; Amarillo: Gabros y basalto de Hispania.....68
- Figura 34. a) Diagrama de clasificación TAS (Middlemost, 1994). b) Diagrama de clasificación AFM para la serie Toleítica y Serie calco-alcalina (Irvine y Baragar, 191). c) Diagrama de clasificación de rocas subalcalina (Peccerillo y Taylor, 1976). En negro: Basaltos secciones Umbría, Concordia, Salgar, Altamira. Azul: Basaltos Sección Caicedo; Amarillo: Gabros y basalto de Hispania. ....69
- Figura 35. a) Diagrama de clasificación Zr/TiO<sub>2</sub> vs. SiO<sub>2</sub> (Winchester y Floyd, 1977); b) Diagrama de discriminación Co vs. Th (Hastie et al., 2007). En negro: Basaltos secciones Umbría, Concordia, Salgar, Altamira. Azul: Basaltos Sección Caicedo; Amarillo: Gabros y basalto de Hispania.....70
- Figura 36. Diagramas multielementos normalizados a condrito (Thompson, 1982). En negro: Basaltos secciones Umbría, Concordia, Salgar, Altamira. Azul: Basaltos Sección Caicedo; Amarillo: Gabros y basalto de Hispania. Los valores para MORB enriquecido (E-MORB) y MORB normal (N-MORB) son de (Sun y McDonough, 1989) .....72
- Figura 37. Patrones de REE normalizados a condrito (Nakamura, 1974). En negro: Basaltos secciones Umbría, Concordia, Salgar, Altamira. Azul: Basaltos Sección Caicedo; Amarillo: Gabros y basalto de Hispania. Los valores para MORB enriquecido (E-MORB) y MORB normal (N-MORB) y Basaltos de islas oceánicas (OIB) son de (Sun y McDonough, 1989) .....72
- Figura 38. Diagramas de discriminación tectónica. a) (Shervais, 1982); b) (Pearce, 1982); c) (Wood et al., 1979). MORB: Basaltos de dorsal oceánica; BAB: Basaltos de Back Arc; CAB: Basaltos calco-alcalinos; IAT: Toleítas de arco de islas; WPT: Toleítas de Intraplaca; WPA: Basaltos alcalinos Intraplaca. En negro: Basaltos secciones Umbría, Concordia, Salgar, Altamira. Azul: Basaltos Sección Caicedo; Amarillo: Gabros y basalto de Hispania.....76

- Figura 39. Diagramas bivariantes de elementos traza respecto a Zr. Clasificación en color según Rodríguez y Arango (2013) Rojo: Formación Barroso (arco); Verde: diabasas de San José de Urama (MORB transicional: T-MORB) .....77
- Figura 40. Clasificación basada en elementos traza para las muestras de Rodríguez y Arango (2013). a) Diagrama de clasificación Zr/TiO<sub>2</sub> vs. SiO<sub>2</sub> (Winchester & Floyd, 1977); b) Diagrama de discriminación Co vs. Th (Hastie et al., 2007). En colores se presenta la clasificación de Rodríguez y Arango (2013): En rojo: Formación Barroso (Arco); En verde: Diabasas de San José de Urama (MORB transicional: T-MORB).....78
- Figura 41. Diagramas multielementos normalizados a condrito (Thompson, 1982) discriminado por secciones geográficas. Los datos son tomados de Rodríguez y Arango (2013) y siguen la clasificación dada por los autores para la Formación Barroso (Arco) y las diabasas de San José de Urama (plateau). En la sección Altamira se integran los datos de Zapata (2013) para el gabro de Altamira. ....79
- Figura 42. Patrones de REE normalizados a condrito (Nakamura, 1974) discriminado por secciones geográficas. Los datos son tomados de Rodríguez y Arango (2013) y siguen la clasificación dada por los autores para la Formación Barroso (Arco) y las diabasas de San José de Urama (plateau). En la sección Altamira se integran los datos de Zapata (2013) para el gabro de Altamira.....80
- Figura 43. Distribución geoquímica de los datos publicados por Rodríguez y Arango (2013) para la Formación Barroso después de la re-interpretación por secciones geográficas realizada en este estudio. Los datos de las 13 muestras de basaltos obtenidos son incluidos. ....81
- Figura 44. Patrones multielementos normalizados a condrito (Thompson, 1982) del gabro de Altamira e Hispania comparado con: a) tonalita de Buriticá (rosado); b) batolito de Sabanalarga (naranja); c) el gabro de Anserma. Los datos geoquímicos de la tonalita de Buriticá y el batolito de Sabanalarga son tomados de Weber et al. 2015. ....83
- Figura 45. Diagramas de discriminación tectónica para el sector Norte de la Cordillera Occidental de Colombia: a) Zr/Th vs. La/Yb (Jolly et al., 2001) modificado de Villagómez et al, 2011. b) Zr/Y vs. Nb/Y (Fitton et al., 1997) modificado de Villagómez et al, 2011. c) La/Yb vs  $\Delta$ Nb.....85
- Figura 46. Firmas geoquímicas de los basaltos de la Formación Barroso y el gabro de Altamira (rosado) comparados con datos publicados para el Plateau Caribe al sur de la Cordillera Occidental a) Diagrama multielementos normalizado a condrito (Thompson, 1982). b) Patrones de REE normalizados a condrito (Nakamura, 1974).....86

## Lista de tablas

Tabla 1. Localidades fósiles reportadas para la Cordillera Occidental en el departamento de Antioquia y Caldas.....	6
Tabla 2. Muestras colectadas para geocronología y geoquímica. G: Geoquímica; Ar: Geocronología $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . .....	10
Tabla 3. Relación de muestras con consecutivo de laboratorio y fracción usada para irradiación.....	17
Tabla 4. Conteo y estimación del porcentaje de alteración de roca total ( $A_{wr}$ ) para las muestras de basaltos de la Formación Barroso. Plg <sub>s</sub> : Plagioclasa sana; Plg: Plagioclasa alterada levemente (<25%); Plg <sub>f</sub> : Plagioclasa alterada fuertemente (>25%); Pxn <sub>s</sub> : Piroxeno sano; Pxn <sub>a</sub> : Piroxeno alterado; Q/FK: Cuarzo/Feldespato potásico; Prh: Prehnita; V: Vidrio; Clo: Clorita; Cristales completamente reemplazados por clorita; Act: Actinolita. ....	29
Tabla 5 Estimación del porcentaje de alteración de fases minerales individuales para las muestras de basaltos de la Formación Barroso. Plg <sub>s</sub> : Plagioclasa sana; Plg: Plagioclasa alterada levemente (<25%); Plg <sub>f</sub> : Plagioclasa alterada fuertemente (>25%); Pxn <sub>s</sub> : Piroxeno sano; Pxn <sub>a</sub> : Piroxeno alterado. ....	30
Tabla 6 Relación entre $A_{wr}$ , contenido de $^{39}\text{Ar}$ y relación Ca/K. $A_{wr}$ : Porcentaje de alteración de roca total; Act: Actinolita. Ser: Sericita; Ept: Epidota; Q/FK: Cuarzo/Feldespato potásico; Prh: Prehnita; Clo: Clorita; Cristales completamente reemplazados por clorita; Q/Fk: Cuarzo/Feldespato potásico. En rojo: Grupo 1, $A_{wr} > 80\%$ ; En naranja: Grupo 2, $55\% < A_{wr} < 80\%$ ; En Verde: Grupo 3, $A_{wr} < 55\%$ . ....	31
Tabla 7. Resumen edades reportadas en este trabajo para los basaltos de la Formación Barroso. Las edades en negrita son las edades representativas para cada muestra. ....	52
Tabla 8. Relación de grupos de alteración con resultados geoquímicos de $\text{K}_2\text{O}$ y LOI..	56
Tabla 9. Edades reportadas para las rocas volcánicas básicas de la Cordillera Occidental e intrusivos asociados. ....	64
Tabla 10. Elementos mayores de los basaltos de la Formación Barroso y el gabro de Hispania en este estudio. Los valores se encuentran en ppm .....	66
Tabla 11. Concentración de elementos traza en ppm para los basaltos de la Formación Barroso y el gabro de Hispania en este estudio. Los valores se presentan en	

ppm. Sombreado azul indicando las REE. TOT/C: % de Carbono total; TOT/S: % de Azufre total .....	72
---	----

## Capítulo 1. Introducción

---

La colisión y acreción de arcos y plateaus oceánicos en márgenes convergentes constituye uno de los procesos geológicos más significativos en la formación de cinturones orogénicos y en la evolución de la corteza continental (Cawood et al., 2009). Una característica incuestionable en la historia tectónica de los Andes del Norte en el Cretácico es la construcción de diferentes arcos volcánicos (McCourt et al., 1984; Aspden y McCourt, 1986) y la colisión de terrenos oceánicos alóctonos a la margen continental de Suramérica (Pindell y Barret, 1990; Kerr et al., 1996; Kerr et al., 1997a; Pindell et al., 2005; Villagómez et al., 2011). La Cordillera Occidental de Colombia (CO) está conformada por secuencias de rocas máficas de afinidad oceánica cuyas variaciones composicionales han llevado a relacionar su origen con ambientes tipo MORB (González, 2001), arco oceánico (Toussaint y Restrepo, 1976; McCourt et al., 1984; Aspden y McCourt, 1986; Rodríguez y Arango, 2013); y/o plateau oceánico (Millward et al., 1984; Kerr et al., 1997a; Villagómez et al., 2011; Rodríguez y Arango, 2013).

En el segmento norte de la Cordillera Occidental, la unidad volcánica se denomina Formación Barroso (Alvarez y Gonzalez, 1978), cuya temporalidad y naturaleza del magmatismo están pobremente definidas. La edad cretácica que se le asigna está limitada a dos fechamientos en roca total de  $105 \pm 10$  Ma por K-Ar (Toussaint y Restrepo, 1978) y  $84.2 \pm 1.4$  Ma por  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  (González, 2010); y edades indirectas por fósiles encontrados en limolitas silíceas inter-estratificadas de edades Barremiano-Aptiano a Campaniano-Maastrichtiano (Figura 1, Tabla 1)

El contexto tectónico ha sido considerado como de arco de islas desarrollado sobre corteza oceánica (Toussaint y Restrepo, 1994; Estrada et al., 2001) pero estudios geoquímicos sugieren que la formación agrupa dos unidades con afinidad de arco y plateau oceánico respectivamente (Geoestudios, 2005; Rodríguez y Arango, 2013), sin ser concluyentes sobre el origen del volcanismo. La componente de plateau es correlacionada con la Formación Volcánica y el Complejo Ultramáfico de Bolívar que afloran al sur de la Cordillera Occidental, con edades entre 75 y 99 Ma de volcanismo típicamente toleítico, e interpretadas como un fragmento del Plateau Caribe adosado a la

margen continental (Nivia, 1996a; Kerr et al., 1997a; Villagómez et al., 2011; Serrano et al., 2011)

La estratigrafía y relaciones estructurales de estas secuencias volcánicas son complejas y aún discutidas. Algunos autores han propuesto un sólo ciclo volcano-tectónico entre origen y acreción (Barrero, 1978; Millward et al., 1984); mientras otros proponen al menos dos pulsos volcánicos y varios eventos sucesivos de acreción durante todo el Cretácico (McCourt et al., 1984; Aspden y McCourt 1986; Cediél et al., 2003); o desde finales del Cretácico Superior hasta el Mioceno (Toussaint y Restrepo, 1994; Moreno-Sanchez y Pardo-Trujillo, 2003; Villagómez y Spikings, 2013), tal como se plantea para unidades correlacionable en Ecuador (Vallejo et al., 2006)

Si bien la historia tectonomagmática de los terrenos oceánicos y la temporalidad de los eventos colisionales ha sido refinada en los últimos años en algunas regiones, principalmente al sur de la Cordillera Occidental (Kerr et al., 1997a; Villagómez et al., 2011; González, 2010; Villagómez y Spikings, 2013), existen áreas extensas donde la ausencia de caracterización litoestratigráfica, geoquímica y geocronológica no permite reconstruir de manera coherente la historia estos terrenos tectono-magmáticos.

El presente trabajo aborda la historia magmática y colisional del sector norte de la CO, a partir de nuevas edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y datos geoquímicos y evalúa los modelos de sucesión o superposición temporal de ambientes tectónicos (plateau-arco oceánico y/o continental) acotando cronológicamente la colisión de este dominio oceánico con la margen Andina.

## **1.1 Objetivo General**

Caracterizar las relaciones de campo, la temporalidad y la características composicionales de la Formación Barroso con el fin de reconstruir la historia magmática y la evolución de los escenarios tectónicos donde se formaron, su relación con la placa Caribe y los límites temporales de la colisión con la margen Andina.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- Establecer relaciones de campo entre las unidades volcánicas, los intrusivos cretácicos y los depósitos volcánicos y sedimentarios asociados hacia el tope de la secuencia volcánica de la Formación Barroso.
- Definir la geocronología de los eventos magmáticos en la transición plateau – arco volcánico por medio de fechamientos  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$
- Establecer por medio de análisis geoquímicos el ambiente tectonomagmático de las rocas volcánicas y su evolución en el tiempo.
- Correlacionar la evolución magmática con la evolución de otros segmentos de la margen Andina y Circum-Caribeña.
- Acotar temporalmente la acreción de los terrenos volcánicos.

## 1.2 Marco geológico Regional

La evolución tectónica de los Andes del Norte durante el Cretácico ha sido relacionada con la construcción de diferentes arcos continentales y la colisión de arcos y fragmentos de plateau oceánico formados en el Pacífico (Kerr et al., 1997b; Pindell y Keenan, 2009; Villagómez et al., 2011; Spikings et al., 2015). En Colombia los Andes están conformados por tres cordilleras con una tendencia aproximada N-S, separadas entre sí por los valles interandinos del Cauca y Magdalena. La diferencia en el Cretácico entre el este y el oeste Colombiano es marcada por los regímenes tectónicos dominantes. Hacia el oriente prevalece una tectónica de extensión con depositación de sedimentos marinos; mientras hacia el occidente se desarrollan eventos magmáticos, metamórficos y acreciones sucesivas de terrenos alóctonos de origen oceánico, que según algunos modelos se estarían colisionando en la margen continental desde el Aptiano hasta el Paleoceno-Eoceno (Toussaint y Restrepo, 1994; Cediél et al., 2003). La acreción de estos terrenos alóctonos a la margen continental genera un complejo sistema de fallas de ~30 km de ancho que se extiende al sur hasta el Ecuador (Sistema de Fallas Romeral). Esta sutura de escala regional se compone tres ramales principales, que estarían representando diferentes eventos de acreción: Falla San Jerónimo, Falla Silvia-Pijao y Falla Cauca-Almaguer (Figura 1).

La Cordillera Central, muestra afinidad de corteza continental y es conformada por gneises de edad Paleozoica y rocas metasedimentarias y metaígneas del Complejo Cajamarca que componen el terreno Tahamí (Toussaint y Restrepo, 1994). Este terreno es limitado por la falla Otú-Pericos (OPF) al oeste y la falla San Jerónimo al este (SJF), y es intruído por diferentes granitoides con edades que van desde el Cretácico Inferior hasta el Paleoceno (Villagómez et al., 2011).

Entre las fallas San Jerónimo y Cauca-Almaguer se encuentra el complejo Quebradagrande, que comprende volcanismo máfico asociado a arcos de islas del Cretácico Inferior (Toussaint y Restrepo, 1994); y el complejo Arquía compuesto de anfibolitas y esquistos verdes producto de un metamorfismo de media-alta presión y baja temperatura de rocas basálticas de afinidad MORB, que habrían alcanzado su pico metamórfico en el Cretácico Inferior (Villagómez et al., 2011).

La Cordillera Occidental está constituida por rocas ígneas de edad cretácica agrupadas en el terreno Calima (Toussaint y Restrepo, 1994). Se encuentra al sureste de la falla Garrapatas y al oeste de la falla Cauca-Almaguer, y está conformada por fragmentos acrecionados del Plateau Caribe (Kerr et al., 1997a; Cedié et al., 2003). Las secuencias volcánicas y ultramáficas se conocen al sur como Formación Volcánica y Complejo Ultramáfico de Bolívar, cuya contraparte al norte de la cordillera sería la Formación Barroso. Las edades U/Pb de los intrusivos como el gabro del Palmar varían entre 91 y 99 Ma, y la edad de una toba lítica es de 75.5 Ma (Figura 1). Estas rocas tendrían su origen en un punto caliente del Pacífico Este y migraron hasta acrecionarse al continente desde el Cretácico Superior (Kerr et al., 1997b; Pindell y Keenan, 2009). Otra interpretación es que son el producto de una ventana astenosférica (“*slab window*”) creada por la interacción de la dorsal oceánica Proto-Caribe con el Gran Arco del Caribe, creando unos pulsos magmáticos desde ~100 a 66 Ma (Serrano et al., 2011).

La acreción de estas unidades oceánicas habría tenido lugar en el Cretácico Superior, como lo sugieren los análisis termocronológicos en la Cordillera Central y el análisis estratigráfico de las cuencas en el Oriente Colombiano, que indican rápidas tazas de enfriamiento entre 75-65 Ma y un paso a ambientes mas continentales con aporte de la Cordillera Central también en el Campaniano-Maastrichtiano (Villagomez et al., 2011).

### 1.3 Marco geológico Cordillera Occidental de Colombia

El segmento norte de la Cordillera Occidental de Colombia está formado por rocas volcano-sedimentarias de edad Cretácica Superior formadas en ambientes de afinidad oceánica y han sido agrupadas en el Grupo Cañasgordas (Alvarez y Gonzalez, 1978). Esta unidad agrupa una parte volcánica denominada Formación Barroso, compuesta por diabasas y derrames de lava de composición basáltica y andesítica, intercalados con tobas y aglomerados, y paquetes sedimentarios ocasionales. La parte sedimentaria se denomina Formación Penderisco y está formada por una secuencia de pedernal y calizas negras así como depósitos turbidíticos.

Sólo dos fechamientos han sido reportados para la Formación Barroso. Toussaint y Restrepo (1978) reportaron una edad de  $105 \pm 10$  Ma por K-Ar en roca total para un basalto, que interpretaron como un arco de islas desarrollado sobre corteza oceánica. González (2010) obtuvo una edad de  $84.2 \pm 1.4$  Ma por  $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$  en roca total para un basalto y, aunque es una edad confiable, el autor sugiere que existen varios bloques tectónicos de diferentes edades debido a las relaciones con intrusivos y fósiles del Cretácico hacia el norte y centro de la Formación Barroso (Figura 1).

Rodríguez y Arango (2013) integraron un análisis litogeoquímico nuevo con resultados publicados previamente y dividen la Formación Barroso en dos conjuntos. El primero está formado por basaltos porfídicos, basaltos amigdalares, aglomerados y tobas, con una afinidad geoquímica de arco volcánico toleítico subalcalino, y rocas piroclásticas de la serie calcoalcalina, que estarían relacionadas genéticamente con otras unidades como el batolito de Sabanalarga ( $\sim 89.9 \pm 0.6$  Ma, (Vinasco y Cordani, 2012), la tonalita de Buriticá ( $100.9 \pm 0.85$  Ma, (Weber et al., 2015) y el gabro de Altamira (88.9 Ma, (Zapata, 2013) (Figura 1), formando el arco volcánico-plutónico Barroso-Sabanalarga en la zona de sutura entre el basamento oceánico y el basamento continental al este.

El segundo grupo, formado por diabasas y basaltos almohadillados y relacionado con la unidad diabasas de San José de Urama, presenta afinidad toleítica y una geoquímica afín a un MORB transicional (T-MORB). La edad de este magmatismo no ha sido definida con precisión, aunque estos autores presentan una edad  $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$  jurásica ( $155.1 \pm 11.2$  Ma)

que, debido al bajo contenido de K, tiene baja precisión por lo que su significado geológico es incierto.

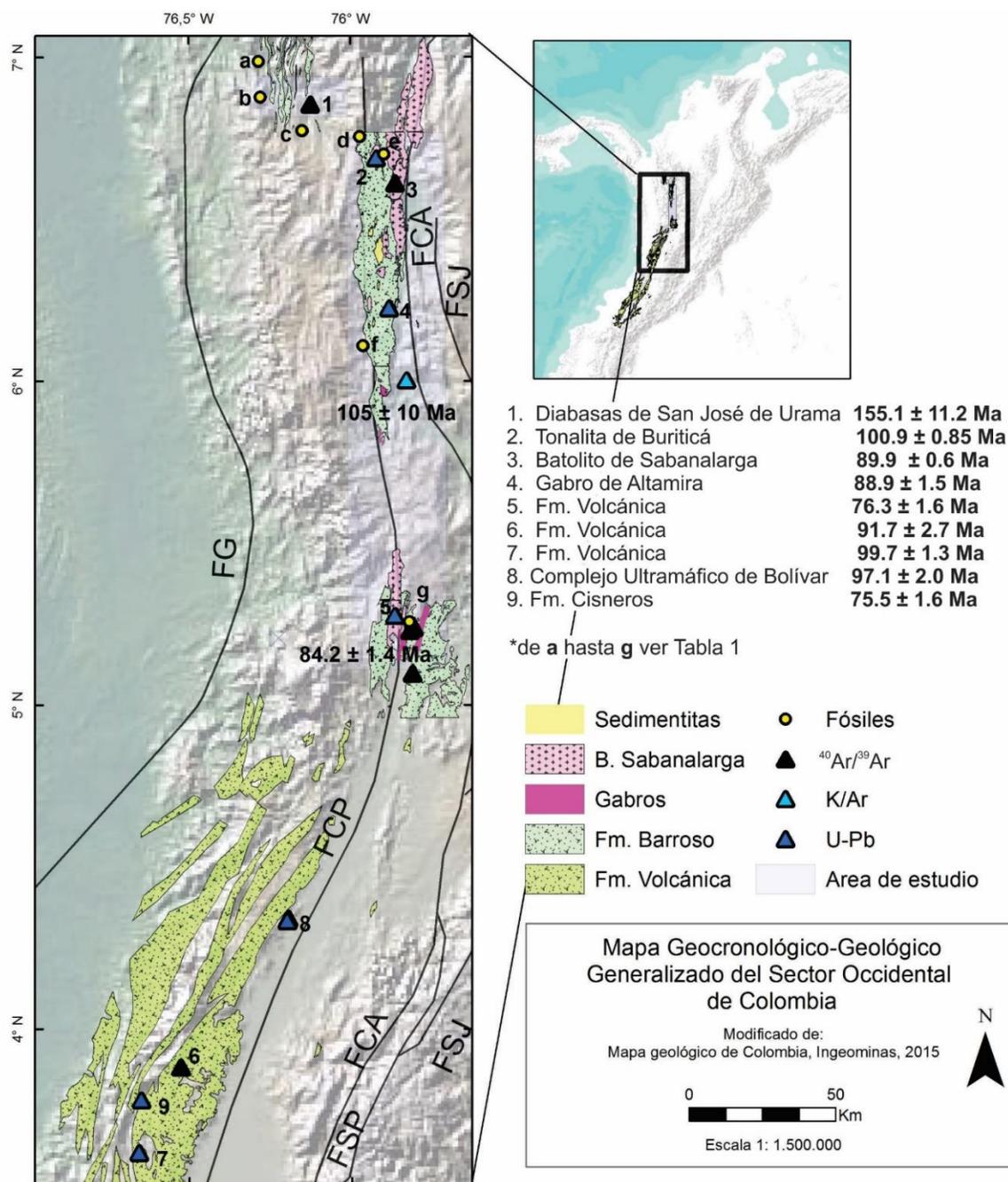
Basados en las características petrográficas, geoquímicas y, en menor grado los resultados geocronológicos, se ha correlacionado la Formación Barroso con la Formación Volcánica en el segmento sur de la Cordillera Occidental y el Ecuador. Esta unidad volcánica ha sido incluida como una parte acrecionada de la placa del Caribe que habría migrado del punto caliente de los Galápagos y que colisionó con la margen continental de Suramérica en el Cretácico Tardío a medida que esta placa avanzaba para alcanzar su posición actual (Villagómez y Spikings, 2013; Spikings et al., 2015).

Los diferentes modelos de evolución cretácica en la esquina noroccidental de Suramérica proponen diferentes edades para la colisión entre los terrenos alóctonos oceánicos y la margen continental. Según el esquema de Rodríguez y Arango (2013), con el arco Sabanalarga-Barroso originado en la sutura e intruyendo tanto la Cordillera Occidental como la Central, la colisión tendría lugar entre 88 y 105 Ma. Villagómez y Spikings (2013) atribuyen las tasas altas de exhumación en la Cordillera Central de Colombia entre 75-65 Ma como resultado de la colisión. Kerr et al. (1997a) sugieren que el arco de Dabeiba de edad Eoceno (al occidente de la Formación Barroso) es la respuesta a la obducción del plateau de edad 75-90 Ma y por ende, la colisión sería probablemente durante el Eoceno Inferior; similar con el modelo de múltiples acreciones de Cediel et al. (2003) en el que el terreno Dagua-Piñón, que alberga la Formación Barroso, colisiona con la margen continental ~ 49 Ma. Kennan y Pindell (2009) sugieren que las unidades de plateau oceánico empiezan a acrecionarse durante una subducción lenta, que empieza a 75 Ma en el Ecuador, y extendiéndose hacia el norte hasta el Mioceno Inferior.

**Tabla 1. Localidades fósiles reportadas para la Cordillera Occidental en el departamento de Antioquia y Caldas.**

Código	Fósil	Edad	Unidad	Referencia
a	Radiolarios	Maastrichtiano-Paleoceno	Fm. Nutibara	Bourgeois et al. (1983)
b	Radiolarios	Coniaciano-Campaniano	Fm. Nutibara	Ingeominas, informes internos
c	Radiolarios	Cretácico Superior	Fm. Nutibara	Ingeominas, informes internos
d	Radiolarios	Cretácico Superior	Fm. Urrao	Ingeominas, informes internos

<b>e</b>	Amonitas	Barremiano-Aptiano	Fm. Barroso	Castro y Feinenger (1965)
<b>e</b>	Foraminíferos	Aptiano-Albiano	Fm. Barroso	Castro y Feinenger (1965)
<b>e</b>	Amonitas	Albiano Medio	Fm. Barroso	Etayo et al., (1980)
<b>f</b>	Bivalvos	Campaniano-Maastrichtiano	Fm. Urrao	Andrés Pardo, Comunicación Personal, 2015
<b>g</b>	Pachidyscus sp.	Campaniano-Maastrichtiano	Fm. Barroso	Moreno y Pardo 2003



**Figura 1. Mapa geocronológico generalizado para el sector Occidental de Colombia. FG: Falla Garrapatas; FCP: Falla Cauca-Patía; FCA: Falla Cauca-Almaguer; FSP: Falla Silvia-Pijao; FSJ: Falla San Jerónimo.**

## Capítulo 2. Metodología

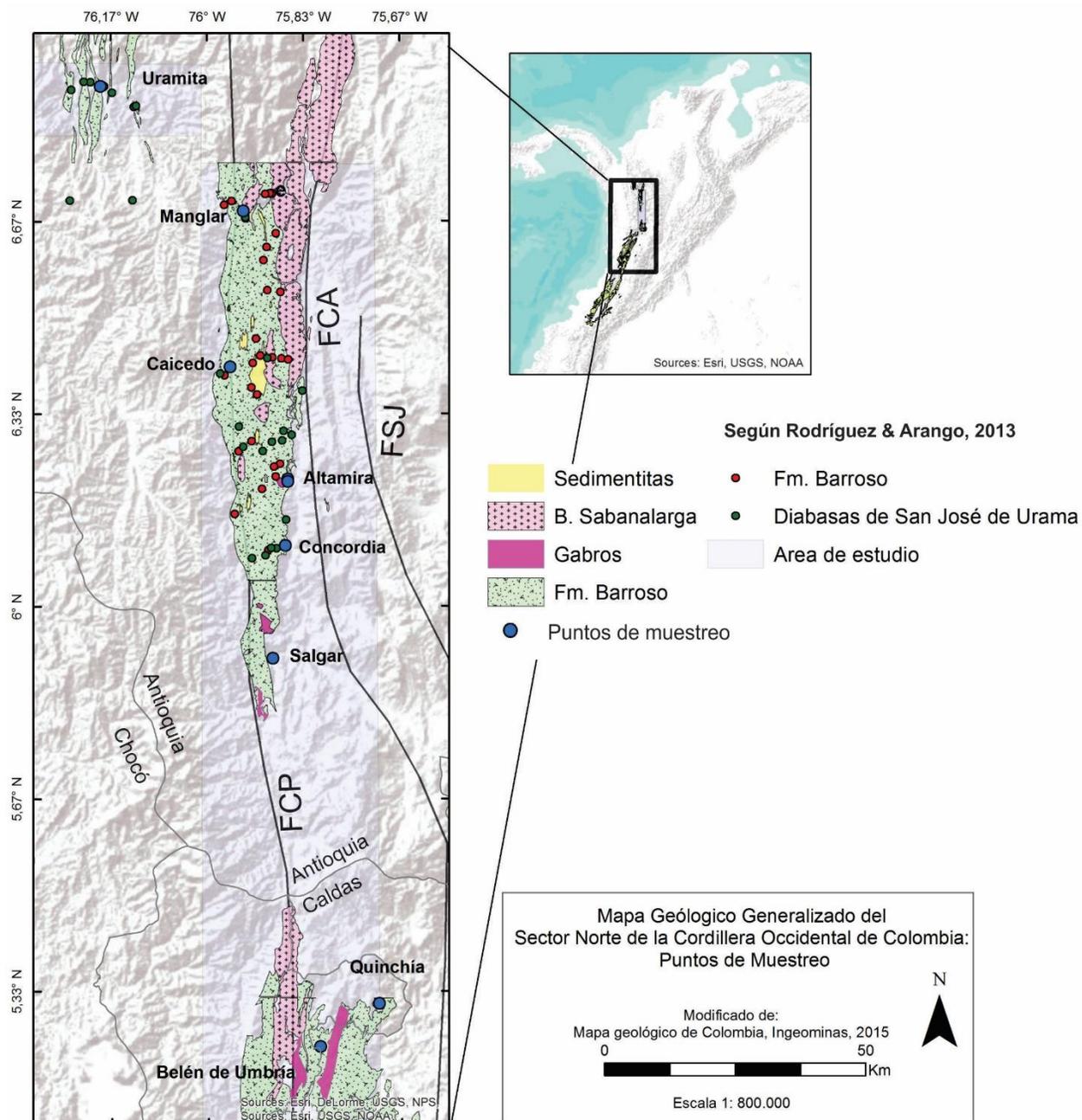
---

### 2.1 Fase de campo: Muestreo

La fase de campo se realizó en dos campañas con diferentes objetivos. En la primera campaña se realizó el muestreo para geocronología y geoquímica. Inicialmente el diseño del muestreo estaba pensado para realizarse en dos secciones cuya información previa podría contextualizar mejor el resultado de la geocronología (Altamira y Salgar). Pero debido al estado de meteorización severa de las rocas en los cortes, sólo se pudieron obtener una o dos muestras frescas de cada sección. Se optó entonces por realizar un muestreo regional procurando cortes este-oeste en nueve localidades entre los departamentos de Antioquia y Caldas (Figura 2). Para esto se tuvo en cuenta el mapa geológico regional, el contraste en la geoquímica existente entre la firma de plateau y arco (según Rodríguez y Arango, 2013, Figura 2) y la exposición y grado de alteración de la roca. Para las muestras de geocronología se tuvo especial cuidado en obtener rocas sin alterar o meteorizar, sin presencia de vetillas de carbonatos o influencia evidente de fluidos hidrotermales. Aunque para las muestras de geoquímica también se tuvo en cuenta el estado de alteración de la roca, en algunos casos, la presencia leve de alteración fue aceptable y se tuvo en cuenta en los análisis posteriores.

Se realizaron 31 secciones delgadas para su análisis petrográfico. En una primera revisión en Colombia se pre-seleccionaron 13 muestras para fechamiento  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , de las cuales 10 fueron procesadas y analizadas en el Laboratorio de Geocronología de CICESE. Para geoquímica se escogieron 15 muestras que fueron procesadas en la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín para su posterior envío y análisis en Washington State University. En la Tabla 2 se presenta la relación del muestreo total realizado para este trabajo

La segunda campaña de campo se realizó luego de obtener los primeros resultados de geocronología. El objetivo fue verificar los datos de las edades obtenidas con las relaciones de campo existentes. Para esto se realizaron dos perfiles estructurales que contribuyen en la explicación del significado de la geocronología.



**Figura 2. Mapa geológico generalizado del área de estudio, en el norte de la Cordillera Occidental de Colombia. Las muestras analizadas en este trabajo se indican en azul.**

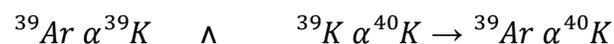
**Tabla 2. Muestras colectadas para geocronología y geoquímica. G: Geoquímica; Ar: Geocronología  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ .**

Estación	Longitud (x)	Latitud (y)	Sección	Litología	Análisis
<b>CVM 006</b>	-75.86196	6.22003	Altamira	Basalto	G, Ar
<b>CVM 008</b>	-75.86192	6.21548	Altamira	Pillow	G, Ar
<b>CVM 015</b>	-75.88801	5.90960	Salgar	Pillow	G, Ar
<b>CVM 016</b>	-75.89378	5.90585	Salgar	Basalto	G
<b>CVM 018</b>	-75.90302	5.90000	Salgar	Basalto	G
<b>CVM 029</b>	-75.90875	5.84106	Hispania	Gabro	G
<b>CVM 030</b>	-75.90804	5.83625	Hispania	Gabro	G
<b>CVM 031</b>	-75.90455	5.83075	Hispania	Gabro	G, Ar
<b>CVM 046</b>	-75.93868	6.40726	Caicedo	Basalto	G
<b>CVM 048</b>	-75.96070	6.41442	Caicedo	Basalto	G, Ar
<b>CVM 052</b>	-75.93754	6.68403	Manglar	Pillow	Ar
<b>CVM 054</b>	-76.16424	6.88930	Uramita	Gabro	Ar
<b>CVM 066</b>	-75.80472	5.23993	Umbría	Basalto	G
<b>CVM 067</b>	-75.80704	5.23752	Umbría	Basalto	Ar
<b>CVM 068</b>	-75.81280	5.23610	Umbría	Basalto	G
<b>CVM 071</b>	-75.82520	5.23313	Umbría	Basalto	G
<b>CVM 073</b>	-75.76497	5.25596	Umbría	Basalto	G
<b>CVM 083</b>	-75.86623	6.10493	Concordia	Basalto	G, Ar
<b>CVM 085</b>	-75.70099	5.31359	Quinchía	Basalto	Ar

## 2.2 Geocronología

### 2.2.1 Método $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$

Una de las bases para el fechamiento por  $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$  es el decaimiento radiactivo del  $^{40}\text{K}$  en  $^{40}\text{Ar}$  radiogénico ( $^{40}\text{Ar}^*$ ). La acumulación del  $^{40}\text{Ar}^*$  en la estructura cristalina de la muestra permite determinar el tiempo transcurrido desde que empieza funcionar el geocronómetro. En el fechamiento  $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$ , el  $^{39}\text{Ar}$  es generado a partir de la irradiación de la muestra con neutrones en un reactor nuclear, y se cuantifica el  $^{39}\text{Ar}$  producto de la reacción con el  $^{39}\text{K}$ . Como la relación entre  $^{40}\text{K}$  y  $^{39}\text{K}$  es constante en la naturaleza se puede decir que:



Ya que el  $^{39}\text{Ar}$  es una medida indirecta del contenido de nucleídos padre  $^{40}\text{K}$  en la muestra, se puede generar la relación  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  tomando la ecuación fundamental del sistema isotópico K-Ar, y el número de átomos de  $^{39}\text{Ar}$  producidos en la irradiación:

$$\left( \frac{^{40}\text{Ar}^*}{^{39}\text{Ar}} \right)_s = \frac{e^{\lambda t_s} - 1}{J}$$

Donde  $\lambda$  es la constante de decaimiento del  $^{40}\text{K} = 5.543 \times 10^{-10}$  años $^{-1}$ ,  $J$  es un parámetro que involucra la densidad de flujo de neutrones en el reactor, la probabilidad de transformación del  $^{39}\text{K}$  en  $^{39}\text{Ar}$  y el tiempo de irradiación en el reactor, por lo que puede ser determinado irradiando una muestra con edad conocida o monitor de irradiación. El  $(^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar})_s$  es la relación medida del monitor (Faure y Mensing, 2005).

Finalmente, con  $(^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar})_m$  medido en la muestra y resolviendo para  $t$ :

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left\{ \left( \frac{^{40}\text{Ar}^*}{^{39}\text{Ar}} \right)_m J + 1 \right\} \quad (1)$$

### 2.2.2 Argón atmosférico

Se entiende por argón atmosférico el argón con la composición isotópica que se encuentra hoy en la atmósfera. Existen naturalmente 3 isótopos de argón:  $^{40}\text{Ar}$  con 99.600% abundancia,  $^{38}\text{Ar}$  con 0.0632% y  $^{36}\text{Ar}$  0.3364%. En la irradiación con neutrones se generan los isótopos artificiales  $^{37}\text{Ar}$  y  $^{39}\text{Ar}$ .

Para el método  $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$  se requiere asumir que el  $^{40}\text{Ar}$  puede ser tanto radiogénico como atmosférico, que una vez que se corrige la masa 36 por el isótopo  $^{36}\text{Ar}$  derivado de la irradiación del Ca, el  $^{36}\text{Ar}$  restante es de composición atmosférica. Entonces el  $^{40}\text{Ar}$  medido puede corregirse por la presencia de  $^{40}\text{Ar}$  no radiogénico mediante el  $^{36}\text{Ar}$ . Partiendo de que la relación  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  atmosférica es igual a 295.5 (Steiger y Jäger, 1977), se tiene que:

$$\left(\frac{{}^{40}\text{Ar}}{{}^{36}\text{Ar}}\right)_{\text{Atm}} = 295.5 \Rightarrow ({}^{40}\text{Ar})_{\text{Atm}} = 295.5x({}^{36}\text{Ar})_{\text{Atm}} \quad (2)$$

En una primera aproximación es válido suponer que el  ${}^{40}\text{Ar}$  es la suma de  ${}^{40}\text{Ar}^*$  y  ${}^{40}\text{Ar}_{\text{atm}}$ :

$$({}^{40}\text{Ar})_{\text{Total}} = ({}^{40}\text{Ar}^*) + ({}^{40}\text{Ar})_{\text{Atm}} \quad (3)$$

se encuentra el  ${}^{40}\text{Ar}^*$  reemplazando el  ${}^{40}\text{Ar}_{\text{atm}}$  en función del  ${}^{36}\text{Ar}$

$$({}^{40}\text{Ar}^*) = ({}^{40}\text{Ar})_{\text{Total}} - 295.5({}^{36}\text{Ar})_{\text{Atm}} \quad (4)$$

Para obtener la relación  ${}^{40}\text{Ar}^*/{}^{39}\text{Ar}$  requerida para el cálculo de la edad es necesario tener en cuenta las reacciones de interferencia generadas en el reactor nuclear debido a la interacción de los neutrones con isótopos de Ca y K, que generan isótopos de argón. La ecuación que define la corrección por reacciones de interferencia involucra los factores  $f_1$  y  $f_2$  que están asociados a reacciones de interferencia con el Ca:

$$\left(\frac{{}^{40}\text{Ar}^*}{{}^{39}\text{Ar}_K}\right)_{\text{Atm}} = (1 - f_1) \left(\frac{{}^{40}\text{Ar}}{{}^{39}\text{Ar}}\right)_m - 295.5(1 - f_2) \left(\frac{{}^{36}\text{Ar}}{{}^{39}\text{Ar}}\right)_m - \left(\frac{{}^{40}\text{Ar}}{{}^{39}\text{Ar}}\right)_K \quad (5)$$

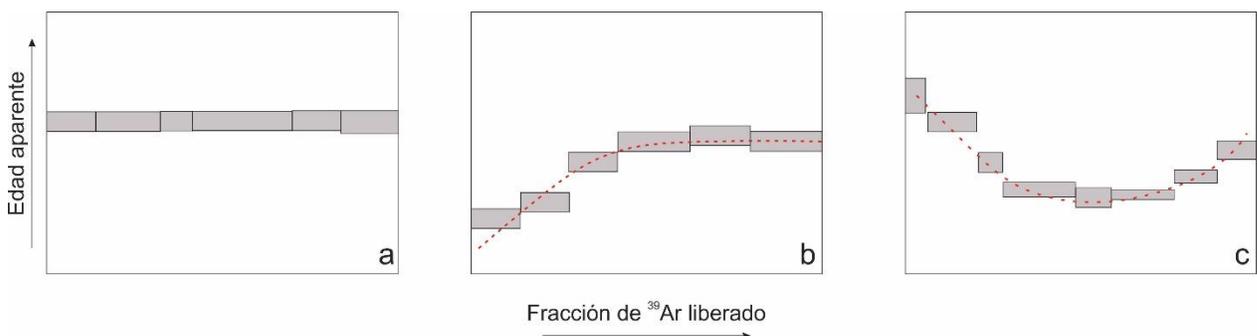
$$\text{Con } f_1 = \left[1 - \left(\frac{{}^{37}\text{Ar}}{{}^{39}\text{Ar}}\right)_{\text{Ca}} \left(\frac{{}^{39}\text{Ar}}{{}^{37}\text{Ar}}\right)_m\right]^{-1} \quad \wedge \quad f_2 = \frac{\left[1 - \left(\frac{{}^{36}\text{Ar}}{{}^{39}\text{Ar}}\right)_{\text{Ca}} \left(\frac{{}^{36}\text{Ar}}{{}^{39}\text{Ar}}\right)_m\right]}{\left[1 - \left(\frac{{}^{37}\text{Ar}}{{}^{39}\text{Ar}}\right)_{\text{Ca}} \left(\frac{{}^{37}\text{Ar}}{{}^{39}\text{Ar}}\right)_m\right]}$$

Los subíndices  $m$  se refieren a las relaciones medidas en la muestra,  $\text{Ca}$  y  $\text{K}$  comprenden las relaciones determinadas en la irradiación de neutrones de sales de Ca y K respectivamente y son parámetros de corrección específicos para cada reactor nuclear.

### 2.2.3 Experimentos de calentamiento por pasos- Espectros de edad

En la técnica de calentamiento por pasos el argón es liberado incrementando la temperatura de extracción de argón en etapas a temperaturas fijas para cada paso hasta llegar a la fusión de la muestra. La relación  $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$  es determinada con las composiciones isotópicas de argón obtenidas por espectrometría de masas. Para cada incremento de temperatura se obtiene una edad y con éstos datos se construye un espectro de edad donde se relaciona la fracción de  $^{39}\text{Ar}$  liberado en cada etapa con su respectiva edad aparente (Figura 3) calculada a partir de la relación  $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$  y la ecuación (1)

En el caso ideal de un sistema cerrado para el geocronómetro K-Ar desde su formación, las edades obtenidas en cada etapa deben ser iguales y el espectro de edad debe verse como una línea horizontal formando lo que se denomina una edad de “meseta” o “plateau” para todos los datos. En caso contrario la forma del espectro de edad indica perturbación del geocronómetro K-Ar y su forma puede sugerir pérdida de argón (Figura 3b) o cuando el espectro de edad tiene forma de “U” ganancia de argón (Figura 3c).



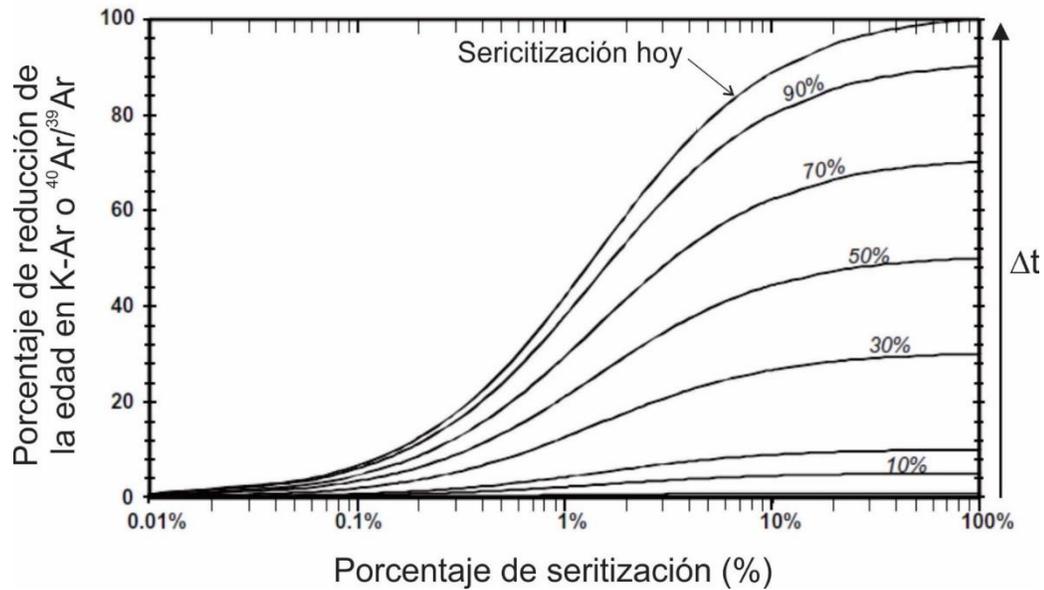
**Figura 3. Espectros de edad. a) En un caso ideal de sistema cerrado se forma una meseta o “plateau”; b) Pérdida de argón; c) Exceso de argón**

### 2.2.4 El rol de la Difusión vs. Alteración

Las rocas volcánicas son caracterizadas por un enfriamiento rápido, donde plagioclasas y piroxenos logran preservar el argón. La edad obtenida por este método se asocia con la edad de emplazamiento de la lava. Durante en enfriamiento, en rocas plutónicas, la temperatura genera una transferencia del argón por difusión en la red cristalina, o así

mismo, un evento de calentamiento posterior puede lograr la difusión del argón. Cuando las rocas son sometidas a altas temperaturas después de su cristalización, el  $^{40}\text{Ar}^*$  que se ha acumulado hasta ese momento puede perderse parcial o completamente dependiendo de la temperatura, el tiempo de duración del incremento de temperatura y de las características de cada mineral por ejemplo, su temperatura de cierre. Los procesos que pueden ocurrir después de la cristalización, como el metamorfismo, u otros asociados con la pérdida parcial de  $^{40}\text{Ar}^*$ , pueden ser registrados por la técnica de calentamiento por pasos del método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , permitiendo realizar un mejor seguimiento a la historia termal del mineral o roca (McDougall y Harrison, 1988).

Este método de fechamiento es el más usado para datar rocas máficas volcánicas, y debido al tamaño de los cristales, es habitual hacerlo en roca total más que por separados minerales. Típicamente, rocas con meteorización, vidrio desvitrificado, o fases minerales secundarias como zeolitas o arcillas no son recomendadas para datación. Estas características pueden ser fáciles de cumplir en rocas jóvenes (<30 Ma) donde una revisión cuidadosa y trabajo en campo puede obviar el problema; sin embargo, en rocas antiguas en contextos tectónicos complejos, la ocurrencia de minerales secundarios es constante (Jourdan et al., 2007). Adicionalmente, una roca no perturbada pero con algún grado de alteración, incluso no reconocido en afloramiento y/o secciones delgadas, podría lograr subestimar las edades de cristalización de la roca (Baksi, 2007). La sericita, fase mineral secundaria de alteración de plagioclasas, es generada en procesos de baja temperatura (<300 °C) relacionados con alteración hidrotermal de tipo epitermal o durante metamorfismo en facies esquisto verde. Si se considera el bajo contenido de K en las plagioclasas ( $\text{K}_2\text{O} \sim 0.1 \text{ wt } \%$ ), que son frecuentemente las únicas fases minerales que se puede fechar en rocas volcánicas básicas, una alteración fina de sericita ( $\text{K}_2\text{O} \sim 12\%$ ) es capaz de afectar y reducir las edades K/Ar y  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  (Verati y Jourdan, 2013). El modelado del efecto que tiene la sericita en la reducción de la edad sugiere que el factor más importante es el tiempo transcurrido entre el tiempo de la cristalización y el tiempo en que se produce el evento de sericitización. Así, entre mayor el lapso, mayor es el efecto en la reducción de la edad, incluso en pequeñas cantidades de sericita (Figura 4).



**Figura 4. Porcentaje de sericitización vs Porcentaje de reducción de la edad en metodología K-Ar o  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . Modelo de Verati y Jourdan, 2013**

### 2.2.5 Preparación de muestras

Las 11 muestras de roca se prepararon siguiendo la metodología del Laboratorio de Geocronología del CICESE, en los talleres dispuestos por el departamento de Geología. La roca fue triturada con la ayuda de una bomba hidráulica y tamizada separando las fracciones 710  $\mu\text{m}$  y 180  $\mu\text{m}$ . Para evitar contaminación en el proceso de trituración todo el lugar fue lavado, limpiado y secado antes de empezar con la trituración de las muestras. También se realizó la limpieza de la bomba hidráulica y tamices cada vez que una muestra era terminada.

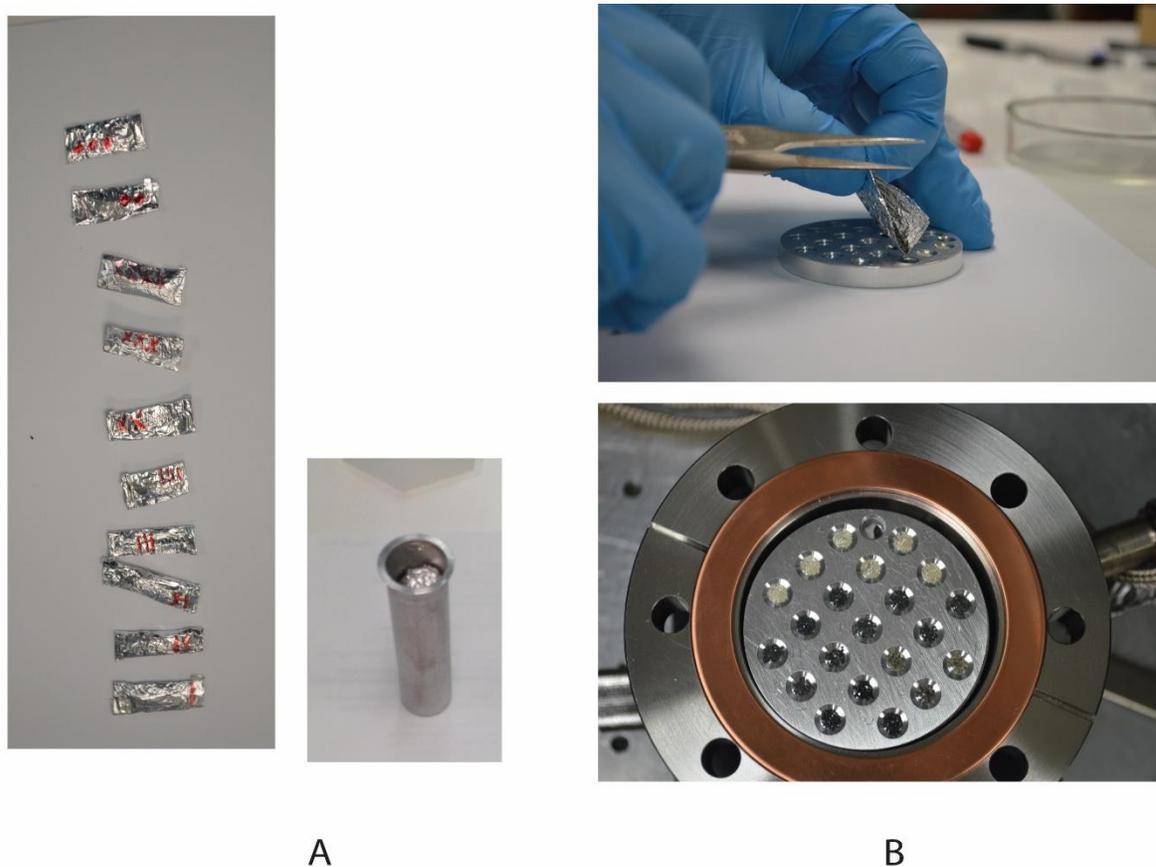
Las muestras tamizadas fueron lavadas con agua, ácido nítrico (sólo las que tenían presencia de carbonatos con el fin de eliminarlos de la muestra) y pasaron por el ultrasonido. Fueron secadas en el horno a temperatura de 50°C, y dispuestas en un separador magnético tipo Frantz.

La separación de minerales y selección de roca total se realizó con la ayuda de un microscopio estereoscópico. Las muestras de basaltos fueron separadas como roca total en fracciones entre 710  $\mu\text{m}$  y 355  $\mu\text{m}$ . Los separados de plagioclasa se escogieron de las fracciones más finas (-335  $\mu\text{m}$  +250  $\mu\text{m}$  y -250  $\mu\text{m}$  +180  $\mu\text{m}$ ) pues son los tamaños

más cercanos al tamaño promedio del cristal. En total se prepararon 12 muestras de aproximadamente 1 g cada una.

Al tener listos los separados minerales, se empacaron individualmente en sobres de papel aluminio con  $\sim 0.1$  g de material. Se identificaron según el protocolo del laboratorio, se empaquetaron en una cápsula de aluminio (Figura 5A) y finalmente, se enviaron al reactor nuclear McMaster en Ontario, Canadá donde fueron irradiadas, la dosis recibida fue de 120MWH en la posición 8C.

En la Tabla 3 se listan las muestras con la fracción usada y el identificador del laboratorio.



**Figura 5. A. Sobres de aluminio enviados a irradiar. B. Montaje de las muestras en la charola después de la irradiación.**

**Tabla 3. Relación de muestras con consecutivo de laboratorio y fracción usada para irradiación**

<b>ID</b>	<b>Nº Lab</b>	<b>Muestra</b>	<b>Mineral</b>	<b>Tamaño</b>
<b>I</b>	BE 14	CVM 006	WR	-710 µm +335 µm
<b>II</b>	BE 15	CVM 008	WR	-710 µm +335 µm
<b>XI</b>	BE 16	CVM 015	WR	-710 µm +335 µm
<b>III</b>	BE 21	CVM 052	WR	-710 µm +335 µm
<b>IIII</b>	BE 23	CVM 067	WR	-710 µm +335 µm
<b>X</b>	BE 24	CVM 078	WR	-710 µm +335 µm
<b>XX</b>	BE 25	CVM 083	WR	-710 µm +335 µm
<b>XXX</b>	BE 26	CVM 085	WR	-710 µm +335 µm
<b>XXXX</b>	BE 31	CVM 048	MTX	-710 µm +335 µm
<b>O</b>	BE 32	CVM 048	PLG	-250 µm +180 µm
<b>OO</b>	BE 33	CVM 031	PLG	-335 µm +250 µm
<b>OOO</b>	BE 36	CVM 054	PLG	-335 µm +250 µm

Para realizar las mediciones de argón se utilizó el espectrómetro de masas VG5400 marca Micromass (Figura 6). Las muestras a su regreso llegaron en su empaque original. En el montaje de la charola se procuró un promedio 20-35 granos de muestra por hoyo (Figura 5B); la variación depende de si es roca total o separado mineral y del tamaño de la fracción usada.

Luego del montaje de las muestras en el sistema de entrada del espectrómetro de masas, la cámara de extracción fue bombeada al alto vacío un mínimo 24 horas antes de realizar la medición de los isótopos de argón. El valor del parámetro  $J$  fue calculado a partir del monitor de irradiación sanidino FTC 2C (Kuiper et al., 2008). De acuerdo a su ubicación en el reactor nuclear se utilizó para las muestras de roca total  $J = (2.597 \pm 0.007) \times 10^{-3}$  y para los concentrados de plagioclasa  $J = (2.419 \pm 0.001) \times 10^{-3}$ . Para todas las muestras se utilizó la técnica de calentamiento en etapas. En promedio se realizaron entre 7-10 pasos. La potencia máxima del láser fue de 10 W. A excepción de la potencia usada en cada etapa de calentamiento, el proceso en el sistema de extracción, la medición de blancos y la sintonización del espectrómetro tomando como referencia la masa  $^{40}\text{Ar}$ , fue realizado con un sistema automatizado que controla las válvulas y el espectrómetro de masas. Al inicio de cada paso se realizó una medición del blanco y posteriormente, los datos de la muestra fueron corregidos por el blanco correspondiente. El factor de

corrección por discriminación de masas es determinado con una muestra de lava del volcán Ceboruco de edad reciente. Para la corrección por reacciones de interferencia se utilizaron los parámetros del reactor nuclear de la Universidad de McMaster:  $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = (6.50 \pm 0.47) \times 10^{-4}$ ,  $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = (2.55 \pm 0.28) \times 10^{-4}$  y  $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = (0.0 \pm 0.001) \times 10^{-2}$  (Masliwec, 1981).

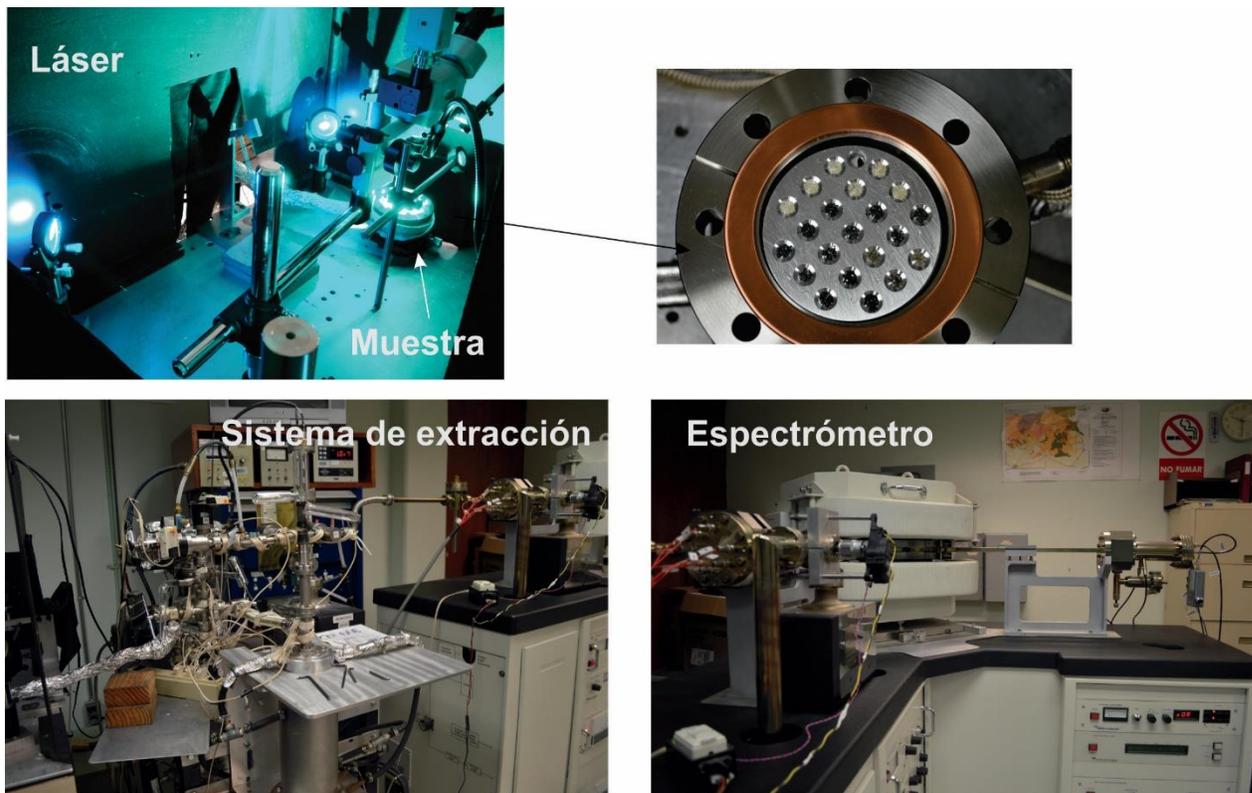


Figura 6. Espectrómetro de masas VG5400 marca Micromass

### 2.2.6 Definición de edades representativas

Se tomaron como edades de meseta aquellas definidas con al menos 3 fracciones consecutivas que representen por lo menos el 30% de  $^{39}\text{Ar}$  liberado y que no sean diferentes estadísticamente dentro de un  $\sigma$  de incertidumbre. Para el cálculo de las isocronas se tomaron en cuenta las fracciones que definen la(s) meseta(s) en el experimento. Para el cálculo de la edad de isocrona se combinaron los datos de los experimentos realizados para cada muestra, usualmente dos. La edad de isocrona es la opción escogida cuando se observa la presencia de exceso de Ar. Cuando las edades de meseta e isocrona fueron estadísticamente indistinguibles se seleccionó el resultado

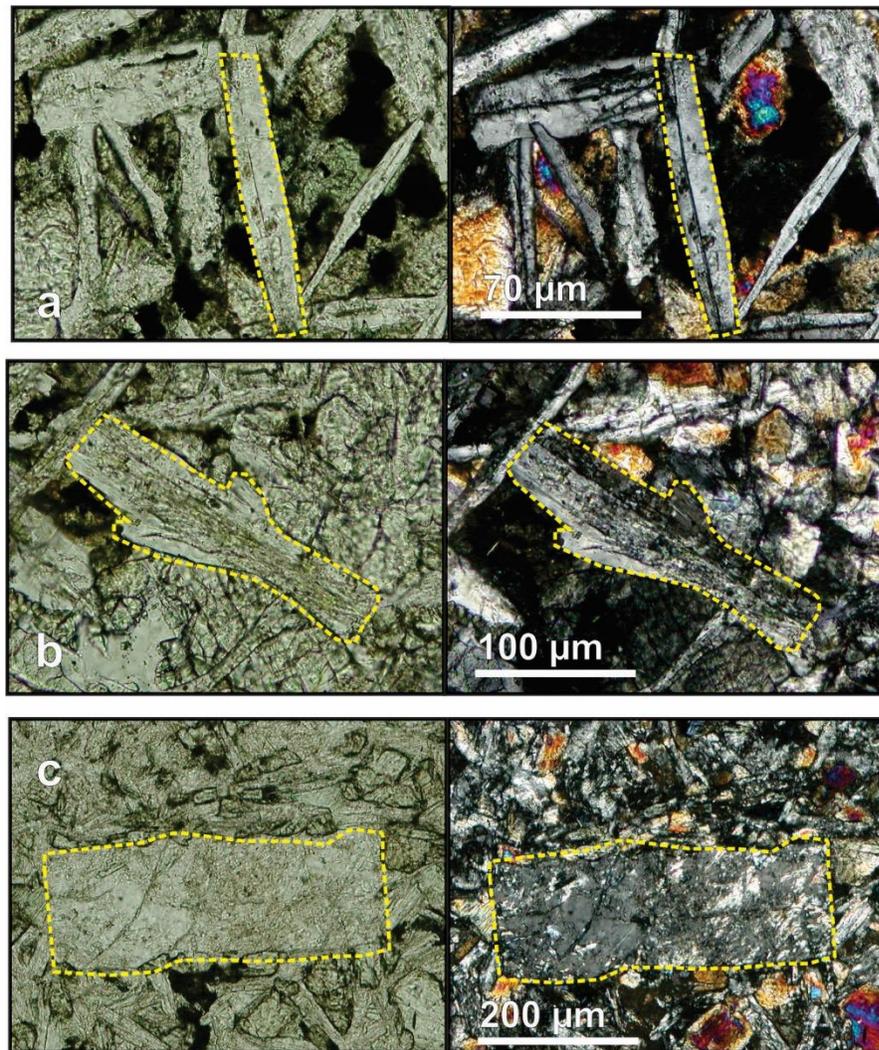
más preciso. La bondad del ajuste (MSWD) es también un parámetro importante que representa la dispersión en los datos. Valores menores o iguales a uno significan un buen ajuste a una distribución normal o con poca dispersión, valores superiores a uno indican mayor dispersión en los datos, sin embargo en algunas ocasiones puede resultar en un artificio matemático en el que fracciones con grandes errores pueden tener un MSWD aceptable ( $\leq 1$ ), mientras fracciones con errores individuales pequeños podrían no alinearse perfectamente en una línea recta (en la isocrona) y así dar una mala bondad del ajuste. Todos los datos en conjunto son tenidos en cuenta a la hora de identificar una edad representativa.

Las edades integradas son reportadas en los anexos pero no son consideradas en ningún caso como una buena aproximación de edad representativa por el grado de heterogeneidad observada en los experimentos.

### **2.3 Petrografía y Microscopía Electrónica de Barrido**

Las 31 secciones delgadas fueron descritas en el laboratorio de petrografía de CICESE. De la revisión de las 13 muestras seleccionadas para geocronología, se descartaron dos muestras debido a su alto grado de alteración hidrotermal que habría comprometido los resultados.

A las muestras de basalto escogidas para el fechamiento  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  se les realizó un estudio petrográfico más detallado diferenciando las fases de alteración. El término alteración se refiere en este estudio a la formación de minerales secundarios que caracterizan facies metamórficas de bajo grado como prehnita, clorita, epidota, albita, zeolita, cuarzo. Se realizó un conteo de más de 300 puntos para cada sección delgada. En el conteo se diferenció entre plagioclasa sana, y plagioclasa leve o fuertemente alterada, tomando como criterio de “leve” un cristal alterado  $< 25\%$  (Figura 7). En los piroxenos sólo se diferenció entre alterado y no alterado tomando como criterio el desarrollo de coronas de reacción y la cloritización invasiva del mineral. Se contaron también cristales completamente reemplazados por clorita, prehnita, cuarzo-feldespatos potásico-adularia secundario, opacos y vidrio.



**Figura 7. Discriminación microscópica de: a) plagioclasas sanas. Muestra CVM 006. b) Plagioclasas alteradas levemente (<25%). Muestra CVM 015. c) Plagioclasas alteradas fuertemente (>25%). Muestra CVM 048.**

Del conteo se estimaron porcentajes de alteración de la roca en general ( $A_{wr}$ ) y de cada fase mineral individual (plagioclasa:  $A_{plg}$ ; piroxeno:  $A_{pxn}$ ).

El porcentaje de alteración de la roca en general se calculó sumando los porcentajes individuales de plagioclasa alterada leve y fuertemente, piroxenos alterados, cristales reemplazados por clorita, prehnita y cuarzo/feldespato potásico-adularia secundarios.

La alteración de cada fase mineral, principalmente plagioclasa y piroxeno, se realizó recalculando al 100% los puntos totales de éstas y estimando la proporción de alteración de estos minerales. Se logró mejorar la identificación de fases de alteración como sericita,

prehnita, cuarzo y adularia, en algunos casos actinolita, con la sonda de energía dispersiva de rayos X (*Energy Dispersive Spectrometry*, EDS) del microscopio electrónico de barrido (MEB) JSM-35C. Se realizaron también mapas de distribución de elementos con el fin de entender la homogeneidad microscópica de K en las muestras. Si bien los resultados del EDS son semi-cuantitativos, permiten realizar la identificación entre minerales que no son fáciles de diferenciar utilizando únicamente el microscopio petrográfico.

## Capítulo 3. Resultados

---

### 3.1 Geología

#### 3.1.1 Basaltos

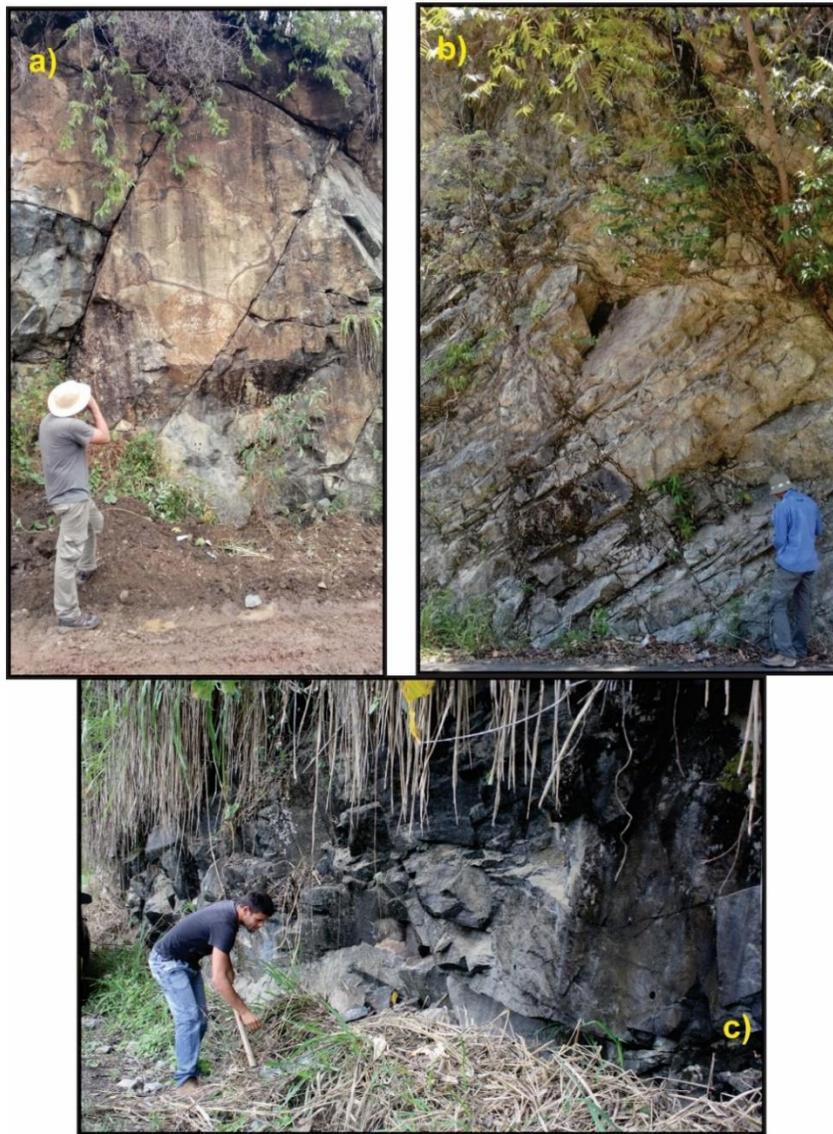
La Formación Barroso se presenta como una franja alargada con elongación N-S, con un ancho variable siendo más angosto en el departamento de Antioquia (8-15 km) y más ancho hacia el sur en el departamento de Caldas (20-30 km) (Figura 2). Se presenta como derrames lávicos masivos con frentes de lava almohadillada. Algunos afloramientos alcanzan hasta 3 km de continuidad. Las secciones de Manglar, Altamira y Salgar presentan una buena exposición de lavas almohadilladas, mientras que en Belén de Umbría la presencia de éstas es ocasional y de poco espesor, siendo los flujos masivos la expresión recurrente. La sección de Caicedo se presenta como basaltos porfídicos.

Las pillow lavas en la sección Altamira (Figura 8a) tienen polaridad normal, con buzamiento aparente general hacia el norte, mientras que en Salgar la secuencia se encuentra invertida con dirección N20W buzando 35° hacia el oeste. La deformación regional es evidente, siendo un rasgo el plegamiento de las unidades con buzamientos que varían entre 20° NW a 30° NE en la foliación de flujo para las lava almohadilladas. Presentan un sistema de diaclasas principalmente en 3 direcciones y un sistema de fracturas de alto ángulo rellenas de calcita que sugieren fallamiento de rumbo, y componente inversa con vergencia preferente hacia el este (Figura 9)

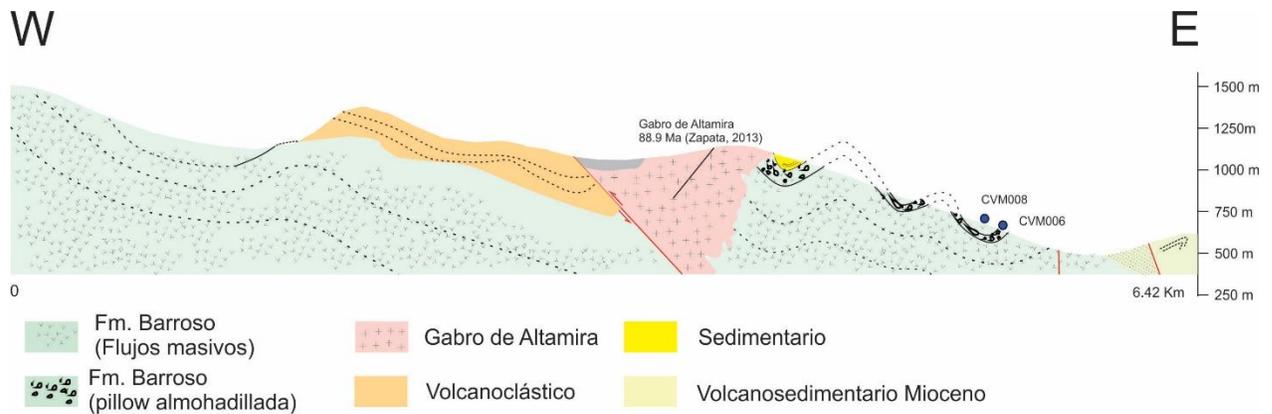
El grado de meteorización química y el vetilleo asociado a la alteración hidrotermal puede ocurrir en todas las secciones, sin embargo es posible encontrar exposiciones de roca con menor alteración. En la sección Salgar se pueden encontrar rocas con un alto grado de silicificación y/o cloritización que dan a la roca una coloración verde clara (Figura 8b).

Microscópicamente las rocas basálticas están compuestas por plagioclasa cálcica tipo labradorita-bytownita y piroxenos tipo augita y diópsido (según análisis semi-cuantitativos del MEB). Se observa variaciones texturales desde hipocristalinas, intergranulares y subofíticas, algunos afaníticos hasta texturas más porfídicas y traquíticas con mayor proporción de amígdalas.

La plagioclasa se presenta como microlitos en las rocas más afaníticas y como cristales aciculares-tabulares con el aumento de tamaño de cristal. Los fenocristales que se encuentran son euhedrales-subhedrales y suelen ocurrir como glomérulos asociados a augita. Los piroxenos son euhedrales o se encuentran rellenando espacios entre las plagioclasas. La presencia de orto-piroxenos es escasa. Ocasionalmente tienen texturas variolíticas. La alteración es variable, en las plagioclasas suele ocurrir como una combinación de sericita-prehnita-clorita, mientras que los piroxenos están alterando a clorita y en algunos casos con bordes de reacción alterando a uralita.



**Figura 8. a) Pillow lavas en la sección Altamira. b). Flujo de basaltos con diaclasamiento pervasivo y silicificación en la sección Salgar. c) Flujo masivo de basaltos altamente fracturados en la sección Belén de Umbría.**



**Figura 9. Perfil interpretativo de la sección Altamira. Las líneas punteadas inferidas representan límites entre flujos de lava indicando el plegamiento leve de las unidades.**

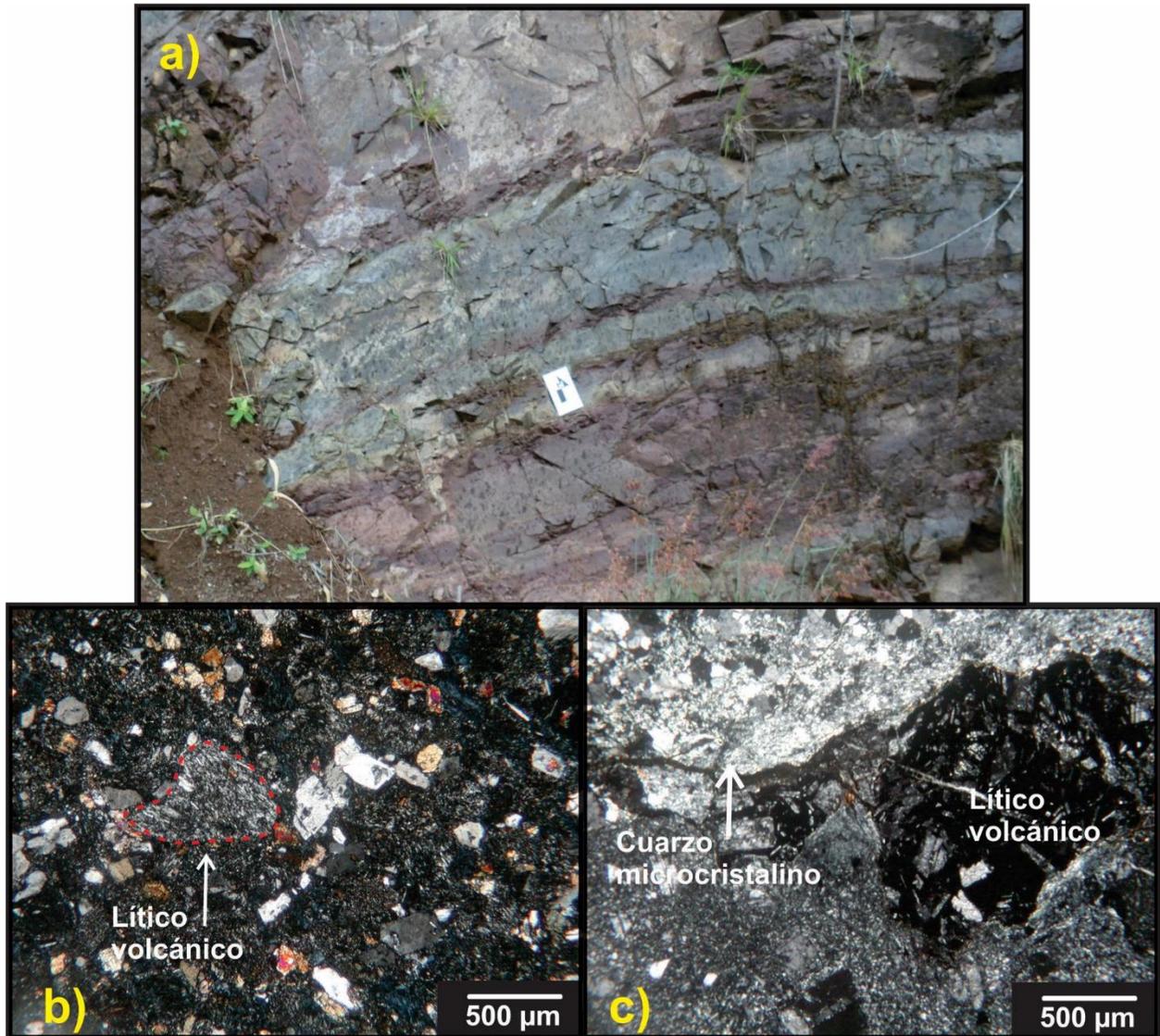
### 3.1.2 Rocas volcanoclásticas

Los depósitos volcanoclásticos están restringidos al sector occidental de la zona de estudio en cercanía al contacto con las rocas sedimentarias de la Formación Penderisco. Los afloramientos tienen menos de 350 m de extensión lateral y pueden encontrarse intercalaciones con flujos basálticos amigdalares probando un origen co-genético con la Formación Barroso (Figura 11). En la sección Salgar las brechas piroclásticas son comunes con un coloración rojiza oxidada en la matriz, fragmentos sub-redondeados de basalto y con presencia de carbonatos relleno vesículas y fracturas. En las secciones Altamira, Umbría y Caicedo las tobas vítreas y líticas son más frecuentes con coloraciones verdes y rojas en las cuales es posible identificar planos de estratificación (Figura 10a). La estratificación tiene dirección preferente hacia el NW y buzamiento hacia el NE, con variaciones en la dirección de buzamiento NW, indicando plegamiento abierto que se corresponden con la foliación encontrada en los flujos basálticos.

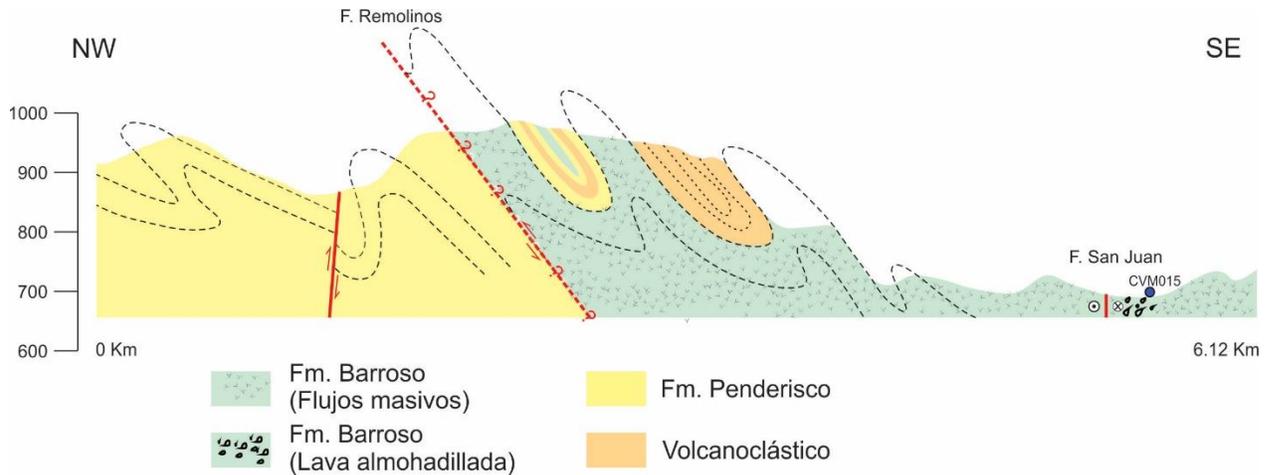
En las rocas volcanoclásticas se pueden identificar 2 sistemas de diaclasas y fracturas rellenas de forma similar a las fracturas en las rocas basálticas con buzamiento de ángulo moderado ( $\sim 60^\circ$ ) hacia el noroeste y noreste. En la sección Altamira el contacto de estas unidades con el gabro se encuentra cubierto por depósitos cuaternarios, sin embargo, Zapata (2013) lo describe como fallado de componente inversa.

Las tobas líticas microscópicamente se observan con texturas traquílicas en la matriz y pueden ser clasto-soportadas y matriz-soportadas. Los clastos son de basaltos

amigdalares o masivos que preservan microlitos de plagioclasa y cuarzo microcristalino asociado al chert (pedernal) (Figura 10b, c). Pueden encontrarse también en estas rocas cristales de plagioclasas bien formadas, piroxenos esqueletales y esferulitas ocasionalmente.



**Figura 10. a) Afloramiento de tobas en la sección Altamira. b). Microfotografía de la muestra de toba CVM 024 en la sección Salgar donde se observan líticos volcánicos con texturas microlíticas; c) Microfotografía de la muestra de toba CVM 021 en la sección Salgar donde se observan líticos volcánicos con texturas amigdalares y cuarzo microcristalino.**



**Figura 11. Perfil interpretativo de la sección Salgar. Las líneas punteadas inferidas representan límites entre flujos de lava o estratos indicando un plegamiento más pronunciado de las unidades respecto a la sección Altamira.**

### 3.1.3 Gabros

En las zonas de Altamira, Hispania y Belén de Umbría, a lo largo del cuerpo basáltico se observaron pequeños intrusivos máficos de  $\sim 2.5$  hasta  $5 \text{ km}^2$ . En general estas unidades presentan variaciones texturales, de grano muy grueso hasta grano fino, que en algunas ocasiones puede confundirse y/o asociarse a cuerpos diabásicos. Estas variaciones en el tamaño del cristal pueden relacionarse con la cercanía al contacto con los basaltos de la Formación Barroso y puede corresponder a un borde de enfriamiento del gabro (Zapata, 2013) evidenciando su carácter intrusivo. Los afloramientos de intrusivos se encuentran meteorizados.

En la sección Hispania es común encontrar diques basálticos con dirección NE-E buzando  $\sim 50^\circ$  hacia el sur. Las fallas inversas con dirección N-S buzando al oeste y se observaron cortando y desplazando estos diques (Figura 12a). Los fallamientos de tipo normal de alto ángulo y buzando hacia el este aparecen poniendo en contacto litologías diferentes de diabasas y gabros, que en metros pueden encontrarse con una relación intrusiva. Las fallas normales de alto ángulo también son observadas en el contacto con rocas sedimentarias, en la vía que va hacia Ciudad Bolívar, plegando paquetes sedimentarios de intercalaciones de chert y lodolitas.

Los intrusivos gabróticos presentan texturas ofíticas, intergranulares, y están compuestos por plagioclasas cálcicas tipo labradorita y piroxenos tipo augita. Las plagioclasas son cristales sub-idiomórficos, alargados y tabulares, con alteración moderada. Los piroxenos son de tipo augita, subhedrales y están generalmente frescos o con bordes de reacción y texturas esqueletales. El gabro de Hispania difiere composicionalmente de los gabros de Altamira y Belén de Umbría por su alto contenido de olivino, el cual se encuentra fracturado y alterado total o parcialmente a serpentina.

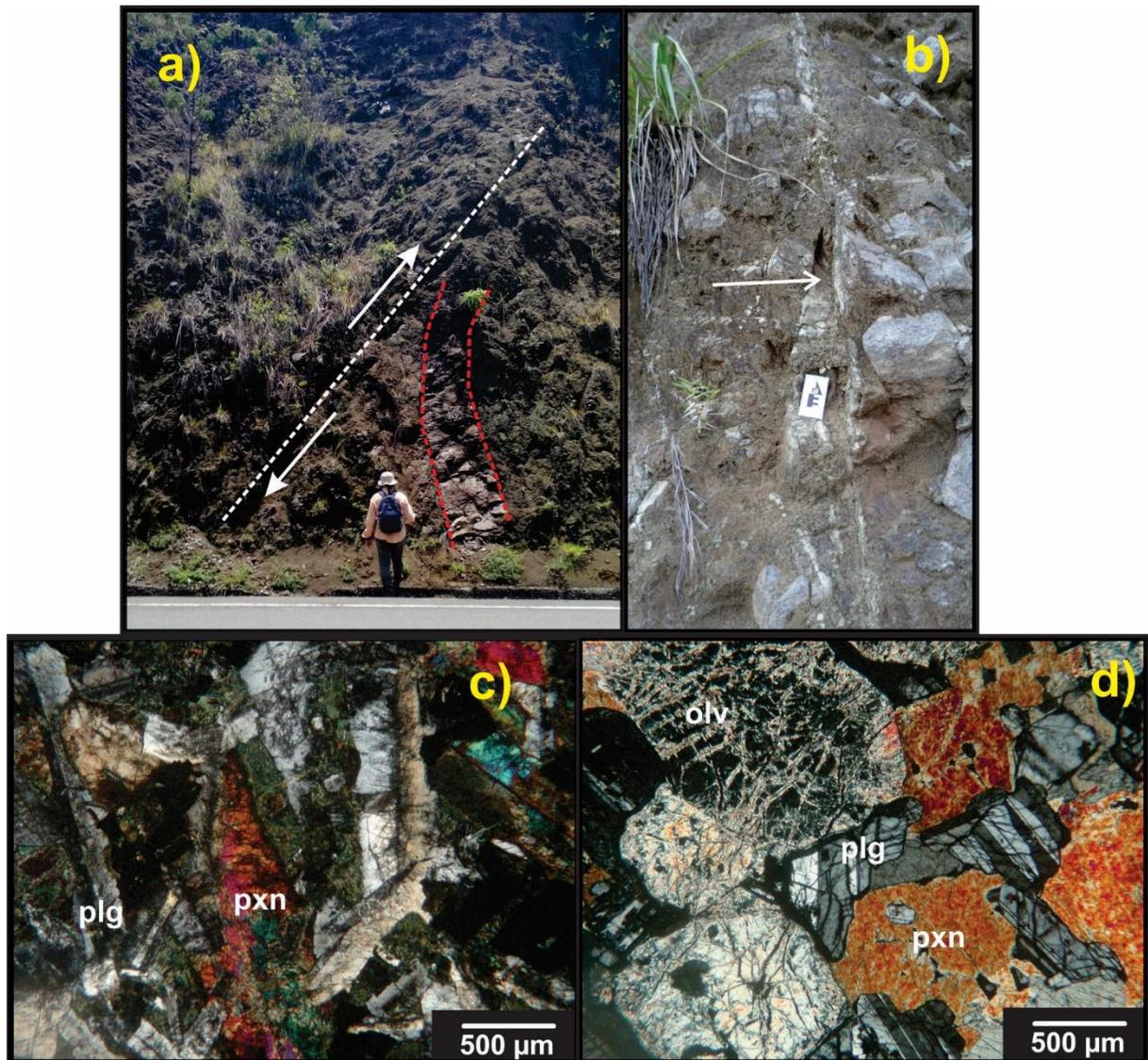


Figura 12. a) Dique basalto intruyendo el gabro de Hispania, con pliegue de arrastre. b) Fractura vertical rellena de calcita en gabro de Altamira. c) Fotografía microscopio petrográfico CVM 065 del gabro de Belén de Umbría evidenciando su grado de alteración, con piroxenos (pxn) uralitizados y cloritizados y plagioclasas (plg) alteradas a arcillas. d) Fotografía microscopio petrográfico CVM 031 del gabro de Hispania con olivino (olv) fracturado y serpentizado.

## 3.2 Geocronología

El bajo contenido de potasio y alto contenido de calcio de las muestras, producen en la mayoría de los experimentos una señal baja de la masa de  $^{39}\text{Ar}$  y relaciones de  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  relativamente altas para el tipo de muestras analizadas. Los resultados de la espectrometría de masas indican que el contenido de K en las muestras analizadas es muy bajo en comparación con basaltos típicos analizados en el laboratorio de Geocronología de CICESE y en otros trabajos publicados (ver por ejemplo Turrin et al., 2007). Los espectros de edad obtenidos revelan diferentes grados de perturbación en las muestras pudiéndose observar mesetas o pseudo-meseta; espectros en forma de “U” que sugieren la presencia de exceso de argón. Para todas las muestras analizadas se realizaron dos experimentos  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de calentamiento en etapas. El análisis de los resultados deja ver que los duplicados no siempre rindieron resultados reproducibles indicando aparentemente poca homogeneidad en las muestras analizadas.

Los resultados de edad en las muestras varían en un rango entre 40 Ma y 69 Ma para los basaltos, edades mucho más jóvenes de lo esperado por las relaciones de campo encontradas y por la correlación con fósiles reportados en la literatura para algunas localidades. Con el fin de comprender la complejidad en los resultados geocronológicos se evaluó de forma detallada el desarrollo de la mineralogía secundaria (hidrotermal, metamorfismo, meteorización) de las rocas a nivel petrográfico y microscópico, incluyendo análisis de microscopía electrónica de barrido. En la primera parte de este capítulo se muestran los resultados de la petrografía de alteración y su aparente relación con los resultados  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . Posteriormente se describe los resultados  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  obtenidos en el contexto regional. En los anexos se adjuntan todos los datos utilizados para el cálculo de las edades de meseta, isocrona y se reportan también los resultados integrados.

### 3.2.1 Análisis petrológico y geocronológico

El termino alteración es referido a la formación de minerales secundarios que caracterizan facies metamórficas de bajo grado como prehnita, clorita, epidota, albita, zeolita, cuarzo. En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos del conteo para las 9 muestras de

basaltos pertenecientes a la Formación Barroso. Ya que en el conteo realizado se tuvo en cuenta el porcentaje de cuarzo/feldespatos potásico y clorita los valores estimados de alteración pueden parecer altos en comparación a lo que observado macro y microscópicamente en las muestras.

Tabla 5 muestra la estimación de porcentajes de alteración para las fases minerales de plagioclasas y piroxenos separadamente. Para facilitar la visualización, las muestras fueron reorganizadas en orden de mayor a menor alteración.

**Tabla 4. Conteo y estimación del porcentaje de alteración de roca total ( $A_{wr}$ ) para las muestras de basaltos de la Formación Barroso. Plg<sub>s</sub>: Plagioclasa sana; Plg<sub>l</sub>: Plagioclasa alterada levemente (<25%); Plg<sub>f</sub>: Plagioclasa alterada fuertemente (>25%); Pxn<sub>s</sub>: Piroxeno sano; Pxn<sub>a</sub>: Piroxeno alterado; Q/FK: Cuarzo/Feldespatos potásico; Prh: Prehnita; V: Vidrio; Clo: Clorita; Cristales completamente reemplazados por clorita; Act: Actinolita.**

Muestra	Plg <sub>s</sub>	Plg <sub>l</sub>	Plg <sub>f</sub>	Pxn <sub>s</sub>	Pxn <sub>a</sub>	Q/FK	Prh	V	Clo	O	Act	Total conteo	$A_{wr}$
CVM 006	73	27	18	88	39	23	-	-	15	18	-	301	
%	24.3	9.0	6.0	29.2	13.0	7.6	-	-	5.0	6.0	-		<b>40.5</b>
CVM 008	87	23	16	80	67	21	-	-	3	17	-	314	
%	27.7	7.3	5.1	25.5	21.3	6.7	-	-	1.0	5.4	-		<b>41.4</b>
CVM 015	19	81	39	108	38	-	-	-	8	9	-	302	
%	6.3	26.8	12.9	35.8	12.6	-	-	-	2.6	3.0	-		<b>55.0</b>
CVM 048	0	43	102	71	55	-	-	-	34		-	305	
%	0.0	14.1	33.4	23.3	18.0	-	-	-	11.1	0.0	-		<b>76.7</b>
CVM 052	3	95	36	0	87	-	16	45	18	5	-	305	
%	1.0	31.1	11.8	0.0	28.5	0.0	5.2	14.8	5.9	1.6	-		<b>82.6</b>
CVM 054	0	32	96	57	47	18	13	-	41	8	-	312	
%	0.0	10.3	30.8	18.3	15.1	5.8	4.2		13.1	2.6	-		<b>79.2</b>
CVM 067	36	46	17	114	65	-	-	15	18	13	-	324	
%	11.1	14.2	5.2	35.2	20.1	-	-	4.6	5.6	4.0	-		<b>45.1</b>
CVM 083	0	31	86	0	142	-	-	-	-	4	40	303	
%	0.0	10.2	28.4	0.0	46.9	-	-	-	-	1.3	13.2		<b>98.7</b>
CVM 085	6	98	52	12	123	-	-	-	4	6	-	301	
%	2.0	32.6	17.3	4.0	40.9	-	-	-	1.3	2.0	-		<b>92.0</b>

**Tabla 5 Estimación del porcentaje de alteración de fases minerales individuales para las muestras de basaltos de la Formación Barroso. Plg<sub>s</sub>: Plagioclasa sana; Plg<sub>l</sub>: Plagioclasa alterada levemente (<25%); Plg<sub>f</sub>: Plagioclasa alterada fuertemente (>25%); Pxn<sub>s</sub>: Piroxeno sano; Pxn<sub>a</sub>: Piroxeno alterado.**

	A <sub>wr</sub>	Minerales de Alteración	Observaciones	%Plg <sub>s</sub>	%Plg <sub>l</sub>	%Plg <sub>f</sub>	%Pxn <sub>s</sub>	%Pxn <sub>a</sub>
CVM 083	99	Act/Ser/Ept, Alb, Prh en venas	Finogranular. Vesículas 1%. Pxn alterados a actinolita, se observan algunos remanentes con clorita en los bordes. Plagioclasas albitizada y alterando a prehnita y sericita. Venillas de prehnita.	0.0	26.5	73.5	0.0	100.0
CVM 085	93	Clo/Prh/ept	Cpx alterados habito radial fibroso (actinolita?) color de interferencia amarillo primer orden, plg no tan alteradas como pxn. Prehnita	3.8	62.8	33.3	8.9	91.1
CVM 052	83	Prh-Clo Venillas y amígdalas, Ept	Finogranular. Vidrio 15%. Pxn alterados clorita. Plg traquítica. Clorita diseminada por toda la roca- alteración de vidrio. Epidota asociada a prehnita. Fase tardía de plg relleno espacios, amorfa, con epidota.	2.2	70.9	26.9	0.0	100.0
CVM 054	79	Clo/Ser/Ept Q/Fk	Pxn textura esquelética, alterados clorita+epidota, coronas de reacción. Plg alteradas a clorita+prehnita, y sericita. Clorita aparece relleno microfracturas de plg. Cuarzo/Fk Amorfo sin alteración.	0.0	25.0	75.0	54.8	45.2
CVM 048	77	Clo/Ser/Ept Alb/ Prh- Esfalerita en venas	Textura porfídica, Plg alterando a clorita, Albitización y sericitización muy marcada, amígdalas rellenas de clorita, venillas de prehnita. Pxn en fenocristales levemente alterados.	0.0	29.7	70.3	56.3	43.7
CVM 015	55	Clo/Ser/Ept Alb, Zeolitas	Vesículas 8%. 2 generaciones de plg. Cristales más grandes más alterados. Plg alterando a clorita. Pxn con texturas variolíticas, algunos con extensión ondulatoria, Alto contenido de Fe en Pxn.	13.7	58.3	28.1	74.0	26.0
CVM 067	45	Clo/Ser/Ept, uralita	Vidrio 5%. Finogranular. Clorita "fluida" bordeando cristales y relleno microfracturas de plg. Pxn amorfos. Pxn alterando a ept, algunos uralitizados. 2 generaciones de plg, las de mayor tamaño son euédrales y alterados leve/ sericita. Venillas, lentes de cuarzo?	36.4	46.5	17.2	63.7	36.3
CVM 006	41	Clo/Ser/Ept	Vidrio <1%. Plg alteración muy leve a clorita/sericita/epidota, generalmente a lo largo de maclas. Fenocristales (<3%) están más alterados a sericita. Pxn con texturas variolíticas, algunos con extinción ondulatoria. Cuarzo/Fk Amorfa.	61.9	22.9	15.3	69.3	30.7

CVM 008	41	Clo/Ser Adularia	Vidrio <1%. Bandeamiento asociado a la relación cristales/vidrio. Fenocristales (<3%) Pxn con texturas variolíticas, algunos con extinción ondulatoria. Alto contenido de Fe en Pxn. Cuarzo/Fk Amorfa	69.0	18.3	12.7	54.4	45.6
------------	----	---------------------	---	------	------	------	------	------

Al relacionar el porcentaje  $A_{wr}$  con el contenido de  $^{39}\text{Ar}$  y la razón Ca/K (calculada como  $\text{Ca/K} = 1.83 \times \frac{^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}}{^{39}\text{Ar}_{\text{K}}}$ ) se pudieron establecer 3 grupos diferentes con características en espectrometría y alteración similares. En la Tabla 6 se muestra la síntesis de estos datos y en colores las muestras pertenecientes a los 3 grupos diferentes. La descripción de cada grupo se presenta a continuación.

**Tabla 6 Relación entre  $A_{wr}$ , contenido de  $^{39}\text{Ar}$  y relación Ca/K.  $A_{wr}$ : Porcentaje de alteración de roca total; Act: Actinolita. Ser: Sericita; Ept: Epidota; Q/FK: Cuarzo/Feldespatos potásico; Prh: Prehnita; Clo: Clorita; Cristales completamente reemplazados por clorita; Q/Fk: Cuarzo/Feldespatos potásico. En rojo: Grupo 1,  $A_{wr} > 80\%$ ; En naranja: Grupo 2,  $55\% < A_{wr} < 80\%$ ; En Verde: Grupo 3,  $A_{wr} < 55\%$ .**

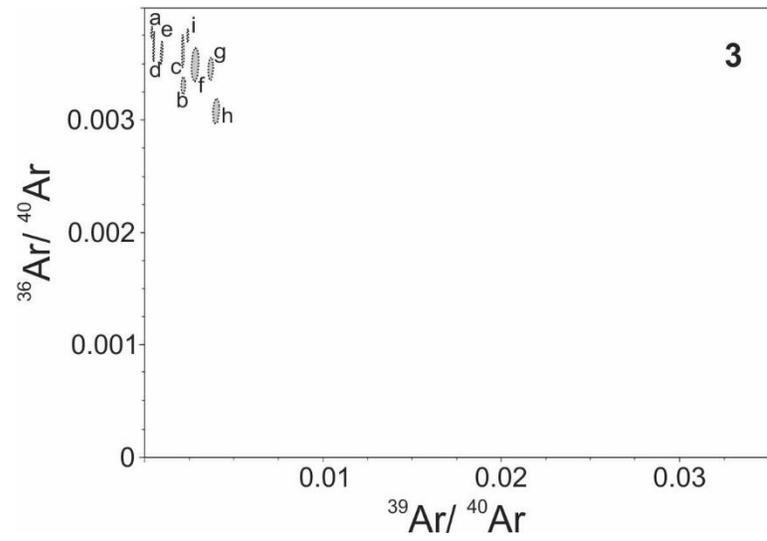
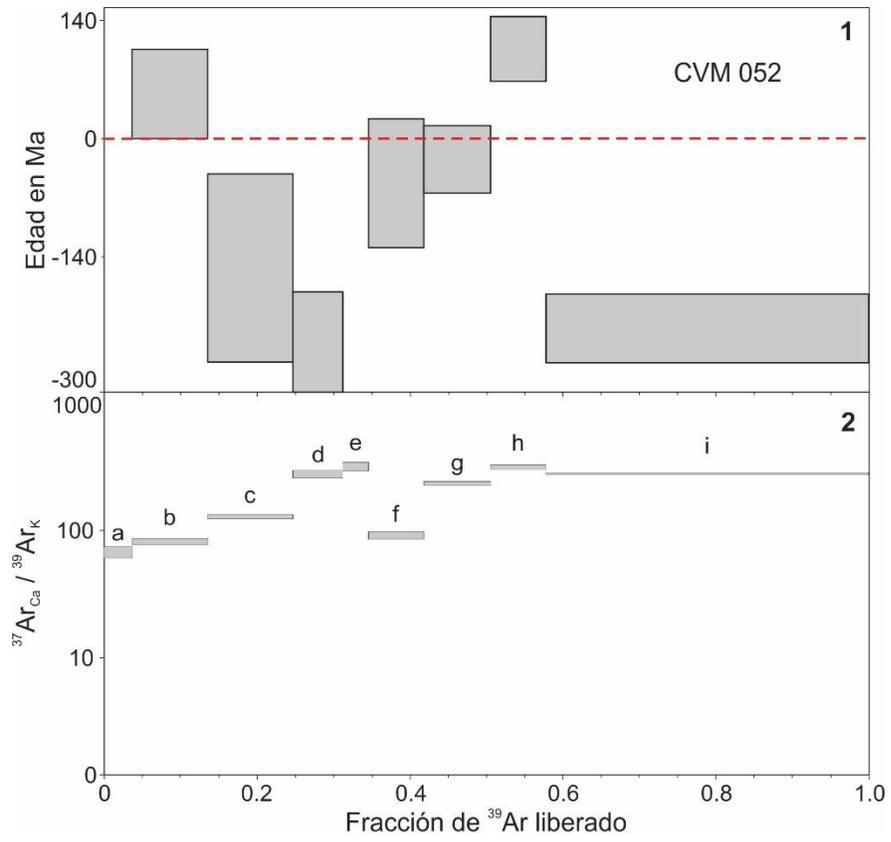
	$A_{wr}$	Minerales de Alteración	$^{39}\text{Ar}^{+}_{1\text{exp}}$	$^{39}\text{Ar}^{+}_{2\text{exp}}$	$^{39}\text{Ar}^{+}_{3\text{exp}}$	Ca/K
<b>CVM 083</b>	99	Act/ Ser/Ept, Albitización Prh en venas	69.4	69.1		14-49
<b>CVM 085</b>	93	Clo/Prh/ept	15.9			111-348
<b>CVM 052</b>	83	Prh-Clo Venillas y amígdalas, Ept	8.5			101-418
<b>CVM 054</b>	79	Clo/Ser/Ept Q/Fk	87.6	32.6		2--60
<b>CVM 048</b>	77	Clo/Ser/Ept Albitización/ Prh-Esfalerita en venas	96.72 12.75 Cristales	129 16.68 Cristales		2-38 0.05-1.29 Cristales
<b>CVM 015</b>	55	Clo/Ser/Ept Albitización, Zeolitas	41.3	36.2		20-98
<b>CVM 067</b>	45	Clo/Ser/Ept, uralita	21.8	17.0		11-296
<b>CVM 008</b>	41	Clo/Ser Adularia	30.0	16.0	11.9	7-520
<b>CVM 006</b>	41	Clo/Ser/Ept	24.6	17.1		27-302

\*Nota: El valor de la masa  $^{39}\text{Ar}$  para la misma cantidad de muestra de un basalto típico con la misma dosis de irradiación es  $\sim 60 \text{ E-06}$  volts, Ca/K  $\sim 10$

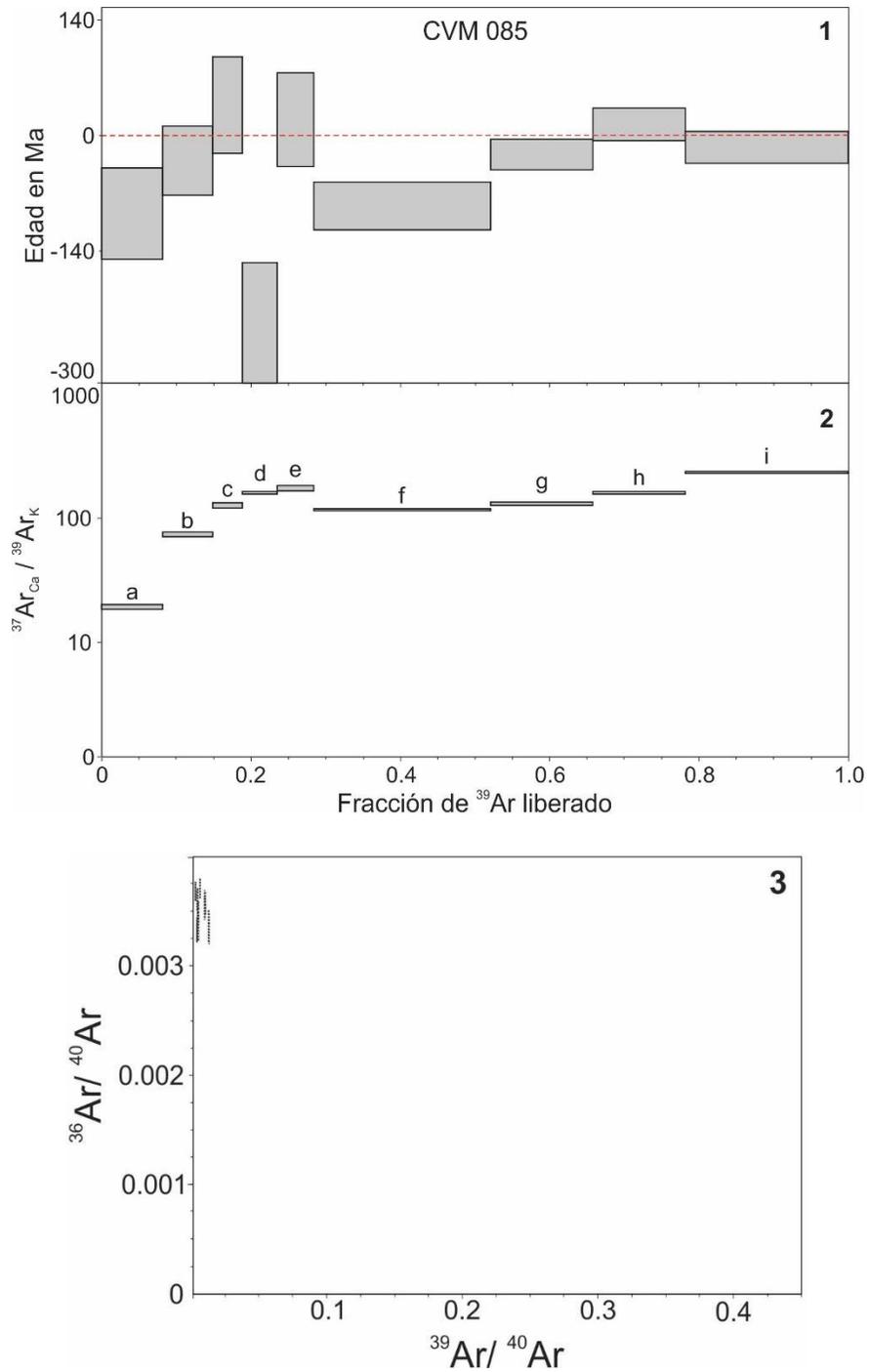
### **Grupo 1 (Rojo)**

Estas muestras corresponden a una lava almohadillada en la sección Manglar y un basalto en la sección Quinchía, y son las muestras un grado de alteración mayor a 80%. La muestra CVM 083, aunque es la muestra con mayor porcentaje de alteración, no pertenece a este grupo. Las muestras CVM 052 y CVM 085 presentan el contenido de  $^{39}\text{Ar}$  más bajo (de 8.5 a 16) y las relaciones de Ca/K consistentemente más altas de todos los experimentos realizados (de ~100 hasta 420, Tabla 6). Corresponden además a espectros de edad completamente perturbados que reportan edades menores a cero sin significado geológico; poseen bajo contenido de  $^{40}\text{Ar}^*$ , provocando que los datos en el diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  se agrupen hacia el eje de las ordenadas, no definen una línea recta y en consecuencia tampoco es posible obtener una edad de isocrona (Figura 13). Ambos experimentos fueron descartados para realizar duplicados por considerarlos no satisfactorios.

Petrográficamente ambas muestras coinciden con las que presentan todos los piroxenos alterados a clorita, siendo ésta la fase mineral de alteración predominante. La plagioclasa presenta principalmente una alteración leve asociada a fases cálcicas como epidota y prehnita. Los diagramas de distribución de K sólo registran interferencias de baja intensidad propias del microscopio electrónico de barrido, evidenciando la ausencia de este elemento en estas muestras (Figura 14).

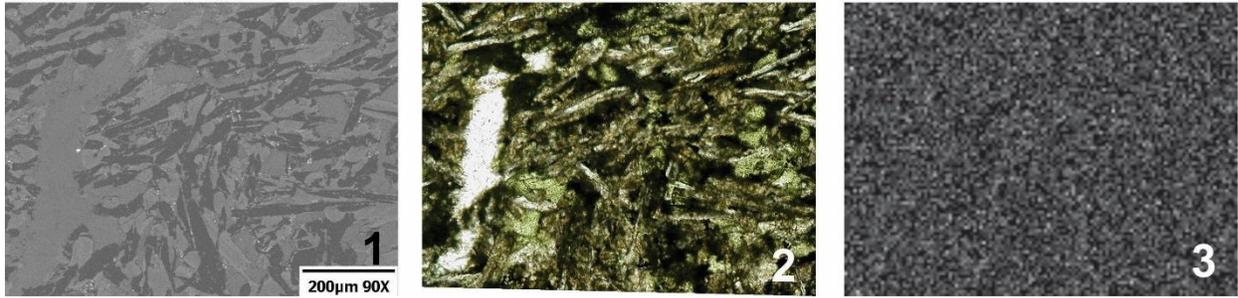


a)



b)

Figura 13. 1) Espectros de edad en roca total. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  para las muestras del grupo 1. a) CVM 052; b) CVM 085



**Figura 14. Muestra CVM 052: 1) Microfotografía de electrones retrodispersados a 90x. 2) Microfotografía con nícoles cruzados evidenciando la fuerte cloritización en la muestra. 3) Mapa de distribución de K mostrando sólo interferencia de baja intensidad.**

### **Grupo 2 (Naranja)**

Está conformado por las muestras con una alteración media entre 55 y 79%. Se incluye aquí la muestra CVM 083, pues a pesar de ser la muestra más alterada, los valores de la masa 39, las relaciones Ca/K y el tipo de alteración son afines a este grupo.

Las muestras del grupo 2 presentan el mayor contenido de  $^{39}\text{Ar}$  (40-129) y relaciones Ca/K relativamente bajas entre 2 y 98 en comparación con otras muestras (Tabla 6), pero siguen siendo altas comparadas con un basalto típico (Ca/K  $\sim$ 10). Los espectros de edad son escalonados y/o en forma de U evidenciando exceso de argón. La fase de alteración predominante en las plagioclasas es la sericita.

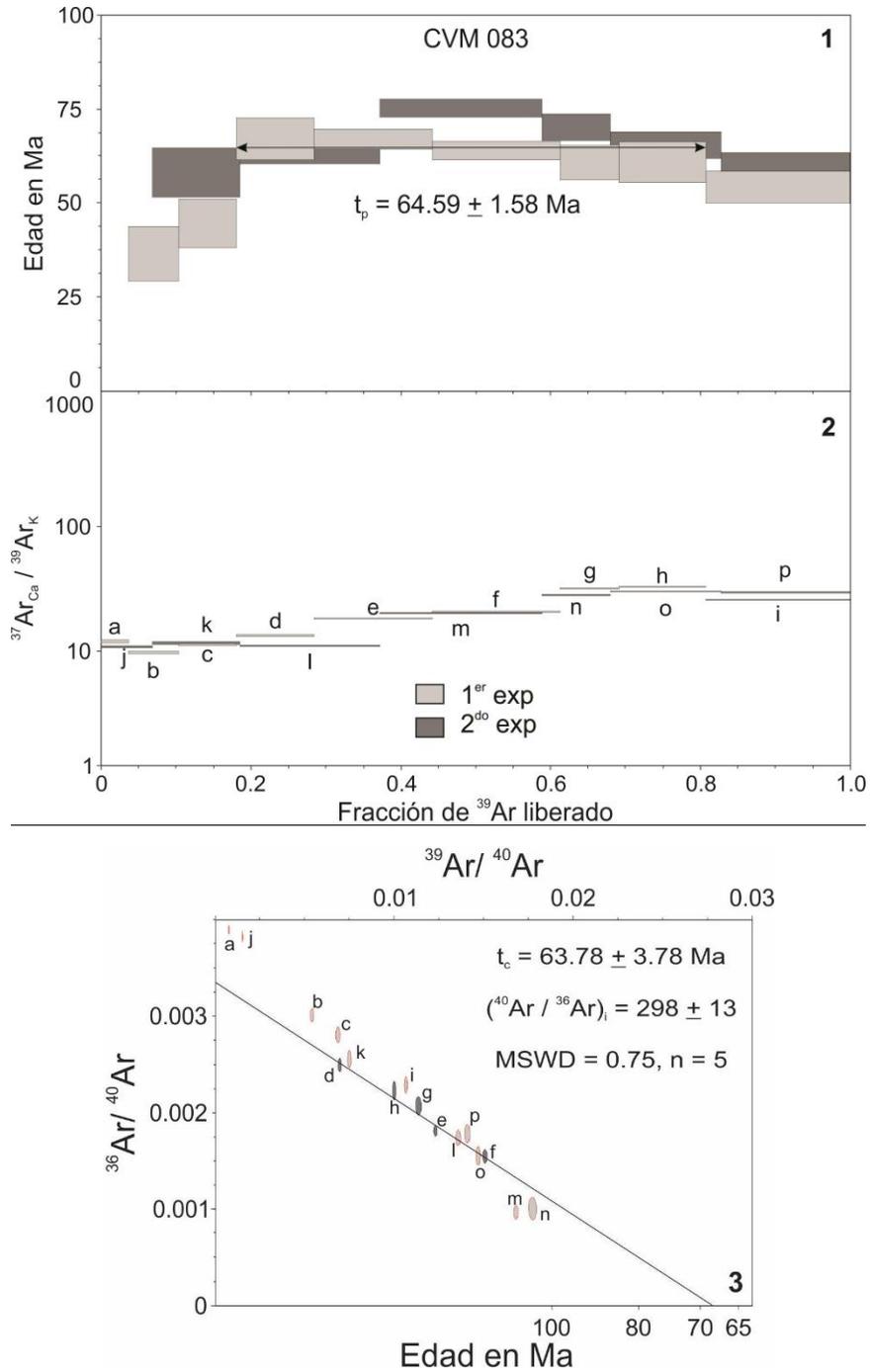
### **CVM 083**

Esta muestra corresponde a un flujo de lava afanítico de la sección Concordia. En los 2 experimentos se observa un espectro de edad escalonado descendente (Figura 15).

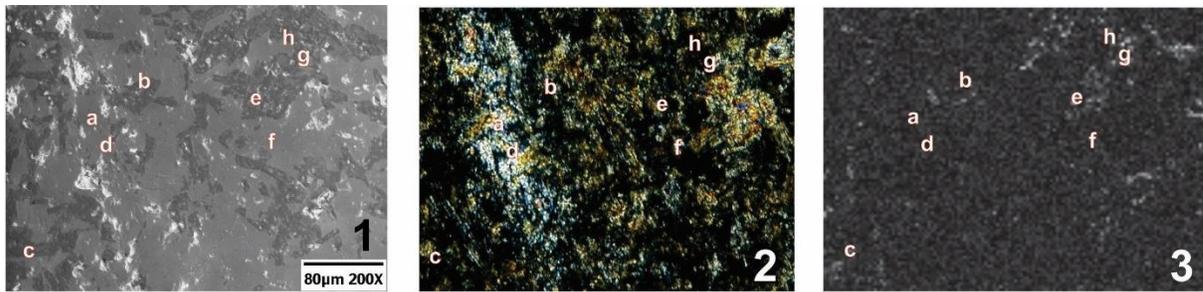
En el primer experimento se define una edad de meseta de  $64.59 \pm 1.58$  Ma con 5 fracciones consecutivas que representan el 63% del  $^{39}\text{Ar}$  liberado. La edad de isocrona  $63.78 \pm 3.78$  Ma se calculó usando las fracciones que definen la edad de meseta. Con estos datos se obtuvo una relación  $(^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar})_i = 298 \pm 13$  y  $\text{MSWD} = 0.75$ . Se realizó un segundo experimento, pero los resultados obtenidos no fueron reproducibles indicando que la composición de la muestra no es completamente homogénea. Los datos del segundo experimento se distribuyen a lo largo de la isócrona definida con los datos del

primer experimento. Sin embargo, solamente tres fracciones caen en la línea recta, pero dichas fracciones no son consecutivas por lo que no se incorporaron en el cálculo de la edad de isócrona. Debido a la poca homogeneidad, se considera confiable únicamente el primer experimento y se toma la edad de meseta ( $64.59 \pm 1.58$  Ma) como la mejor estimación de la edad de esta muestra.

Petrográficamente CVM 083 es la muestra con mayor grado de alteración, las plagioclasas se encuentran fuertemente alteradas a sericita y albitizadas, mientras que todos los piroxenos están alterados a anfíbol, probablemente actinolita. El diagrama de distribución de elementos (Figura 16) evidencia el K distribuido homogéneamente y asociado a los cristales de plagioclasa. Las zonas más brillantes con mayor contenido de K (ver Figura 16.3) corresponden a las zonas más oscuras en la imagen de electrones retrodispersados (Figura 16.1), y se identificaron como cristales de plagioclasa según el análisis de EDS. Estas plagioclasas tienen una concentración de hasta 2.5% de K, que es mayor al contenido promedio para este mineral (~0.2%). La prehnita y epidota están asociadas a venillas.



**Figura 15. Muestra CVM 083-roca total: 1) Espectro de edad. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . En gris: fracción utilizada para el cálculo de la isocrona; en rojo: fracción ignorada para el cálculo de la isocrona**

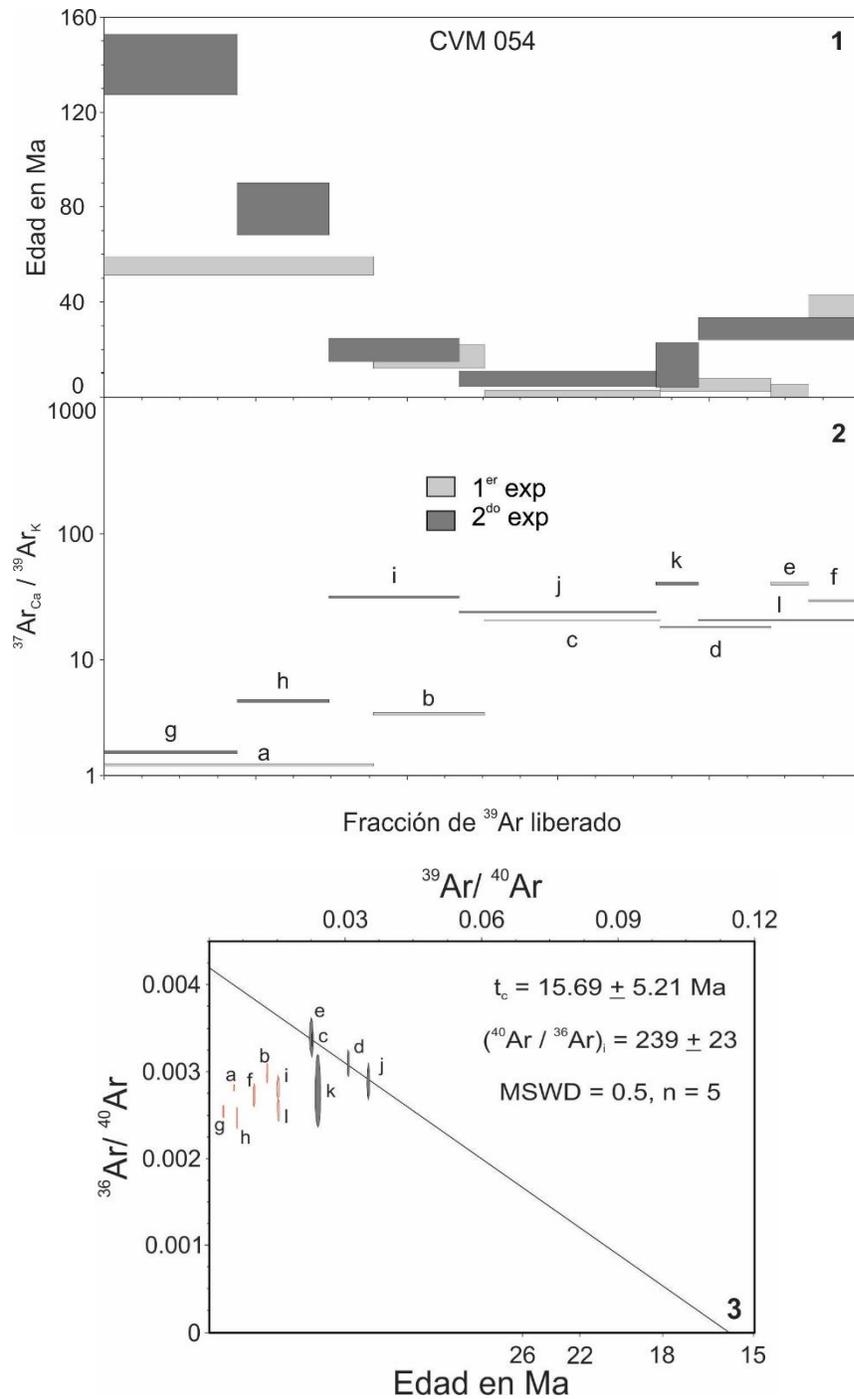


**Figura 16. Muestra CVM 083: 1) Microfotografía de electrones retrodispersados a 200x. 2) Microfotografía con nícoles cruzados. 3) Mapa de distribución de K. a: Prehnita; b, e, g: Alteración de K (2.5%); c: Plagioclasa intermedia; d: epidota; f, h: Anfíbol-Actinolita**

### **CVM 054**

La plagioclasa fechada en la muestra CVM 054, corresponde a un microgabro de la sección de Uramita. Los dos experimentos realizados rinden resultados reproducibles y presentan espectros de edad con pronunciada forma en “U” (Figura 17.1), un alto contenido de  $^{39}\text{Ar}$  ( $> 80$ ) y relaciones Ca/K relativamente bajas (2-60) (Tabla 6). Debido al bajo contenido de  $^{40}\text{Ar}^*$  los datos de los dos experimentos caen en la esquina superior izquierda del diagrama  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  (Figura 17.3). Las fracciones que definen la base de la “U” en el espectro de edad, se alinean definiendo una edad de isócrona de  $15.69 \pm 5.21$  Ma. Sin embargo, debido al alto grado de alteración de esta muestra y a la pérdida de argón evidenciada en la razón inicial  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ , la edad se considera no significativa.

Los piroxenos se encuentran alterados a clorita y epidota en un 55%, principalmente con coronas de reacción. Las plagioclasas se encuentran fuertemente alteradas a sericita, prehnita y clorita.



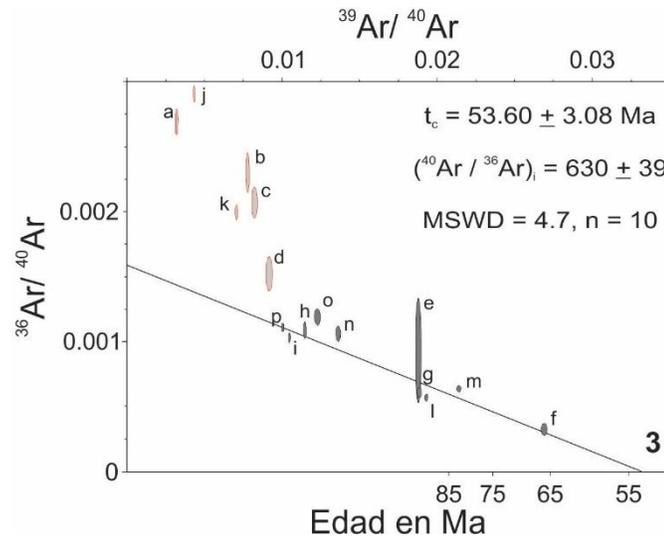
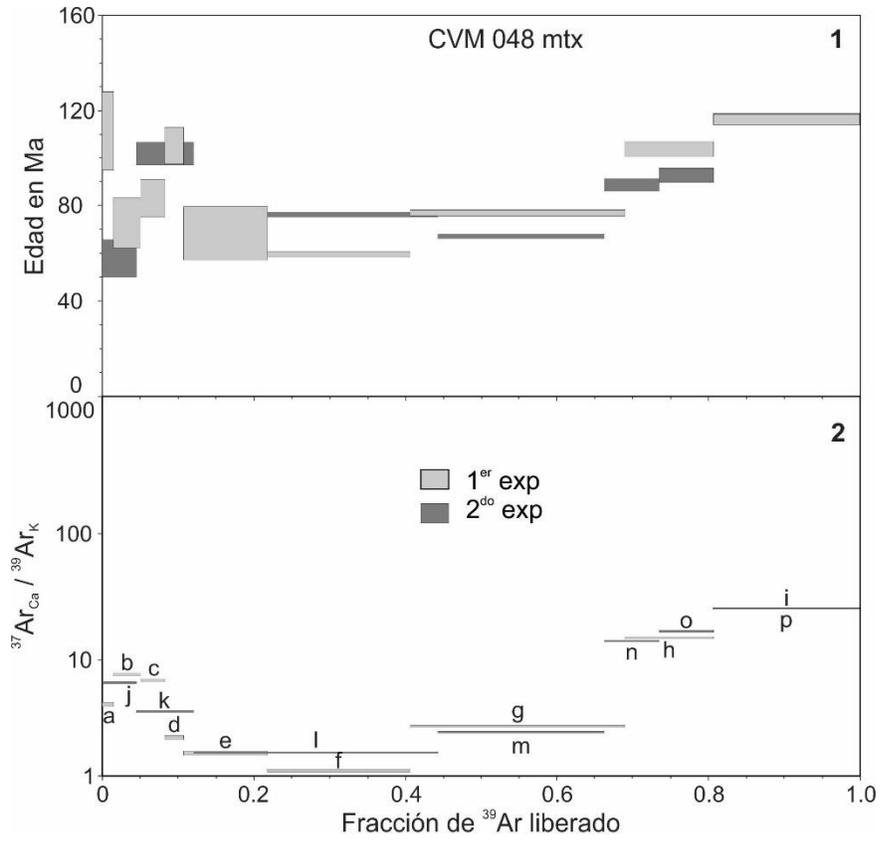
**Figura 17. Muestra CVM 054-plagioclase: 1) Espectro de edad. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . En gris: fracción utilizada para el cálculo de la isocrona; en rojo: fracción ignorada para el cálculo de la isocrona.**

**CVM 048**

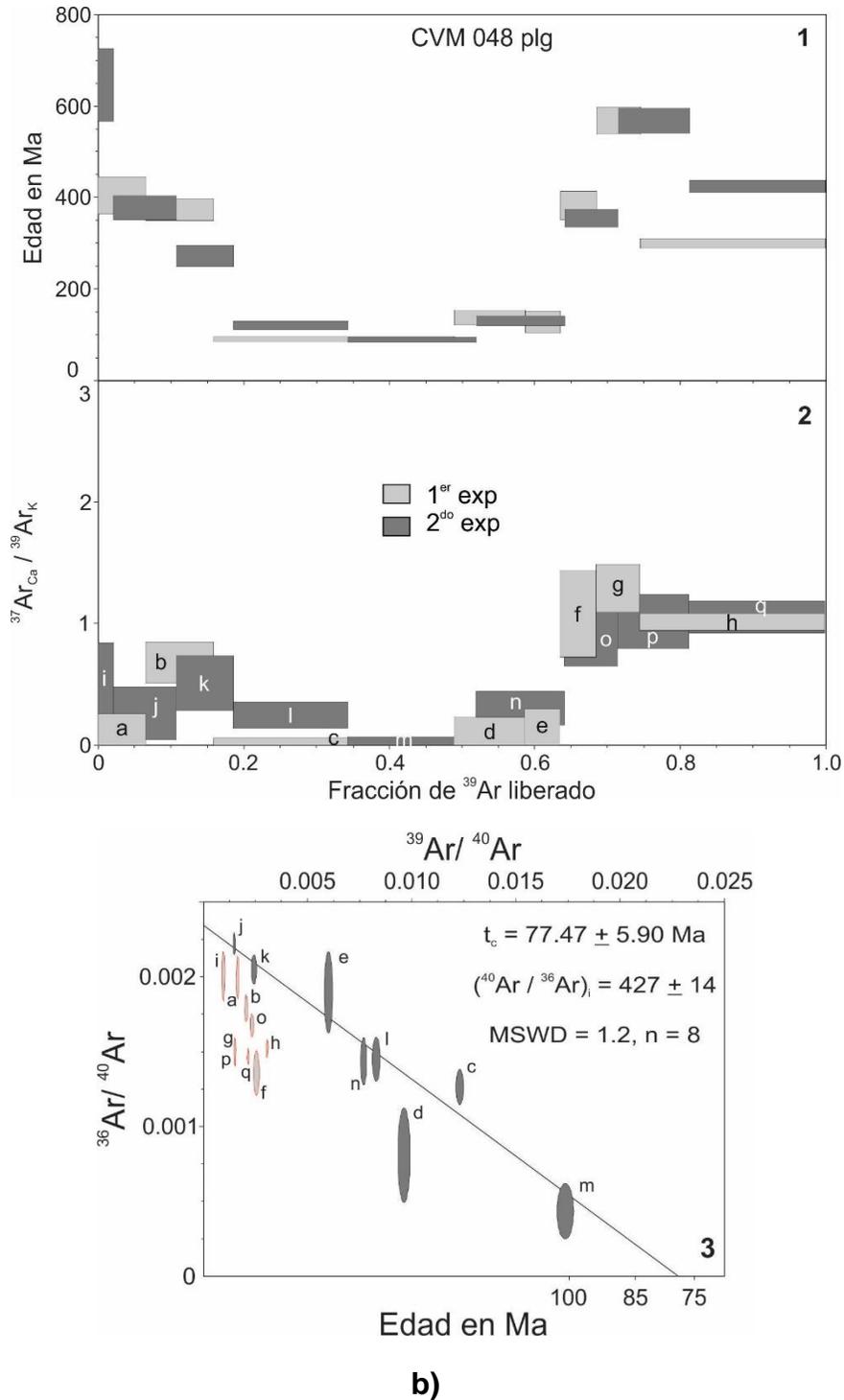
Esta muestra es un basalto con textura porfídica ubicado en la sección Caicedo. Para ella se prepararon: un concentrado de los fenocristales de plagioclasa y un concentrado de matriz. Se realizaron experimentos por duplicado para los fechamientos con matriz y también para el fechamiento de plagioclasa por separado. En ambos casos los espectros se encuentran perturbados con formas en “U” sugiriendo la presencia de exceso de argón (Figura 18a, b). Los resultados indican edades diferentes y variaciones en el contenido de los isótopos de argón. El contenido de  $^{39}\text{Ar}$  en la matriz varió entre 97 y 129, valores considerablemente mayores a 13 y 17, que son los valores obtenidos con el concentrado de plagioclasa (Tabla 6). Además, se observó que la plagioclasa se caracteriza por un bajo contenido de  $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}$ , lo que es más afín a feldespatos potásicos o estarían reportando la albitización de la plagioclasa cálcica.

Los datos de los dos experimentos realizados con la muestra de matriz permiten definir una edad de isocrona en  $53.60 \pm 3.08$  Ma. En el cálculo de la edad de isocrona se ignoraron las fracciones liberadas a baja temperatura. Las fracciones ignoradas representan ~10% del  $^{39}\text{Ar}$  liberado. Tomando en consideración la distribución de los datos en el diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ , se considera la isocrona confiable.

Las edades obtenidas con el concentrado de plagioclasa rinden un espectro de edad con un marcado exceso de argón. En el espectro de edad (Figura 18b) puede observarse que la base de la “U” indica una edad de ~88 Ma, la cual usualmente se interpreta como el límite inferior de la edad de la muestra. Los datos de los dos experimentos realizados, permiten obtener una edad de isocrona de  $77.47 \pm 5.90$  Ma. Para calcular la edad de isocrona se utilizaron datos de fracciones consecutivas de cada experimento que constriñen una línea recta en el diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . La edad de isocrona de la plagioclasa puede ser significativa y correlacionable con edades obtenidas en los otros experimentos.

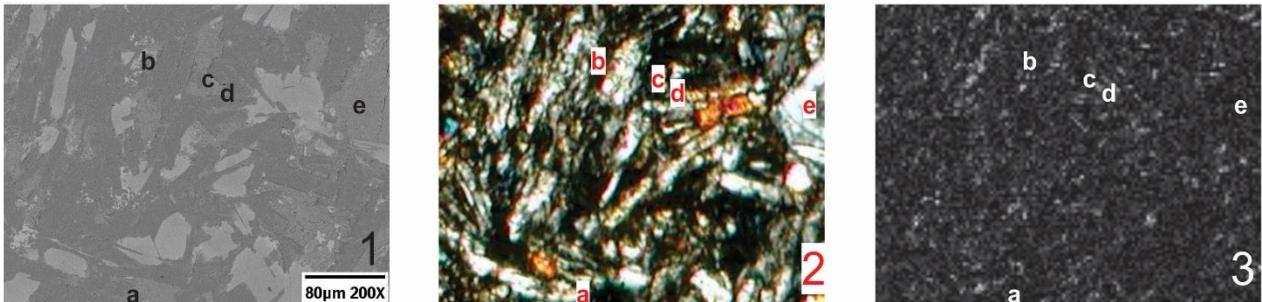


a)

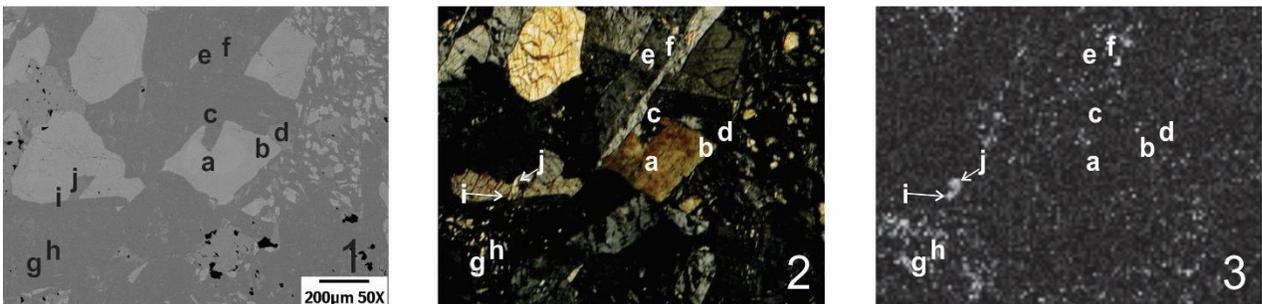


**Figura 18. Muestra CVM 048. a) Matriz. b) Plagioclasa; 1) Espectro de edad. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . En gris: fracción utilizada para el cálculo de la isocrona; en rojo: fracción ignorada para el cálculo de la isocrona.**

Los piroxenos se encuentran levemente alterados a clorita, mientras que en las plagioclasas la alteración es más intensa. La matriz muestra desarrollo de sericitización con un valor aproximado de 5% en contenido de  $K_2O$  según el análisis EDS y su distribución es homogénea (Figura 19). Los fenocristales de plagioclasa están fuertemente afectados por procesos de albitización, sericitización y clorita. En éstos el contenido de  $K_2O$  es mayor, ~15% (Figura 20). Se observaron vetillas de prehnita con sulfuros de zinc (esfalerita) que no son mostradas en las figuras.



**Figura 19. Matriz de la muestra CVM 048: 1) Microfotografía de electrones retrodispersados a 200x. 2) Microfotografía con nícoles cruzados. 3) Mapa de distribución de K. a, e: Clorita; b, c: Alteración de K (5.0%); d: Augita.**

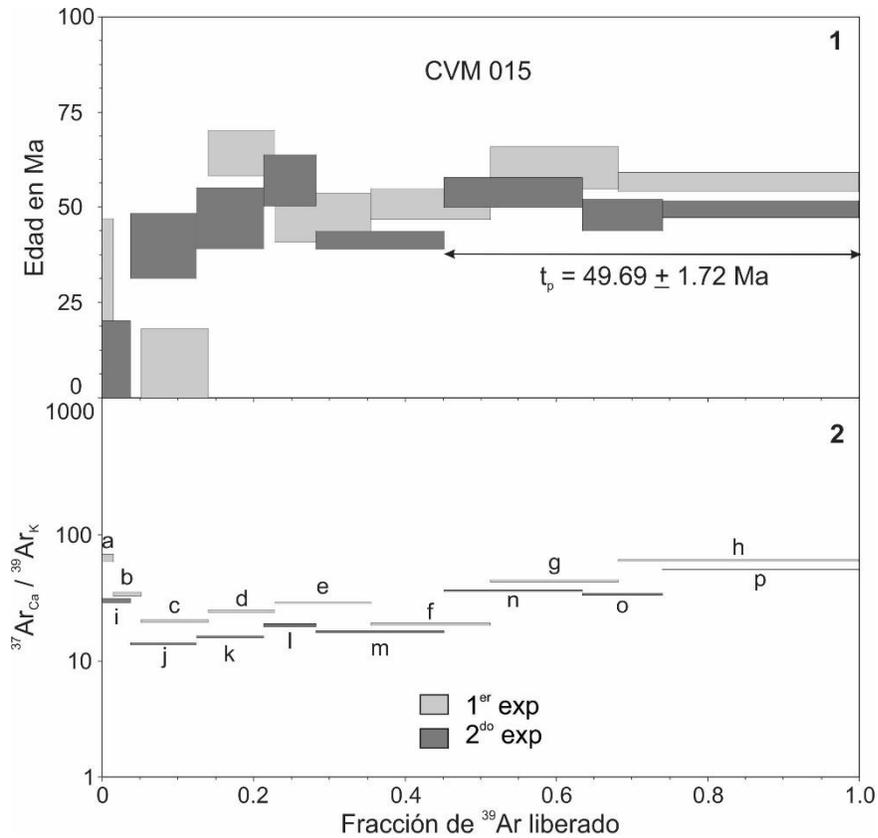


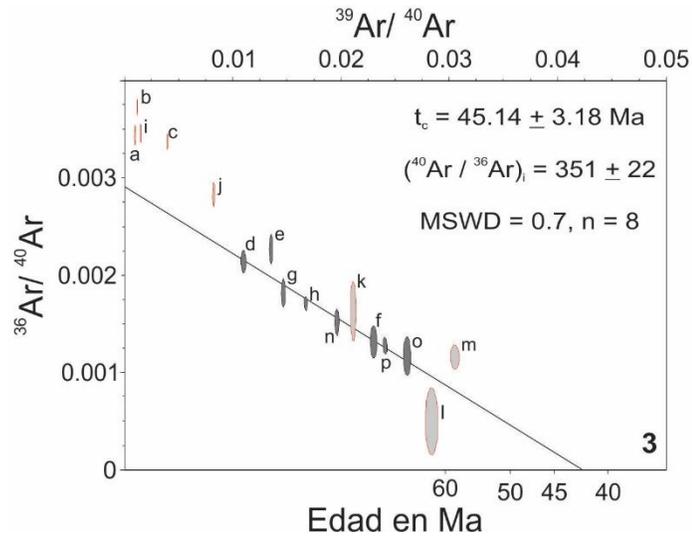
**Figura 20. Fenocristales de la muestra CVM 048: 1) Microfotografía de electrones retrodispersados a 50x. 2) Microfotografía con nícoles cruzados. 3) Mapa de distribución de K. a, b: Augita; c, f, h, j: Plagioclasa albitizada; d, e: Clorita; d: epidota; g, i: Alteración de K (15.0%).**

## CVM 015

Esta muestra corresponde a una lava almohadillada encontrada en la sección Salgar. La forma en “U” del espectro de edad en ambos experimentos sugiere nuevamente exceso de argón (Figura 21). El contenido de  $^{39}Ar$  (41) es el menor comparado con las muestras de este grupo y la relación Ca/K varía entre 20 y 98 (Tabla 6). En el segundo experimento puede calcularse una edad de plateau de  $49.69 \pm 1.72$  Ma con 3 fracciones consecutivas

que representan el 55% del  $^{39}\text{Ar}$  liberado. La edad de isocrona calculada a partir de estas tres fracciones y 5 más del primer experimento rinde una edad de  $45.14 \pm 3.18$  Ma con un MSWD de 0.7 y una relación  $(^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar})_i = 351 \pm 22$ . A pesar de que esta edad no es estadísticamente diferente a la edad de meseta y tiene un error más grande, se toma como la edad de la muestra pues el exceso de argón puede generar edades aparentemente más viejas.





**Figura 21. Muestra CVM 015-roca total: 1) Espectro de edad. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . En gris: fracción utilizada para el cálculo de la isocrona; en rojo: fracción ignorada para el cálculo de la isocrona.**

### **Grupo 3 (Verde)**

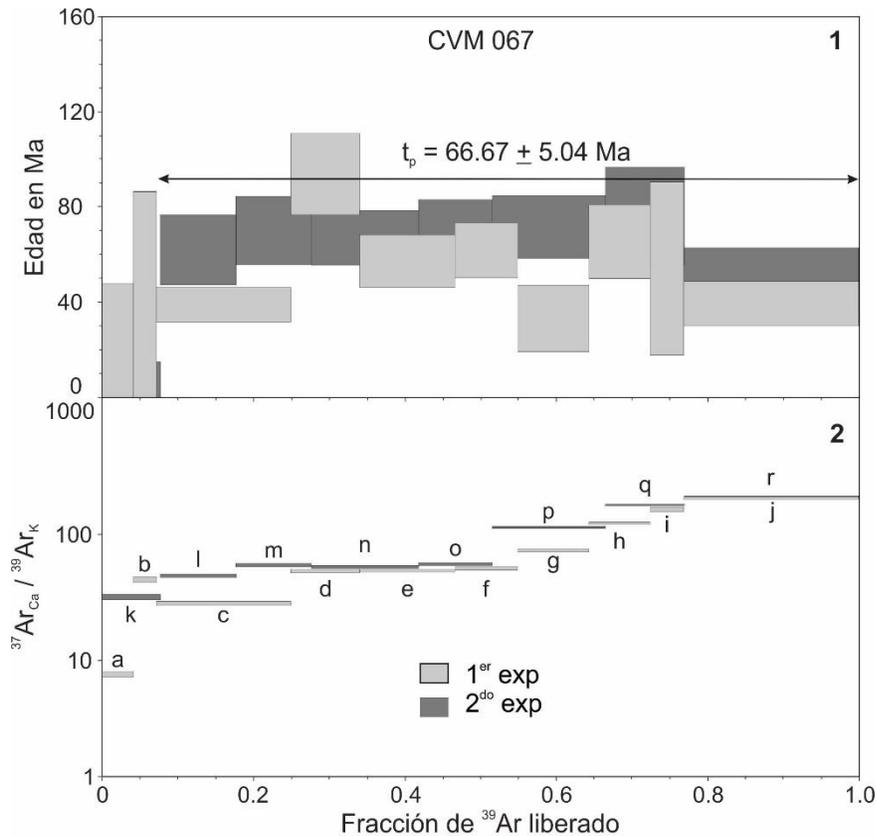
Agrupar las rocas más frescas con un índice de alteración menor a 45%. El contenido de  $^{39}\text{Ar}$  es considerablemente menor (<30) a lo encontrado para las muestras de los grupos 1 y 2. Las relaciones Ca/K son similares a los valores encontrados en el Grupo 2, excepto en las fracciones liberadas a alta temperatura, para las que se observa un incremento pronunciado que varía entre 290 y 520. Las fases de alteración predominantes son clorita, epidota y sericita (Tabla 6).

### **CVM 067**

Esta muestra forma parte de un flujo de basaltos con una exposición de más de 3 km en la sección Belén de Umbría. El contenido de  $^{39}\text{Ar}$  es de 22 y la relación de Ca/K alcanza valores hasta 296 en las fracciones de alta temperatura (Tabla 6). En la Figura 22 se reportan los resultados de los dos experimentos realizados. El primer experimento muestra un espectro de edad irregular, que se atribuye a un calentamiento no homogéneo de la muestra debido a que los fragmentos de roca no quedaron distribuidos en una sola capa en el porta-muestras. En el segundo experimento se obtuvo una meseta bien definida por 7 fracciones consecutivas con una edad de  $66.67 \pm 5.04$  Ma que representa el 92% del  $^{39}\text{Ar}$  liberado, el segmento utilizado se identifica con una flecha en la figura. El

diagrama de correlación permite calcular una isocrona utilizando los datos de 12 fracciones que rinde una edad de  $63.55 \pm 8.66$  Ma con un MSWD de 0.8 y una relación  $(^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar})_i = 293 \pm 12$ . Ambas edades no son estadísticamente diferentes dentro de  $1\sigma$  de incertidumbre. Sin embargo se escoge la edad de meseta pues es más precisa y representativa para esta muestra.

Esta muestra es un basalto afanítico con 5% de vidrio. Los piroxenos se encuentran sanos en un 64% y la alteración presente está asociada a epidota y uralita. Las plagioclasas en su mayoría están sanas o levemente alteradas. Los escasos fenocristales presentes muestran una alteración más fuerte a sericita. Se observa clorita rellenando micro-fracturas en las plagioclasas y bordeando algunos cristales. En el mapa de distribución el K se distingue puntualmente y sin preferencia por matriz o fenocristales y el contenido de K es  $\sim 1.5\%$  según el análisis EDS (Figura 23). Se pueden observar lentes y vetillas de cuarzo.



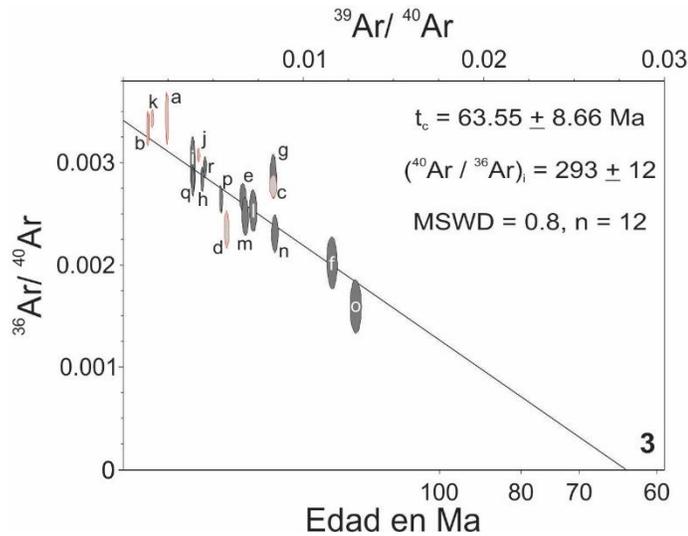


Figura 22. Muestra CVM 067-roca total: 1) Espectro de edad. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . En gris: fracción utilizada para el cálculo de la isocrona; en rojo: fracción ignorada para el cálculo de la isocrona.

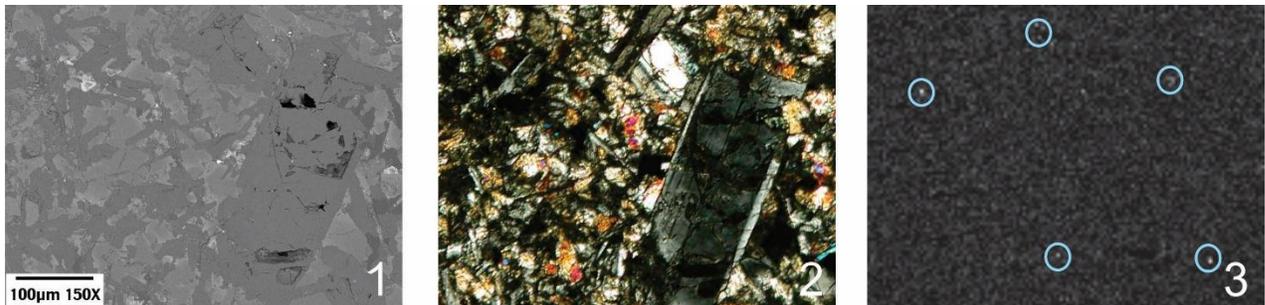


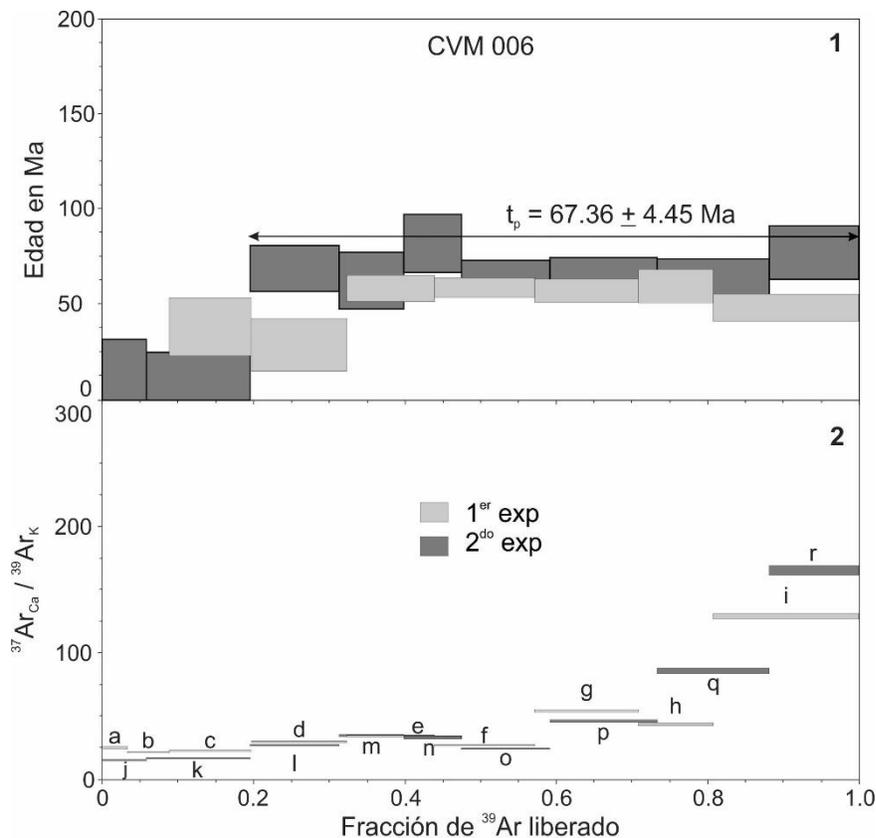
Figura 23. Muestra CVM 067: 1) Microfotografía de electrones retrodispersados a 150x. 2) Microfotografía con nícoles cruzados. 3) Mapa de distribución de K. En círculos azules se indican zonas con K ~1.5%

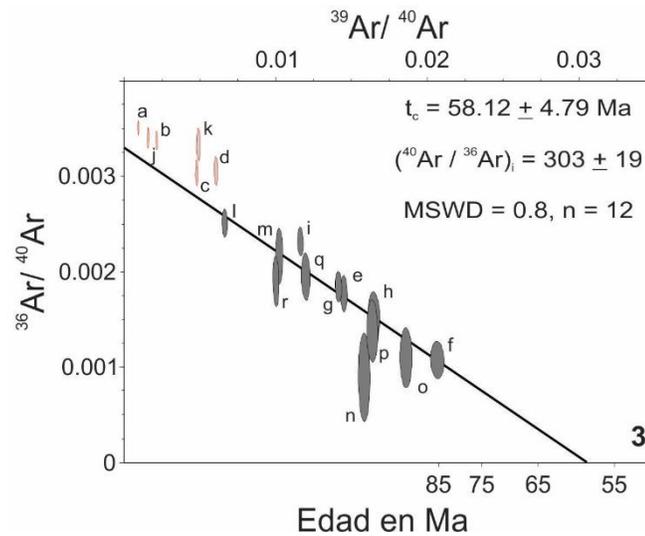
## CVM 006

Esta muestra corresponde a un flujo masivo de basalto en la sección Altamira. Al igual que la muestra anterior se caracteriza por un bajo contenido de  $^{39}\text{Ar}$  (25). La relación Ca/K alcanza valores de 520 para las fracciones de alta temperatura (Tabla 6). En los dos experimentos realizados se obtuvieron resultados ligeramente diferentes en los dos experimentos realizados (Figura 24). Para el primer experimento con 4 fracciones consecutivas que representan el 48% del  $^{39}\text{Ar}$  liberado, se obtiene una edad de meseta  $58.35 \pm 3.21$  Ma, mientras que el segundo experimento rinde una edad de  $67.36 \pm 4.45$  Ma, para 7 fracciones consecutivas que representan el 80% del  $^{39}\text{Ar}$  liberado. El diagrama

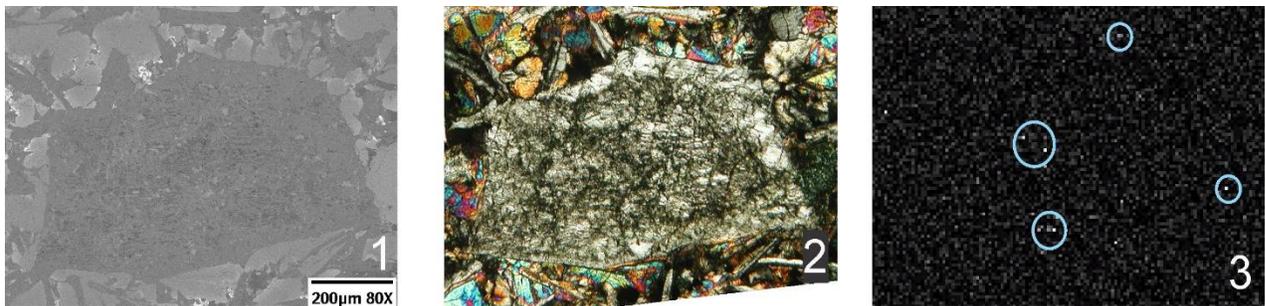
$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$  indica que la composición es homogénea en relación al Ca/K. Los datos de los dos experimentos se graficaron en el diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . Doce fracciones constriñen una línea recta (MSWD = 0.8) que permite calcular la edad de isocrona  $58.12 \pm 4.79$  Ma y  $(^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar})_i = 303 \pm 19$ . Se toma la edad de isocrona como la mejor estimación de la edad de esta muestra.

Tanto los cristales de piroxenos y de plagioclasas se encuentran esencialmente sanos. Los piroxenos presentan extinción ondulatoria y la alteración de la plagioclasa cuando existe se observa a lo largo de las maclas en una asociación de clorita, epidota y sericita. La Figura 25 muestra un fenocristal de plagioclasa fuertemente alterado. Sin embargo, el mapa de distribución de K no muestra preferencia por la matriz o los fenocristales y su configuración es en pequeñas acumulaciones puntuales. El análisis EDS muestra un contenido de K de ~1.5% para estos puntos.





**Figura 24. Muestra CVM 006-roca total: 1) Espectro de edad. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . En gris: fracción utilizada para el cálculo de la isocrona; en rojo: fracción ignorada para el cálculo de la isocrona.**



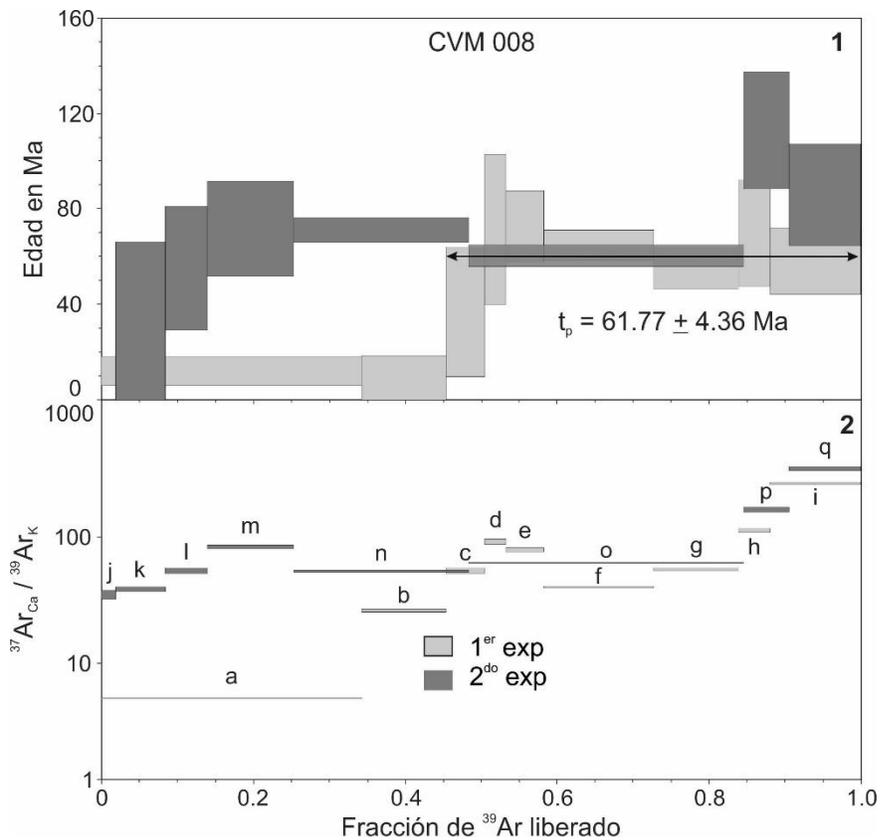
**Figura 25. Muestra CVM 006: 1) Microfotografía de electrones retrodispersados a 80x. 2) Microfotografía con nícoles cruzados. 3) Mapa de distribución de K. En círculos azules se indican zonas con K ~1.5%.**

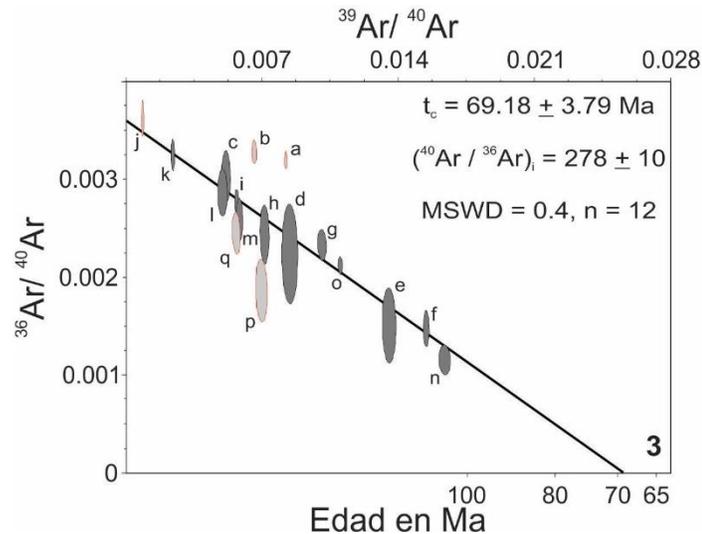
## CVM 008

Esta muestra fue colectada de una secuencia de lavas almohadilladas de la sección de Altamira a 600 m de la muestra CVM 006. Presenta características similares en los contenidos de argón en relación a las otras muestras de este grupo (Tabla 6). Sin embargo, es notable la baja reproducibilidad de los experimentos realizados. En el primer experimento se liberó ~45% del  $^{39}\text{Ar}$  a baja temperatura en las dos primeras fracciones colectadas con 0.8 y 1.5 Watts de potencia con el láser (Figura 26). Las 7 fracciones restantes rinden una edad de meseta de  $61.77 \pm 4.36$  Ma. El segundo experimento no reproduce el comportamiento de alta liberación de  $^{39}\text{Ar}$  a baja temperatura. Los datos del segundo experimento no cumplen criterios para calcular una edad de meseta y se

observa una ligera forma en “U”. Las últimas tres fracciones colectadas rinden edades no diferentes estadísticamente a las obtenidas en el primer experimento (Figura 26). Los datos de estos dos experimentos se combinaron en el diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ , puede observarse que 12 datos constriñen (MSWD = 0.4) una edad de isocrona de  $69.18 \pm 3.79$  Ma y  $(^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar})_i = 278 \pm 10$ .

Se realizó un tercer experimento. Los datos arrojaron un espectro de edad similar al obtenido en el segundo experimento. En la Figura 27 se presentan los resultados de los 3 experimentos realizados.





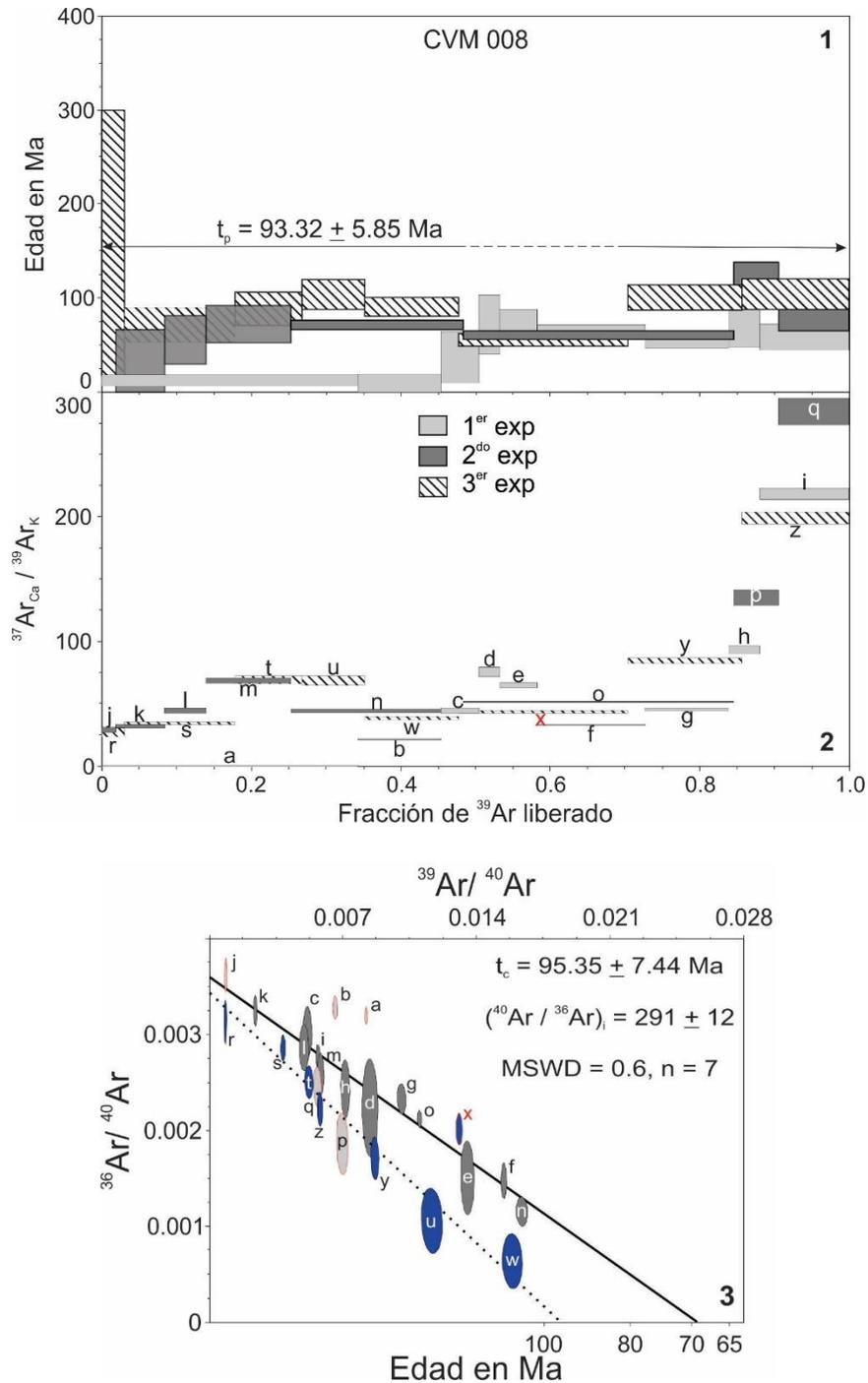
**Figura 26. Muestra CVM 008-roca total: 1) Espectro de edad. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . En gris: fracción utilizada para el cálculo de la isocrona; en rojo: fracción ignorada para el cálculo de la isocrona.**

El espectro de edad del tercer experimento muestra una forma de “U”. En la base de la “U” los datos de los tres experimentos coinciden en una edad de ~62 Ma.

Al graficar todos los datos en el diagrama de correlación (Figura 27.3) se observan que los datos describen una cuña delimitada por la línea continua en color negro, la isocrona definida por el primer y segundo experimento y la línea punteada en color azul, isocrona calculada con los datos del tercer experimento. Los datos de la fracción de la base de la “U” (fracción identificada en la Figura 27 con la letra “x”) caen en la isocrona color negro, mientras que las dos últimas fracciones del segundo experimento caen en la isocrona color azul. La isocrona definida con los datos de 7 fracciones del tercer experimento indica una edad de  $95.35 \pm 7.44$  Ma,  $\text{MSWD} = 0.6$  y  $(^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar})_i = 291 \pm 12$ . El cálculo de la edad ponderada de estas fracciones es de  $93.35 \pm 5.85$  Ma, que representa el 77% del argón liberado y es no es diferente estadísticamente a la edad de isocrona dentro de  $1\sigma$ .

Petrográficamente los piroxenos se encuentran sanos en un 55% presentando en algunas ocasiones extinción ondulatoria. Las plagioclasas están principalmente sanas y en menor proporción presentan variable alteración a sericita. El contenido de K es más evidente en esta muestra en relación con las 2 anteriores, sin embargo su distribución no es homogénea al no estar restringida en la matriz o fenocristales y observarse en forma

de parches (Figura 28). El análisis EDS muestra que el contenido de K en estas fases de alteración es de ~13%



**Figura 27.** Muestra CVM 008 con los tres experimentos integrados: 1) Espectro de edad. 2) Relación  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . 3) Diagrama de correlación  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . En gris: fracción utilizada para el cálculo de la isocrona para los 2 primeros experimentos; en azul: Fracciones del tercer experimento; en rojo: fracción ignorada para el cálculo de la isocrona. La edad de isocrona mostrada en la figura corresponde al tercer experimento.

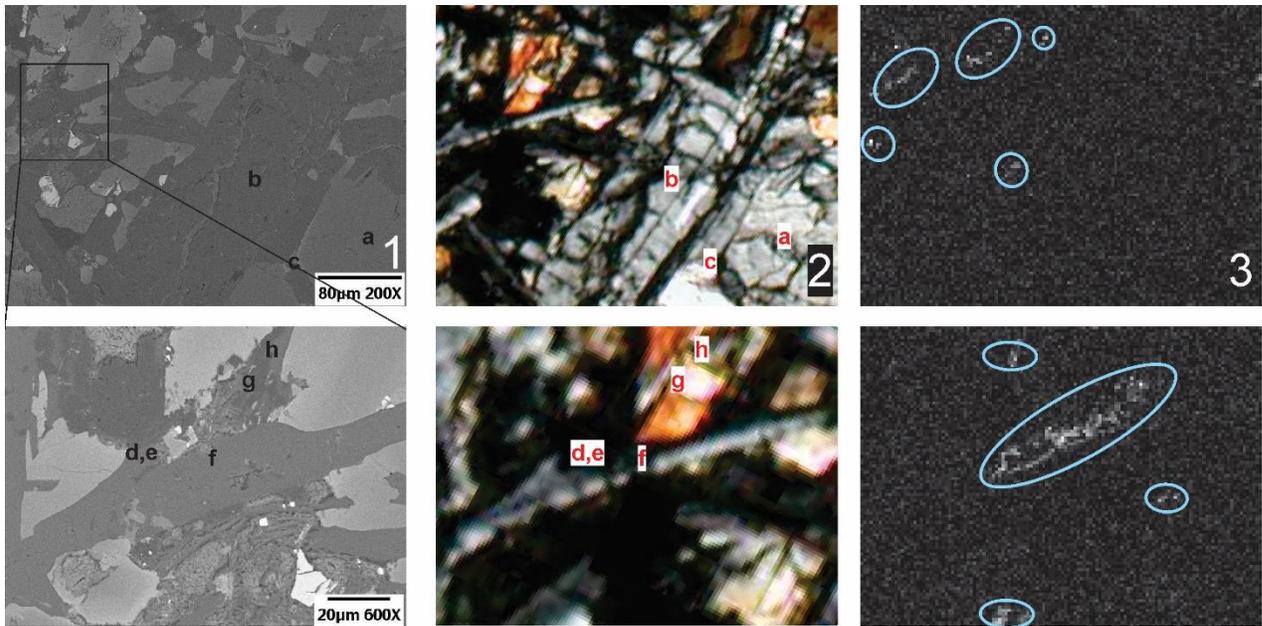


Figura 28. Muestra CVM 008: 1) Microfotografía de electrones retrodispersados a 200x. 2) Microfotografía con nícoles cruzados. 3) Mapa de distribución de K. En círculos azules se indican zonas con K. La segunda fila de fotos representa un aumento a 600x de la zona en el recuadro negro en 1. a: augita; b, f: plagioclasa cálcica; c: clorita; d, e: alteración de K (13.0%); g: cuarzo; h: adularia.

### 3.2.2 Discusión

En la Tabla 7 se presenta el resumen de las edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en roca total de las rocas volcánicas de la Formación Barroso. La distribución espacial de estas edades se muestra en la Figura 29.

Tabla 7. Resumen edades reportadas en este trabajo para los basaltos de la Formación Barroso. Las edades en negrita son las edades representativas para cada muestra.

Muestra	Material datado	Edad de plateau (Ma)	MSWD/n	Edad de Isocrona (Ma)	$(^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar})_i$	MSWD/m
<b>CVM 083</b>	wr	<b>64.59 ± 1.58</b>	0.6/5	63.78 ± 3.78	298 ± 13	0.8/5
<b>CVM 048</b>	mtx	--	--	<b>53.08 ± 3.08</b>	630 ± 39	4.7/10
<b>CVM 015</b>	wr	49.59 ± 1.72	0.6/3	<b>45.14 ± 3.18</b>	351 ± 22	0.7/8
<b>CVM 067</b>	wr	<b>66.67 ± 5.04</b>	0.4/7	63.55 ± 8.66	293 ± 12	0.8/12
<b>CVM 006</b>	wr	67.36 ± 4.45	0.3/7	<b>58.12 ± 4.79</b>	303 ± 19	0.8/12
<b>CVM 008</b>	wr	<b>61.77 ± 4.36</b>	0.4/7	69.18 ± 3.79	278 ± 10	0.4/12

Los errores se reportan a 1  $\sigma$

### ***Temporalidad del magmatismo: Cristalización vs. Sericitización***

La edad del magmatismo de las rocas volcánicas al norte de la Cordillera Occidental denominadas como Formación Barroso se ha definido en los límites del Cretácico Inferior y Superior, con dos edades de K-Ar y  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de 105 y 84 Ma respectivamente (Toussaint y Restrepo, 1978; González, 2010). Estas edades están apoyadas en relaciones con fósiles de edad Barremiano-Albiano medio (Tabla 1) encontrados en lodolitas interestratificadas con flujos basálticos en la parte norte de la zona de estudio, se establece un mínimo de >100 Ma para el magmatismo en este sector.

Los cuerpos intrusivos en la Formación Barroso como la tonalita de Buriticá, batolito de Sabanalarga y gabro de Altamira (Figura 29) con edades entre 100 y 89 Ma (Vinasco y Cordani, 2012; Zapata, 2013; Weber et al., 2015) y el Stock de Mistrató en la sección Umbría de 85 Ma (Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) y Universidad de Caldas, 2011) limitan también la historia magmática de esta unidad volcánica mayor a 90 Ma.

Las edades obtenidas en este estudio se encuentran en el rango entre 45 y 67 Ma por lo que no son consistentes con edades de cristalización de la Formación Barroso. Sin embargo, las relaciones encontradas en el análisis petrológico sumado a una revisión de edades obtenidas en unidades volcánicas y plutónicas, sugieren que el rango entre 63 y 67 Ma representa una historia post-magmática. La evolución tectónica del margen noroccidental de Suramérica sugiere que estas edades más jóvenes estarían posiblemente asociadas a la alteración durante la acreción de estas rocas al continente, lo que ocasionó el desarrollo de plegamiento y zonas de cizalla con migración de fluidos causante de la sericitización en las secciones estudiadas (Boven et al., 2002; Fuentes et al., 2005; Oliveros et al., 2008).

En este trabajo, las observaciones de las fases de mineralogía secundaria a nivel microscópico (<200 micras), el bajo contenido de K generalizado en las muestras, el aumento y/o variación de la señal del argón con la presencia de sericita, y su relación con las características en la espectrometría, están confirmadas por los datos geoquímicos. Las rocas con menor contenido de  $\text{K}_2\text{O}$  (<0.1 %), coinciden con valores bajos de LOI (*Loss of Ignition* o pérdida por calcinación). Estas muestras también presentan los valores

más bajos del índice  $A_{wr}$  (Tabla 8). Por ejemplo, la muestra CVM 006 con un porcentaje de K de 0.07%, es una de las menos alteradas ( $A_{wr}= 41$ ) y presenta una LOI de 1.4%.

La muestra CVM 083 (Concordia, Figura 29) tiene un  $A_{wr}$  de 99% y presenta una pseudo-meseta escalonada con edad de  $64.6 \pm 1.6$  Ma. Aunque típicamente este tipo de espectro es relacionado con exceso de argón, la relación  $(^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar})_i$  no muestra evidencia de dicho proceso, y la forma escalonada debe estar relacionada a un efecto de *recoil* producto del tamaño de los cristales (Baksi, 2006). A diferencia de las muestras CVM 052 y CVM 085 con  $A_{wr} > 80\%$  (grupo 1) en las que el 63 y 70% de las plagioclasas se encuentran levemente alteradas a prehnita y epidota, la alteración de las plagioclasas en esta muestra es fuerte (>70%) y el desarrollo de sericita es evidente. Un estado intermedio en el proceso de sericitización en la roca puede provocar espectros más difíciles de interpretar, mientras que una “alteración homogénea” de la roca genera espectros y edades más confiables para eventos de baja temperatura que provocan sericitización. Adicionalmente, la presencia de actinolita también se manifiesta en la señal del  $^{40}\text{Ar}$  y, debido a que probablemente son producto del mismo proceso de alteración/metamorfismo, la edad obtenida es la de mejor precisión en este estudio.

En el otro extremo, la sección Altamira concentra dos de las muestras más frescas (CVM 006 y CVM 008) con un  $A_{wr} < 55\%$  y una proporción de plagioclasas sanas entre 62 y 69%. El pobre desarrollo de sericitización y los espectros con mesetas bien definidas para estas muestras con edades de  $58.1 \pm 4.8$  y  $61.8 \pm 4.4$  Ma, podrían parecer edades de cristalización. Sin embargo, además de las asociaciones regionales que restringen el magmatismo de la Formación Barroso a edades >90 Ma, la intrusión del gabro de Altamira, con edad de  $88.9 \pm 1.5$  Ma (Figura 9), hace imposible la interpretación de estas edades como edades de cristalización magmática.

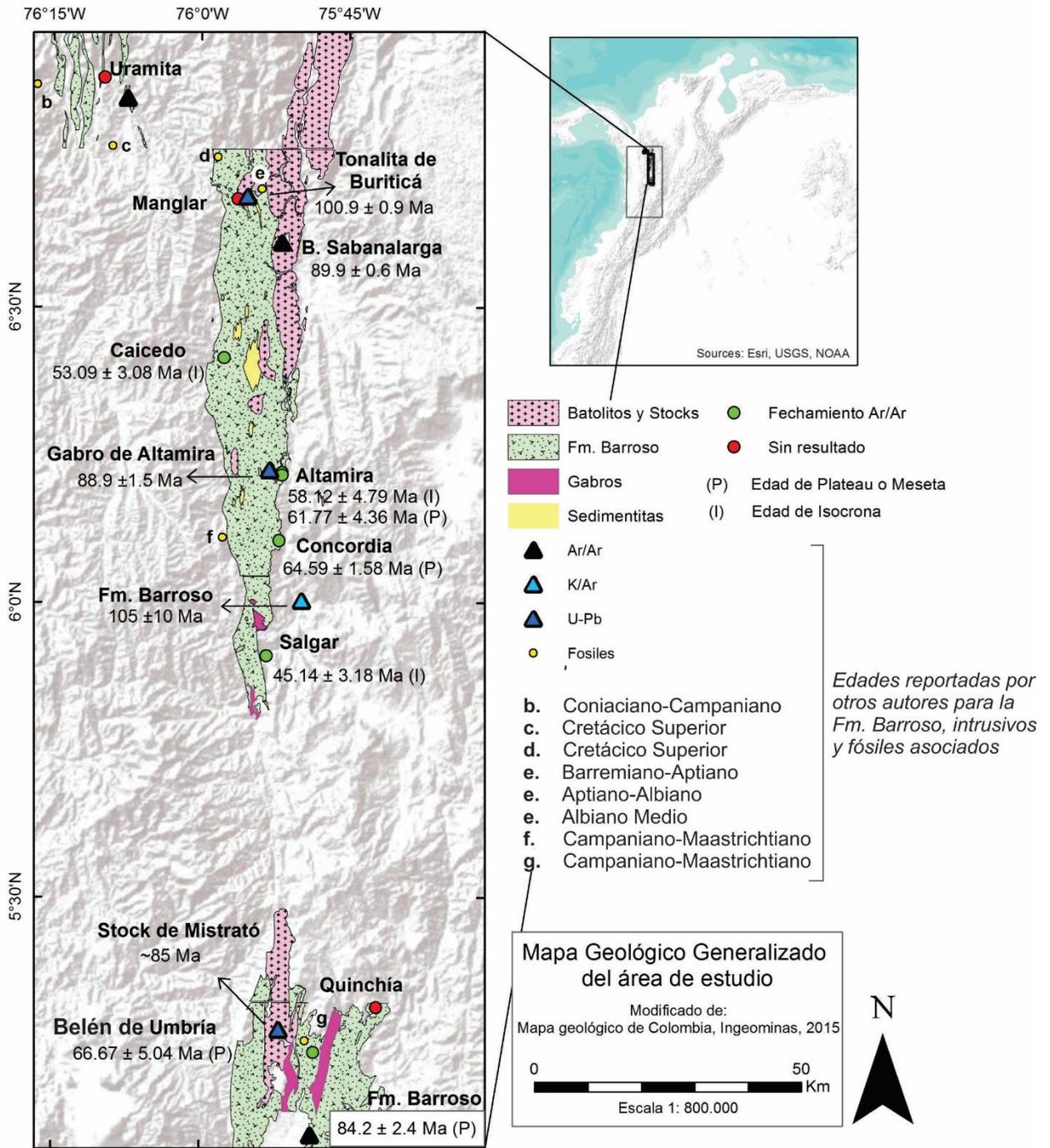


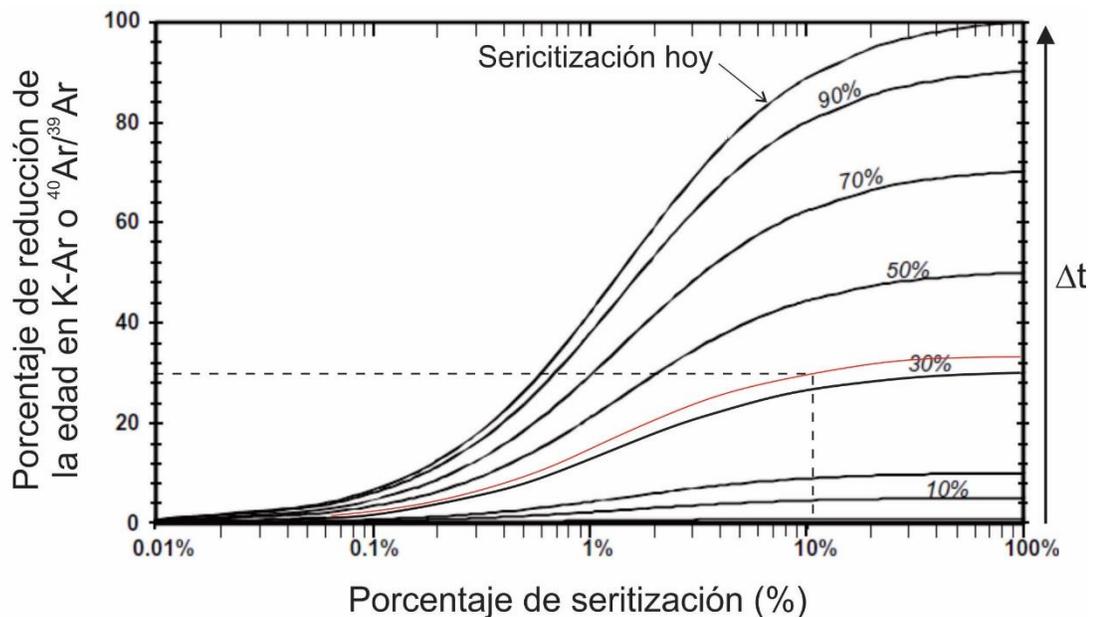
Figura 29. Mapa de localización de fechamientos <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar obtenidos en este estudio. Las referencias de las localidades fosilíferas se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 8. Relación de grupos de alteración con resultados geoquímicos de K<sub>2</sub>O y LOI

Nombre lámina	A <sub>wr</sub>	Minerales de Alteración	<sup>39</sup> Ar <sub>1exp</sub>	<sup>39</sup> Ar <sub>2exp</sub>	<sup>39</sup> Ar <sub>3exp</sub>	Ca/K	K <sub>2</sub> O	LOI
<b>CVM 083</b>	99	Actinolita/ Sericita/Epidota, Prehnita en venas,	69.4	69.1		14-49	<b>0.30</b>	<b>2.9</b>
<b>CVM 085</b>	93	Clorita/Pumpellita? /epidota	15.9			111- 348	--	--
<b>CVM 052</b>	83	Prehnita-Clo Venillas y amígdalas, Vidrio, Epidota	8.5			101- 418	--	--
<b>CVM 054</b>	79	Clorita/Sericita/Epi dota, Cuarzo/Fk?	87.6	32.6		2--60	--	--
<b>CVM 048</b>	77	Clorita/sericita, epidota. Albitización/ Prehnita-Esfalerita en venas	96.72 Matriz/ 12.75 Cristales	129 Matriz/ 16.68 Cristales		2-38/ 0.05- 1.29	<b>0.57</b>	<b>3.4</b>
<b>CVM 015</b>	55	Clorita/Sericita/Epi dota Albitización, Zeolitas	41.3	36.2		20-98	<b>0.11</b>	<b>2.0</b>
<b>CVM 067</b>	45	Clorita, epidota, uralita	21.8	17.0		11-296	<b>0.09</b>	<b>2.2</b>
<b>CVM 008</b>	41	Clorita/Sericita/Ad ularia	30.0	16.0	11.9	7-520	<b>0.05</b>	<b>1.2</b>
<b>CVM 006</b>	41	Clorita/Sericita/Epi dota	24.6	17.1		27-302	<b>0.07</b>	<b>1.4</b>

La muestra CVM 008 en particular, la distribución no homogénea de la sericita se interpreta como la causa de la falta de reproducibilidad en estos experimentos. Sin embargo es significativo que los tres experimentos coincidan en un segmento de 63 Ma y que la fracción con una edad menor aparente ("x" en Figura 27) coincida en la isocrona de los dos primeros experimentos. La explicación más probable es que la primera muestra haya tenido mayor contenido de sericita, generando incluso una edad de "meseta de alteración", mientras que en las muestras posteriores el contenido de ésta es menor y sólo es liberado entre 4 y 6 W de potencia del láser. La edad de  $93.3 \pm 5.9$  Ma podría representar la edad mínima de cristalización para la Formación Barroso, sin embargo la falta de reproducibilidad en los experimentos no permite afirmarlo de manera concluyente.

Tomando 93 Ma como edad de cristalización para la Formación Barroso, y situando el evento de sericitización en ~63 Ma, sería necesario sólo un 11% de contenido de sericita en la muestra para obtener una reducción de la edad de ~30% (Figura 30). La presencia de la sericita en rocas con bajo contenido de  $K_2O$  (<0.1 %) puede generar la superposición de la señal de la sericita sobre la señal de la plagioclasa. Al no existir eventos posteriores que modifiquen el sistema K/Ar de la sericita, se pueden obtener mesetas bien definidas, pero que representan mesetas de alteración o un evento de sericitización.



**Figura 30. Sericitización vs. Reducción de edad (Modificado de (Verati y Jourdan, 2013))**

Los resultados inesperados que se obtuvieron de la geocronología llevaron a la búsqueda de una explicación que fuera relevante geológicamente. Existen argumentos a favor para pensar que estas edades son la expresión de un evento geológico que afecta las unidades del sector norte de la Cordillera Occidental Colombiana. La distribución de las edades obtenidas en un segmento de más de 100 km en rocas con un origen común (Figura 29), las relaciones de campo (Figura 9), las claras relaciones intrusivas con unidades cretácicas, las relaciones con fósiles de edad Barremiano-Albiano en la región Manglar (Tabla 1), así como los fósiles de bivalvos en la zona de Concordia de edad Campaniano-Maastrichtiano (Tabla 1), sugieren que el magmatismo para esta unidad fue

anterior al período Campaniano-Maastrichtiano (~83 a 66 Ma), y evidencian que las edades obtenidas en esta tesis de ~63 Ma no corresponden a una edad de cristalización.

En vez de esto estarían marcando un evento de escala regional que se evidencia en las edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  a finales del Cretácico Superior. Las edades con exceso de argón en Salgar y Caicedo sin embargo, son menos claras y pueden estar afectadas por eventos hidrotermales más locales como se evidencia en la muestra CVM 048 de Caicedo.

### ***¿Metamorfismo de bajo grado producto de la colisión?***

Las asociaciones mineralógicas prehnita-pumpellyta-sericita-epidota-clorita-albita presentes en las muestra, son indicadoras de un metamorfismo de bajo grado en facies sub-esquistos verdes cuyas temperaturas no sobrepasan los 250°C. La presencia de actinolita en la muestra CVM 083 (Concordia) representa el máximo grado de metamorfismo encontrado en la unidad. Este mineral requiere un aumento de temperatura de entre 280 y 300 °C (Frey y Robinson, 1999). A excepción de esta muestra, las edades no deberían interpretarse como un calentamiento termal que haya homogenizado el sistema K/Ar, en el sentido que no habrían superado la temperatura de cierre de las plagioclasas (<300 °C), y se interpretan más bien como una sobreimposición de la señal de la sericita sobre la plagioclasa en presencia de rocas con un contenido muy bajo de K (<0.1 ppm).

La ausencia de fábricas deformacionales penetrativas como esquistosidad, y las asociaciones mineralógicas de baja temperatura, son típicamente asociadas a metamorfismo por enterramiento o de piso oceánico. Sin embargo, estas características han sido también encontradas en ambientes tectónicos convergentes (Frey y Robinson, 1999). Las muestras analizadas se encuentran plegadas y cortadas por fallas con evidencia de deformación dúctil y frágil, lo que sugiere que pudieron experimentar interacción con fluidos en las zonas menos deformadas.

La posición estratigráfica relativa de las muestras teniendo en cuenta sus características petrográficas, pondrían a la sección Salgar en una posición estratigráfica más somera en el edificio volcánico. Esto es consistente con el contenido de vesículas (~10%) y su

cercanía inmediata con el miembro sedimentario (Formación Penderisco); mientras que las secciones Altamira y Belén de Umbría tienen una posición estratigráfica de mayor profundidad, debido al menor contenido de vesículas (<2%) y la exposición de casi 3 km continuos de flujos masivos e intercalaciones con lavas almohadilladas en la sección Altamira. Un metamorfismo por enterramiento generaría en las secciones basales un mayor desarrollo de mineralogía secundaria (prehnita, pumpellyta, epidota, clorita) e incluso mayor deformación. Sin embargo, las secciones de Altamira y Belén de Umbría están principalmente preservadas ( $A_{wr} < 45\%$ ) en relación con Salgar, que presenta un mayor porcentaje de mineralogía secundaria, y mayor deformación (Figura 11), pudiéndose encontrar incluso desarrollo de esquistosidad a nivel microscópico. Procesos posteriores que afectaron al bloque, probablemente durante su acreción a la margen continental, son los responsables de un metamorfismo dinámico (Nivia, 1996b), que afecta en mayor proporción las unidades que se encuentran más expuestas y son menos competentes, más que un metamorfismo de enterramiento.

El metamorfismo de piso oceánico por su parte, se encuentra mejor documentado para diferentes niveles en la corteza oceánica, en cambio, la alteración en plateaus oceánicos es un tema menos conocido. En un centro de expansión el metamorfismo de piso oceánico aumenta con la profundidad siendo zeolitas las fases minerales más comunes (Pichler et al., 1999). La composición de los fluidos y la presión demasiado baja para la estabilidad de la pumpellyta, generaría la ausencia de esta fase mineral en sistemas oceánicos. Mientras que en ofiolitas (en el sentido que definen los autores Schiffman y Staudigel, 1994: generadas en una cuenca tras-arco), islas oceánicas o procesos de acreción asociados a obducción de corteza oceánica en cambio, la ocurrencia de prehnita y/o pumpellyta es frecuente (Schiffman y Staudigel, 1994; Frey y Robinson, 1999).

Cualquiera que sea el caso del origen del metamorfismo, es claro que afecta en menor o mayor grado a las rocas basálticas de la Cordillera Occidental (Grösser, 1989; Toussaint y Restrepo, 1994; Nivia, 1996b; González, 2001). Estos reajustes metamórficos impiden determinar la edad de erupción, más aun cuando el material fechado es roca total o matriz, en vez de un separado mineral de plagioclasa (Hofmann et al., 2000; Koopers et al., 2000; Jourdan et al., 2007; Courtillot et al., 2010). Cuando la sericitización está presente normalmente los fechamientos en roca total muestran espectros complejos y

una edad menor que es cercana a la edad del evento de sericitización. En el caso de fechamiento en plagioclasas, si no se tiene en cuenta el sistema plagioclasa-sericita en la interpretación de las edades, la edad obtenida es siempre la edad mínima para el magmatismo (Boven et al., 2002). Esto implicaría que algunas de las edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y K/Ar reportadas para las unidades basálticas y plutones máficos de la Cordillera Occidental Colombiana podrían ser espurias.

### ***¿Registro de la colisión en el geocronómetro K-Ar?***

Las edades de unidades volcánicas son más escasas por las complicaciones asociadas a procesos de alteración metamórfica resaltado anteriormente. Solo dos edades K-Ar y  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de 105 y 84 Ma (Toussaint y Restrepo, 1978; González, 2010) se han reportado para la Formación Barroso. Otras edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  reportadas por González (2010) para la Formación Volcánica y Amaime, que es el equivalente al sur de la Formación Barroso (Villagómez et al., 2011), son de 69.9 y 58.6 Ma respectivamente. Estas edades son semejantes al rango de edades encontradas en este estudio (Figura 31) y son interpretadas por el autor como eventos termales que re-homogenizan el sistema K/Ar debido a que, al igual que en la zona de estudio, las relaciones intrusivas y fósiles asociados en estas unidades el magmatismo corresponde a edades del Cretácico Inferior.

Los cuerpos cretácicos intrusivos que cortan a las rocas volcánicas de la Formación Barroso (batolito de Sabanalarga, tonalita de Buriticá, gabro de Anserma, stock de Mistrató) han sido asociados a un ambiente de subducción, con una actividad entre 115 y 70 Ma (Ma (McCourt et al., 1984; González y Londoño, 1998; González, 2010; Rodríguez y Arango, 2013). Sin embargo, otros autores sugieren que el rango de edades 65 y 78 Ma corresponde a eventos “termales” que han reseteado el sistema K/Ar a lo largo de la Cordillera Occidental y Central, y proponen que estas edades son un marcador de un evento tectonomagmático que afecta regionalmente las unidades (Toussaint y Restrepo, 1976; Souza et al., 1984; Toussaint y Restrepo, 1994; González y Londoño, 1998; González, 2010)

El gabro de Anserma tiene una edad K/Ar de 71 Ma (González y Londoño, 1998) que no estaría representando una edad de enfriamiento, pues Vallejo et al. (2011) reportan la relación intrusiva entre el Stock de Mistrató (fechado en 85 Ma en circones, Figura 29) y el gabro. El gabro de Anserma presenta patrones geoquímicos de ambientes oceánicos tipo MORB (Vallejo et al., 2011), lo que sugiere que están más relacionados con los basaltos de la Formación Barroso como propone Estrada et al. (2001).

El batolito de Sabanalarga y Buga representaría el magmatismo de arco intraoceánico sobreimpuesto en el plateau Caribe (González y Londoño, 1998; González, 2010; Villagómez et al., 2011; Weber et al., 2015). Las edades Rb/Sr y U/Pb de  $99 \pm 4$  y  $92 \pm 0.8$  Ma respectivamente, están también acompañadas de edades K/Ar y  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  entre 74 y 69 Ma (Tabla 9). En rocas plutónicas estas edades serían representativas de enfriamiento, reseteo o sericitización. Es posible que el rango de edades más jóvenes (74 y 69 Ma) dado por el sistema K/Ar, y definido por algunos autores como un evento tectonomagmático, esté representando la colisión y acreción de las unidades del plateau caribeño a la margen suramericana colombiana (Figura 31).

Datos  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y huellas de fisión publicados por Villagómez y Spikings (2013) sugieren un período de enfriamiento rápido generalizado en la Cordillera Occidental y en la Cordillera Central. Las unidades hacia el sur de la Cordillera Occidental (Formación Volcánica e intrusivos máficos) presentan edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en hornblenda de 77.6 Ma con un plateau bien definido, sin exceso de argón ( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ )<sub>i</sub> =  $293 \pm 18$ ) aunque con un contenido considerable de  $^{36}\text{Ar}$ . También presentan una edad de isocrona con exceso de argón de 67.6 Ma en hornblenda del complejo Ultramáfico de Bolívar; y edades de huellas de fisión entre 62 y 67 Ma con lo que acotan su modelo de historia termal y proponen una tasa de enfriamiento rápido para estas unidades.

En la Cordillera Central la respuesta a la colisión se evidencia con rápidas tasas de exhumación y picos metamórficos en el mismo período. En el norte la exhumación rápida del batolito Antioqueño con edades de hornblenda 70.4 Ma, biotita de 72.3 y 68.9 Ma y plagioclasa de 62.6 Ma todas con exceso de argón y espectros con algún grado de perturbación. Los datos de trazas de fisión indican edades de  $66.6 \pm 8.0$  a  $55.4 \pm 5.2$  Ma (Villagómez y Spikings, 2013). Al sur se registran edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de 61 y 67 Ma en

micas blancas (Bustamante et al., 2011), interpretadas como el proceso responsable de la exhumación de los esquistos azules de Jambaló en un ambiente colisional.

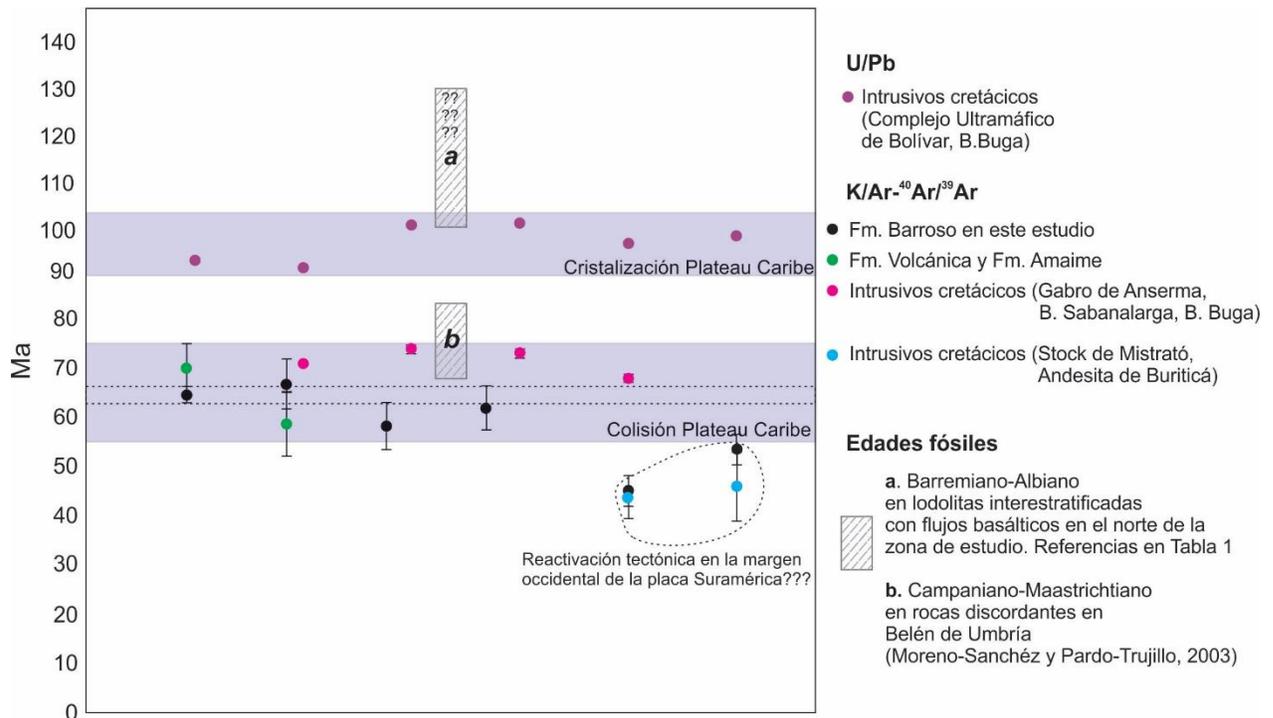
En la sección de Belén de Umbría se reportan rocas discordantes sobre la Formación Barroso con fósiles con edad Campaniano-Maastrichtiano. Las asociaciones bióticas y la ausencia de fuentes continentales como cuarzo o rocas metamórficas, sugieren ambientes someros de depositación en un basamento oceánico aislado (Moreno-Sanchez y Pardo-Trujillo, 2003), lo que indica que para este periodo aún no había conexión entre el occidente y el oriente colombiano.

El inicio de la colisión de la placa Caribe a la margen continental colombiana genera el levantamiento de la Cordillera Central y la depositación sincrónica en las cuencas sedimentarias del Cretácico Superior-Paleoceno del valle del Magdalena en la Cordillera Oriental (Moreno-Sanchez y Pardo-Trujillo, 2003). En el borde occidental de la Cordillera Central las cuencas marinas someras en este intervalo de tiempo reportan alto contenido de cuarzo sugiriendo la cercanía de bloques continentales y una conexión parcial entre el oriente y occidente para este tiempo, mientras que en el borde occidental del valle interandino del Magdalena se registra un aumento de la sedimentación clástica gruesa y una mayor subsidencia en el oriente (Moreno-Sanchez y Pardo-Trujillo, 2003).

Los datos obtenidos en este estudio son significativos y representan la temporalidad de la colisión del Plateau Caribe en el segmento norte entre 63 y 67 Ma. Este rango de edades ha sido reportado de forma indirecta con las observaciones hechas por otros autores con edades K/Ar y  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  “anómalas”, que son más jóvenes y no coinciden con relaciones de campo, e intrusiones de cuerpos de edad más antigua, lo que sugiere el potencial de esta metodología para fechamientos de metamorfismo de baja temperatura. Sin embargo, se debe tener cuidado en la interpretación de los resultados obtenidos con esta técnica en contextos geológicos complejos.

Las edades en Salgar ( $45.03 \pm 3.18$  Ma) y Caicedo ( $53.6 \pm 3.08$ ), son menos claras y pueden estar asociadas a eventos hidrotermales posteriores más locales. Sin embargo unidades como el Stock de Mistrató y Andesita de Buriticá (Tabla 9) reportan edades K/Ar post-magmáticas similares a las de Salgar  $\sim 45$  Ma (González & Londoño, 1998), y

podrían representar la reactivación tectónica en la margen occidental de la placa Suramérica debido al incremento en la tasa de convergencia entre las placas Farallón y Suramérica (Villagómez y Spikings, 2013 y referencias en él). Este incremento generó nuevamente altas tasas de exhumación en la Cordillera Central entre 45 y 30 Ma (Restrepo-Moreno et al., 2009; Villagómez y Spikings, 2013).



**Figura 31. Síntesis de edades U-Pb,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y K/Ar reportadas como eventos termales o edad de enfriamiento para rocas volcánicas e intrusivas del Plateau Caribe. El rango propuesto para la colisión es de Villagómez y Spikings (2013). Las líneas punteadas representan el rango de edades establecido en este estudio. En la Tabla 9 se indica el método usado y el mineral fechado en estos datos.**

**Tabla 9. Edades reportadas para las rocas volcánicas básicas de la Cordillera Occidental e intrusivos asociados.**

Unidad	Edades K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$			Edades U-Pb		
	Edad	Mineral	Referencia	Edad	Mineral	Referencia
<i>Fm. Barroso</i>	105 ± 10	Wr	Toussaint y Restrepo 1986			
<i>Fm. Barroso</i>	84.2 ± 2.3	Wr	González 2010			
<i>Fm. Volcánica</i>	69.9 ± 4.9	Hbl	González 2010			
<i>Fm. Amaime</i>	58.6 ± 6.5	Wr	González 2010			
<i>Gabro de Anserma</i>	71 ± 2.7	Wr	González y Londoño1998			
<i>B. Sabanalarga</i>	68	?	Brook 1984 (en González 2010)			
<i>B. Buga</i>	74.08 ± 0.81	Hbl	González 2010	92.1 ± 0.8	Circón	Villagómez et al. 2011
<i>B. Buga</i>	73.16 ± 0.8	Hbl	González 2010	90.6 ± 1.3	Circón	Villagómez et al. 2011 McCourt, Aspend y
<i>B. Buga</i>				99.4 ± 4 (Rb/Sr)	Bio/Hbl	Brook, 1986
<i>Gabro del Palmar (Volcánica)</i>	77.6 ± 5.7	Hbl	Villagómez y Spikings 2013	99.7 ± 1.3	Hbl	Villagómez et al. 2011
<i>Complejo Ultramáfico de Bolívar</i>	67.6 ± 15.3	Hbl	Villagómez y Spikings 2013	95.5 ± 1.1	Hbl	Villagómez et al. 2011
<i>Complejo Ultramáfico de Bolívar</i>				97.1 ± 2	Bio	Villagómez et al. 2011
<i>Andesita de Buriticá</i>	43.8 ± 4.3	Wr	González y Londoño1998			
<i>Stock de Mistrató</i>	46 ± 7	Wr	González y Londoño1998	85		ANH y Universidad de Caldas, 2011

Wr: Roca Total; Hbl: Hornblenda

### 3.3 Geoquímica

#### 3.3.1 Clasificación y serie magmática

En la Tabla 10 se presentan los resultados para elementos mayores de las 15 muestras analizadas (13 basaltos y 2 gabros). Los valores presentados están recalculados en base anhidra (restando el % de LOI: *Loss of Ignition* o pérdida por calcinación). El LOI es un valor que puede asociarse al estado actual de alteración de la muestra resultado de hidratación de minerales máficos (Lecheler y Desilets, 1987). Para rocas basálticas y andesíticas valores de LOI entre 0.7 y 2.0 pueden ser considerados como no alterados (Lecheler y Desilets, 1987). Los valores obtenidos de LOI en este estudio para las rocas basálticas de la Formación Barroso varían entre 1.2 y 2.9, siendo Caicedo la sección con un mayor contenido de volátiles o grado de alteración (3.4). En el gabro de Hispania la LOI es también superior al 3% debido a la formación de serpentina a expensas del olivino.

El análisis de los elementos mayores indica que en los basaltos de la Formación Barroso pueden agruparse por lo menos dos suites magmáticas con características diferentes.

En el grupo principal que comprende los basaltos de las secciones Umbría, Concordia, Hispania (CVM 029), Salgar y Altamira (en negro, Figura 32), los óxidos varían de SiO<sub>2</sub> varía entre ~49% y 51%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ~14%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 10% y 12%, MgO entre 8% y 9%, CaO entre 11% y 13%, TiO<sub>2</sub> entre 0.8% y 1.0% y un porcentaje de K<sub>2</sub>O bastante bajo entre 0.05% y 0.57%. El #Mg varía entre 56 y 63 mostrando un grado de diferenciación en las muestras (Figura 33).

Los basaltos de la zona noroccidental (Caicedo en azul, Figura 32) muestran valores que contrastan con los del grupo principal, presentan mayores concentraciones de SiO<sub>2</sub> (53%) y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (14%), bajas concentraciones de CaO (6% y 8%), TiO<sub>2</sub> (0.4% y 0.6%) y valores extremos en MgO (7% y 12%) con #Mg de 49 y 69 respectivamente (Figura 33).

El gabro de Hispania (CVM 030, CVM 031, en amarillo Figura 32) presenta bajos contenidos en SiO<sub>2</sub> ~48%, TiO<sub>2</sub> ~0.3 y K<sub>2</sub>O ~0.03%, valores elevados de MgO entre 16% y 18%, Ni entre 239 y 333 ppm y #Mg elevados entre 78 y 80.

Tabla 10. Elementos mayores de los basaltos de la Formación Barroso y el gabro de Hispania en este estudio. Los valores se encuentran en ppm

Muestra	Sección	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ni	LOI	Sum
<b>CVM006</b>	Altamira	50.8	14.0	12.0	8.0	11.8	2.0	0.1	1.0	0.1	0.2	0.0	21	1.4	99.9
<b>CVM008</b>	Altamira	50.6	14.0	12.3	7.9	12.1	1.8	0.1	1.0	0.1	0.2	0.0	23	1.2	100.0
<b>CVM015</b>	Salgar	50.0	14.3	10.9	9.0	12.3	2.2	0.1	0.9	0.1	0.2	0.1	48	2.0	99.9
<b>CVM016</b>	Salgar	49.8	14.6	11.0	8.6	12.2	2.2	0.2	0.9	0.1	0.2	0.1	52	3.2	99.9
<b>CVM018</b>	Salgar	49.8	14.4	10.6	9.2	12.6	2.0	0.3	1.0	0.1	0.2	0.1	61	2.1	100.0
<b>CVM029</b>	Hispania	51.3	13.5	10.7	9.3	11.6	2.4	0.1	0.8	0.1	0.2	0.1	47	3.1	99.9
<b>CVM030</b>	Hispania	48.6	12.8	8.8	16.1	12.4	0.6	0.0	0.3	<0.01	0.1	0.3	239	3.8	99.9
<b>CVM031</b>	Hispania	48.1	12.0	9.1	18.4	11.2	0.4	0.0	0.3	<0.01	0.1	0.3	333	4.8	100.0
<b>CVM046</b>	Caicedo	53.3	14.3	14.1	7.0	6.4	4.1	0.2	0.4	0.0	0.2	<0.01	12	1.8	100.0
<b>CVM048</b>	Caicedo	50.4	14.6	10.4	11.5	8.2	3.3	0.6	0.6	0.1	0.2	0.1	66	3.4	100.0
<b>CVM066</b>	Belén de Umbría	50.6	14.5	10.2	8.9	12.9	1.7	0.1	0.9	0.1	0.2	0.1	59	2.2	100.0
<b>CVM068</b>	Belén de Umbría	49.7	14.6	10.7	8.9	13.0	1.7	0.1	1.0	0.1	0.2	0.1	62	1.9	100.0
<b>CVM071</b>	Belén de Umbría	49.9	14.5	10.6	9.0	12.4	2.2	0.1	1.0	0.1	0.2	0.1	59	3.1	100.0
<b>CVM073</b>	Belén de Umbría	50.0	14.7	10.8	9.1	12.2	1.8	0.1	0.9	0.1	0.2	0.1	36	2.1	100.0
<b>CVM083</b>	Concordia	50.7	14.2	11.1	8.9	11.4	2.0	0.3	1.0	0.1	0.2	0.1	32	2.9	100.0

#Mg: 100x (MgO/ (MgO+0.8998xFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)). Óxidos en masa molar.

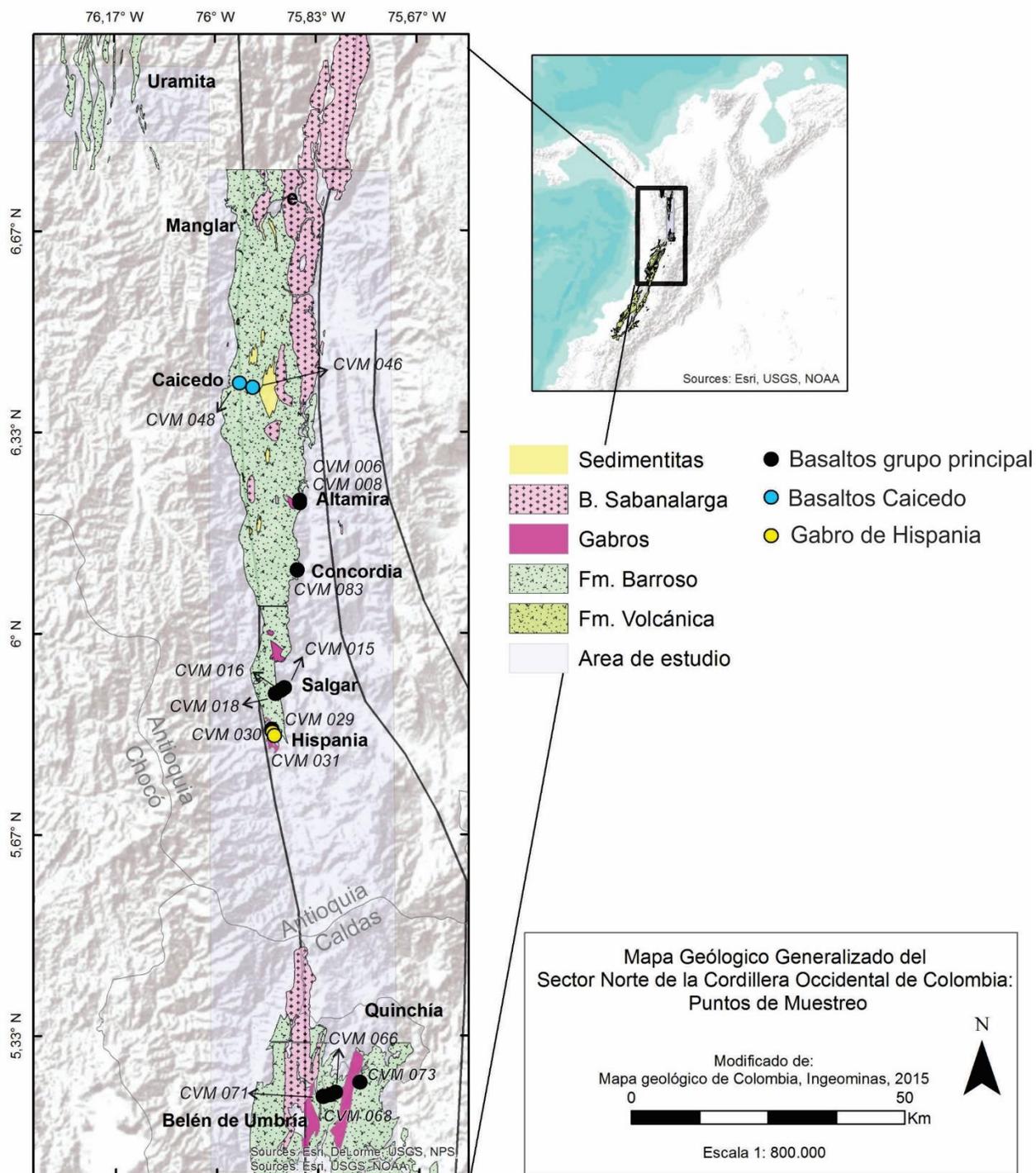
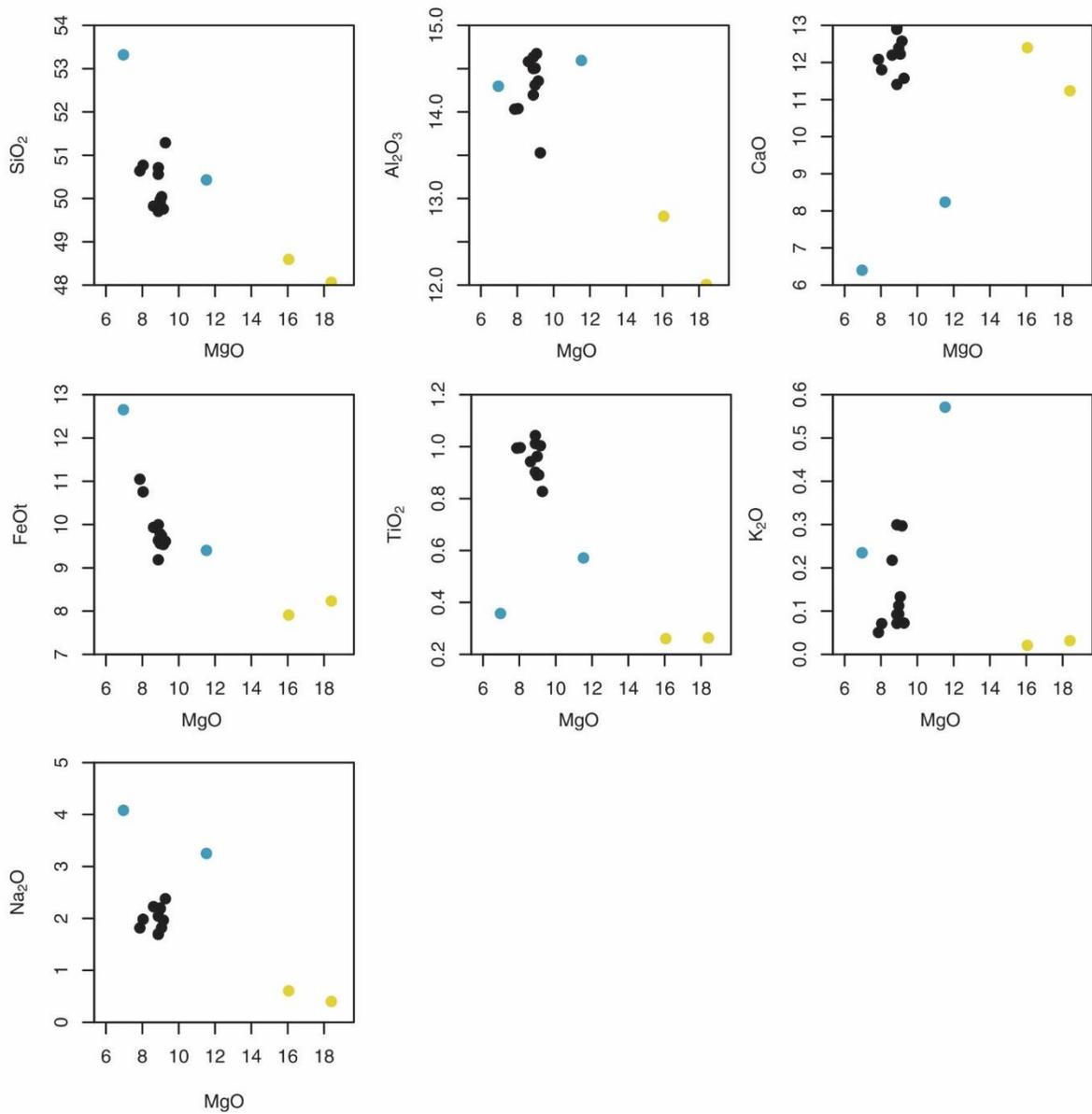


Figura 32. Localización de muestras de geoquímica de este estudio.

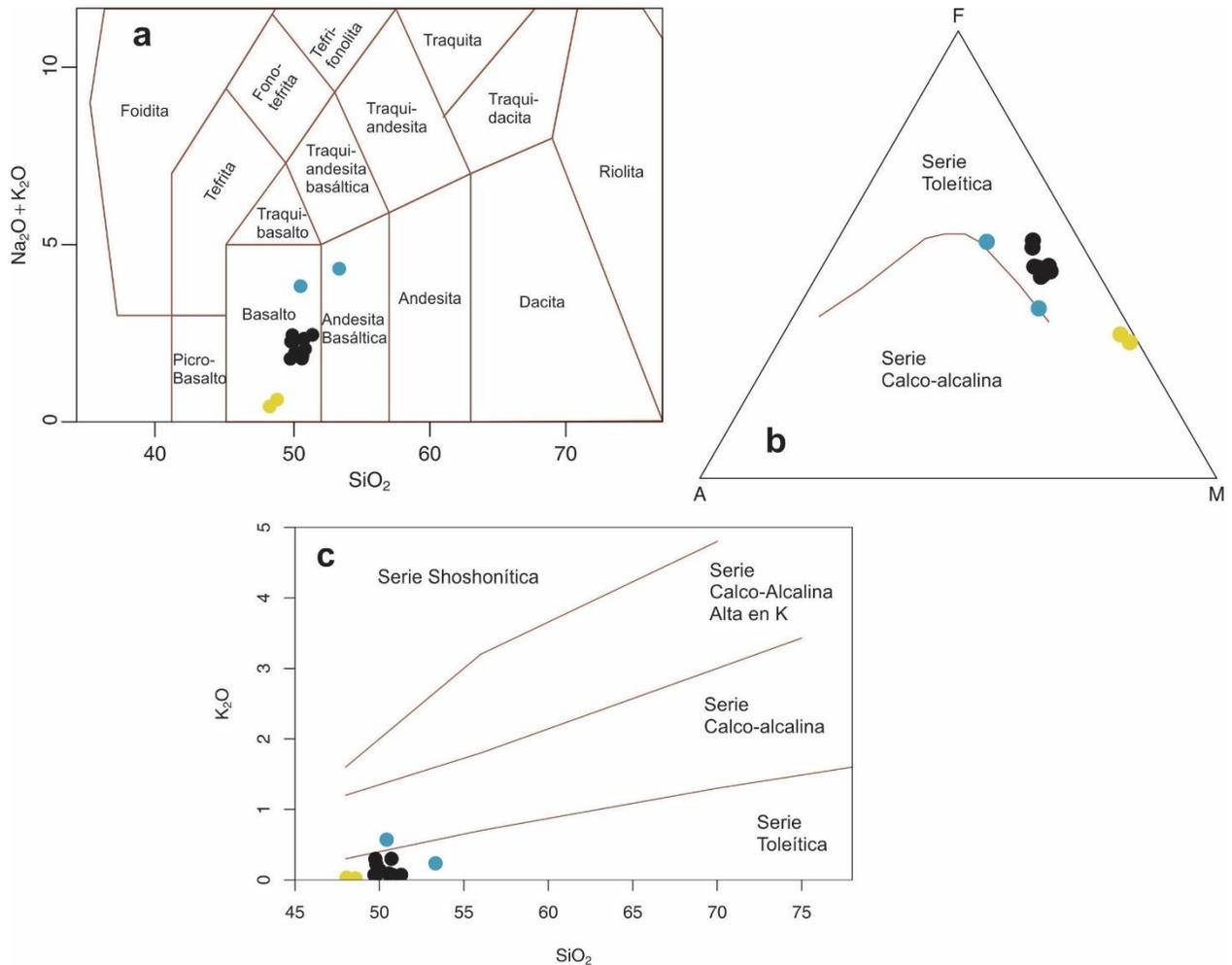


**Figura 33. Diagramas de variación MgO vs Elementos mayores. En negro: Basaltos secciones Umbría, Concordia, Salgar, Altamira. Azul: Basaltos Sección Caicedo; Amarillo: Gabros y basalto de Hispania.**

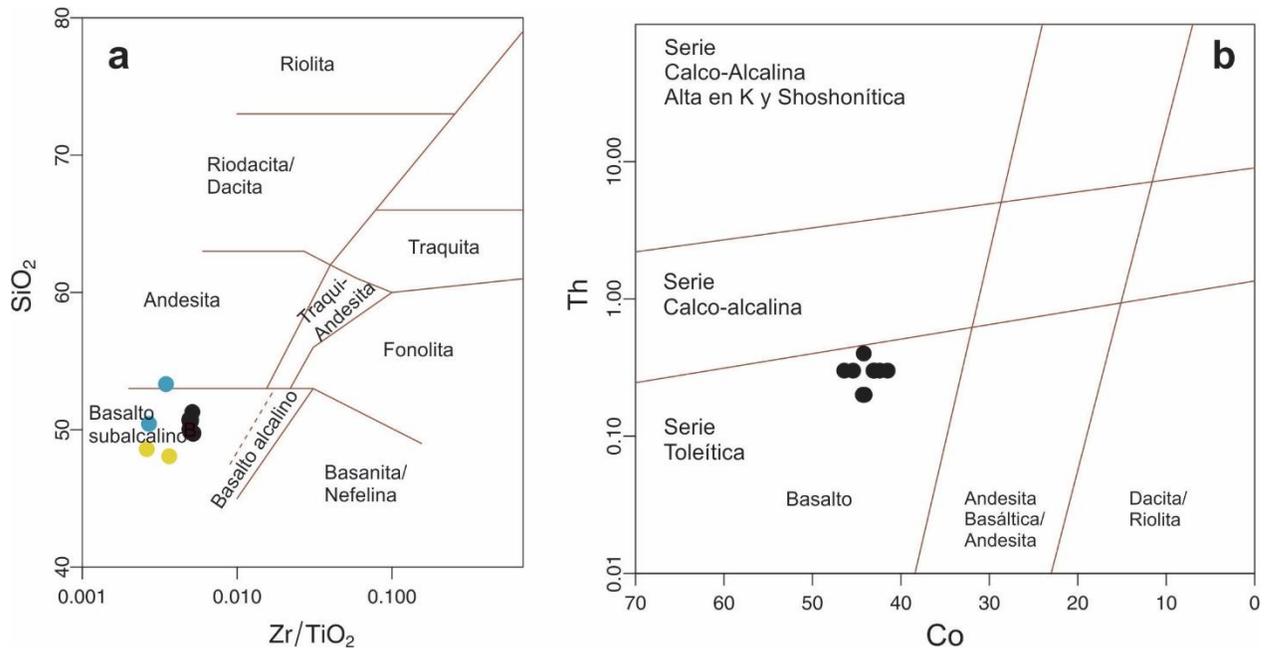
En los diagramas TAS y AFM (álcalis, hierro y magnesio) todas las rocas grafican en el campo de basaltos de la serie toleítica subalcalina de bajo K (Figura 34). Sin embargo, la sección Caicedo grafica en los límites entre la serie toleítica y subalcalina e involucra una roca de afinidad andesítica (Figura 34)

Los diagramas de clasificación usuales para diferenciar el tipo de roca y serie magmática usados en la Figura 34 han sido diseñados para rocas frescas. Debido a la movilidad de

los elementos mayores en procesos de alteración y/o metamorfismo, los diagramas que emplean elementos traza son más apropiados ante la posibilidad de tener rocas alteradas. La Figura 35 muestra la clasificación de rocas y serie magmática basada en elementos inmóviles.



**Figura 34. a) Diagrama de clasificación TAS (Middlemost, 1994). b) Diagrama de clasificación AFM para la serie Toleítica y Serie calco-alcalina (Irvine y Baragar, 1991). c) Diagrama de clasificación de rocas subalcalina (Peccerillo y Taylor, 1976). En negro: Basaltos secciones Umbría, Concordia, Salgar, Altamira. Azul: Basaltos Sección Caicedo; Amarillo: Gabros y basalto de Hispania.**



**Figura 35. a) Diagrama de clasificación  $Zr/TiO_2$  vs.  $SiO_2$  (Winchester y Floyd, 1977); b) Diagrama de discriminación  $Co$  vs.  $Th$  (Hastie et al., 2007). En negro: Basaltos secciones Umbría, Concordia, Salgar, Altamira. Azul: Basaltos Sección Caicedo; Amarillo: Gabros y basalto de Hispania.**

La clasificación con elementos inmóviles corresponde a basaltos toleíticos, que es igual a la realizada con elementos mayores sugiriendo poca influencia de los fluidos metasomáticos en la movilización de elementos por procesos post-magmáticos que hayan experimentado estas rocas. Sin embargo, en la sección Caicedo e Hispania elementos como el Th, Nb y Ta tienen concentraciones muy bajas pues están por debajo del límite de detección del instrumento ( $<0.2$  ppm Th y  $<0.1$  ppm Nb y Ta), y debido a esto tanto en el diagrama  $Co$  vs.  $Th$  como en otros que usan estos elementos, no son posibles de representar.

En la Tabla 11 se muestran los resultados de elementos traza para las 15 muestras. Del diagrama multielementos normalizado a condrito de Thompson (1982, Figura 36) se identifican por lo menos dos patrones principales que siguen la clasificación realizada en el análisis de elementos mayores (Figura 32).

En el diagrama multielementos (Figura 36) los basaltos del grupo principal muestran patrones ordenados casi planos para las tierras raras (REE, por sus siglas en inglés) en el tramo La-Yb con pequeñas anomalías negativas en P, Zr y Hf, mientras que los elementos litófilos de alto radio iónico (LILE, por sus siglas en inglés) como el Ba, Rb y

K, tienen un comportamiento variable y se presentan tanto empobrecidos como enriquecidos respecto a las REE. La relación Zr/Nb varía entre 10 y 20 que es más característico de E-MORB. El patrón de REE normalizado a condrito (Figura 37) muestra patrones planos, destacando el poco fraccionamiento entre tierras raras ligeras (LREE) y pesadas (HREE) con un factor  $(La/Yb)_n$  entre 0.8 y 1.7, indicando un leve enriquecimiento en los LREE. No se aprecia una anomalía de Eu presentando una relación  $(Eu/Eu)_n$  entre 0.9 y 1.1. Las concentraciones son de hasta 10 veces mayores que el condrito y con un contenido total de REE entre 28 y 37 ppm.

Para la secciones Caicedo y el gabro de Hispania los valores de Th, Nb (a excepción de CVM048) y Ta no están bien definidos debido a sus bajas concentraciones ( $<0.1$  ppm) y por esto no puede observarse su comportamiento en el diagrama (Figura 36), ni pueden calcularse con exactitud la relación Zr/Nb (mínimo de 68 con un valor máximo para Nb de 0.1 ppm).

La sección Caicedo muestra una fuerte anomalía positiva de Sr, Ba y K, y anomalías negativas en Zr y Hf. La muestra CVM 048 forma un “valle” negativo formado por Nb, La y Ce, pero no se encuentra enriquecido en Th, ni se observa una anomalía de Ti (Figura 36). Estas dos muestras presentan un leve empobrecimiento en LREE respecto a HREE y una relación  $(La/Yb)_n \sim 0.6$ . Al igual que en los basaltos del grupo principal no es apreciable una anomalía de Eu  $(Eu/Eu)_n$  de 1.1, pero la concentración en REE totales es menor que en éstos con valores entre 13 y 15 ppm (Figura 37).

El gabro de Hispania presenta una fuerte anomalía positiva en Sr y anomalías negativas en P, Zr y Hf y se encuentra empobrecido en Ba (Figura 36). Esta unidad presenta un leve empobrecimiento en LREE respecto a HREE con un factor  $(La/Yb)_n$  entre 0.6 y 0.8, una anomalía positiva leve de Eu con  $(Eu/Eu)_n$  entre 1.2-1.4 y concentraciones en REE totales son bajas  $\sim 6$  ppm (Figura 37).

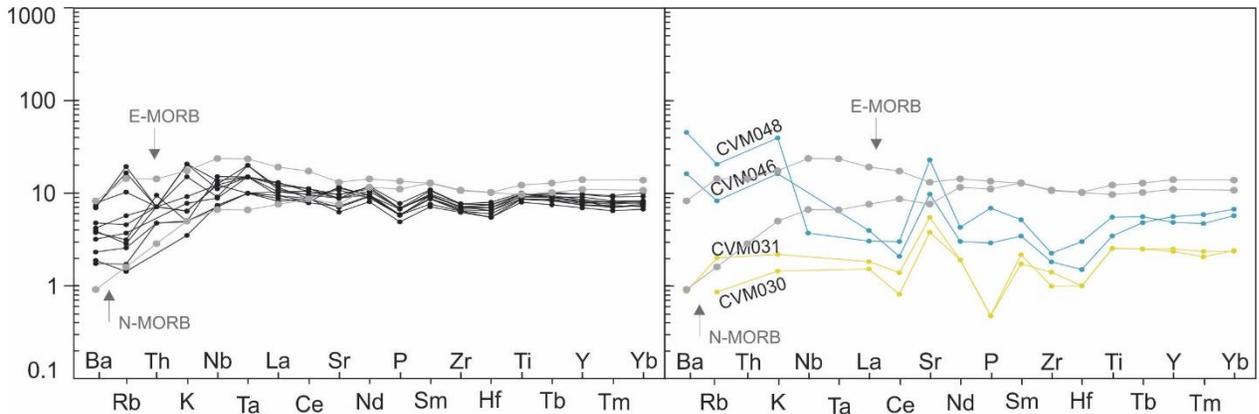


Figura 36. Diagramas multielementos normalizados a condrito (Thompson, 1982). En negro: Basaltos secciones Umbría, Concordia, Salgar, Altamira. Azul: Basaltos Sección Caicedo; Amarillo: Gabros y basalto de Hispania. Los valores para MORB enriquecido (E-MORB) y MORB normal (N-MORB) son de (Sun y McDonough, 1989)

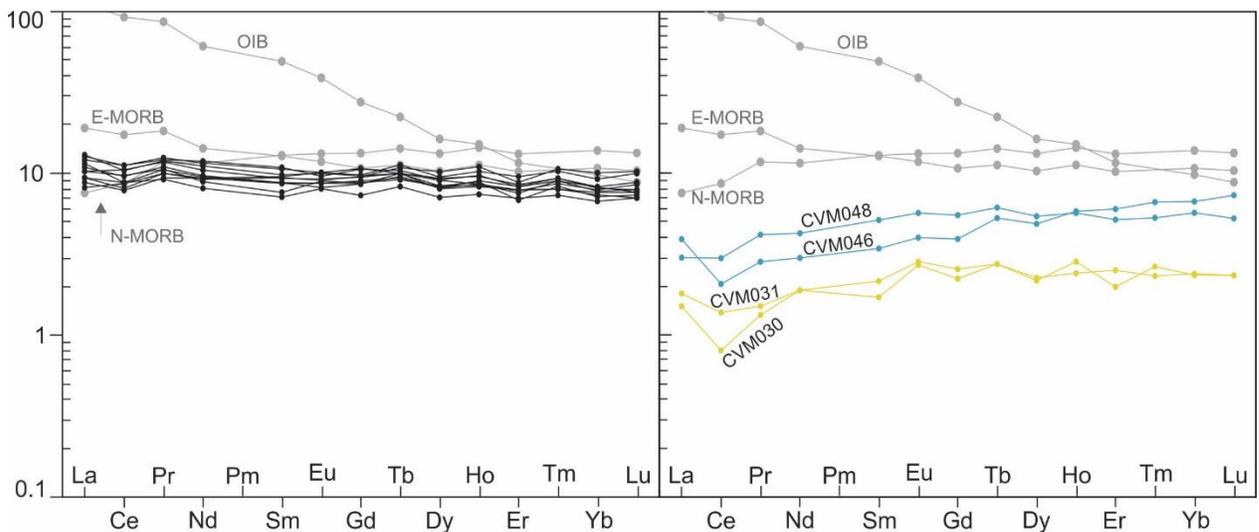


Figura 37. Patrones de REE normalizados a condrito (Nakamura, 1974). En negro: Basaltos secciones Umbría, Concordia, Salgar, Altamira. Azul: Basaltos Sección Caicedo; Amarillo: Gabros y basalto de Hispania. Los valores para MORB enriquecido (E-MORB) y MORB normal (N-MORB) y Basaltos de islas oceánicas (OIB) son de (Sun y McDonough, 1989)

Tabla 11. Concentración de elementos traza en ppm para los basaltos de la Formación Barroso y el gabro de Hispania en este estudio. Los valores se presentan en ppm. Sombreado azul indicando las REE. TOT/C: % de Carbono total; TOT/S: % de Azufre total

Muestra	CVM006	CVM008	CVM015	CVM016	CVM018	CVM029	CVM030	CVM031
Sección	Altamira	Altamira	Salgar	Salgar	Salgar	Hispania	Hispania	Hispania
Sc	49	49	45	46	45	43	39	33
Ba	16	13	22	54	50	12	<1	6
Be	<1	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Co	44.3	43.5	44.6	43.1	42.4	44.1	59.7	67.4
Cs	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	0.1	<0.1



## Continuación

<b>Muestra</b>	<b>CVM046</b>	<b>CVM048</b>	<b>CVM066</b>	<b>CVM068</b>	<b>CVM071</b>	<b>CVM073</b>	<b>CVM083</b>
<b>Sección</b>	Caicedo	Caicedo	Umbría	Umbría	Umbría	Umbría	Concordia
<b>Sc</b>	46	44	45	46	44	44	46
<b>Ba</b>	112	313	27	26	33	29	48
<b>Be</b>	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
<b>Co</b>	34.9	38.6	41.5	44.2	43	45.4	46.4
<b>Cs</b>	<0.1	0.4	0.1	<0.1	<0.1	0.2	5.3
<b>Ga</b>	12.2	12.9	16.3	16.7	15.1	14.9	15
<b>Hf</b>	0.3	0.6	1.3	1.5	1.3	1.1	1.6
<b>Nb</b>	<0.1	1.3	4.4	5.3	4.3	4.3	4.8
<b>Rb</b>	2.9	7.2	1	1.1	1.6	2	6.8
<b>Sn</b>	<1	<1	1	<1	<1	<1	<1
<b>Sr</b>	115.2	270	104.1	104.5	104.5	127.5	113.7
<b>Ta</b>	<0.1	<0.1	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3
<b>Th</b>	<0.2	<0.2	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3
<b>U</b>	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
<b>V</b>	370	262	279	294	282	277	296
<b>W</b>	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
<b>Zr</b>	12.4	15.4	45.2	52.6	48.5	43.8	52.6
<b>Y</b>	11.2	9.7	14.9	17.1	16.4	15	18.2
<b>La</b>	1.3	1	3.6	4	3.4	3.4	4.2
<b>Ce</b>	1.8	2.6	8.3	9.7	9.1	8.4	9.7
<b>Pr</b>	0.32	0.47	1.23	1.36	1.32	1.19	1.4
<b>Nd</b>	1.9	2.7	6.1	7.5	6.6	5.6	7.3
<b>Sm</b>	0.7	1.05	1.78	2.21	1.89	1.55	2.16
<b>Eu</b>	0.31	0.44	0.67	0.74	0.71	0.69	0.78
<b>Gd</b>	1.09	1.53	2.48	2.93	2.62	2.42	2.96
<b>Tb</b>	0.25	0.29	0.44	0.49	0.47	0.43	0.47
<b>Dy</b>	1.68	1.87	2.8	3.13	3.11	2.87	3.21
<b>Ho</b>	0.41	0.4	0.6	0.68	0.6	0.62	0.67
<b>Er</b>	1.36	1.17	1.78	1.86	1.7	1.54	1.92
<b>Tm</b>	0.2	0.16	0.24	0.27	0.27	0.25	0.28
<b>Yb</b>	1.48	1.26	1.62	1.71	1.81	1.58	1.82
<b>Lu</b>	0.25	0.18	0.24	0.27	0.26	0.25	0.3
<b>Mo</b>	0.3	<0.1	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1
<b>Cu</b>	51.9	54.1	43.3	67.9	157.8	82.2	113.4
<b>Pb</b>	0.2	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2
<b>Zn</b>	22	214	42	45	42	29	23
<b>Ni</b>	11.6	65.5	59.4	62.2	58.6	35.5	31.7
<b>As</b>	<0.5	0.5	0.6	<0.5	<0.5	0.6	<0.5
<b>Cd</b>	<0.1	0.9	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
<b>Sb</b>	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
<b>Bi</b>	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
<b>Ag</b>	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
<b>Au</b>	<0.5	<0.5	2.9	3.3	2.5	3.3	2.5
<b>Hg</b>	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03
<b>Tl</b>	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
<b>Se</b>	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
<b>TOT/C</b>	0.03	0.03	<0.02	<0.02	0.03	<0.02	0.03
<b>TOT/S</b>	0.05	0.12	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02

### 3.3.2 Discusión

#### Origen del magmatismo

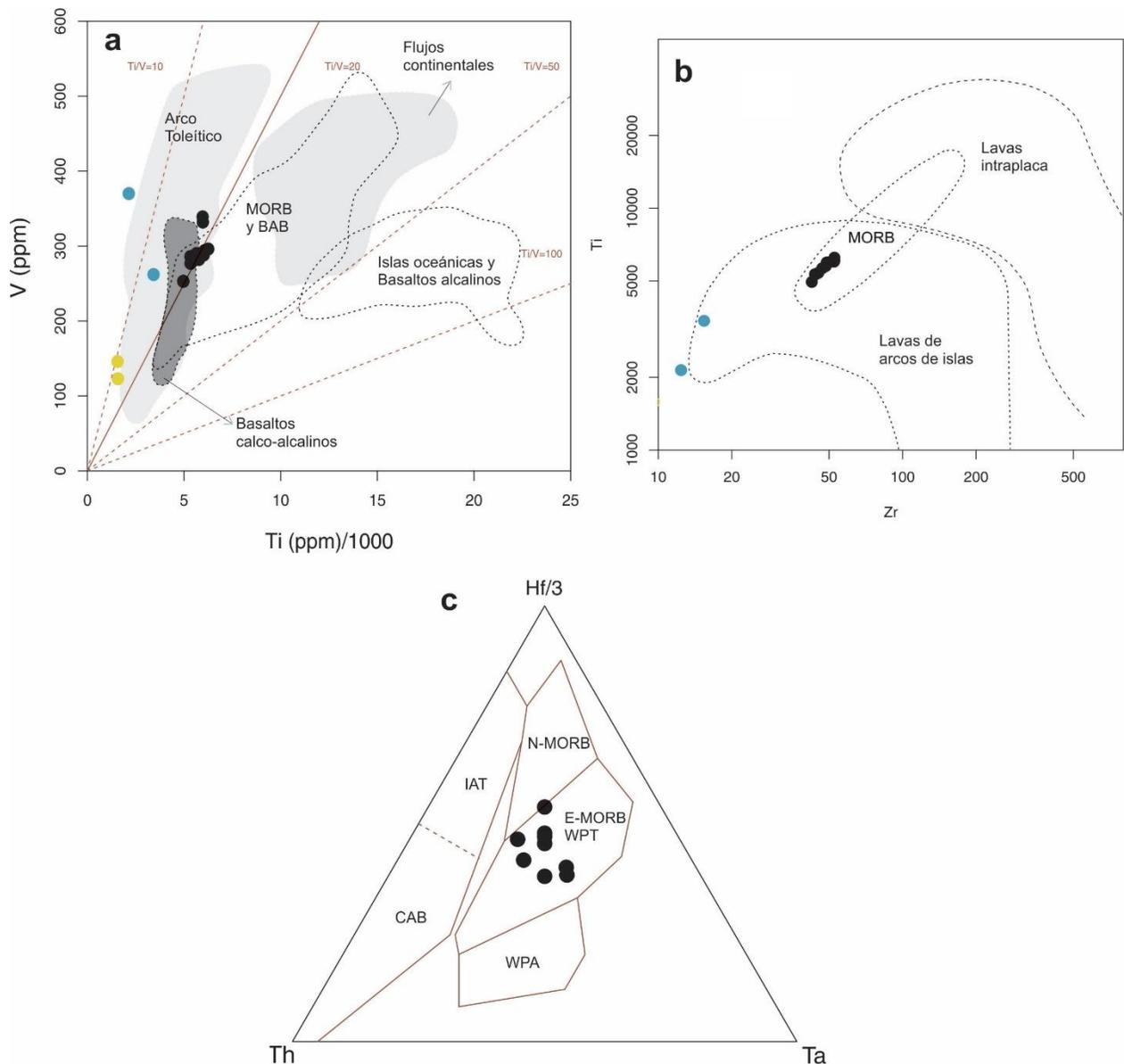
El análisis de los elementos traza sugiere que existen por lo menos 2 grupos geoquímicos de diferentes características. Los basaltos de la Formación Barroso propiamente (color negro en los diagramas Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36 y Figura 37) presentan características de MORB enriquecido (E-MORB) y/o plateau oceánico, y relaciones Zr/Nb entre 10 y 20, que corresponden a valores de basaltos influenciados por plumas (P-MORB) o de islas oceánicas (Wilson, 1989), siendo consistente con los diagramas de discriminación tectónica mostrando una afinidad de E-MORB (Figura 38c).

En el grupo 2, que incluye las secciones Caicedo e Hispania, el ambiente no es claramente definido, por un lado los diagramas discriminantes (Figura 38) sugieren un ambiente de arco de islas definido por bajas concentraciones de Ti y Zr, entre 2100 y 3400 ppm y 12 y 15 ppm respectivamente para los basaltos de Caicedo, y para el gabro de Hispania de 1550 ppm en Ti y entre 7 y 15 ppm para Zr, por lo que no son graficados (Figura 38b); sin embargo la componente de subducción no está bien determinada. Si bien existe un empobrecimiento en Nb, no se ve acompañado de una anomalía negativa en Ta y Ti o un enriquecimiento en Th, La y Ce respecto a Nb (Figura 36) (aunque puede ser influenciado por la cantidad de sedimento que entra en la trinchera), y existe un empobrecimiento en REE en vez de un enriquecimiento que es una característica más afín a estos ambientes (Figura 37).

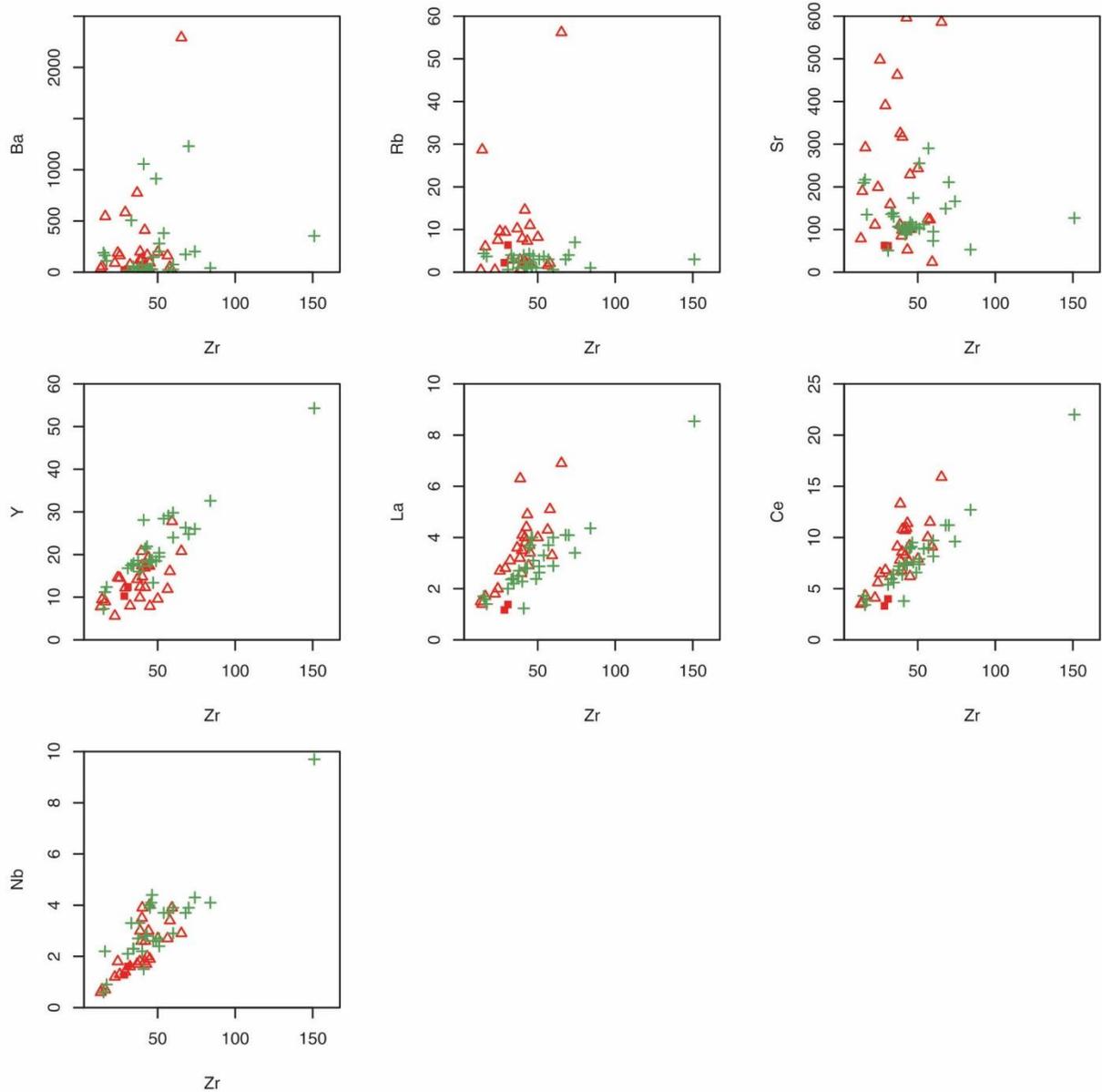
Los estudios realizados anteriormente en el sector norte de la Cordillera Occidental han dado lugar igualmente a una aparente división de las rocas volcánicas en dos grupos composicionales, un plateau oceánico y un arco volcánico sobreimpuesto a éste (Villagómez et al., 2011; Rodríguez y Arango, 2013; Zapata, 2013). Con el fin de evaluar la validez de estos grupos se integran los datos obtenidos en este estudio con las bases de datos geoquímicos existentes para la región norte de la Cordillera.

Los datos publicados por Rodríguez y Arango (2013) muestran una correlación positiva entre elementos inmóviles como Y, La, Ce y Nb, mientras que elementos como Ba, Rb y

Sr se muestran dispersos sugiriendo un mayor grado de alteración debido al efecto de fluidos metasomáticos que provocan movilización de los álcalis (Figura 39). La clasificación y serie magmática define la mayoría de las rocas como basaltos y andesitas basálticas de la serie toleítica con algunas muestras que se encuentran en la transición a la serie calcoalcalina (Figura 40).



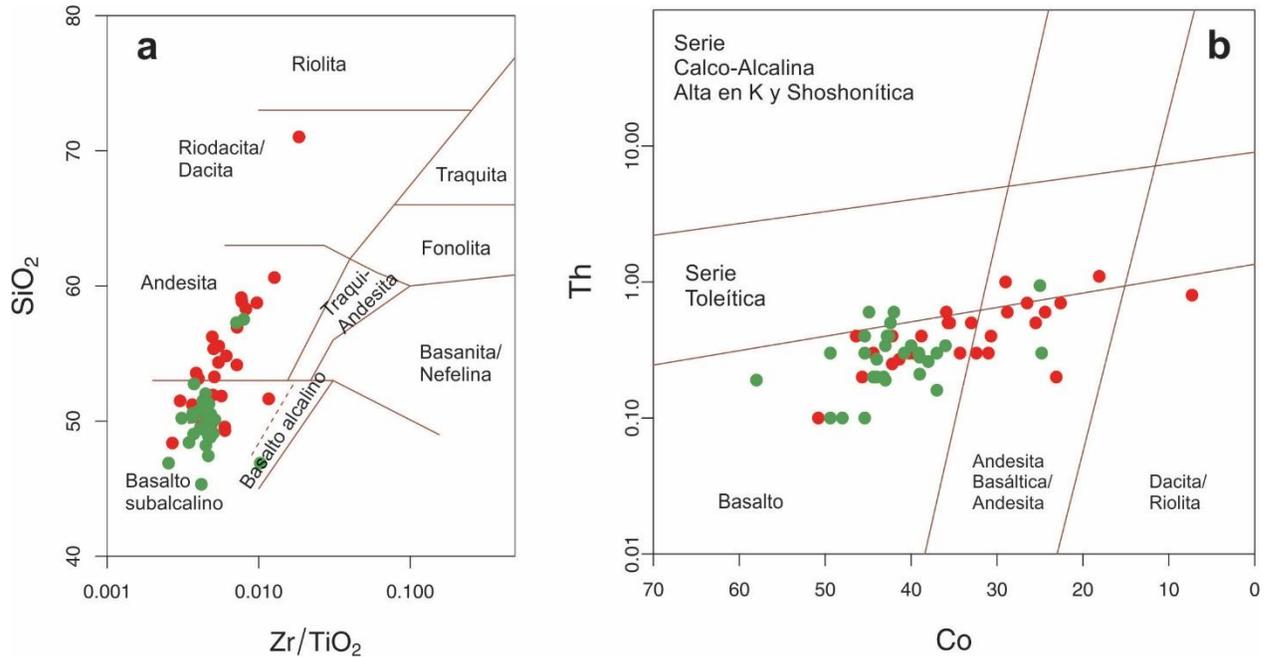
**Figura 38.** Diagramas de discriminación tectónica. a) (Shervais, 1982); b) (Pearce, 1982); c) (Wood et al., 1979). MORB: Basaltos de dorsal oceánica; BAB: Basaltos de Back Arc; CAB: Basaltos calco-alcalinos; IAT: Toleítas de arco de islas; WPT: Toleítas de Intraplaca; WPA: Basaltos alcalinos Intraplaca. En negro: Basaltos secciones Umbría, Concordia, Salgar, Altamira. Azul: Basaltos Sección Caicedo; Amarillo: Gabros y basalto de Hispania.



**Figura 39. Diagramas bivariantes de elementos traza respecto a Zr. Clasificación en color según Rodríguez y Arango (2013) Rojo: Formación Barroso (arco); Verde: diabasas de San José de Urama (MORB transicional: T-MORB)**

El análisis por secciones geográficas muestra que los basaltos reportados por Rodríguez y Arango (2013) en las secciones Altamira, Concordia y Uramita presentan patrones similares a los reportados en este estudio como basaltos de la Formación Barroso (Figura 41), mientras que en Caicedo, Manglar y ocasionalmente en Altamira, se observa además de la firma de plateau una señal mezclada en la que es común un enriquecimiento en Sr, empobrecimiento en Nb ( $\pm$ Ta), y ocasionalmente en Ti (Figura 41), sugiriendo efectivamente la influencia de un ambiente de subducción aun cuando los LREE se

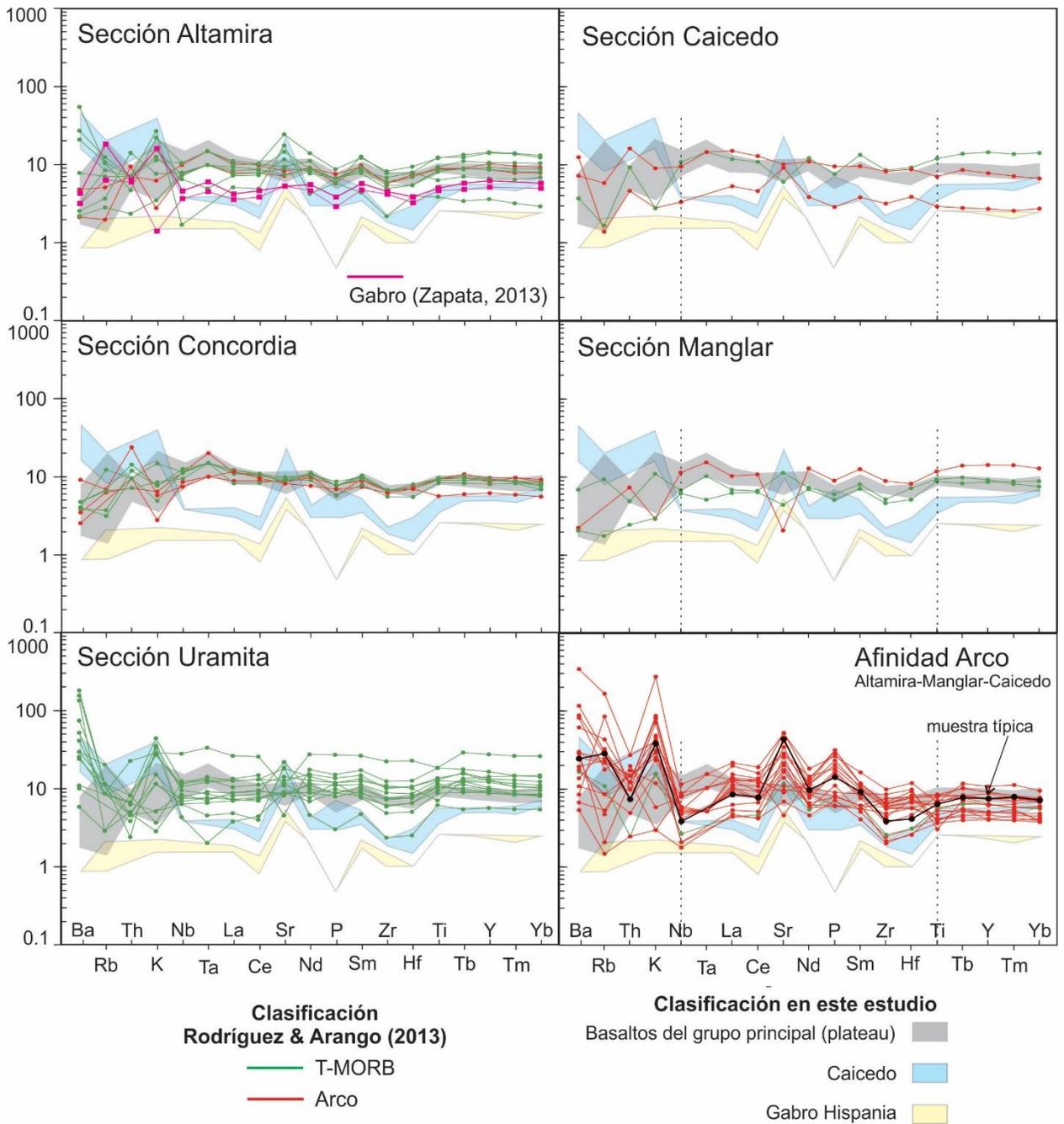
pueden encontrar levemente empobrecidos o enriquecidos con  $(La/Yb)_n$  entre 0.8 y 3.4 (Figura 42).



**Figura 40. Clasificación basada en elementos traza para las muestras de Rodríguez y Arango (2013).** a) Diagrama de clasificación  $Zr/TiO_2$  vs.  $SiO_2$  (Winchester & Floyd, 1977); b) Diagrama de discriminación  $Co$  vs.  $Th$  (Hastie et al., 2007). En colores se presenta la clasificación de Rodríguez y Arango (2013): En rojo: Formación Barroso (Arco); En verde: Diabasas de San José de Urama (MORB transicional: T-MORB).

La cercanía a unidades como el batolito de Sabanalarga y la tonalita de Buriticá (Figura 43), reconocidos como intrusivos asociados a un arco volcánico (Toussaint y Restrepo, 1994; González y Londoño, 1998; Weber et al., 2015), podrían ser los responsables de estas señales. La aparición de estas firmas geoquímicas está relacionada espacialmente en todos los casos con estas unidades, lo que sugiere una asociación con los intrusivos pudiendo ser la fase volcánica del arco como sugiere Rodríguez y Arango (2013) (Figura 43). Sin embargo, la clasificación textural propuesta también por los autores (*Formación Barroso*: basaltos andesíticos, amigdalares y tobas; *diabasas de San José de Urama-MORB transicional*: Lavas almohadilladas y diabasas), no es diagnóstica para la componente de arco, pues las unidades volcanoclásticas presentan afinidades tanto de arco como relacionadas a una meseta oceánica, por esto no pueden relacionarse únicamente con estadios finales en la construcción de un arco volcánico, pues ambientes

de plateau oceánico también pueden tener un componente de rocas piroclásticas (Safonova et al., 2015).



**Figura 41. Diagramas multielementos normalizados a condrito (Thompson, 1982) discriminado por secciones geográficas. Los datos son tomados de Rodríguez y Arango (2013) y siguen la clasificación dada por los autores para la Formación Barroso (Arco) y las diabasas de San José de Urama (plateau). En la sección Altamira se integran los datos de Zapata (2013) para el gabro de Altamira.**

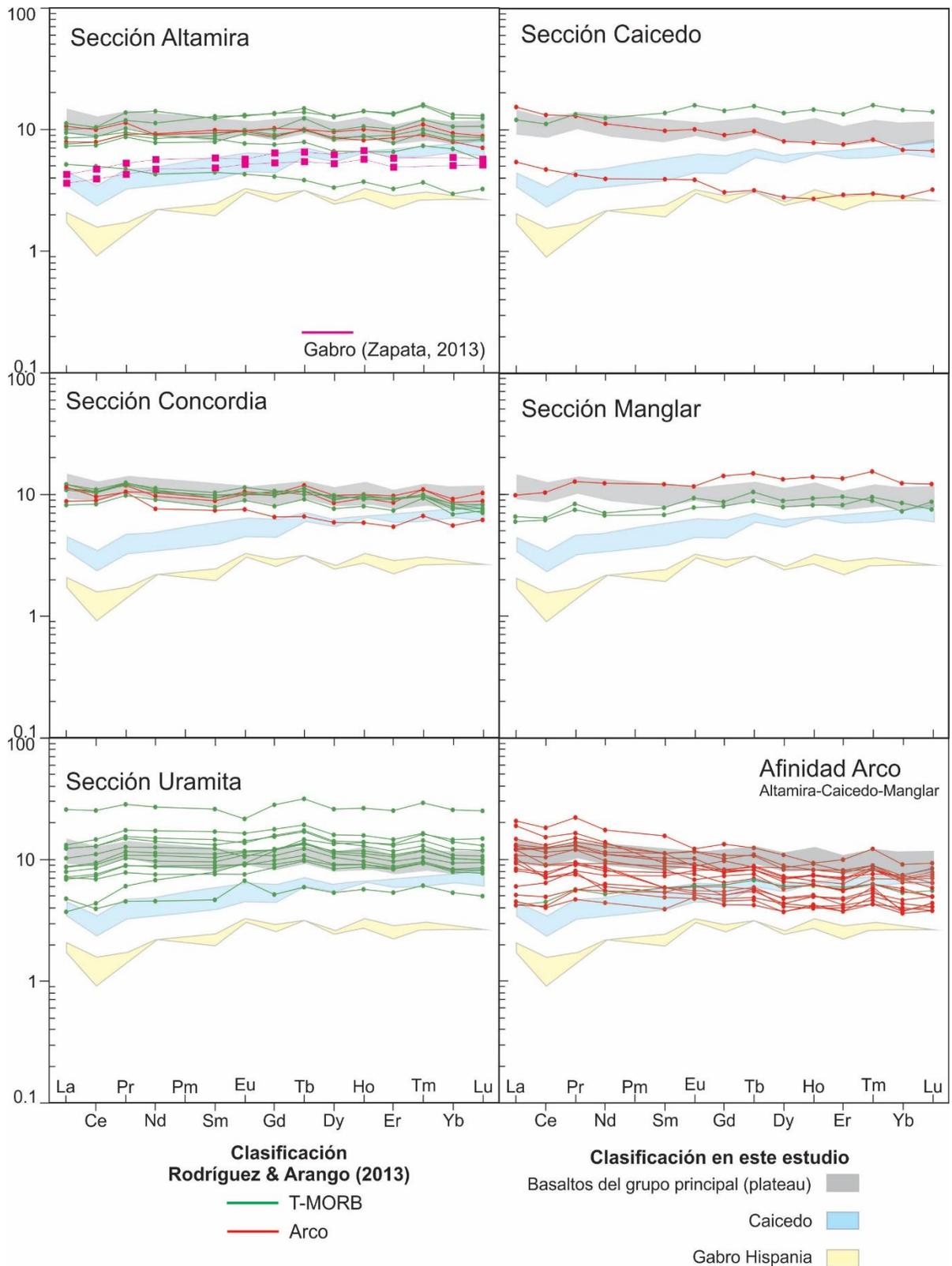


Figura 42. Patrones de REE normalizados a condrito (Nakamura, 1974) discriminado por secciones geográficas. Los datos son tomados de Rodríguez y Arango (2013) y siguen la clasificación dada por los autores para la Formación Barroso (Arco) y las diabasas de San José de Urama (plateau). En la sección Altamira se integran los datos de Zapata (2013) para el gabro de Altamira.

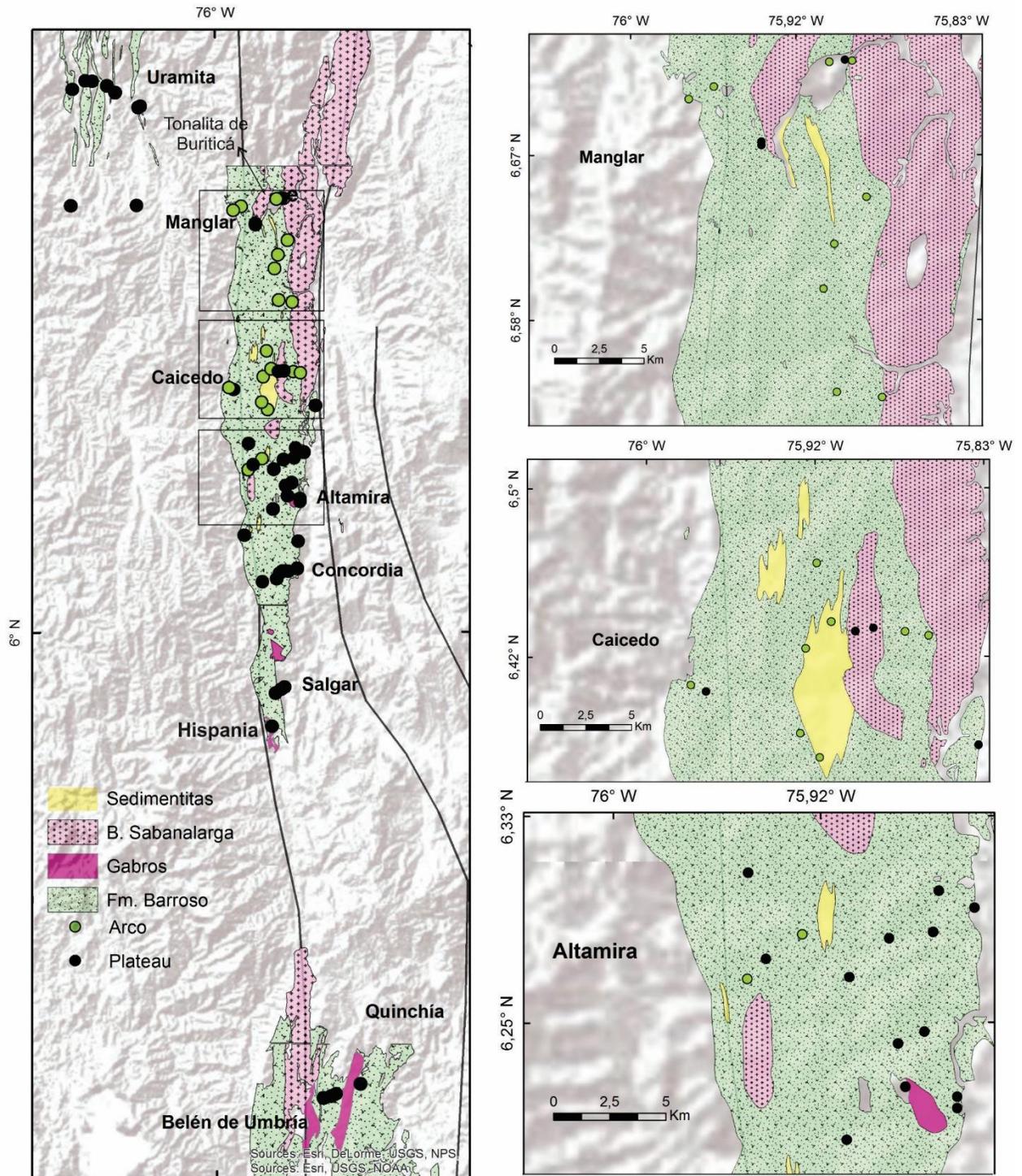


Figura 43. Distribución geoquímica de los datos publicados por Rodríguez y Arango (2013) para la Formación Barroso después de la re-interpretación por secciones geográficas realizada en este estudio. Los datos de las 13 muestras de basaltos obtenidos son incluidos.

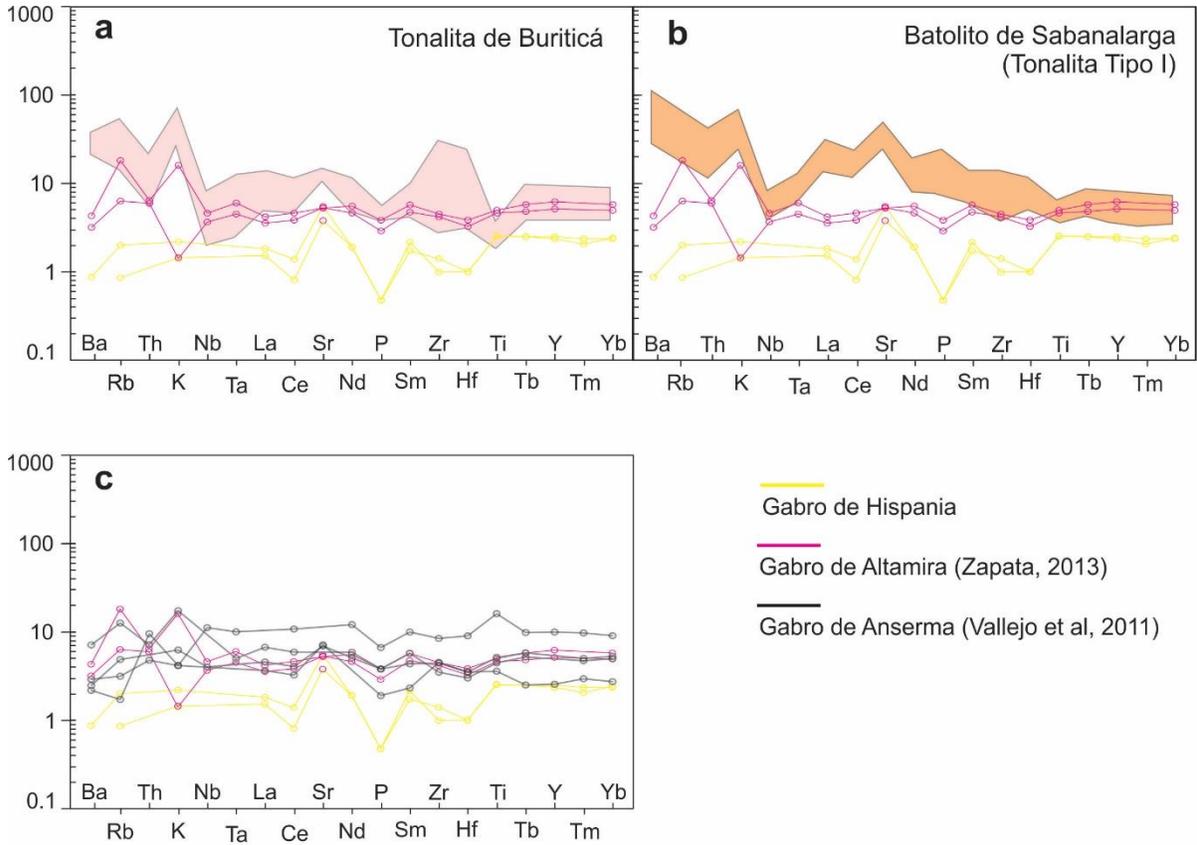
Los basaltos con firmas geoquímicas de arcos volcánicos en la zona norte del área de estudio (Caicedo y Manglar), exhiben una marcada dispersión en los datos, que en ocasiones puede ser indicativo de que las rocas han sido formadas en ambientes de transición, en donde más de un tipo de magma es necesario para explicar la génesis de esas rocas (Pearce, 1996). En el diagrama Zr/Th vs. La/Yb (Figura 45a) estos basaltos son agrupados en el campo de arcos de islas toleíticos, sin embargo en el diagrama Zr/Y vs. Nb/Y (Figura 45b), estas muestras presentan dispersión entre el arreglo de un manto enriquecido tipo Islandia y la transición a fuentes empobrecidas o con contaminación cortical (Fitton et al., 1997). La correlación genera un patrón alargado, pasando de una fuente mantélica enriquecida ( $\Delta Nb > 0$ ) con valores pequeños en La/Yb, a fuentes empobrecidas y/o contaminadas ( $\Delta Nb < 0$ ) con un consecuente enriquecimiento paulatino en LREE (Figura 45). Esto indicaría la mezcla de dos tipos de magmas para la generación de estas rocas.

La restricción geográfica de estos basaltos con firmas geoquímicas particulares que no son encontradas en las secciones al sur (Altamira, Concordia, Salgar, Umbría y unidades al sur de la Cordillera Occidental), podría tomarse como argumento para dividir una suite magmática diferente, siendo la Formación Barroso la unidad que es afín a toleítas tipo MORB de plateau oceánico, pues es la firma geoquímica mejor representada a lo largo de la Cordillera Occidental.

El gabro de Altamira, definido como una toleita de arco de islas (Zapata, 2013) asociado al arco de Altamira (Toussaint y Restrepo, 1976) o al arco Sabanalarga-Barroso (Rodríguez y Arango, 2013), no presenta características diagnósticas que lo relacionen con un ambiente de subducción como la tonalita de Buriticá y el batolito de Sabanalarga (Figura 44a y b), y es de hecho más afín con las rocas de plateau oceánico (Figura 45 y Figura 46) y unidades como el gabro de Anserma (Figura 44c) cuyos patrones geoquímicos fueron asociados a ambientes oceánicos tipo MORB (Vallejo et al., 2011).

Es posible que existan dos tipos de magmatismo contemporáneos: Tipo Buriticá-Sabanalarga (~100 Ma, U-Pb Weber et al., 2015) y Tipo Altamira (~89 Ma, U-Pb Zapata et al., 2013). Los basaltos en las secciones de Caicedo y Manglar pueden ser producto de la contaminación de ambas fuentes como lo sugiere el factor  $\Delta Nb$  (Figura 45c). Sin

embargo, no hay que descartar que existan varios bloques tectónicos de diferentes edades, asociados al Plateau Caribe que representarían más bien múltiples remanentes de diferentes estructuras ígneas con una fuente similar (Hoernle et al., 2004).



**Figura 44. Patrones multielementos normalizados a condrito (Thompson, 1982) del gabro de Altamira e Hispania comparado con: a) tonalita de Buriticá (rosado); b) batolito de Sabanalarga (naranja); c) el gabro de Anserma. Los datos geoquímicos de la tonalita de Buriticá y el batolito de Sabanalarga son tomados de Weber et al. 2015.**

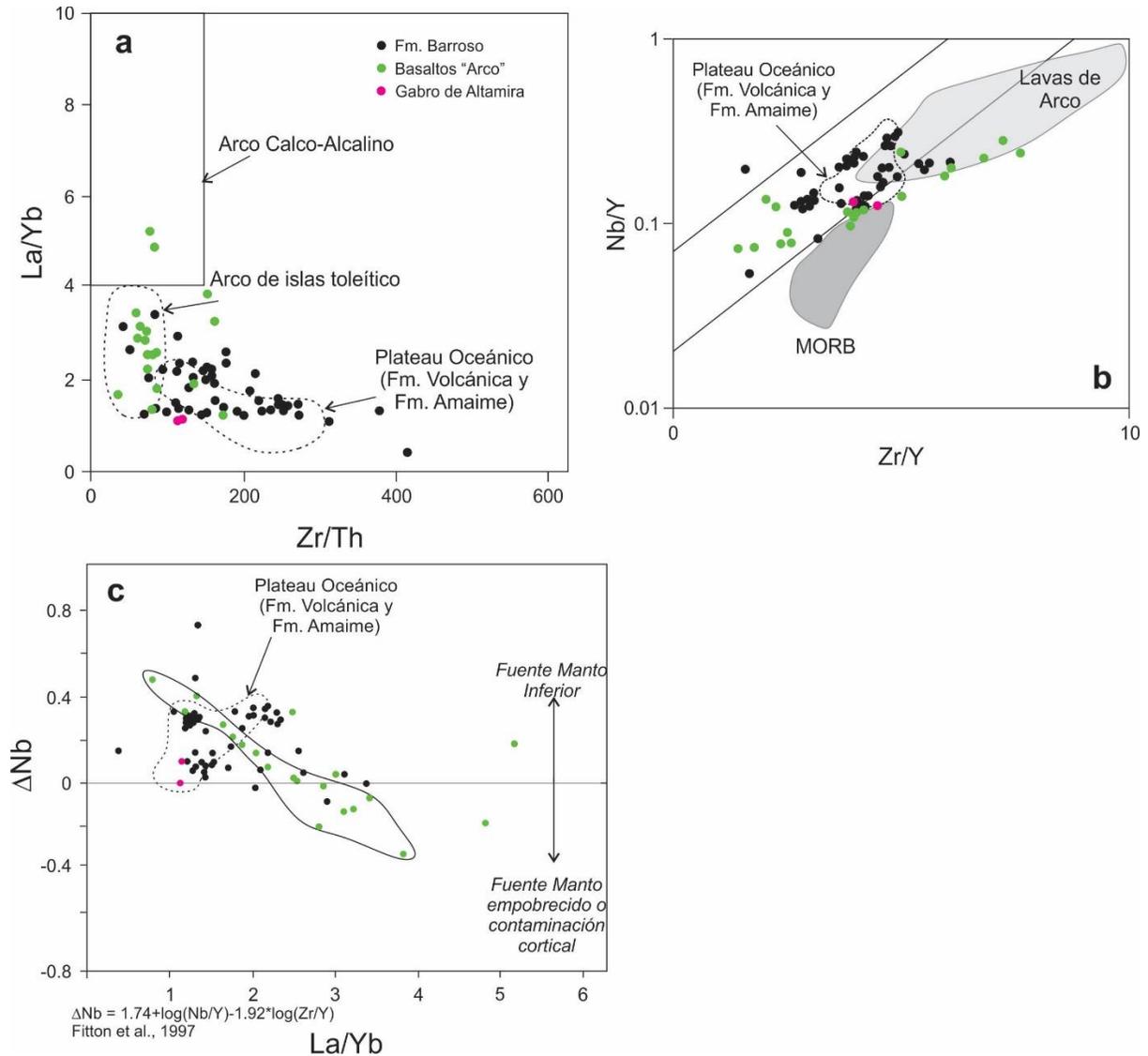
## **Relación con el Plateau del Caribe**

Es comúnmente aceptado que el Plateau Caribe tiene su origen en un punto en el Pacífico oriental desde el cual ha migrado hasta su posición actual dejando a su paso fragmentos que han sido acrecionados en los márgenes de Colombia, Venezuela, La Hispaniola y Jamaica (Kerr et al., 1997b; Sinton et al., 1998). A lo largo de estos fragmentos se encuentran relacionadas secuencias de arcos de islas y batolitos tonalíticos como el Batolito de Aruba (Whitte et al., 1999) o Batolito de Sabanalarga (Weber et al., 2015) de edades similares a las del primer pulso del plateau oceánico ~90 Ma.

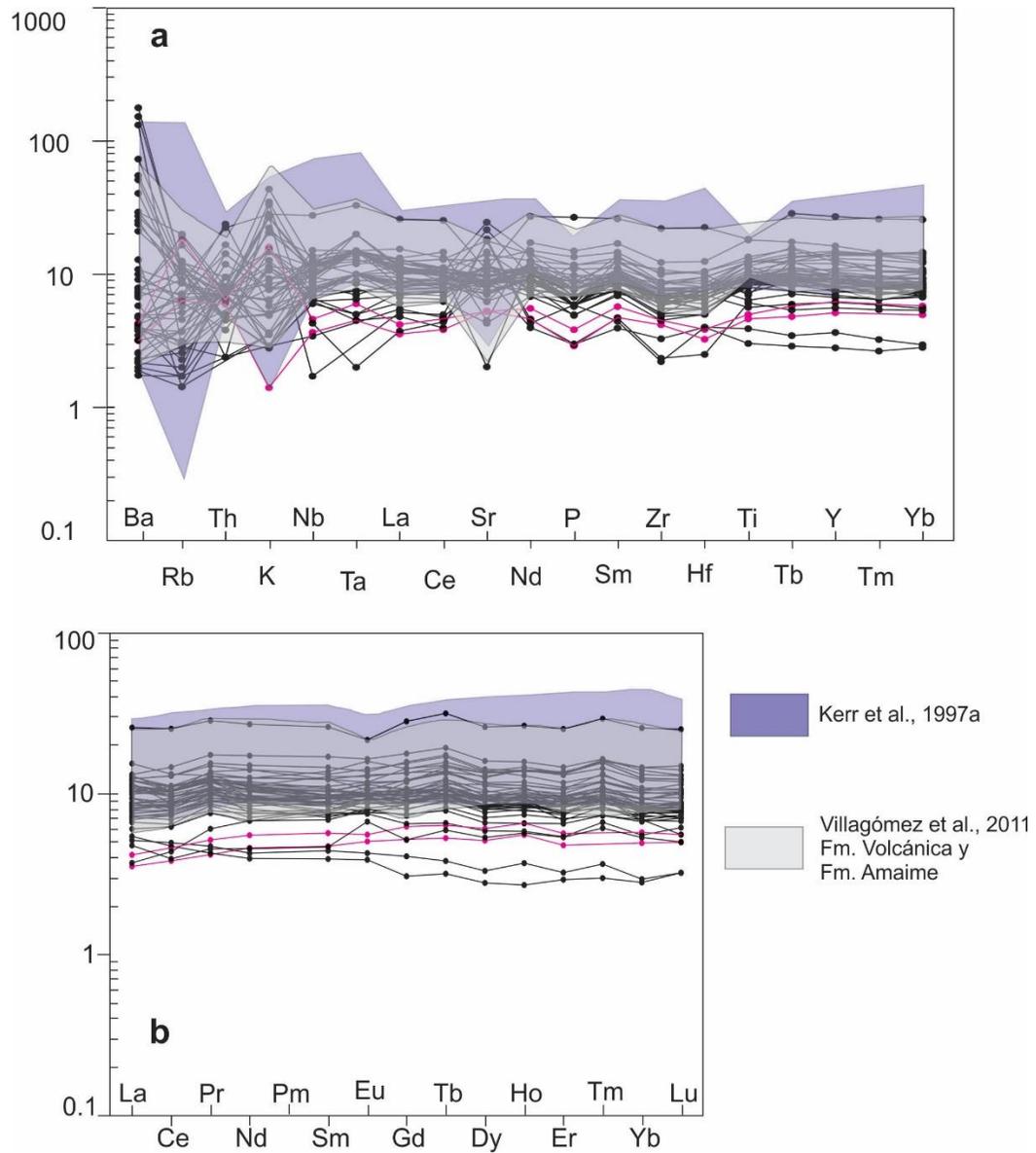
Al sur de la Cordillera Occidental colombiana la Formación Volcánica ha sido identificada como una parte acrecionada del Plateau Caribe y se ha sugerido que la Formación Barroso sería la contraparte al norte de esta unidad (Kerr et al., 1997a; Villagómez et al., 2011; Weber et al., 2015).

Los diagramas de discriminación tectónica (Figura 45) y las firmas geoquímicas en los patrones multielementos y de REE (Figura 46) muestran consistencia entre las rocas basálticas identificadas en este trabajo como Formación Barroso (Rodríguez y Arango 2013 y este estudio) y los datos obtenidos para la Formación Volcánica al sur de la cordillera confirmando las observaciones realizadas que ubicaban estas rocas en ambientes de formación oceánicos, enriquecidos, e influenciados por plumas. Igualmente, el gabro de Altamira se encuentra relacionado a estas unidades confirmando su afinidad a ambientes oceánicos más que a un arco volcánico y c (Figura 45).

La inclusión de las rocas de la Formación Barroso como parte del Plateau Caribe confirma el modelo que sugiere un ensamble de fragmentos de plateau adosados a la margen continental, y amplía la extensión lateral del Plateau Caribe al oriente en la Cordillera Occidental (Figura 1).



**Figura 45.** Diagramas de discriminación tectónica para el sector Norte de la Cordillera Occidental de Colombia: a) Zr/Th vs. La/Yb (Jolly et al., 2001) modificado de Villagómez et al, 2011. b) Zr/Y vs. Nb/Y (Fitton et al., 1997) modificado de Villagómez et al, 2011. c) La/Yb vs  $\Delta Nb$ .



**Figura 46. Firmas geoquímicas de los basaltos de la Formación Barroso y el gabro de Altamira (rosado) comparados con datos publicados para el Plateau Caribe al sur de la Cordillera Occidental a) Diagrama multielementos normalizado a condrito (Thompson, 1982). b) Patrones de REE normalizados a condrito (Nakamura, 1974).**

## Capítulo 4. Conclusiones

---

- Las edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  obtenidas en este estudio no son edades de cristalización para la Formación Barroso debido a las relaciones de campo intrusivas del gabro de Altamira (89 Ma) y las edades reportadas para otros intrusivos del Cretácico, además de edades relativas de fósiles de edad Barremiano-Albiano. Sin embargo, son representativas de un evento regional que afectó a la Formación Barroso y que es registrado por estos fechamientos  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ .
- El estudio de la mineralogía secundaria evidencia la influencia de sericita en los experimentos de espectrometría como una fase principal de alteración. La presencia incluso en pequeñas cantidades logra enmascarar la edad de cristalización reduciéndola hasta un 30%. Esto sugiere que las edades obtenidas son una superposición de la señal de la sericita sobre la plagioclasa, posible debido al bajo contenido de K en la roca (<0.1 ppm), y no un reseteamiento y/o re-homogenización del sistema K-Ar
- Unidades con edades de cristalización > 85 Ma asociadas al Plateau Caribe y los arcos volcánicos asociados, han reportado análogamente edades K-Ar y  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en un rango entre 58 y 70 Ma, similares a las obtenidas en esta tesis. Esto ha sido típicamente atribuido por otros autores a un evento tectonomagmático que resetea el sistema K-Ar en este tiempo. El rango de edades entre 63 y 67 Ma en este estudio, es consistente con modelos propuestos para la colisión del Plateau Caribe el sur de la Cordillera Occidental y Central en un rango entre 75-65 Ma (Villagómez & Spikings, 2013), y generan un primer reporte de la colisión en la parte Norte de la Cordillera Occidental, específicamente para la Formación Barroso.
- En un sentido metodológico, el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  responde a efectos termales y tectónicos, susceptibles de ser interpretada, bajo un estudio adecuado de cada roca y/o mineral y no como una generalización esquemática.

- La clasificación hecha por Rodríguez y Arango (2013) para la Formación Barroso, como rocas de textura basáltica porfídica, amigdalar y tobas generadas en un ambiente de arco volcánico, y la unidad de Diabasas de San José de Urama como basaltos almohadillados y flujos masivos que han sido derivados de un manto tipo T-MORB, es acertada al proponer dos grupos geoquímicos diferentes. Sin embargo, en este trabajo se considera que los basaltos de la Formación Barroso son los que provienen de una fuente mantélica primitiva con enriquecimiento tipo E-MORB y/o P-MORB, correlacionable con unidades al sur con las mismas características, como la Formación Volcánica y Formación Amaime, y son interpretados como parte acrecionada del Plateau Caribe.
- La inclusión de las rocas de la Formación Barroso como parte del Plateau Caribe reafirma el modelo que sugiere un ensamble de fragmentos de plateau adosados a la margen continental, y amplía la extensión lateral del Plateau Caribe al oriente en la Cordillera Occidental.
- Puede reconocerse restringido espacialmente (secciones Caicedo y Manglar) al batolito de Sabanalarga y tonalita de Buriticá, magmatismo basáltico con firmas geoquímicas que sugieren el desarrollo de una zona de subducción. La contaminación de la fuente de plateau oceánico con la fuente de los plutones de arco podría explicar las firmas geoquímicas mezcladas de subducción encontradas en estos basaltos, caracterizados con empobrecimientos de Nb, fuertes anomalías en negativas de Zr y Hf, ausencia de anomalías negativas de Ti, y LREE tanto empobrecidos como enriquecidos.
- El gabro de Altamira de 89 Ma (Zapata, 2013), con un origen asociado a arco volcánico (Toussaint y Restrepo, 1994; Zapata, 2013; Rodríguez y Arango, 2013), no presenta firmas características de un arco volcánico y se encuentra de hecho más asociado geoquímicamente a las rocas de plateau oceánico de la Formación Barroso, y otros cuerpos máficos que han sido relacionados con ambientes MORB (Vallejo et al., 2011).

## Lista de referencias bibliográficas

---

- Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), y Universidad de Caldas. (2011). Estudio integrado de los núcleos y registros obtenidos de los pozos someros (slim holes) perforados por la ANH. Inédito. In J. Gómez, y M. F. Almanza (Eds.), *Compilando la geología de Colombia: Una visión a 2015* (pp. 63-419). Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones especiales 33.
- Alvarez, E., y Gonzalez, H. (1978). *Geología y geoquímica del Cuadrángulo I-7 (Urrao). Mapa 1:100.000*. Medellín: Ingeominas 1761. 347p.
- Aspden, J. A., y McCourt, W. J. (1986). Mesozoic oceanic terranes in the central Andes of Colombia. *Geology*, 14(5), 415-418.
- Baksi, A. K. (2006). Guidelines for assessing the reliability of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  plateau ages: application to ages relevant to hotspot tracks. Recuperado el 19 de enero de 2016, de <http://www.mantleplumes.org/ArAr.html>
- Baksi, A. (2007). A quantitative tool for detecting alteration in undisturbed rocks and minerals—I: Water, chemical weathering, and atmospheric argon. *Geological Society of America Special Papers*, 430, 285-303.
- Barrero, D. (1978). Geology of the central Western Cordillera. west of Buga and Roldanillo, Colombia. En P. Spadea, y A. Espinosa, (1996) *Petrology and chemistry of late Cretaceous volcanic rocks from the southernmost segment of the Western Cordillera of Colombia (South America)*. *Journal of South American Sciences*, 9(1/2), 79-90.
- Boven, A., Pasteels, P., Punzalan, L. E., Liu, J., Luo, X., Zhang, W., . . . Hertogen, J. (2002).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronological constraints on the age and evolution of the Permo Triassic Emeishan Volcanic Province, Southwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(2), 157-175.
- Bustamante, A., Juliani, C., Hall, C. M., y Essene, E. J. (2011).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages from blueschists of the Jambaló region, Central Cordillera of Colombia: implications on the styles of accretion in the Northern Andes. *Geologica Acta*, 9(3), 351-362.
- Cawood, P. A., Kröner, A., Collins, W. J., Kusky, T. D., Mooney, W. D., y Winley, B. F. (2009). Accretionary orogens through Earth history. *Geological Society, London, Special Publications*, 318(1), 1-36.
- Cediel, F., Shaw, R. P., y Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean Block. In C. Bartolini, R. T. Buffler, y J. Blickwede, *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics*. AAPG Memoir 79, 815-848.
- Courtillot, V., Kravchinsky, V. A., Quidelleur, X., Renne, P., y Gladkochub, D. P. (2010). Preliminary dating of the Viluy traps (Eastern Siberia): Eruption at the time of Late Devonian extinction events? *Earth and Planetary Science Letters*, 300(3), 239–245.

- Estrada, J. J., Viana, R., y González, H. (2001). *Geología de la plancha 205 Chinchiná. Escala 1:100.000*. Ingeominas, Bogotá.
- Faure, G., y Mensing, T. M. (2005). *Isotopes: principles and applications*. Hoboken, New Jersey: John Wiley y Sons, Inc.
- Fitton, J. G., Saunders, A., Norry, M., Hardarson, B. S., y Taylor, R. N. (1997). Thermal and chemical structure of the Iceland plume. *Earth and Planetary Science Letters*, 153(3), 197-208 .
- Frey, M., y Robinson, D. (1999). *Low-Grade Metamorphism*. Oxford: Blacwell Science Ltd. 313p.
- Fuentes, F., Féraud, G., Aguirre, L., y Morata, D. (2005).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of volcanism and subsequent very low-grade metamorphism in a subsiding basin: example of the Cretaceous lava series from central Chile. *Chemical Geology*, 214(1), 157-177.
- Geoestudios. (2005). Complementación geológica, geoquímica y geofísica de la parte occidental de las planchas 130 Santa fe de Antioquia 146 Medellín Occidental. Escala 1:100.000. *Ingeominas, Bogotá*, 276 p.
- González, H. (2001). *Mapa Geológico de Antioquia, Escala 1:100.000. Memoria explicativa y mapa*. Ingeominas, Bogotá.
- González, H. (2010). Geoquímica, geocronología de las unidades litológicas asociadas al sistema de fallas Cauca-Romeral, Sector Centro-Sur. Tomo I. Proyecto Cordillera Occidental. *Ingeominas. Medellín*, 412 p.
- González, H., y Londoño, A. C. (1998). Edades K-Ar en Algunos Cuerpos Plutónicos del Graben Cauca-Patia y Norte de la Cordillera Occidental. *Geología Colombiana*, 23, 117-131.
- Grösser, J. R. (1989). Geotectonic evolution of the Western Cordillera of Colombia: New aspects from geochemical data on volcanic rocks. *Journal of South American Earth Sciences*, 2(4), 359-369.
- Hastie, A. R., Kerr, A., Pearce, J. A., y Mitchell, S. F. (2007). Classification of Altered Volcanic Island Arc Rocks using Immobile Trace Elements: Development of the Th<sup>Co</sup> Discrimination diagram. *Journal of Petrology*, 48(12), 2341-2357.
- Hoernle, K., Hauff, F., y van den Bogaard, P. (2004). 70 m.y. history (139–69 Ma) for the Caribbean large igneous province. *Geology*, 32(8), 697–700.
- Hofmann, C., Féraud, G., y Courtillot, V. (2000).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of mineral separates and whole rocks from the Western Ghats lava pile: further constraints on duration and age of the Deccan traps. *Earth and Planetary Science Letters*, 180(1), 13-27.
- Irvine, T. N., y Baragar, W. R. (1991). A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5), 523-548.
- Jolly, W. T., Lidiak, E. G., Dickin, A. P., y Wu, T. (2001). Secular Geochemistry of Central Puerto Rican Island Arc Lavas: Constraints on Mesozoic Tectonism in the Eastern Greater Antilles. *Journal of Petrology*, 42(12), 2197-2214.

- Jourdan, F., Féraud, G., Bertrand, H., Watkeys, M. K., y Renne, P. R. (2007). Distinct brief major events in the Karoo large igneous province clarified by new  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages on the Lesotho basalts. *Lithos*, 98(1), 195-209.
- Kerr, A. C., Marriner, G. F., Tarney, J., Nivia, A., Saunders, A. D., Thirlwall, M., y Sinton, C. W. (1997a). Cretaceous Basaltic Terranes in Western Colombia :Elemental , Chronological and Sr – Nd Isotopic Constraints on Petrogenesis. *Journal of Petrology*, 38(6), 677-702.
- Kerr, A. C., Tarney, J., Marriner, G. F., Nivia, A., Klaver, G. T., y Saunders, A. D. (1996). The geochemistry and tectonic setting of late Cretaceous Caribbean and Colombian volcanism. *Journal of South American Earth Sciences*, 9(1), 111-120.
- Kerr, A. C., Tarney, J., Marriner, G. F., Nivia, A., y Saunders, A. D. (1997). The Caribbean-Colombian Cretaceous igneous province: the internal anatomy of an oceanic plateau. *Large igneous provinces: Continental, oceanic, and planetary flood volcanism*, 123-144.
- Koopers, A., Staudigel, H., y Wijbrans, J. (2000). Dating crystalline groundmass separates of altered Cretaceous seamount basalts by the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  incremental heating technique. *Chemical Geology*, 166(1), 139–158.
- Kuiper, K. F., Deino, A., Hilgen, F. J., Krijgsman, W., Renne, P. R., y Wijbrans, J. R. (2008). Synchronizing the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and astronomical clocks of Earth history. *Science*, 320, 500-504.
- Lechler, P. J., y Desilets, M. O. (1987). A review of the use of loss on ignition as a measurement of total volatiles in whole-rock analysis. *Chemical Geology*, 63(3-4), 341-344.
- Masliwec, A. (1981). *The direct dating of ore minerals*. Tesis de Doctorado : Universidad de Toronto. 159p.
- McCourt, W. J., Aspden, J. A., y Brook, A. (1984). New geological and geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by multiple accretion. *Journal of Geological Society London*, 141(5), 831-845.
- McDougall, I., y Harrison, T. M. (1988). *Geochronology and thermochronology by the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  method*. New York: Oxford University.
- Middlemost, E. A. (1994). Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3), 215-224.
- Millward, D., Marriner, G. F., y Saunders, A. D. (1984). Cretaceous tholeiitic volcanic rocks from the Western Cordillera of Colombia. En P. Spadea, y A. Espinosa, (1996) *Petrology and chemistry of late Cretaceous volcanic rocks from the southernmost segment of the Western Cordillera of Colombia (South America)*. *Journal of South American Science*, 9(1/2), 79-90.
- Moreno-Sanchez, M., y Pardo-Trujillo, A. (2003). Stratigraphical and sedimentological constraints on western Colombia: Implications on the evolution of the Caribbean plate. En C. Bartolini, R. T. Buffler, y J. Blickwede (Eds.), *The Circum-Gulf of*

*Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics* (pp. 891-924). AAPG: Memoir 79.

- Nakamura, N. (1974). Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(5), 757-775.
- Nivia, A. (1996a). The Bolivar mafic-ultramafic complex, SW Colombia: The base of a obducted oceanic plateau. *Journal of South American Earth Sciences*, 9(1), 59-68.
- Nivia, A. (1996). El Complejo estructural Dagua, registro de deformación de la Provincia litosférica oceánica cretácica occidental en un prisma acrecionario. *Col. Geol. Mem*, 3, 54-67.
- Oliveros, V., Aguirre, L., Morata, D., Simonetti, A., Vergara, M., Belmar, M., y Calderón, S. (2008). Geochronology of very low-grade Mesozoic Andean metabasites; an approach through the K–Ar, 40Ar/39Ar and U–Pb LA-MC-ICP-MS methods. *Journal of the Geological Society, London*, 165(2), 579–584.
- Pearce, J. (1982). Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In R. S. Thorpe (Ed.), *Orogenic andesites and related rocks* (pp. 528-548). Chichester, England: John Wiley and Sons.
- Pearce, J. A. (1996). A user's guide to Basalt Discrimination Diagrams. In D. A. Wyman (Ed.), *Trace element Geochemistry of Volcanic Rocks: Application for massive sulphide exploration* (pp. 79-113). Geological Association of Canada: Short Courses Notes.
- Peccerillo, A., y Taylor, S. R. (1976). Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1), 63-81.
- Pichler, T., Ridley, W. I., y Nelson, E. (1999). Low-temperature alteration of dredged volcanics from the Southern Chile Ridge: additional information about early stages of seafloor weathering. *Marine Geology*, 159(1), 155–177.
- Pindell, J. L., y Barret, S. F. (1990). Geological Evolution of the Caribbean Region: A plate-tectonic perspective. En G. Dengo, y J. E. Case, *The Caribbean region: Boulder, Colorado, Geological Society of America*.
- Pindell, J., y Keenan, L. (2009). Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update. En K. James, M. A. Lorente, y J. Pindell, *The geology and evolution of the region between North and South America* (pág. (Eds)). Geological Society of London: Special Publication.
- Pindell, J., Kennan, L., Maresch, W. V., Stanek, K. P., Draper, G., y Higgs, R. (2005). Plate-kinematics and crustal dynamics of circum-Caribbean arc-continent interactions: Tectonic controls on basin development in Proto-Caribbean margins. *Geological Society of America. Special Paper*, 394, 7-52.
- Restrepo-Moreno, S. A., Foster, D. A., Stockli, D. F., y Parra-Sánchez, L. N. (2009). Long-term erosion and exhumation of the “Altiplano Antioqueño”, Northern Andes

- (Colombia) from apatite (U–Th)/He thermochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 278(1), 1-12.
- Rodríguez, G., y Arango, M. I. (2013). Formación Barroso: Arco volcánico toleítico y diabasas de San José de Urama: Un prisma acrecionario T-MORB en el segmento norte de la cordillera Occidental de Colombia. *Boletín Ciencias de la Tierra*, 33, 17-38 p.
- Safonova, I., Maruyama, S., Kojima, S., Komiya, T., Krivonogov, S., y Koshida, K. (2015). Recognizing OIB and MORB in accretionary complexes: A new approach based on ocean plate stratigraphy, petrology and geochemistry. *Gondwana Research*, *In press*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2015.06.013>.
- Schiffman, P., y Staudigel, H. (1994). Hydrothermal alteration of a seamount complex on La Palma, Canary Islands: Implications for metamorphism in accreted terranes. *Geology*, 22(2), 151-154.
- Serrano, L., Ferrari, L., López-Martínez, M., Petrone, C. M., y Jaramillo, C. (2011). An integrative geologic, geochronologic and geochemical study of Gorgona Island Colombia: Implications for the formation of the Caribbean Large Igneous Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 309(3), 324-336.
- Shervais, J. W. (1982). Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 59(1), 101 - 118.
- Sinton, C. W., Duncan, R. A., Storey, M., Lewis, J., y Estrada, J. J. (1998). An oceanic flood basalt province within the Caribbean plate. *Earth and Planetary Science Letters*, 155(3), 221–235.
- Souza, H. A., Espinosa, A., y Delaloye, M. (1984). K-Ar ages of basic rocks in the Patia valley, southwest Colombia. *Tectonophysics*, 107(1-2), 135-145.
- Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W., y Beate, B. (2015). The geological history of northwestern South America: From Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290 – 75 Ma). *Gondwana Research*, 27(1), 95-139.
- Steiger, R. H., y Jäger, E. (1977). Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmo-chronology. *Earth Planetary Science Letters*, 36(3), 359-362.
- Sun, S., y McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1), 313-345.
- Thompson, R. N. (1982). Magmatism of the British Tertiary Volcanic Province. *Scottish Journal of Geology*, 18(1), 49-107.
- Toussaint, F. J., y Restrepo, J. J. (1976). Modelos orogénicos y tectónica de placas de los andes colombianos. *Boletín de Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional. Medellín*, 1, 1-47.

- Toussaint, F. J., y Restrepo, J. J. (1978). Edad K/Ar de dos rocas básicas del flanco noroccidental de la Cordillera Central. *Boletín de Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional de Colombia. Medellín*, 15, 1p.
- Toussaint, J. F., y Restrepo, J. J. (1994). The Colombian Andes During Cretaceous Times. En J. A. Salfity (Ed.), *Cretaceous Tectonics of the Andes*. Vieweg, 61-100p.
- Turrin, B. D., Muffler, L. P., Clynne, M. A., y Champion, D. E. (2007). Robust  $24 \pm 6$  ka  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age of a low-potassium tholeiitic basalt in the Lassen region of NE California. *Quaternary Research*, 68(1), 96-110.
- Vallejo, C., Spikings, R. A., Luzieux, L., Winkler, W., Chew, D., y Page, L. (2006). The early interaction between the Caribbean Plateau and the NW South American Plate. *Terra Nova*, 18(4), 264-269.
- Vallejo, D. F., Salazar, A. F., y Toro, L. M. (2011). Petrografía y geoquímica de las rocas intrusivas aflorantes entre los municipios de Mistrató y Belén de Umbría (Departamento de Risaralda, Cordillera Occidental Colombiana). *Boletín de Geología*, 33(2), 47-57.
- Verati, C., y Jourdan, F. (2013). Modelling effect of sericitization of plagioclase on the  $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$  and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronometers: implication for dating basaltic rocks and mineral deposits. *Geological Society, London, Special Publications*, 378(1), 155-174.
- Villagómez, D., y Spikings, R. (2013). Thermochronology and tectonics of the Central and Western Cordilleras of Colombia: Early Cretaceous–Tertiary evolution of the Northern Andes. *Lithos*, 160-161, 229-249.
- Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W., y Beltrán, A. (2011). Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia. *Lithos*, 125(3-4), 875-896.
- Vinasco, C., y Cordani, U. (2012). Reactivation episodes of the Romeral fault system in the northwestern part of Central Andes, Colombia, through  $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$  and k-ar results. *Boletín Ciencias de la Tierra*, 32, 111-124.
- Weber, M., Gómez-Tapias, J., Cardona, A., Duarte, E., Pardo-Trujillo, A., y Valencia, V. (2015). Geochemistry of the Santa Fe Batholith and Buriticá Tonalite in NW Colombia: Evidence of subduction initiation beneath the Colombian Caribbean Plateau. *Journal of South American Earth Sciences*, 62, 257-274.
- Whitte, R. V., Tarney, J., Kerr, A. c., Saunders, A. D., Kempton, P. D., Pringle, M. S., y Klaver, G. T. (1999). Modification of an oceanic plateau, Aruba, Dutch Caribbean: Implications for the generation of continental crust. *Lithos*, 46(1), 43–68.
- Wilson, B. M. (1989). *Igneous Petrogenesis A Global Tectonic Approach* (Novena ed.). London: Springer Science y Business Media.
- Winchester, J. A., y Floyd, P. A. (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20, 325-343.

- Wood, D., Joron, J. L., y Treuil, M. (1979). A re-appraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings. *Earth and Planetary Science Letters*, 45(2), 326-336.
- Zapata, J. P. (2013). *Análisis petrográfico, geoquímico y geocronológico de la secuencia de rocas básicas de Altamira*. Tesis de Pregrado. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. 65p.

## Anexos

### CVM 006 Roca total

	id	Potencia láser	$^{39}\text{Ar} \times 10^{-6}$	F $^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}_K$	t (Ma)	% $^{40}\text{Ar}^*$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_K$	$t_i$ (Ma)	$t_p$ (Ma)	$t_c$ (Ma)
1 <sup>er</sup> exp	a	0.3	0.836	0.0335	$-14.8 \pm 10.2$	$-70.5 \pm 49.5$	-3.6	285.22	24.50			†
	b	0.6	1.385	0.0556	$0.4 \pm 5.3$	$1.8 \pm 24.6$	0.2	296.13	21.31			†
	c	1.2	2.692	0.1080	$8.2 \pm 3.3$	$38.2 \pm 15.2$	10.3	329.29	22.44			†
	d	2.0	3.160	0.1262	$6.2 \pm 3.0$	$28.6 \pm 13.9$	9.7	327.29	29.52			
	e	3.2	2.920	0.1162	$12.7 \pm 1.5$	$58.4 \pm 7.0$	47.7	564.97	34.30			‡
	f	4.5	3.298	0.1319	$12.7 \pm 1.2$	$58.7 \pm 5.2$	68.3	933.13	26.77			‡
	g	5.9	3.501	0.1377	$12.4 \pm 1.3$	$57.3 \pm 6.1$	45.6	543.24	53.93			‡
	h	7.5	2.499	0.0989	$12.9 \pm 1.9$	$59.4 \pm 8.7$	55.1	658.16	43.24			‡
	i	10.0	5.115	0.1920	$10.4 \pm 1.6$	$48.3 \pm 7.2$	31.5	431.63	128.97			
										<b><math>43.2 \pm 4.1</math></b>	<b><math>58.3 \pm 3.2</math></b>	
2 <sup>do</sup> exp	j	0.50	1.008	0.0585	$-1.4 \pm 8.1$	$-6.4 \pm 38.1$	-0.6	293.84	14.80			†
	k	1.20	2.372	0.1374	$1.18 \pm 4.1$	$5.5 \pm 19.3$	1.5	300.02	16.77			†
	l	1.80	2.037	0.1172	$15.0 \pm 2.7$	$68.9 \pm 12.0$	25.8	398.38	26.72			‡
	m	2.50	1.496	0.0856	$13.6 \pm 3.3$	$62.6 \pm 15.1$	36.1	462.33	34.63			‡
	n	3.30	1.336	0.0766	$17.9 \pm 3.4$	$82.0 \pm 15.2$	73.7	1122.82	33.23			‡
	o	4.30	2.031	0.117	$14.0 \pm 2.0$	$64.4 \pm 8.9$	67.6	910.91	24.25			‡
	p	5.50	2.492	0.1416	$14.0 \pm 2.3$	$64.2 \pm 10.5$	59.3	726.69	46.08			‡
	q	8.00	2.671	0.1481	$13.6 \pm 2.4$	$62.8 \pm 11.0$	42.4	513.10	85.46			‡
	r	10.00	2.235	0.1181	$16.9 \pm 3.1$	$77.3 \pm 14.0$	43.8	526.07	165.24			‡
										<b><math>55.3 \pm 5.2</math></b>	<b><math>67.4 \pm 4.5</math></b>	<b><math>58.1 \pm 4.8</math></b>

Id: Identificación de la fracción individual en la isocrona; F  $^{39}\text{Ar}$ : Fracción de Argón liberado; t: Edad de la fracción individual;  $^{40}\text{Ar}^*$ : Argón radiogénico;  $t_i$ : Edad integrada;  $t_p$ : Edad de meseta;  $t_c$ : Edad de isocrona calculada a partir de la combinación de los dos experimentos realizados; ‡: Fracción utilizada para el cálculo de la edad de meseta; †: Fracción ignorada para el cálculo de la isocrona;  $J = (2.597 \pm 0.007) \times 10^{-3}$

## CVM 008 Roca total

	id	Potencia láser	$^{39}\text{Ar} \times 10^{-6}$	F $^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}_K$	t (Ma)	% $^{40}\text{Ar}^*$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}_{Ca}/^{39}\text{Ar}_K$	$t_i$ (Ma)	$t_p$ (Ma)	$t_c$ (Ma)
1 <sup>er</sup> exp	a	0.8	10.336	0.3426	$2.5 \pm 1.3$	$11.9 \pm 6.1$	5.4	312.42	4.34			†
	b	1.5	3.405	0.1116	$1.7 \pm 2.2$	$8.1 \pm 10.1$	3.0	304.55	21.45			†
	c	2.0	1.553	0.0502	$7.9 \pm 5.9$	$36.7 \pm 27.3$	10.5	330.30	44.42			‡
	d	2.6	0.903	0.0286	$15.5 \pm 7.0$	$71.3 \pm 31.6$	33.9	447.25	75.46			‡
	e	3.7	1.548	0.0494	$15.8 \pm 3.3$	$72.6 \pm 14.9$	55.6	665.24	64.71			‡
	f	5.0	4.467	0.1454	$14.1 \pm 1.4$	$64.7 \pm 6.3$	56.4	678.06	32.92			‡
	g	5.9	3.431	0.1108	$11.9 \pm 1.9$	$55.0 \pm 8.5$	31.2	429.30	45.32			‡
	h	7.0	1.342	0.0420	$15.2 \pm 5.0$	$69.6 \pm 22.5$	28.0	410.49	93.24			‡
	i	9.6	4.104	0.1194	$12.6 \pm 3.1$	$58.0 \pm 13.9$	18.6	362.83	218.36			‡
										<b><math>38.0 \pm 4.0</math></b>	<b><math>61.80 \pm 4.4</math></b>	
2 <sup>do</sup> exp	j	0.4	0.302	0.0185	$-32.5 \pm 25.6$	$-158.9 \pm 130.9$	-7.1	275.84	28.86			†
	k	0.8	1.069	0.0653	$6.3 \pm 8.0$	$29.2 \pm 36.7$	3.9	307.49	31.69			‡
	l	1.3	0.914	0.0554	$11.9 \pm 5.7$	$54.9 \pm 26.0$	15.3	348.89	44.44			‡
	m	2.5	1.903	0.1136	$15.6 \pm 4.4$	$71.6 \pm 19.8$	23.6	386.58	68.56			‡
	n	4.2	3.801	0.2306	$15.5 \pm 1.1$	$71.2 \pm 5.1$	66.0	868.47	44.12			
	o	6.2	5.996	0.3620	$13.1 \pm 1.0$	$60.3 \pm 4.6$	37.5	472.67	51.16			
	p	8.0	1.047	0.0600	$24.9 \pm 5.6$	$113.0 \pm 24.6$	45.0	537.10	135.12			
	q	10.0	1.795	0.0945	$18.8 \pm 4.8$	$85.9 \pm 21.3$	27.6	408.31	284.64			†
										<b><math>63.6 \pm 5.5</math></b>	<b><math>59.7 \pm 14.5</math></b>	†
3 <sup>er</sup> exp	r	0.6	0.372	0.0306	$35.4 \pm 32.9$	$158.5 \pm 141.3$	7.5	319.40	27.58			†‡
	s	1.6	1.801	0.1475	$15.5 \pm 4.1$	$71.2 \pm 18.5$	15.5	349.60	34.25			†‡
	t	2.6	1.117	0.0896	$19.2 \pm 4.0$	$87.9 \pm 17.7$	26.0	399.29	68.89			†‡
	u	3.6	1.046	0.0839	$22.7 \pm 3.7$	$103.4 \pm 16.2$	68.8	946.53	68.44			†‡
	w	4.6	1.538	0.1257	$19.7 \pm 2.2$	$90.0 \pm 9.9$	81.3	1577.46	38.11			†‡
	x	5.6	2.779	0.2264	$11.9 \pm 1.5$	$55.0 \pm 6.7$	40.5	496.70	43.35			

y	7.0	1.924	0.1527	22.0 ± 3.1	100.1 ± 13.6	49.5	584.88	84.57		†	‡
z	12.0	1.934	0.1435	22.8 ± 3.7	103.9 ± 16.5	34.3	449.92	199.06		†	‡
									<b>86.0 ± 7.0</b>	<b>93.3 ± 5.9</b>	<b>67.5 ± 3.7</b>

### CVM 015 Roca total

	id	Potencia láser	<sup>39</sup> Ar x 10 <sup>-6</sup>	F <sup>39</sup> Ar	<sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar <sub>K</sub>	t (Ma)	% <sup>40</sup> Ar*	<sup>40</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar	<sup>37</sup> Ar <sub>Ca</sub> / <sup>39</sup> Ar <sub>K</sub>	t <sub>i</sub> (Ma)	t <sub>p</sub> (Ma)	t <sub>c</sub> (Ma)	
1 <sup>er</sup> exp	a	0.3	0.62	0.0144	-3.0 ± 13.0	-14.3 ± 60.9	-0.8	293.28	53.73				†
	b	0.6	1.55	0.0368	-33.2 ± 9.6	-162.9 ± 49.2	-9.8	269.09	27.84				†
	c	1.2	3.71	0.0887	1.3 ± 2.5	6.1 ± 11.8	1.3	299.50	17.01				†
	d	2.0	3.68	0.0878	13.9 ± 1.3	63.9 ± 6.0	39.5	488.60	20.39				
	e	3.5	5.34	0.1274	10.2 ± 1.4	46.9 ± 6.4	35.6	458.76	23.60				
	f	5.0	6.59	0.1578	10.9 ± 0.9	50.4 ± 4.1	65.2	850.00	16.09				
	g	7.0	7.14	0.1689	13.0 ± 1.2	60.0 ± 5.6	49.6	585.88	35.34				
	h	10.0	13.57	0.3180	12.2 ± 0.6	56.2 ± 2.7	52.9	627.53	51.53				
										<b>42.4 ± 3.0</b>	--		
2 <sup>do</sup> exp	i	0.5	1.37	0.0374	-4.0 ± 8.2	-18.9 ± 39.0	-1.5	291.03	24.69				†
	j	1.0	3.19	0.0875	8.5 ± 1.9	39.4 ± 8.5	18.1	360.93	11.19				†
	k	1.8	3.24	0.0887	10.1 ± 1.8	46.7 ± 8.0	55.4	662.18	12.70				†
	l	2.8	2.51	0.0687	12.3 ± 1.5	56.7 ± 6.8	90.6	3139.81	15.76				†
	m	4.0	6.18	0.1691	8.8 ± 0.5	40.9 ± 2.4	70.0	985.74	14.06				†
	n	5.5	6.77	0.1833	11.6 ± 0.9	53.4 ± 3.9	59.0	719.88	29.66				‡
	o	7.5	3.90	0.1059	10.3 ± 0.9	47.5 ± 4.3	69.7	974.56	27.69				‡
	p	10.0	9.66	0.2593	10.6 ± 0.5	49.1 ± 2.2	66.4	879.05	43.48				‡
										<b>45.3 ± 2.2</b>	<b>49.7 ± 1.7</b>	<b>45.1 ± 3.1</b>	

Id: Identificación de la fracción individual en la isocrona; F <sup>39</sup>Ar: Fracción de Argón liberado; t: Edad de la fracción individual; <sup>40</sup>Ar\*: Argón radiogénico; t<sub>i</sub>: Edad integrada; t<sub>p</sub>: Edad de meseta; t<sub>c</sub>: Edad de isocrona calculada a partir de la combinación de los dos experimentos realizados; ‡: Fracción utilizada para el cálculo de la edad de meseta; †: Fracción ignorada para el cálculo de la isocrona; J = (2.597 ± 0.007) × 10<sup>-3</sup>

## CVM 048 matriz

	id	Potencia láser	$^{39}\text{Ar} \times 10^{-6}$	F $^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}_K$	t (Ma)	% $^{40}\text{Ar}^*$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_K$	$t_i$ (Ma)	$t_p$ (Ma)	$t_c$ (Ma)
1 <sup>er</sup> exp	a	0.5	1.42	0.0146	26.3 ± 4.0	111.4 ± 16.6	20.47	371.56	3.64			†
	b	1.0	3.52	0.0363	17.0 ± 2.5	72.8 ± 10.5	32.07	435.02	6.26			†
	c	1.5	3.05	0.0314	20.0 ± 1.9	83.2 ± 7.8	38.84	483.17	5.69			†
	d	2.2	2.41	0.0249	24.8 ± 1.9	105.2 ± 7.7	55.07	657.76	2.00			†
	e	3.2	10.71	0.1106	15.9 ± 2.9	68.3 ± 11.2	72.52	1075.50	1.50			
	f	4.5	18.26	0.1886	13.9 ± 0.2	59.6 ± 1.0	90.45	3093.55	1.09			
	g	6.0	27.49	0.2838	18.0 ± 0.3	76.8 ± 1.3	82.04	1645.37	2.45			
	h	8.0	11.38	0.1167	24.5 ± 0.8	103.7 ± 3.1	67.88	920.06	12.30			
	i	10.0	18.94	0.1931	27.5 ± 0.5	116.0 ± 2.1	69.59	971.78	21.10			
										<b>84.7 ± 1.6</b>	--	
2 <sup>do</sup> exp	j	1.0	5.82	0.0450	13.5 ± 1.9	57.9 ± 7.9	14.16	344.25	5.41			†
	k	2.0	9.76	0.0755	24.0 ± 1.1	101.9 ± 4.7	41.09	501.58	3.20			†
	l	3.0	41.65	0.3224	17.8 ± 0.2	76.1 ± 0.9	83.20	1759.40	1.51			
	m	4.2	28.37	0.2196	15.7 ± 0.2	67.1 ± 0.8	81.18	1570.00	2.21			
	n	5.2	9.49	0.0730	20.8 ± 0.6	88.7 ± 2.6	68.69	943.76	11.65			
	o	6.3	9.31	0.0715	21.8 ± 0.7	92.8 ± 3.1	64.86	840.88	13.83			
	p	9.0	25.25	0.1931	27.6 ± 0.5	116.7 ± 2.1	67.25	902.27	20.97			
										<b>85.3 ± 0.98</b>	--	<b>53.6 ± 3.0</b>

Id: Identificación de la fracción individual en la isocrona; F  $^{39}\text{Ar}$ : Fracción de Argón liberado; t: Edad de la fracción individual;  $^{40}\text{Ar}^*$ : Argón radiogénico;  $t_i$ : Edad integrada;  $t_p$ : Edad de meseta;  $t_c$ : Edad de isocrona calculada a partir de la combinación de los dos experimentos realizados; †: Fracción utilizada para el cálculo de la edad de meseta; ‡: Fracción ignorada para el cálculo de la isocrona;  $J = (2.419 \pm 0.001) \times 10^{-3}$ .

## CVM 048 plagioclasa

	id	Potencia láser	$^{39}\text{Ar} \times 10^{-6}$	F $^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}_K$	t (Ma)	% $^{40}\text{Ar}^*$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_K$	$t_i$ (Ma)	$t_p$ (Ma)	$t_c$ (Ma)
1 <sup>er</sup> exp	a	0.7	0.834	0.0654	103.9 ± 11.7	404.5 ± 40.7	41.0	500.93	0.00			
	b	1.5	1.195	0.0937	95.1 ± 6.6	373.6 ± 23.4	47.2	559.10	0.68			
	c	2.6	4.219	0.3310	21.1 ± 1.2	89.6 ± 5.2	62.7	792.40	0.00			β
	d	3.3	1.235	0.0969	32.7 ± 4.1	137.3 ± 16.7	76.2	1239.42	0.10			β
	e	4.3	0.623	0.0488	30.3 ± 5.7	127.5 ± 23.1	44.0	527.29	0.05			β
	f	5.5	0.632	0.0496	97.6 ± 8.9	382.5 ± 31.3	60.0	738.07	1.08			
	g	7.0	0.766	0.0600	153.1 ± 9.2	568.4 ± 29.3	55.8	668.67	1.29			
	h	10.0	3.248	0.2546	74.6 ± 2.8	299.2 ± 10.5	55.1	658.44	1.01			
										<b>245.8 ± 6.0</b>	--	
2 <sup>do</sup> exp	i	0.6	0.350	0.0210	178.0 ± 26.1	646.0 ± 79.5	40.8	499.47	0.01			
	j	1.4	1.448	0.0868	96.0 ± 7.5	376.9 ± 26.6	34.4	450.09	0.26			β
	k	2.1	1.312	0.0786	67.3 ± 6.2	272.0 ± 23.1	39.5	488.07	0.51			β
	l	3.0	2.623	0.1572	28.5 ± 2.3	120.2 ± 9.4	57.2	690.03	0.24			β
	m	4.1	2.950	0.1769	20.8 ± 1.4	88.4 ± 5.8	87.3	2322.79	0.00			β
	n	6.0	2.019	0.1210	31.0 ± 2.6	130.3 ± 10.5	57.6	697.38	0.30			β
	o	8.0	1.221	0.0731	89.7 ± 5.4	354.1 ± 19.4	50.5	597.30	0.88			
	p	12.5	1.641	0.0983	152.9 ± 8.6	567.6 ± 27.5	55.7	666.78	1.01			
q	15.0	3.123	0.1871	109.4 ± 3.9	423.7 ± 13.3	56.6	681.29	1.05				
										<b>287.1 ± 6.3</b>	--	<b>77.5 ± 5.9</b>

Id: Identificación de la fracción individual en la isocrona; F  $^{39}\text{Ar}$ : Fracción de Argón liberado; t: Edad de la fracción individual;  $^{40}\text{Ar}^*$ : Argón radiogénico;  $t_i$ : Edad integrada;  $t_p$ : Edad de meseta;  $t_c$ : Edad de isocrona calculada a partir de la combinación de los dos experimentos realizados; J: Fracción utilizada para el cálculo de la edad de meseta; β: Fracción usada para el cálculo de la isocrona;  $J = (2.419 \pm 0.001) \times 10^{-3}$ .

## CVM 052 Roca Total

	Potencia láser	$^{39}\text{Ar} \times 10^{-6}$	$F^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}_K$	t (Ma)	% $^{40}\text{Ar}^*$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_K$	$t_i$ (Ma)	$t_p$ (Ma)	$t_c$ (Ma)
1 <sup>er</sup> exp	a	0.5	0.323	0.0369	$-290.1 \pm 50.1$	$-2526.5 \pm 953.1$	-11.8	264.33	55.30		
	b	1.0	0.869	0.0986	$10.5 \pm 11.5$	$48.6 \pm 52.4$	2.3	302.38	66.85		
	c	1.5	1.005	0.1114	$-31.8 \pm 21.6$	$-155.4 \pm 110.1$	-6.8	276.69	105.23		
	d	2.2	0.633	0.0653	$-67.1 \pm 28.6$	$-345.2 \pm 162.2$	-6.4	277.76	227.18		
	e	3.0	0.329	0.0333	$-157.1 \pm 63.6$	$-946.0 \pm 503.2$	-8.1	273.28	259.97		
	f	4.5	0.645	0.0728	$-11.8 \pm 15.7$	$-55.9 \pm 75.8$	-3.3	285.98	74.90		
	g	5.9	0.828	0.0872	$-5.9 \pm 8.3$	$-27.9 \pm 39.3$	-2.2	289.16	191.50		
	h	7.5	0.715	0.0725	$22.3 \pm 8.6$	$101.7 \pm 38.0$	9.0	324.54	258.07		
	i	10.0	4.095	0.4220	$-45.4 \pm 7.6$	$-226.1 \pm 40.6$	-11.0	266.33	228.62		
									$-206.9 \pm 35.6$	--	--

Id: Identificación de la fracción individual en la isocrona;  $F^{39}\text{Ar}$ : Fracción de Argón liberado; t: Edad de la fracción individual;  $^{40}\text{Ar}^*$ : Argón radiogénico;  $t_i$ : Edad integrada;  $t_p$ : Edad de meseta;  $t_c$ : Edad de isocrona calculada a partir de la combinación de los experimentos realizados;  $J = (2.597 \pm 0.007) \times 10^{-3}$

## CVM 054 plagioclasa

	id	Potencia láser	$^{39}\text{Ar} \times 10^{-6}$	$F^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}_K$	t (Ma)	% $^{40}\text{Ar}^*$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_K$	$t_i$ (Ma)	$t_p$ (Ma)	$t_c$ (Ma)
1 <sup>er</sup> exp	a	1.0	31.229	0.3562	$12.8 \pm 1.0$	$55.2 \pm 4.0$	16.9	355.52	1.20			
	b	2.0	12.916	0.1471	$3.9 \pm 1.1$	$16.9 \pm 4.9$	12.0	335.67	3.04			
	c	3.5	20.573	0.2323	$0.1 \pm 0.5$	$0.2 \pm 2.3$	0.3	296.38	16.89			$\beta$
	d	5.0	12.943	0.1463	$1.2 \pm 0.6$	$5.0 \pm 2.7$	8.5	322.96	14.90			$\beta$
	e	7.0	4.438	0.0496	$-0.1 \pm 1.2$	$-0.3 \pm 5.4$	-0.4	294.35	33.01			$\beta$
	f	9.0	6.098	0.0685	$8.2 \pm 1.8$	$35.2 \pm 7.6$	19.4	366.71	24.18			
									$25.5 \pm 2.1$	--		
2 <sup>do</sup> exp	g	0.6	5.748	0.1764	$33.4 \pm 3.2$	$140.2 \pm 12.7$	24.9	393.24	1.51			
	h	1.5	3.943	0.1208	$18.5 \pm 2.6$	$79.1 \pm 10.9$	27.1	405.52	3.85			

i	2.5	5.704	0.1723	4.6 ± 1.1	19.7 ± 4.9	16.6	354.45	25.97		
j	4.0	8.589	0.2605	1.7 ± 0.8	7.5 ± 3.3	14.6	346.00	19.70	β	
k	5.6	1.856	0.0558	3.1 ± 2.2	13.4 ± 9.4	17.8	359.46	33.00	β	
l	10.0	7.055	0.2143	6.6 ± 1.1	28.6 ± 4.7	24.2	389.99	16.96		
								<b>47.1 ± 3.31</b>	--	<b>15.7 ± 5.2</b>

Id: Identificación de la fracción individual en la isocrona; F <sup>39</sup>Ar: Fracción de Argón liberado; t: Edad de la fracción individual; <sup>40</sup>Ar\*: Argón radiogénico; t<sub>i</sub>: Edad integrada; t<sub>p</sub>: Edad de meseta; t<sub>c</sub>: Edad de isocrona calculada a partir de la combinación de; J: Fracción utilizada para el cálculo de la edad de meseta; β: Fracción usada para el cálculo de la isocrona; J = (2.419 ± 0.001) × 10<sup>-3</sup>.

### CVM 067 Roca total

	id	Potencia láser	<sup>39</sup> Ar x 10 <sup>-6</sup>	F <sup>39</sup> Ar	<sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar <sub>K</sub>	t (Ma)	% <sup>40</sup> Ar*	<sup>40</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar	<sup>37</sup> Ar <sub>Ca</sub> / <sup>39</sup> Ar <sub>K</sub>	t <sub>i</sub> (Ma)	t <sub>p</sub> (Ma)	t <sub>c</sub> (Ma)	
1 <sup>er</sup> exp	a	0.3	0.907	0.0415	-2.3 ± 12.4	-10.8 ± 58.5	-1.5	291.29	6.41				†
	b	0.6	0.664	0.0298	4.3 ± 14.3	20.1 ± 66.2	1.5	300.11	36.03				†
	c	1.2	3.924	0.1777	8.4 ± 1.6	38.9 ± 7.2	18.1	360.94	23.36				†
	d	1.8	2.034	0.0910	20.5 ± 3.8	93.7 ± 17.0	30.6	425.81	42.00				†
	e	2.8	2.820	0.1262	12.4 ± 2.5	57.1 ± 11.1	21.4	375.72	42.26				
	f	3.8	1.850	0.0827	13.4 ± 2.6	61.7 ± 11.6	40.3	495.07	44.18				
	g	4.8	2.133	0.0943	7.1 ± 3.0	33.0 ± 13.8	15.4	349.17	61.13				
	h	5.8	1.876	0.0809	14.2 ± 3.4	65.3 ± 15.4	16.1	352.35	101.04				
	i	6.8	1.041	0.0441	11.7 ± 8.0	54.1 ± 36.3	11.8	334.87	129.69				
	j	10.0	5.555	0.2316	8.4 ± 2.1	39.1 ± 9.4	9.2	325.29	158.07				
								<b>47.9 ± 5.7</b>	--				
2 <sup>do</sup> exp	k	0.7	1.332	0.0769	-3.5 ± 6.6	-16.3 ± 31.1	-1.5	291.27	26.21				†
	l	1.3	1.748	0.1001	13.4 ± 3.3	61.9 ± 14.8	25.2	394.91	38.54				‡
	m	2.0	1.747	0.0996	15.2 ± 3.2	70.0 ± 14.4	26.8	403.73	46.86				‡
	n	3.2	2.476	0.1412	14.6 ± 2.6	67.0 ± 11.5	31.8	433.52	45.67				‡
	o	4.5	1.712	0.0975	15.8 ± 2.4	72.5 ± 10.6	52.9	627.70	47.75				‡

p	6.0	2.709	0.1500	15.6 ± 3.0	71.4 ± 13.3	21.9	378.51	93.82		↓	
q	8.0	1.927	0.1037	16.6 ± 4.6	76.1 ± 20.4	16.7	354.68	140.30		↓	
r	10.0	4.346	0.2309	10.7 ± 2.9	49.6 ± 13.3	12.7	338.29	162.19		↓	
									<b>58.7 ± 6.0</b>	<b>66.7 ± 5.0</b>	<b>63.6 ± 8.7</b>

Id: Identificación de la fracción individual en la isocrona; F <sup>39</sup>Ar: Fracción de Argón liberado; t: Edad de la fracción individual; <sup>40</sup>Ar\*: Argón radiogénico; t<sub>i</sub>: Edad integrada; t<sub>p</sub>: Edad de meseta; t<sub>c</sub>: Edad de isocrona calculada a partir de la combinación de los dos experimentos realizados; ↓: Fracción utilizada para el cálculo de la edad de meseta; t: Fracción ignorada para el cálculo de la isocrona; J= (2.597± 0.007)<sub>x</sub>10<sup>-3</sup>

### CVM 083 Roca total

	id	Potencia láser	<sup>39</sup> Ar x 10 <sup>-6</sup>	F <sup>39</sup> Ar	<sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar <sub>K</sub>	t (Ma)	% <sup>40</sup> Ar*	<sup>40</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar	<sup>37</sup> Ar <sub>Ca</sub> / <sup>39</sup> Ar <sub>K</sub>	t <sub>i</sub> (Ma)	t <sub>p</sub> (Ma)	t <sub>c</sub> (Ma)	
1 <sup>er</sup> exp	a	0.5	2.568	0.0368	-80.9 ± 8.1	-425.4 ± 48.3	-15.2	256.43	9.86				
	b	1.0	4.633	0.0664	7.9 ± 1.6	36.4 ± 7.3	11.0	331.97	8.00				
	c	1.5	5.385	0.0772	9.6 ± 1.4	44.5 ± 6.4	17.1	356.34	9.21				
	d	2.2	7.256	0.1038	14.6 ± 1.2	67.0 ± 5.6	26.2	400.60	11.00				β
	e	3.2	11.076	0.1581	14.6 ± 0.6	67.0 ± 2.7	46.5	551.94	15.02				β
	f	4.5	11.963	0.1705	13.9 ± 0.6	63.9 ± 2.5	54.3	647.13	17.02				β
	g	6.0	5.575	0.0790	13.2 ± 1.0	60.8 ± 4.6	38.9	483.44	26.03				β
	h	8.0	8.185	0.1159	13.2 ± 1.2	60.8 ± 5.5	34.3	449.42	26.94				β
	i	10.0	13.518	0.1922	11.7 ± 0.9	54.2 ± 4.3	32.4	437.25	21.19				
									<b>43.1 ± 2.6</b>	<b>64.6 ± 1.6</b>	<b>63.4 ± 3.8</b>		
2 <sup>do</sup> exp	j	0.7	4.759	0.0684	-34.1 ± 5.0	-167.3 ± 25.5	-13.2	261.09	8.87				
	k	1.4	8.155	0.1172	12.6 ± 1.5	58.1 ± 6.6	24.5	391.32	9.52				
	l	2.3	13.004	0.1870	13.8 ± 0.7	63.6 ± 3.2	48.6	575.18	9.05				
	m	3.5	15.079	0.2158	16.4 ± 0.5	75.2 ± 2.4	71.5	1037.08	16.57				
	n	4.6	6.441	0.0918	15.3 ± 0.8	70.2 ± 3.6	70.3	995.41	23.11				
	o	6.7	10.384	0.1478	14.2 ± 0.8	65.4 ± 3.5	54.2	644.68	24.70				
	p	10.0	12.077	0.1720	13.0 ± 0.8	59.7 ± 3.7	47.3	561.05	24.16				
									<b>50.8 ± 2.3</b>	--	--		