







# Nuevas edades, correlación y ciclo magmático de plutones de arco insular en el norte de la Cordillera Occidental de Colombia

Gabriel Rodríguez-García<sup>1\*</sup> ; Tomás Correa-Restrepo<sup>1</sup>   
Francy H. Ortiz-Párraga<sup>1</sup> ; Mónica J. Tobón-Mazo<sup>1</sup>   
Milton G. Obando-Quintero<sup>1</sup> ; Juan R. Peláez-Gaviria<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Grupo de Estudios Geológicos Especiales, Servicio Geológico Colombiano, Medellín, Colombia.  
(\* ) grodriguez@sgc.gov.co; tcorrea@sgc.gov.co; fortiz@sgc.gov.co; monicatobon@gmail.com;  
mobando@sgc.gov.co; jpelaez@sgc.gov.co

**Material Suplementario:** este artículo contiene Material Suplementario (Tablas TS1, TS2 y TS3).

## Resumen

Este trabajo presenta nuevos datos de petrografía y geocronología U-Pb en circón en cuerpos plutónicos con afinidad química de arco de islas, localizados en el sector nororiental de la Cordillera Occidental de Colombia, constituidos por tonalitas, cuarzodioritas, dioritas, gabros, plagiogranitos y andesitas de las unidades llamadas tonalita de Santa Fe de Antioquia, tonalita de Buriticá, tonalita de La Noque y andesita de Guarco, algunas de las cuales contienen xenolitos máficos de gabro y están atravesados por diques andesíticos y basálticos. Estos plutones arrojaron edades U-Pb en circón entre  $100,9 \pm 0,85$  Ma y  $78,4 \pm 6,4$  Ma. Junto a los plutones aflora la granulita de Pantanillo, compuesta por anfibolitas, granulitas y granofels, que arrojó edades de cristalización entre  $91,6 \pm 6,5$  Ma y  $84,71 \pm 0,60$  Ma, y se interpreta como el residuo granulítico del arco insular. Los resultados indican que el ciclo de cristalización del arco insular se inició *ca.*  $100,9 \pm 0,85$  Ma y finalizó a *ca.*  $78,4 \pm 6,4$  Ma; que los plutones fueron emplazados en rocas volcánicas con afinidad de *plateau* oceánico y vulcanitas del mismo arco. El análisis de distribución espacial de las edades de cristalización de los plutones, junto con el análisis de la profundidad relativa de generación de fundidos, muestra que las edades se hacen más jóvenes hacia el este del arco y que la profundidad de fusión de estos plutones orientales fue mayor, sugiriendo que la subducción ocurrió en sentido oeste-este.

**Palabras clave:** Cretácico; Arco volcánico; Arco Barroso-Sabanalarga; Andes del Norte.

## New ages, correlation and magmatic cycle of island arc plutons in the north of the Western Cordillera of Colombia

### Abstract

This paper presents new petrographic and U-Pb zircon geochronological data for plutonic bodies with island arc chemical affinity, located in the northeastern sector of the Western Cordillera of Colombia and composed by tonalites, quartz diorites, diorites, gabbros, plagiogranites and andesites from the Santa Fe de Antioquia Tonalite, Buriticá Tonalite, La Noque Tonalite and the Guarco Andesite, some of which contain mafic gabbro xenoliths and are cut by andesitic and basaltic dikes. These plutons yielded zircon U-Pb ages between  $100.9 \pm 0.85$  Ma and  $78.4 \pm 6.4$  Ma. Next to the plutons, the Pantanillo Granulite crops out, composed of amphibolites, granulites,

Forma de citar: Rodríguez-García, G.; Correa-Restrepo, T.; Ortiz-Párraga, F.H.; Tobón-Mazo, M.J.; Obando-Quintero, M.G.; Peláez-Gaviria, J.R. (2023). Nuevas edades, correlación y ciclo magmático de plutones de arco insular en el norte de la Cordillera Occidental de Colombia. *Boletín de Geología*, 45(2), 15-33. <https://doi.org/10.18273/revbol.v45n2-2023001>

and granofels that yielded crystallization ages between  $91.6 \pm 6.5$  Ma and  $84.71 \pm 0.60$  Ma, and is interpreted as the granulitic residue of the island arc. The results indicate that the crystallization cycle of the island arc began at ca.  $100.9 \pm 0.85$  Ma and ended at ca.  $78.4 \pm 6.4$  Ma. The arc plutons were emplaced in volcanic rocks with oceanic plateau affinity and vulcanites of the same arc. The spatial distribution analysis of the crystallization ages of the plutons, together with an analysis of the relative depth of melt generation shows that the ages become younger towards the east of the arc and that the depth of melting of these eastern plutons was greater, suggesting that subduction occurred in a west-to-east direction.

**Keywords:** Cretaceous; Volcanic Arc; Barroso-Sabanalarga Arc; Northern Andes.

## Introducción

En la Cordillera Occidental de Colombia, la falta de información geocronológica y geoquímica no había permitido separar las unidades de diferentes ambientes geotectónicos, las cuales habían sido agrupadas dentro de grandes unidades (p.e. Formación Barroso y Grupo Diabásico; [González, 2001](#); [Nivia, 2001](#)). Los primeros estudios en proponer la separación de unidades en función del contexto tectónico fueron realizados por [Rodríguez et al. \(2012a\)](#) y [Rodríguez y Arango \(2013\)](#). Trabajos más recientes separan rocas de arcos de islas de las de *plateau* oceánico ([Buchs et al., 2018](#); [Correa et al., 2018, 2020](#)) a partir de la química de roca total y el reconocimiento de las diferencias petrográficas.

Por otro lado, las rocas volcánicas y algunos cuerpos intrusivos de la Cordillera Occidental de Colombia han sido designados como parte de la Gran Meseta Oceánica del Caribe (CCOP, por sus siglas en inglés) ([Nivia, 1996](#); [Kerr et al., 1997](#); [Pearce, 2008](#); [Villagómez et al., 2011](#)). A lo largo de la Cordillera Occidental, los plutones del arco de islas del Cretácico se presentan intruyendo las secuencias basálticas de *plateau* y las vulcanitas del mismo arco, relaciones de contacto que fueron descritas para algunos plutones (tonalitas de Santa Fe de Antioquia y Buriticá y el stock de Mistrató. [Villagómez et al., 2011](#); [Weber et al., 2015](#); [Correa et al., 2018, 2020](#); [Pardo-Trujillo et al., 2020](#); [Zapata-Villada et al., 2021a](#)), similares a las descritas para el batolito de Buga por [Nivia \(2001\)](#) y [Nivia et al. \(2019\)](#).

Bloques de anfibolitas y granulitas fueron identificados en el norte de la Cordillera Occidental de Colombia, localizados al interior de la tonalita de Santa Fe de Antioquia, durante trabajos de cartografía geológica ([Álvarez y González, 1978](#); [Geoestudios, 2005](#)). Posteriormente, se describieron las características petrográficas, las paragénesis metamórficas y la composición química, asociando las rocas a un ambiente de arco, inicialmente considerado como parte del basamento metamórfico de la Cordillera Central de Colombia ([Rodríguez et al., 2012b](#)). Nuevos datos de

estos cuerpos metamórficos han permitido interpretarlos como residuos granulíticos asociados a las raíces de los plutones del arco de islas del Cretácico ([Correa et al., 2018](#); [Toro-Toro et al., 2020](#)).

Este estudio se centra en las edades de cristalización, la caracterización del plutonismo, la extensión del ciclo magmático y el sentido de envejecimiento de las edades de cristalización del arco insular cretácico, en un área localizada al norte de la Cordillera Occidental de Colombia.

## Marco geológico regional

La Cordillera Occidental de Colombia está compuesta por rocas de *plateau* oceánico, rocas de arcos volcánicos insulares y continentales y sedimentos pelágicos ([Figura 1](#)). Las unidades formadas en un ambiente de *plateau* oceánico han sido denominadas Grupo Diabásico, Formación Volcánica, basaltos de La Trinidad y diabasas de San José de Urama ([Nelson, 1962](#); [Parra, 1983](#); [Aspden, 1984](#); [Nivia, 2001](#); [Villagómez et al., 2011](#); [Rodríguez y Arango, 2013](#)). Sin embargo, existen pocos datos geocronológicos que han arrojado edades comprendidas entre ca. 155 Ma y ca. 90 Ma ([Rodríguez y Arango, 2013](#); [Correa et al., 2018](#)).

En cuanto a las rocas formadas en ambientes de arco, se han identificado al menos tres arcos (dos insulares y uno continental) desarrollados entre el Cretácico y el Mioceno. El primer arco insular se emplazó en el margen oriental del *plateau* oceánico de la Cordillera Occidental durante el límite Cretácico inferior-Cretácico superior (ca. 90 Ma), se extiende desde Ecuador ([Vallejo et al., 2006](#)) hasta el norte de Colombia ([Rodríguez y Arango, 2013](#); [Weber et al., 2015](#); [Correa et al., 2018](#); [Cetina et al., 2019](#)), y ha sido denominado Arco Barroso-Sabanalarga (ABS) ([Rodríguez et al., 2012a](#); [Rodríguez y Arango, 2013](#)). El segundo arco insular se ubica en el margen occidental de la Cordillera Occidental de Colombia, se desarrolló durante el Paleógeno y se le ha denominado Arco Chocó Panamá ([Duque-Caro, 1990](#); [Pindell, 1993](#); [Cardona et al., 2018](#); [Zapata-García y](#)

Rodríguez-García, 2020). Finalmente, un tercer arco continental se formó durante el Mioceno (8,5 Ma y 12 Ma), se ubicó en el segmento norte de la Cordillera Occidental y se denominó Arco de El Botón (Zapata y Rodríguez, 2011; Rodríguez y Zapata, 2012).

Sobre el *plateau* oceánico y las rocas insulares cretácicas reposan unidades sedimentarias pelágicas del Complejo

Estructural Dagua, Formación Lázaro y Formación Penderisco (Álvarez y González, 1978; Parra, 1983; Nivia, 2001). El conjunto de unidades se localiza entre las fallas Cauca-Almaguer al este (Maya y González, 1995) y la falla Dabeiba Pueblo Rico al oeste (Rodríguez y Zapata, 2012; Cetina *et al.*, 2019); este bloque se ha denominado Cañasgordas (González, 2001).

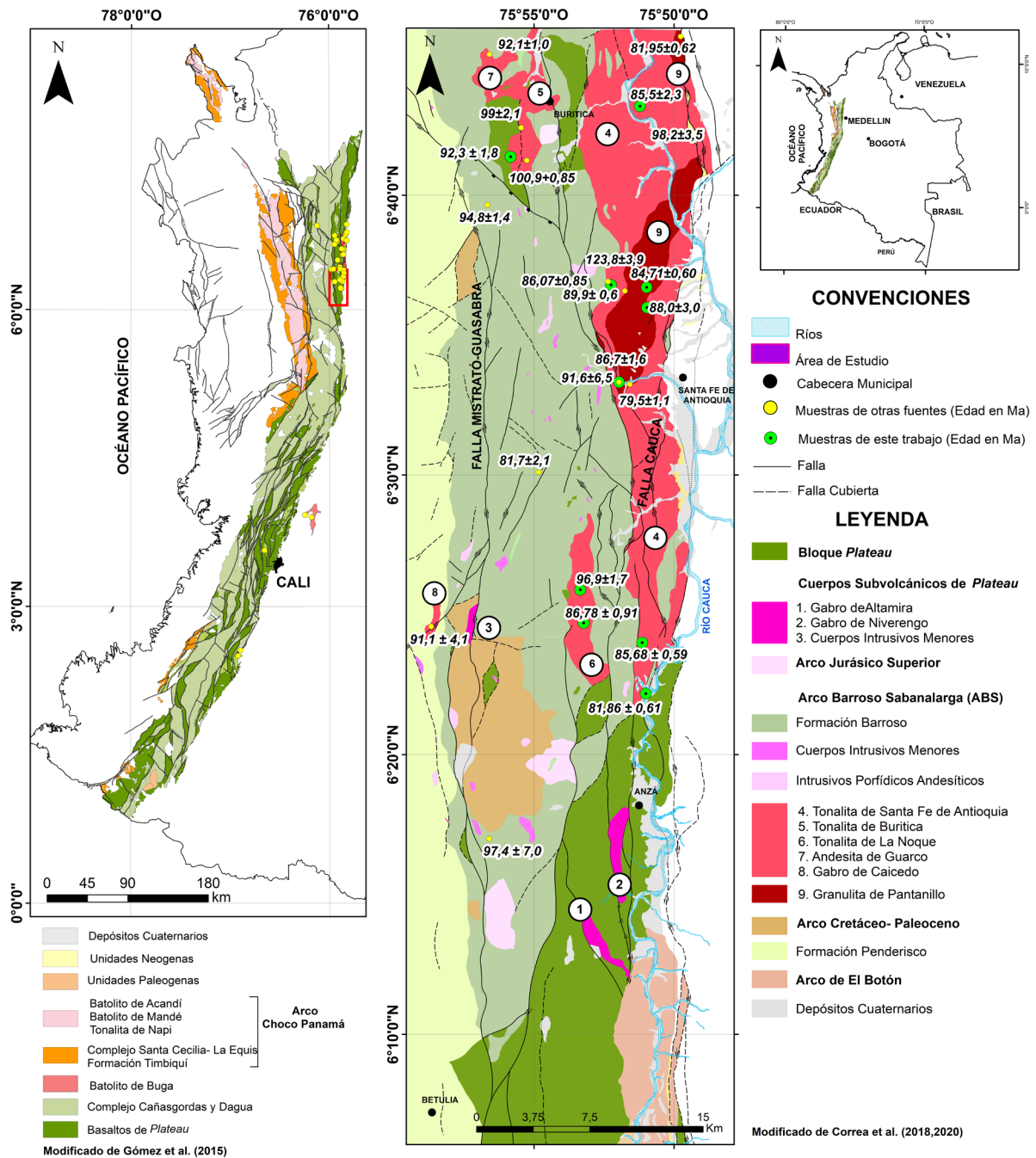


Figura 1. Mapa geológico del área de estudio con datos geocronológicos (tomado de Gómez *et al.*, 2015; Correa *et al.*, 2018, 2020; este trabajo).

## Materiales y métodos

### Trabajo de campo

Se cartografió un área de 1640 km<sup>2</sup> a escala 1:50.000 durante cuatro años. La cartografía se realizó en mapas del IGAC, dentro de los proyectos de cartografía del Servicio Geológico Colombiano (SGC).

### Petrografía

Los criterios de selección de la muestra de roca incluyeron la alteración mineral (se analizaron exclusivamente rocas inalteradas), la distribución espacial y la representatividad de cada cuerpo. En total, 36 nuevas muestras fueron enviadas al laboratorio de preparación de láminas delgadas (Laboratorio de Pulidos) del SGC, sede Bogotá, y fueron analizadas por los autores utilizando microscopios petrográficos Leitz y Olympus y 300 puntos de conteo. La clasificación de las rocas se realizó mediante los diagramas QAP de Streckeisen (1976, 1979) para rocas plutónicas, siguiendo las recomendaciones de Le Maitre *et al.* (1989).

### Geocronología U-Pb

La datación U-Pb en circón se realizó en 10 muestras, siguiendo el método de Peña-Urueña *et al.* (2018), en el Laboratorio de Ablación Láser del SGC. Los análisis se realizaron en un sistema de ablación láser Photon Machines, con un láser Excimer de 193 nm, acoplado a un espectrómetro de masas Element 2, utilizando los isótopos <sup>238</sup>U, <sup>206</sup>Pb y <sup>204</sup>Pb para la integración manual, así como los estándares de referencia Plešovice (Sláma *et al.*, 2008), FC-1 (Coyner *et al.*, 2004), Zircon 91500 (Wiedenbeck *et al.*, 1995, 2004) y Mount Dromedary (Renne *et al.*, 1998). Los puntos analizados en los circones fueron de 20 μm de diámetro. Los datos se redujeron utilizando el *software* Iolite v2.5® en IGORPro 6.3.6.4® (Hellstrom *et al.*, 2008; Paton *et al.*, 2010). La corrección de la derivación común se realizó utilizando el modelo evolutivo según Stacey y Kramers (1975). Los resultados finales corresponden a los datos medios calculados después de aplicar el criterio de Chauvenet para eliminar datos a más de dos desviaciones estándar de la media.

Las relaciones, edades y errores de <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb se calcularon de acuerdo con Petrus y Kamber (2012). Las concentraciones de U y Th se calcularon utilizando un circón estándar externo, según Paton *et al.* (2010). Se calcularon las edades y se trazaron gráficos geocronológicos utilizando el *software* Isoplot V4.15 (Ludwig, 2012); los resultados isotópicos de las ablaciones de circón están disponibles en la Tabla suplementaria de geocronología (TS3).

## Resultados

Los plutones del ABS analizados en este estudio son las tonalitas de Santa Fe de Antioquia, Buriticá, La Noque, la andesita de Guarco, la granulita Pantanillo y algunos cuerpos de gabro (Figura 1).

### Características generales de los plutones del arco insular

La Tabla 1 resume las características macroscópicas y microscópicas del conjunto de plutones analizados en este estudio, la Figura 1 muestra la localización y forma de los cuerpos, la Figura 2 muestra las características macroscópicas de algunas rocas, la Tabla suplementaria TS1 trae la composición y porcentaje mineralógico de las rocas con análisis petrográfico de cada unidad, y la Figura 3 indica la clasificación de las rocas plutónicas de cada unidad en diagramas QAPF (Streckeisen, 1976).

### Geocronología

Se obtuvieron 10 edades de cristalización por el método LA-ICP-MS U-Pb en circón, para la tonalita de Buriticá (1), la tonalita de La Noque (2), la tonalita de Santa Fe de Antioquia (4) y la granulita de Pantanillo (3). Las edades se muestran en la Figura 1 y los resultados se presentan en la Tabla suplementaria de geocronología (TS3).

**Tonalita de Buriticá:** la muestra MGO-014A corresponde a una tonalita colectada en la vía Santa Fe de Antioquia - Manglar. Los circones son prismáticos cortos y alargados, subhedrales y euhedrales, algunos están rotos, incoloros, de tamaño entre 50 y 100 μm (Figura 4). Se observan en las imágenes de catodoluminiscencia (CL) texturas de zonación bandeada o paralela

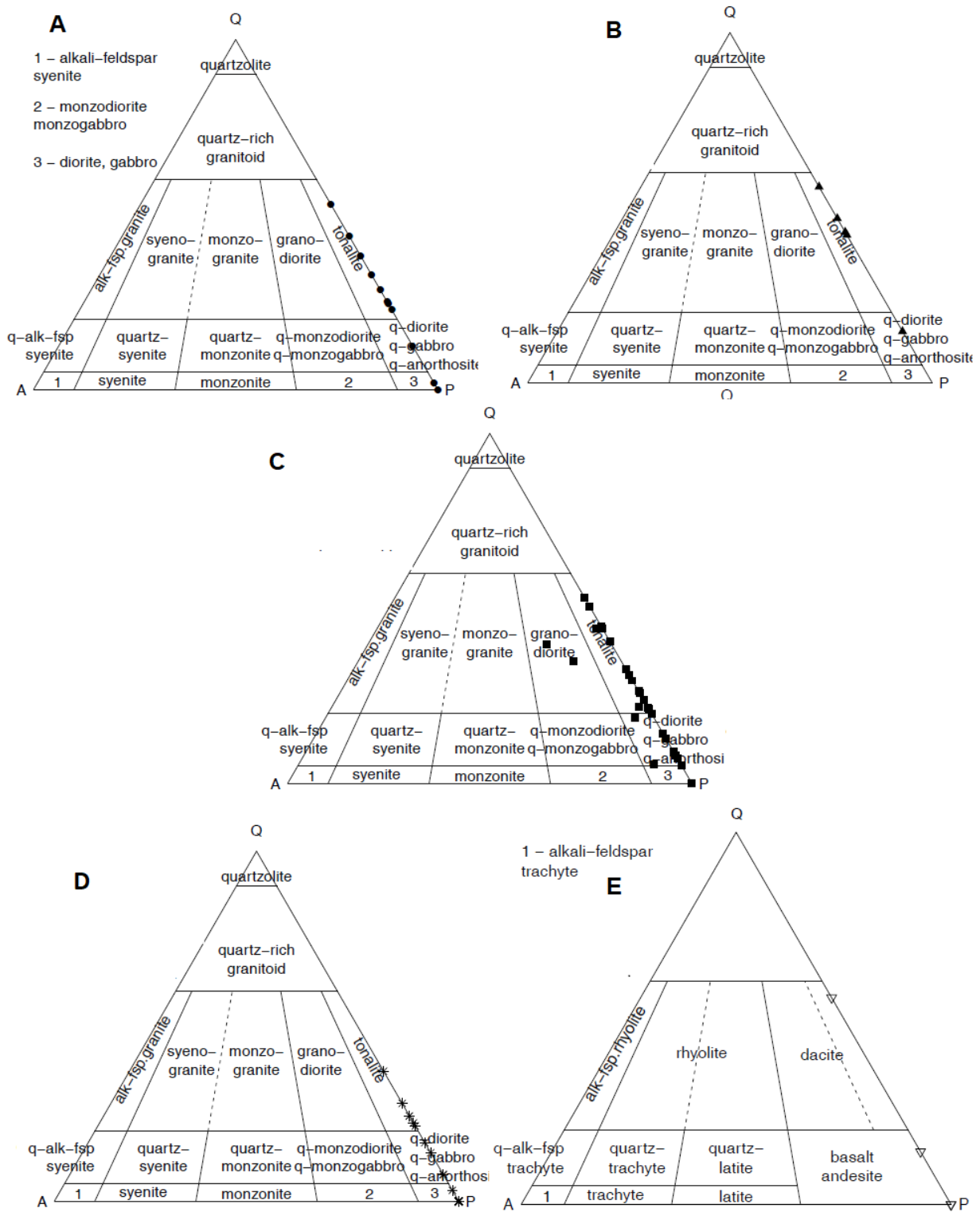
Para el cálculo de la edad se descartaron los datos con valores discordantes >35% y errores de edad corregida >5%. La edad promedio ponderada es de 92,1 ± 2,1 Ma (n=10, MSWD = 3,1) (Figura 5), por lo que es considerada como la edad de cristalización de la roca, con relaciones Th/U entre 0,54 y 0,74, común en circones ígneos (Rubatto, 2002).

**Tonalita de La Noque:** se obtuvieron dos edades en rocas clasificadas como tonalitas, que corresponden a las muestras MGO-050 y TCR-778 colectadas en la vía Caicedo-río Cauca y la quebrada La Noque, respectivamente. Los circones de ambas muestras son prismáticos euhedrales cortos y alargados e incoloros, con tamaño entre 50 y 100 μm, con texturas de un solo patrón de cristalización y débilmente oscilatoria en los bordes de cristales y texturas de reabsorción comunes en circones magmáticos (Figura 4).

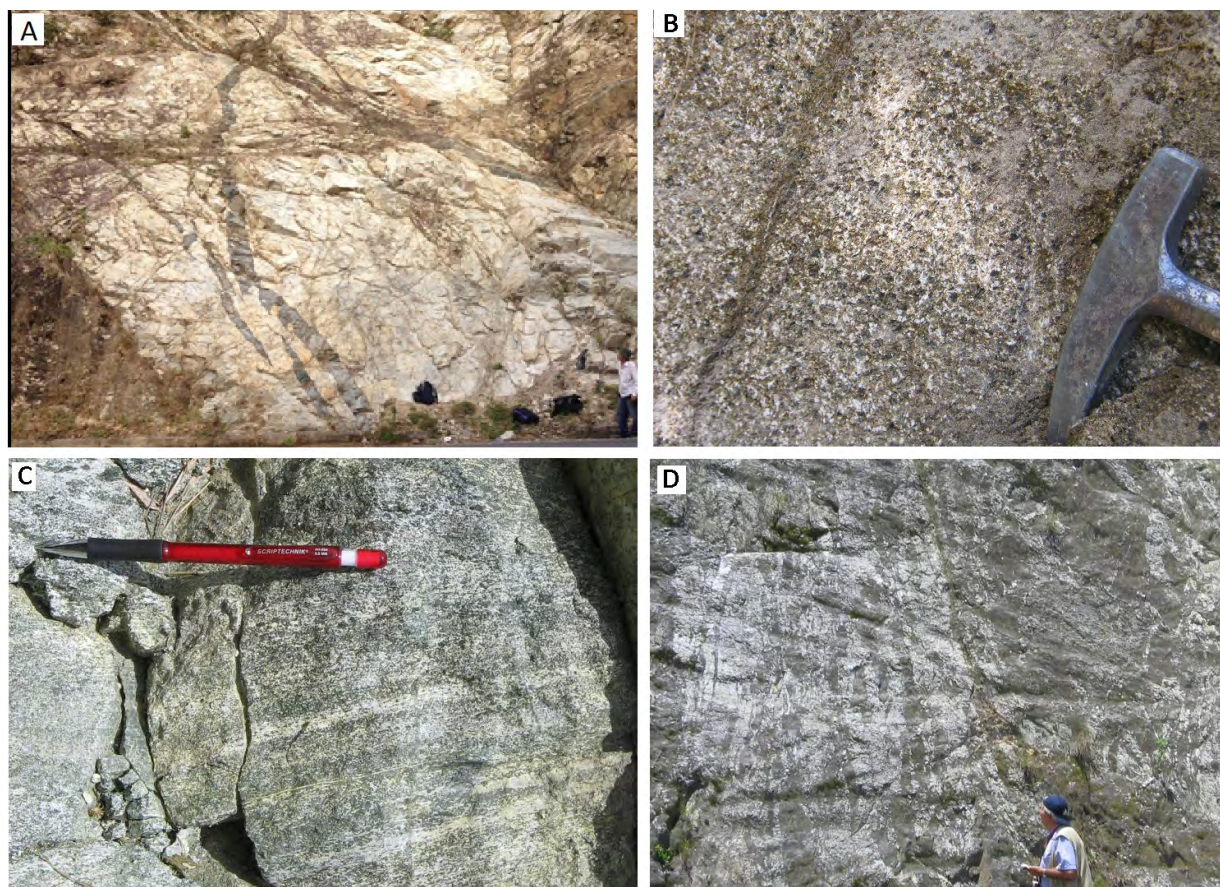
**Tabla 1.** Características macroscópicas y microscópicas de cuerpos intrusivos y subvolcánicos del ABS.

Cuerpo plutónico/volcánico	Características microscópicas	Litología de las facies	Mineralogía de cada facies	Minerales accesorios	Texturas	Contacto y facies de contacto
<b>Tonalita de Santa Fe de Antioquia</b>	Brecha intrusiva y magmas de inyección	Xenolitos básicos: gabros hornbléndicos, dioritas	Pl+Hbl±Cpx±Qtz	Bt, Ol, Tnt, Ap, Mt	Granular	Intrusivo en Formación Barroso, Diabasas de San José de Urama: cornubianas en facies albíta epidota cornubianita y hornblenda cornubianita
		Intermedia: cuarzodioritas –tonalitas– granodioritas	Qtz+Pl+Hbl	Bt, Ap, Mt, Zr	Granular e inequigranular	
		Diques: andesíticos y basálticos			Porfídica	
<b>Tonalita de Buriticá</b>	Homogéneo y localmente aspecto de brecha intrusiva hacia los bordes	Facies normal: tonalitas (plagiogranitos) y dioritas como xenolitos	Qtz+Pl+Hbl±Bt	Bt, Ap, Mt, Zr, Tnt	Granular	Intrusivo, brechas de intrusión, rocas dioríticas en los bordes, facies albíta epidota cornubianita, intruye basaltos de <i>plateau</i>
		Diques: andesíticos y basálticos	Pl+Hbl+Cpx	Ap, Op, Zr	Porfídica	
<b>Tonalita de La Noque</b>	Homogénea	Facies normal: tonalitas (plagiogranitos)	Qtz+Pl+Hbl±Bt±Fsp	Ap, Mt, Zr, Tnt	Equigranular, inequigranular, poiquilítica y mirmequítica	Intrusivo en Formación Barroso, Diabasas de San José de Urama
		Diques: andesíticos	Pl-Hbl	Op		
<b>Andesita de Guarco</b>	Homogénea	Andesitas	Pl-Hbl± Cpx	Op, Py, Ao, Zr	Porfídica	Intrusiva en Formación Barroso y Diabasas de San José de Urama
<b>Gabro de Caicedo</b>	Homogéneo en composición y textura	Gabros, dioritas y tonalitas	Pl-Cpx-Op±Ol-Opx	Qtz,Hbl, Tnt, Op	Granular	No observadas
<b>Granulita de Pantanillo</b>	Estructura bandeada Pl, Qtz	Granulitas máficas, anfibolitas	Pl +Hbl + Ol + Opx +Spl + Op; Pl + Qtz + Opx + Cpx; Pl + Cpx + Hb; Pl + Hbl	Op, Ap, Zr, Spl, Rt	Texturas granoblásticas, nematoblásticas y kelifíticas	Instruida por la tonalita de Santa Fe de Antioquia y localmente fallada
		Diques dioríticos, tonalíticos y pegmatíticos	Pl+Qtz+Hbl	Op, Ap, Zr	Microgranular y/o porfídica	Contacto neto intrusivo

Qtz: cuarzo, Pl: plagioclasa, Fsp: feldespato, Cpx: clinopiroxeno, Opx: ortopiroxeno, Ol: olivino, Hbl: hornblenda, Op: opaco, Ap: apatito, Tnt: titanita, Spl: espinela, Mt: magnetita.



**Figura 2.** Clasificación petrográfica de rocas de diferentes plutones del ABS. **A.** Tonalita de Buriticá, **B.** Tonalita de La Noque, **C.** Tonalita de Santa Fe de Antioquia, **D.** Granulita de Pantanillo y **E.** Andesita de Guarco.



**Figura 3.** Aspecto macroscópico de algunos plutones. **A.** Tonalita de Buriticá cortada por diques basálticos. **B.** Gabro de Caicedo. **C.** Granulita de Pantanillo con estructura bandeada. **D.** Tonalita de Santa Fe de Antioquia con xenolitos básicos de gabro hornbléndico rodeados de tonalita y cuarzdiorita.

Para el cálculo de la edad de la muestra MGO-050 no se tuvieron en cuenta las edades con discordancias  $>20$  y error recalculado  $>6,5$ . Para la muestra TCR-778 no se tuvieron en cuenta las edades con discordancias  $>15$  y error recalculado  $>5,5$ . La edad promedio ponderada de la muestra MGO-050 es de  $96,9 \pm 1,7$  Ma ( $n=11$ , MSWD = 1,7) (Figura 5). Para la muestra TCR-778 se obtuvo una edad promedio de  $86,51 \pm 0,93$  Ma ( $n=21$ , MSWD = 0,63) (Figura 5). Ambas se consideran edades de cristalización, con relaciones Th/U de 0,28 a 0,78 y de 0,33 a 1,3 respectivamente.

**Tonalita de Santa Fe de Antioquia:** se obtuvieron cuatro edades que corresponden a las muestras TCR-835, TCR-732, MGO-032A y FHO-222, obtenidas a partir de un dique de monzogranito en el contacto con la Formación Barroso, una granodiorita, un xenolito de microgabro y en tonalita, respectivamente (Tabla 2). Los circones de la muestra TCR-835 son incoloros a levemente naranja, euhedrales, en su mayoría prismáticos cortos, algunos largos, con tamaño entre

200 y 500  $\mu\text{m}$ , sin inclusiones, con marcada zonación oscilatoria. Los circones de la muestra TCR-732 son subhedrales a euhedrales, prismáticos cortos y alargados e incoloros, con tamaño entre 50 y 120  $\mu\text{m}$ , con texturas de zonación oscilatoria e inclusiones. Los circones de la muestra MGO-032A son prismáticos cortos de tamaños entre 50 y 100  $\mu\text{m}$ , con texturas de zonación concéntrica. Los circones de la muestra FHO-222 son traslúcidos, algunos prismáticos alargados y otros redondeados, con inclusiones (Figura 4).

El cálculo de la edad promedio ponderada de las muestras TCR-835, MGO-032 y FHO-222 se realizó a partir de edades con discordancias  $<10$  y error recalculado  $<5$ . La muestra TCR-732 presenta pérdida de Pb; no se tuvieron en cuenta las edades con discordancias  $>60$  y error recalculado  $>6$ .

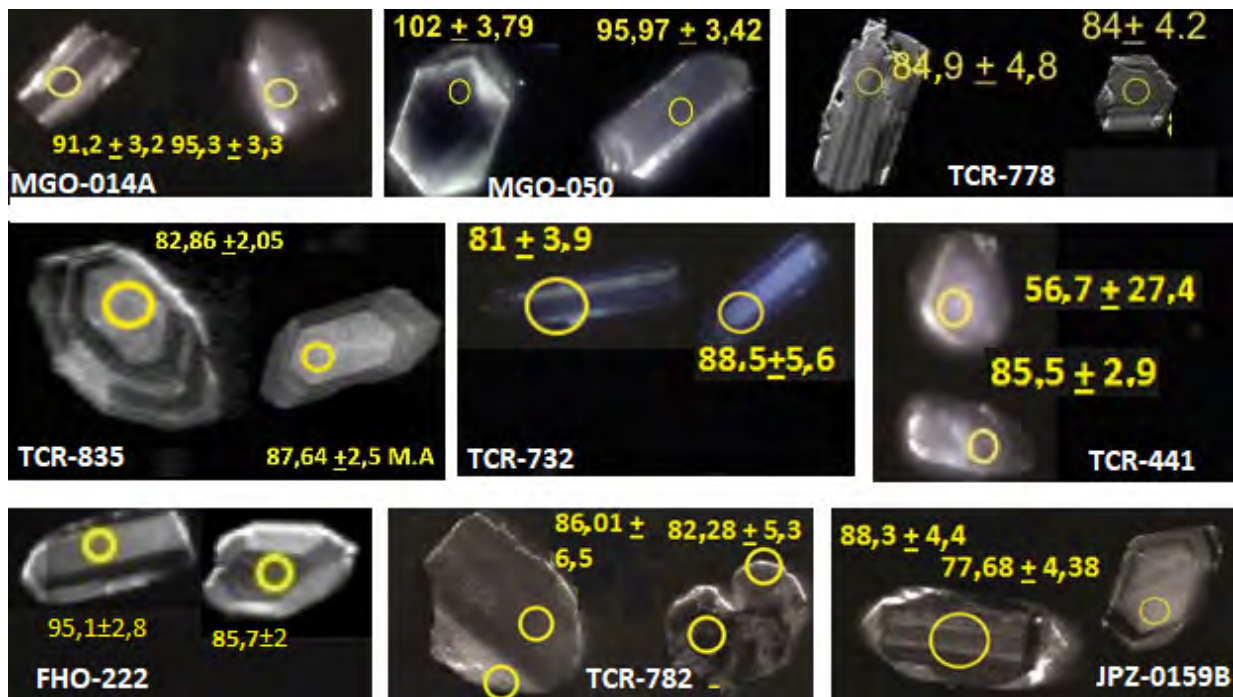
La edad promedio ponderada de la muestra TCR-835 es de  $83,98 \pm 0,95$  Ma ( $n=34$ , MSWD = 6,3). Para la muestra TCR-732 se obtuvo una edad promedio

de  $85,5 \pm 2,3$  Ma ( $n=15$ , MSWD = 3,5). Para la muestra MGO-032A se obtuvo una edad promedio de  $86,07 \pm 0,85$  Ma ( $n=16$ , MSWD = 1,7). Para la muestra FHO-222 se obtuvo una edad promedio de  $85,68 \pm 0,59$  Ma ( $n=42$ , MSWD = 2,1) (Figura 5). Las cuatro edades se consideran de cristalización de la roca y tienen relaciones Th/U de 0,33 a 1,04; 0,30 a 1,02; 0,23 a 0,66, y de 0,3 a 1,34, respectivamente.

**Granulita de Pantanillo:** se obtuvieron tres edades que corresponden a las muestras TCR-441, TCR-782 y JPZ-0159B, a partir de un granofels de Pl, Hbl y Tr con Qtz y Cpx, una granulita y una anfibolita, respectivamente (Tabla 2). Los circones de la muestra TCR-441 son subhedrales a anhedrales, prismáticos cortos y alargados, algunos redondeados, incoloros, de tamaño entre 50 y 100  $\mu\text{m}$ , algunos con núcleos heredados. Los circones de la muestra TCR-782 presentan formas anhedrales, algunos están rotos, redondeados, presentan texturas de absorción en coliflor, coloración uniforme y otros de reabsorción (Corfu *et al.*, 2003), con tamaño entre 50 y 100  $\mu\text{m}$ . Los circones de la muestra JPZ-0159B son subhedrales a anhedrales, algunos están rotos, otros son prismáticos cortos y

alargados, incoloros, de tamaños entre 30 y 150  $\mu\text{m}$ . Algunos presentan texturas de zonación oscilatoria, otros presentan texturas de sobrecrecimiento en los bordes de los cristales (Figura 4). Los resultados que determinan la edad de cristalización presentan relaciones Th/U entre 0,33 y 1,23, valores que sugieren que los núcleos son ígneos.

Para la muestra TCR-441 no se tuvieron en cuenta para las edades heredadas los datos con discordancias  $>20$  y error recalculado  $>7,5$  y para la población que define la edad no se tuvo en cuenta las muestras con error recalculado  $>7,5$ . El cálculo de la edad promedio ponderada de las muestras JPZ-159B y TCR-782 se realizó a partir de edades con discordancias  $<10$  y error recalculado  $<5$ . La muestra TCR-441 tiene un dato discordante con una edad de  $60,32 \pm 2,12$  (Figura 5), el cual se elimina del cálculo. La edad promedio ponderada de la muestra TCR-441 arrojó una edad de  $86,8 \pm 2,0$  Ma ( $n=11$ , MSWD = 1,5). Para la muestra TCR-782 se obtuvo una edad promedio de  $84,71 \pm 0,60$  Ma ( $n=80$ , MSWD = 0,98) (Figura 5). Para la muestra JPZ-0159B se obtuvo una edad promedio de  $91,6 \pm 6,5$  Ma ( $n=15$ , MSWD = 0,071).



**Figura 4.** Imágenes de catodoluminiscencia de cristales de circon representativos de muestras datadas de cuerpos del arco insular cretácico. Tonalita de Buriticá (MGO-014A); tonalita de La Noque (MGO-050 y TCR-778), tonalita de Santa Fe de Antioquia (TCR-835, TCR-732 y FHO-222) y granulita de Pantanillo (TCR-441, TCR-782 y JPZ-0159B).



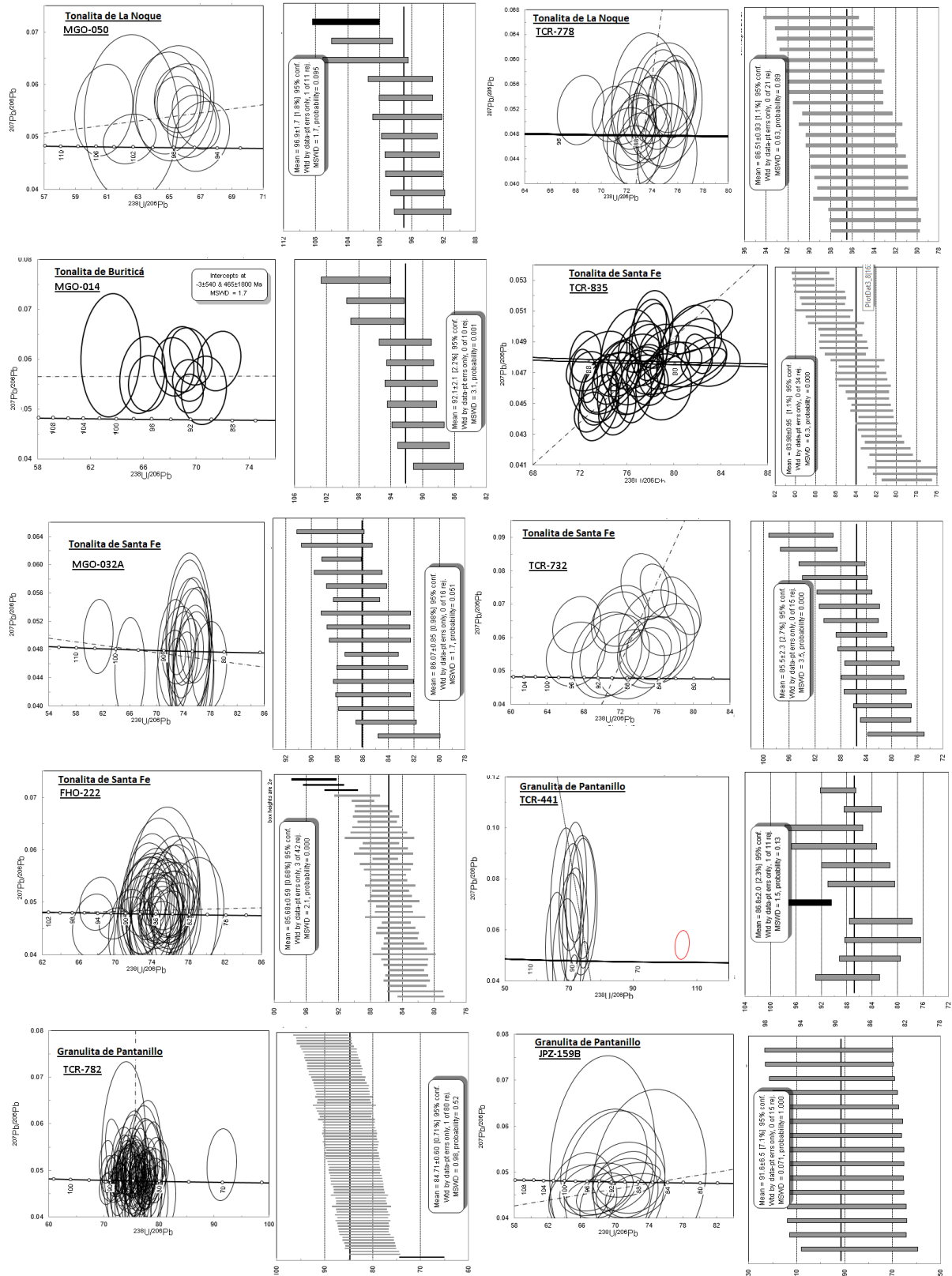


Figura 5. Edades U-Pb de los plutones del ABS. Diagramas Tera-Wasserburg y de densidad de probabilidad (barras negras no tenidas en cuenta para el cálculo de la edad).

## Discusión

### Correlación de plutones y ciclo magmático del arco insular

La correlación de los plutones se basó en la posición geotectónica, la información química de las rocas y la edad de cristalización de cada intrusivo (Tabla 2). El ciclo magmático del arco es obtenido a partir de las edades de cristalización U-Pb de los plutones y dos edades de la Formación Barroso (Correa *et al.*, 2018, 2020), mediante un gráfico de densidad de Kernel (Figura 6B). La correlación de plutones que define el ciclo magmático y la composición química general se obtuvo a partir de la composición de rocas publicada en otros trabajos y de datos de esta publicación (Geoestudios, 2005; Lesage, 2011; Rodríguez *et al.*, 2012a, 2012b; Geología Regional y Prospección Ltda., 2014; Weber *et al.*, 2015; Correa *et al.*, 2018, 2020; Cetina *et al.*, 2019; Zapata-Villada *et al.*, 2021a) (Tabla 2, Figura 6, TS2).

Los plutones del arco insular cretácico (ABS: tonalitas de Buriticá, Santa Fe de Antioquia, La Noque, La Fonda, Sabaletas, batolito de Buga, gabros de Caicedo, El Palmar y andesita de Guarco, entre otros) están emplazados en rocas de *plateau* oceánico (diabasas de San José de Urama, Grupo Diabásico) y en vulcanitas del mismo arco insular (Formación Barroso), localizados hacia la margen oriental de los basaltos de *plateau* y contra la margen occidental continental), cuyo límite es la falla Cauca-Almaguer (Maya y González, 1995) (Figura 7A). Los plutones del arco insular corresponden a batolitos y *stocks* cristalizados en diferentes niveles de la corteza oceánica, los hay subvolcánicos (andesita de Guarco) hasta epizonales (tonalitas de Santa Fe de Antioquia, La Noque y Buriticá), algunos están acompañados por bloques de granulitas, interpretadas como las raíces del arco (granulita de Pantanillo, Rodríguez *et al.*, 2012a; Correa *et al.*, 2018, 2020; Toro-Toro *et al.*, 2020), o se emplazan en los productos volcánicos del arco (Formación Barroso).

Las edades obtenidas para los plutones del arco insular se resumen en la Figura 6 y en la Tabla 2. El registro geocronológico de este magmatismo presenta edades entre  $100,9 \pm 0,85$  Ma y  $78,4 \pm 6,4$  Ma (ciclo magmático de ca. 30 Ma), con dos picos de cristalización ca. 86 Ma y 91,8 Ma (Figura 6B). Los plutones corresponden a granitoides cálcicos (Figura 6C) de la serie toleítica (Figura 6D), predominantemente metaluminosos, con algunas rocas que alcanzan el campo peraluminoso

(Figura 6E), con anomalía negativa de Nb y Ti, típica de rocas generadas en ambientes de arco.

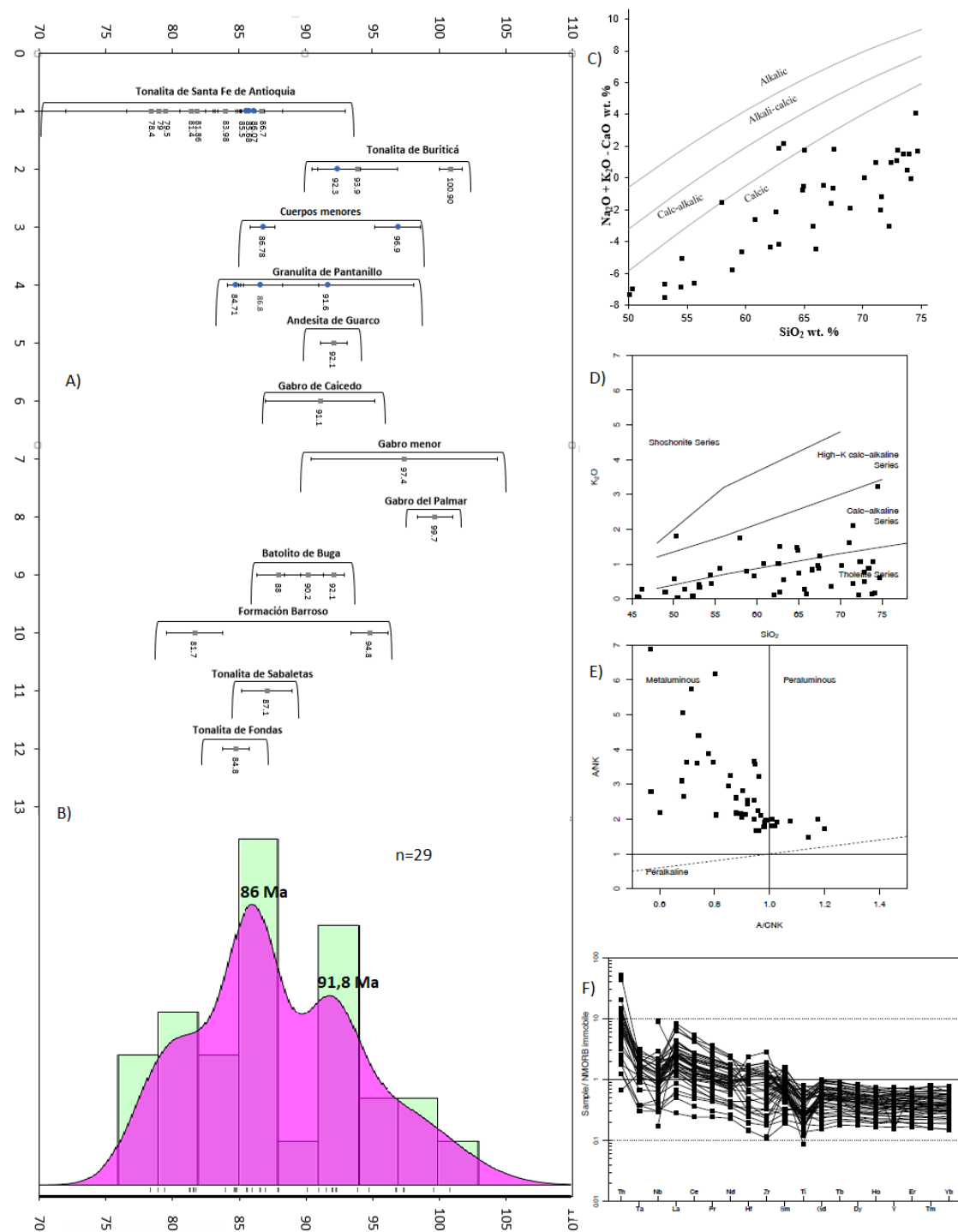
La tonalita de Buriticá y la tonalita de La Noque son los cuerpos intrusivos del arco más antiguos en el área de estudio, con edades de cristalización que van desde  $100,9 \pm 0,85$  hasta  $86,78 \pm 0,91$  Ma (Weber *et al.*, 2015; el presente estudio).

Pequeños cuerpos gabróticos, andesitas subvolcánicas, rocas volcánicas basálticas y cuerpos de plagiogranito con afinidad toleítica subalcalina se formaron al comienzo del arco. Los primeros fundidos gabróticos cristalizaron entre  $99,7 \pm 1,3$  y  $91,1 \pm 4,1$  Ma, y están representados por plutones como El Palmar, Caicedo y Mistrató (Villagómez *et al.*, 2011; Correa *et al.*, 2018; Pardo-Trujillo *et al.*, 2020). La generación de plagiogranitos y cuerpos gabróticos contemporáneos indica la formación de diferentes fundidos con composiciones contrastantes, como sugiere Paz *et al.* (2017) para el batolito de Buga. El mecanismo de generación puede ser derivado de una fusión basáltica parental por fraccionamiento de cristales a alta presión siempre que el anfíbol domine el proceso de fraccionamiento generando magmas tonalíticos (Dessimoz *et al.*, 2012). Algunos de estos cuerpos plutónicos de arco presentan en los bordes de contacto abundantes enclaves máficos de gabros y dioritas que sugieren enfriamiento rápido del magma máfico, los cuales están rodeado por rocas félsicas, conservando las composiciones de los líquidos máficos originales.

La generación de magmas contrastantes continuó entre  $\sim 90$  y  $\sim 76$  Ma, con la formación de cuerpos de batolitos de composición heterogénea (plagiogranitos, tonalitas, granodioritas, cuarzodioritas, dioritas y gabros) como la tonalita de Santa Fe de Antioquia (Rodríguez *et al.*, 2012a; Weber *et al.*, 2015; Correa *et al.*, 2018; Zapata-Villada *et al.*, 2021a) y el batolito de Buga (Nivia *et al.*, 2019). Estos dos cuerpos intrusivos resultaron de la cristalización de magmas máficos y félsicos, que permitió la generación de plutones con estructura de brecha intrusiva, constituidos por bloques máficos (gabros y dioritas) rodeados por rocas félsicas (tonalitas, granodioritas, cuarzodioritas, plagiogranitos) y localmente rocas híbridas (Figura 3D), que probablemente se formaron a partir de recargas sucesivas de la cámara magmática a partir de material que está por debajo de la cámara. La formación de enclaves y preservación está controlada por contrastes de composición y térmicos entre la recarga y el magma huésped y la dinámica de mezcla

(Wiebe, 2016; Ruprecht *et al.*, 2020). Las edades U-Pb obtenidas a partir de las rocas gabróicas y tonalíticas de la tonalita de Santa Fe de Antioquia sugieren la cristalización durante el mismo periodo de gabros y tonalitas, entre  $86,7 \pm 1,6$  y  $78,4 \pm 6,4$  Ma (Tabla 2).

Estos grandes plutones se desarrollaron a partir de múltiples pulsos magmáticos con diferentes edades de cristalización (Figura 6A), probablemente a partir de recargas sucesivas de la cámara magmática.



**Figura 6.** Edad y composición de los plutones del arco insular (ABS). **A.** Diagrama de correlación de plutones. **B.** Diagrama de densidad de kernel a partir de las edades U-Pb de los plutones. **C.** Tipo de granitoide. **D.** Diagrama de  $\text{SiO}_2$  vs  $\text{K}_2\text{O}$ . **E.** Diagrama de elementos traza inmóviles.

**Tabla 2.** Edades LA-ICP-MS U-Pb en circón en plutones y vulcánitas del AIS.

Muestra	Tipo de roca	Unidad	Este	Norte	Edad Ma	MSWD	Fuente
GR-22	Plagiogranito	Tonalita de Buriticá	6°41'14,82"	-75° 55' 15,35"	100,9 ± 0,85		Weber <i>et al.</i> (2015)
MGO-014A	Plagiogranito	Tonalita de Buriticá	6°41'22,66"	-75° 55' 50,24"	92,3 ± 1,8	3,1	El presente trabajo
WBR	Tonalita	Tonalita de Buriticá			93,9 ± 3	0,2	Zapata-Villada <i>et al.</i> (2021a)
MGO-050	Plagiogranito	Tonalita de La Noque	6°25'53,50"	-75° 53' 20,93"	96,9 ± 1,7	1,7	El presente trabajo
TCR-778A	Plagiogranito	Tonalita de La Noque	6°24'42,27"	-75° 53' 20,95"	86,78 ± 0,91	0,63	El presente trabajo
DV-42	Gabro	Gabro del Palmar	03°37'05,0"	-76° 39' 15,1"	99,7 ± 1,3	0,62	Villagómez <i>et al.</i> (2011)
TCR-977	Gabro	Cuerpo menor de gabro	6°16'59,72"	-75°55'5,84"	97,4 ± 7,0	5,4	Correa <i>et al.</i> (2020)
TCR-550	Andesita	Andesita de Guarco	6°45'2,23"	-75°56'35,44"	92,1 ± 1,0	3,1	Cetina <i>et al.</i> (2019)
JPZ-202	Qtzdiotita	Gabro de Caicedo	6°24'34,93"	-75° 58' 40,36"	91,1 ± 4,1		Correa <i>et al.</i> (2018)
DV30	Tonalita	Batolito de Buga	3°54'10,600"	-76° 10' 50,40"	92,1 ± 0,8	0,66	Villagómez (2010)
DV91	Diorita	Batolito de Buga	3°55'31,000"	-76° 14' 42,40"	90,2 ± 1,8	2,3	Villagómez (2010)
??		Batolito de Buga			88 ± 1,64		Nivia <i>et al.</i> (2017)
JPZ-159B	Anfibolitae	Granulita de Pantanillo	6°33'19,15	-75° 51' 57,82	91,6 ± 6,5	0,07	El presente trabajo
TCR-441	Granofels	Granulita de Pantanillo	6°35'58,80"	-75° 50' 57,81"	86,8±2,0	1,5	El presente trabajo
TCR-782	Granulita	Granulita de Pantanillo	6°36'42,45"	-75°50' 58,68"	84,71 ± 0,60	0,98	El presente trabajo
LMC-168	Basalto	Formación Barroso	6°39'39,37"	-75°56'39,64"	94,8 ± 1,4		Correa <i>et al.</i> (2018)
JPZ-117	Toba	Formación Barroso	6°30'6,10"	-75° 54' 49,97"	81,7 ± 2,1		Correa <i>et al.</i> (2018)
CDG0026Pa	Tonalita	Tonalita de Sabaletas	2°33'29,67"	-76° 53' 41,33"	87,1 ± 1,9		Geología regional y Prospección Ltda. (2014)
CLM0136P	Tonalita	Tonalita de Fondas	2°30'3,82"	-76° 55' 13,68"	84,8 ± 1,0		Geología regional y Prospección Ltda. (2014)
MGO-032A	Gabro	Tonalita de Santa Fe de Antioquia	6°36'47,59"	-75°52'14,99"	86,07 ± 0,85	1,7	El presente trabajo
JPZ-159A	Tonalita	Tonalita de Santa Fe de Antioquia	6°33'19,15"	-75° 51' 57,82"	86,7 ± 1,6	2,6	Zapata-Villada <i>et al.</i> (2021a)
FHO-222	Tonalita	Tonalita de Santa Fe de Antioquia	6°24'0,16"	-75°51'8,15"	85,68 ± 0,59	2,1	El presente trabajo
TCR-732	Granodiorita	Tonalita de Santa Fe de Antioquia	6°43'10,95"	-75° 51' 12,91"	85,5 ± 2,3	3,5	El presente trabajo
TCR-835	Dique meta monzogranito	Tonalita de Santa Fe de Antioquia	6°22'10,89"	-75°51'0,34"	83,98 ± 0,95	6,3	El presente trabajo

Continuación Tabla 2.

Muestra	Tipo de roca	Unidad	Este	Norte	Edad Ma	MSWD	Fuente
TCR-815	Microgabro	Tonalita de Santa Fe de Antioquia	6°45'40,37"	-75° 49' 45,64"	81,86 ± 0,61	1,16	Zapata-Villada <i>et al.</i> (2021a)
JPZ-121	Tonalita	Tonalita de Santa Fe de Antioquia	6°33'14,31"	-75° 51' 34,69"	79,5 ± 1,1	1,2	Zapata-Villada <i>et al.</i> (2021a)
WSF	Diorita	Tonalita de Santa Fe de Antioquia	6°33' 27,2"	-75°51'16,3"	78,4 ± 6,4	29	Zapata-Villada <i>et al.</i> (2021a)
W64SA	Diorita	Tonalita de Santa Fe de Antioquia			79 ± 14	0,32	Zapata-Villada <i>et al.</i> (2021a)
WtrCA	Diorita	Tonalita de Santa Fe de Antioquia	6°51'44,0"	-75°49' 19,7"	81,4 ± 2	2,4	Zapata-Villada <i>et al.</i> (2021a)

Junto a la tonalita de Santa Fe de Antioquia afloran granulitas básicas a ultrabásicas que cristalizaron entre  $91,6 \pm 6,5$  y  $84,71 \pm 0,60$  Ma (granulita de Pantanillo), ligeramente anteriores a las rocas de la tonalita de Santa Fe de Antioquia. Las granulitas y anfibolitas asociadas al ABS se han interpretado como residuos de fusión parcial, ubicados en las raíces del arco (Correa *et al.*, 2018; Toro-Toro *et al.*, 2020). Las relaciones de campo indican que algunos de los pulsos magmáticos intruyen las granulitas (granulitas y anfibolitas asociadas a la tonalita de Santa Fe de Antioquia y Cuarzodiorita de Mistrató. Correa *et al.*, 2018; Toro-Toro *et al.*, 2020). Las rocas de la granulita de Pantanillo tienen bajo contenido de SiO<sub>2</sub>, inferior al 52% en peso en la mayoría de las rocas, excepto en las bandas félsicas con SiO<sub>2</sub> de hasta 59% en peso; altos contenidos de MgO que van del 8 al 19% en peso en las rocas pobres en SiO<sub>2</sub> (Rodríguez *et al.*, 2012b). El contenido de CaO es alto, oscila entre 8,7 y 15,5% en peso, y disminuye al aumentar la SiO<sub>2</sub> (Rodríguez *et al.*, 2012b). Los contenidos de CaO y MgO de las rocas de la tonalita de Santa Fe de Antioquia son notablemente inferiores, con valores de MgO generalmente <5% en peso y CaO <10% en peso y con contenidos más altos de Na<sub>2</sub>O, que van de 1,6 a 4,4% en peso. Fueron relacionadas con rocas formadas en un ambiente de arco (Rodríguez *et al.*, 2012b; Correa *et al.*, 2018).

#### **Distribución de las edades y profundidad de fusión relativa del ABS**

El análisis de la distribución espacial de las edades de cristalización de los plutones que conforman el ABS permite establecer si las edades se envejecen o rejuvenecen hacia el este o hacia el oeste, como una aproximación para entender la dirección de migración del arco. En la Figura 7A se muestra la geología y la

localización de las edades de cristalización en plutones y unidades volcánicas del arco en el área de estudio, y se marca la paleomargen continental a partir de la falla Cauca-Almaguer. En la Figura 7b se observa que las edades de los plutones del arco insular son en general más viejas hacia el oeste y más jóvenes hacia el este, es decir, la migración de las edades de cristalización sugerida por los datos es en sentido oeste-este.

Similares resultados se encontraron utilizando el diagrama Nb/Zr vs Sm/Yb (He *et al.*, 2010), en el cual se observa que la tonalita de Santa Fe de Antioquia (más joven) fue generada a mayor profundidad relativa que la tonalita de Buriticá, la tonalita de la Noque y la andesita de Guarco (más viejas) (Figura 7C).

Tres modelos de subducción se han propuesto para explicar el ABS: el primero fue propuesto por Rodríguez *et al.* (2012a) cuando se habló por primera vez de los plutones del arco insular de la Cordillera Occidental. Este modelo consideraba una sola zona de subducción con inclinación en sentido oeste – este, generando los plutones cretáceos de las cordilleras Occidental y Central, entre 88 y 115 Ma. Estos autores pensaban que para ese momento ya estaba unido el plateau a la margen continental, trabajos posteriores indicarían que la colisión ocurrió ~70 Ma (Zapata-Villada *et al.*, 2021b). Un segundo escenario consideraba una subducción con buzamiento hacia el este de las placas del Caribe y Farallón debajo de América del Sur y el plateau respectivamente, es decir dos zonas de subducción paralelas al tiempo, las cuales causaron el cierre de los océanos marginales en el Cretácico Superior – Paleógeno Temprano (Taboada *et al.*, 2000; Botero-García *et al.*, 2023) y la posterior colisión del plateau con la margen continental. Un tercer modelo considera una

zona de subducción de doble divergencia (tipo Moluca), donde la placa del Caribe se inclina hacia el este debajo de América del Sur y a su vez debajo del plateau, con inclinación hacia el oeste (Villagómez y Spikings, 2013). Este modelo ha sido ampliamente aceptado por otros autores (Pardo-Trujillo *et al.*, 2020; Zapata-Villada *et al.*, 2021a, entre otros).

Bajo los modelos propuestos y con los datos que se conocen y los obtenidos en este trabajo que sugieren una dirección de subducción con inclinación en sentido oeste-este, consideramos que el modelo más acorde a los datos es el de dos subducciones paralelas con inclinación hacia el este, como aparece propuesto por Botero-García *et al.* (2023) y se explica en el segundo modelo.

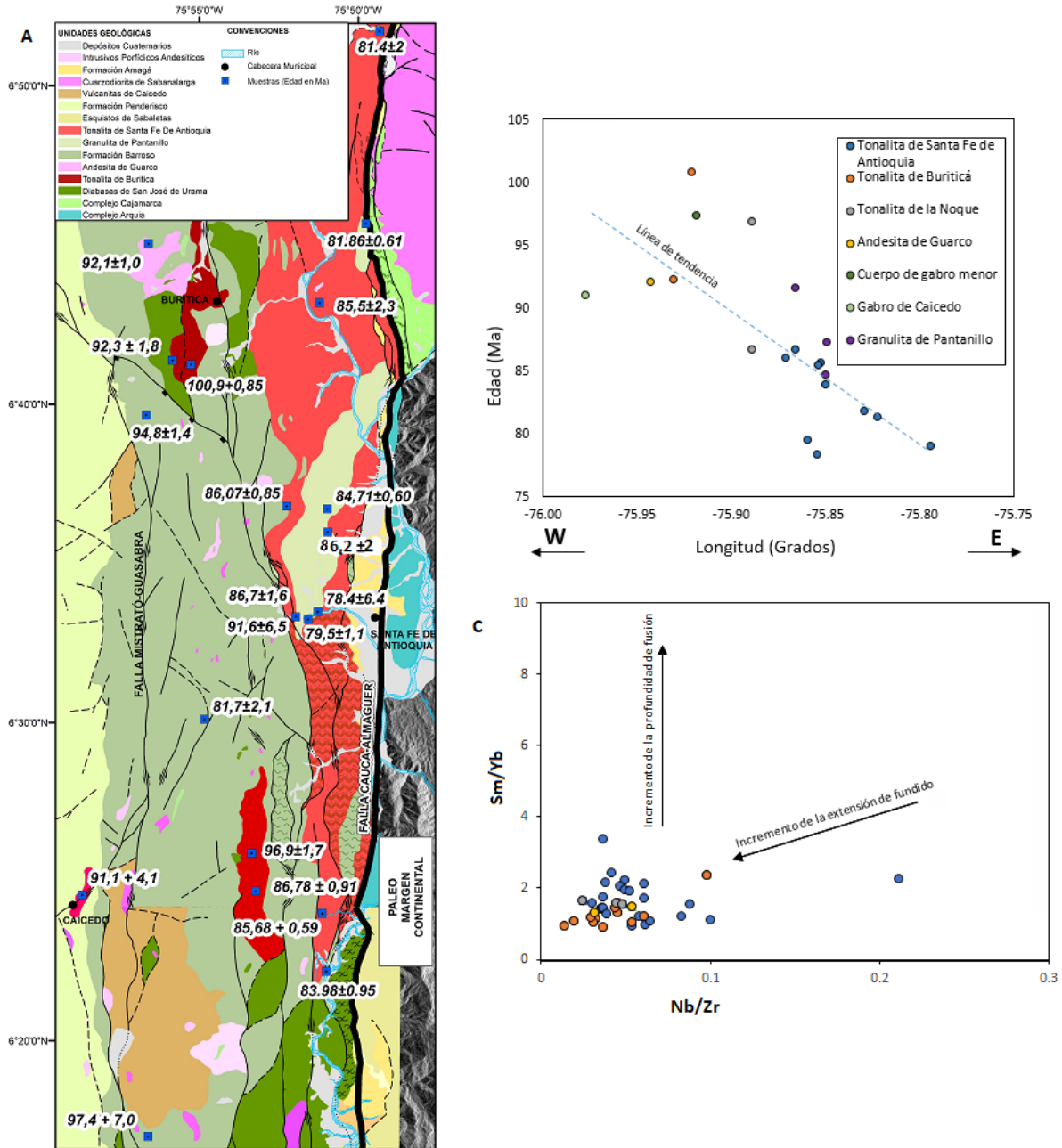


Figura 7. Geología del área de estudio y localización de edades U-Pb en circon en plutones y vulcanitas del ABS, junto con un diagrama de edad vs longitud y Nb/Zr vs Sm/Yb (He *et al.*, 2010).

## Conclusiones

En el área de estudio, la actividad de cristalización del ABS comenzó en  $100,9 \pm 0,85$  Ma (tonalita de Buriticá, tonalita de La Noque y cuerpos de gabros) y terminó en aproximadamente  $78,4 \pm 6,4$  Ma (tonalita Santa Fe de Antioquia).

A medida que se formaban los primeros plagiogranitos (tonalitas), cristalizaron pequeños cuerpos gabróticos derivados del arco, andesitas subvolcánicas y basaltos volcánicos con afinidad toleítica subalcalina. Los primeros fundidos cristalizaron entre  $100,9 \pm 0,85$  y  $91,1 \pm 4,1$  Ma, y están representados por *stocks* como las tonalitas de Buriticá y La Noque, y los gabros de El Palmar y Caicedo.

La ubicación espacial de los plutones de arco, las edades de cristalización y la profundidad relativa de generación de los fundidos sugieren migración de magmatismo en sentido oeste-este, por tal razón acogemos el modelo genético con dos *slab* inclinados hacia el este similar al propuesto por Botero-García *et al.* (2023).

## Agradecimientos

Agradecemos al Servicio Geológico Colombiano (SGC) por la financiación del proyecto. A los Laboratorios de Petrografía y Química del SGC por la elaboración de las secciones delgadas y los análisis químicos de las muestras. A Jimmy Alejandro Muñoz del Laboratorio de Geocronología del SGC por las dataciones radiométricas U-Pb en circón y a Juan Pablo Zapata por sus importantes aportes que enriquecieron significativamente la discusión.

## Referencias

Álvarez, E.; González, H. (1978). Geología y geoquímica del cuadrángulo I-7, Urrao. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras, Medellín. Informe.

Aspden, J.A. (1984). The geology of the western cordillera and pacific coastal plain in the department of Valle del Cauca, sheets 261, 278, 279, 280 and 299. INGEOMINAS-MISIÓN BRITÁNICA (British Geological Survey), Cali.

Botero-García, M.; Vinasco, C.J.; Restrepo-Moreno, S.A.; Foster, D.A.; Kamenov, G.D. (2023). Caribbean–South America interactions since the

Late Cretaceous: Insights from zircon U–Pb and Lu–Hf isotopic data in sedimentary sequences of the northwestern Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 123, 104231. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104231>

- Buchs, D.M.; Kerr, A.C.; Brims, J.C.; Zapata-Villada, J.P.; Correa-Restrepo, T.; Rodríguez, G. (2018). Evidence for subaerial development of the Caribbean oceanic plateau in the Late Cretaceous and palaeo-environmental implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 499, 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.07.020>
- Cardona, A.; León, S.; Jaramillo, J.; Montes, C.; Valencia, V.; Vanegas, J.; Bustamante, C.; Echeverri, S. (2018). The Paleogene arcs of the northern Andes of Colombia and Panama: Insights on plate kinematic implications from new and existing geochemical, geochronological and isotopic data. *Tectonophysics*, 749, 88-103. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.10.032>
- Cetina, L.M.; Tassinari, C.C.; Rodríguez, G.; Correa-Restrepo, T. (2019). Origin of pre-mesozoic xenocrystic zircons in cretaceous sub-volcanic rocks of the northern Andes (Colombia): paleogeographic implications for the region. *Journal of South American Earth Sciences*, 96, 102363. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102363>
- Corfu, F.; Hanchar, J.M.; Hoskin, P.W.; Kinny, P. (2003). Atlas of zircon textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1), 469-500. <https://doi.org/10.2113/0530469>
- Correa, T.; Obando, M.G.; Zapata-Villada, J.P.; Rincón, Á.V.; Ortiz, F.H.; Rodríguez, G.; Cetina, L.M. (2018). Geología del Borde Occidental de la Plancha 130, Santa Fe de Antioquia. Escala 1:50.000. Memoria Explicativa, Servicio Geológico Colombiano, Medellín.
- Correa, T.; Obando, M.; Ortiz, F.; Tobón, M.; Peláez, J.; Zapata, J.P.; Rodríguez, G. (2020). Geología del Borde Occidental de la Plancha 146 Medellín Occidental. Cartografía a Escala 1:50.000, Servicio Geológico Colombiano, Medellín.
- Coyner, S.J.; Kamenov, G.D.; Mueller, P.A.; Rao, V.; Foster, D.A. (2004). FC-1: a Zircon Reference Standard for the Determination of Hf Isotopic

- Compositions via Laser Ablation ICP-MS. *American Geophysical Union, Fall Meeting*. V51C-0584.
- Dessimoz, M.; Müntener, O.; Ulmer, P. (2012). A case for hornblende dominated fractionation of arc magmas: the Chelan Complex (Washington Cascades). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163(4), 567-589. <https://doi.org/10.1007/s00410-011-0685-5>
- Duque-Caro, H. (1990). El Bloque del Chocó en el noroccidente suramericano: Implicaciones estructurales, tectonoestratigráficas y paleogeográficas. *Boletín Geológico*, 31(1), 47-71. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol31.1.1990.179>
- Geoestudios. (2005). Complementación geológica, geoquímica y geofísica de la parte occidental de las planchas 130 Santa Fe de Antioquia y 146 Medellín Occidental. Escala 1:100.000. INGEOMINAS.
- Geología regional y Prospección Ltda. (2014). Memoria explicativa: Plancha 341 El Plateado. Bogotá.
- Gómez, J.; Montes, N.; Nivia, A.; Diederix, H. (2015). Mapa Geológico de Colombia 2015. Escala 1:1'000.000. Servicio Geológico Colombiano.
- González, H. (2001). Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. Escala 1:400.000. Memoria Explicativa, INGEOMINAS.
- He, Q.; Xiao, L.; Balta, B.; Gao, R.; Chen, J. (2010). Variety and complexity of the Late- Permian Emeishan basalts: Reappraisal of plume-lithosphere interaction processes. *Lithos*, 119(1-2), 91-107. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.07.020>
- Hellstrom, J.; Paton, C.; Woodhead, J.D.; Hergt, J.M. (2008). Iolite: software for spatially resolved LA-(Quad and MC)-ICP-MS analysis. *Laser Ablation-ICP-MS in the Earth Sciences: Current Practices and Outstanding Issues*, 343-348.
- Kerr, A.C.; Marriner, G.F.; Tarney, J.; Nivia, A.; Saunders, A.D.; Thirlwall, M.F.; Sinton, C.W. (1997). Cretaceous basaltic terranes in Western Colombia: Elemental, chronological and Sr-Nd isotopic constraints on petrogenesis. *Journal of Petrology*, 38(6), 677-702. <https://doi.org/10.1093/ptro/38.6.677>
- Le Maitre, R.W.; Bateman, P.; Dubek, A.; Keller, J.; Lameyre, J.; Le Bas, M.; Sabine, P.; Schid, R.; Sorensen, H.; Streckeisen, A.; Woolley, A.; Zannettin, B. (1989). *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Editorial Blackwell.
- Lesage, G. (2011). Geochronology, Petrography, Geochemical Constraints, and Fluid Characterization of the Buriticá Gold Deposit, Antioquia Department, Colombia. MSc. Thesis, University of Alberta. <https://doi.org/10.7939/R35M0M>
- Ludwig, K. (2012). User's Manual For Isoplot Version 3.75-4.15: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronological Center, Spec. Publ. No. 5, 75.
- Maya, M.; González, H. (1995). Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico*, 35(2-3), 44-57. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol35.2-3.1995.316>
- Nelson, H.W. (1962). Contribución al conocimiento de la Cordillera Occidental. Sección carretera Cali-Buenaventura. *Boletín Geológico* 10(1-3), 81-108. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol10.1-3.1962.235>
- Nivia, A. (1996). The Bolivar mafic-ultramafic complex, SW Colombia: the base of an obducted oceanic plateau. *Journal of South American Earth Sciences*, 9(1-2), 59-68. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(96\)00027-2](https://doi.org/10.1016/0895-9811(96)00027-2)
- Nivia, A. (2001). Mapa Geológico Departamento del Valle del Cauca. Escala 1:250.000. Memoria Explicativa. INGEOMINAS.
- Nivia, A.; Tarazona, C.; Paz, D. (2017). Geología y geocronología del batolito de Buga y el Macizo Ofiolítico de Ginebra, Colombia. Servicio Geológico Colombiano.
- Nivia, A.; Tarazona, C.; Paz, D.; Ríos, J. (2019). Patogénesis y edad de las rocas ultramáficas y máficas del Complejo ultramáfico de Venus, el



- Macizo Ofiolítico de Ginebra y su relación con el Batolito de Buga, Valle del Cauca. *XVII Congreso Colombiano de Geología* Bogotá.
- Pardo-Trujillo, A.; Cardona, A.; Giraldo, A.S.; León, S.; Vallejo, D.F.; Trejos-Tamayo, R.; Plata, A.; Ceballos, J.; Echeverri, S.; Barbosa-Espitia, A.; Slattey, J.; Salazar-Ríos, A.; Botello, G.E.; Celis, S.A.; Osorio-Granada, E.; Giraldo-Villegas, C.A. (2020). Sedimentary record of the Cretaceous–Paleocene arc–continent collision in the northwestern Colombian Andes: Insights from stratigraphic and provenance constraints. *Sedimentary Geology*, 401, 105627. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2020.105627>
- Parra, E. (1983). Geología de la Plancha 223 El Cairo. Escala 1:100.000 Memoria explicativa, INGEOMINAS.
- Paton, C.; Woodhead, J.D.; Hellstrom, J.C.; Hergt, J.M.; Greig, A.; Maas, R. (2010). Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(3). <https://doi.org/10.1029/2009GC002618>
- Paz, D.; Tarazona, A.; Nivia, A. (2017). Estructuras resultantes de la evolución reológica de magmas coetáneos y de composición contrastante en el Batolito de Buga, Colombia. *XVI Congreso Colombiano de Geología*, Santa Marta.
- Pearce, J.A. (2008). Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100(1-4), 14-48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- Peña-Urueña, M.L.; Muñoz-Rocha, J.A.; Urueña, C.L. (2018). Laboratorio de geocronología en el Servicio Geológico Colombiano: avances sobre datación U-Pb en circones mediante la técnica LA-ICP-MS. *Boletín Geológico*, 44, 39-56. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.44.2018.7>
- Petrus, J.A.; Kamber, B.S. (2012). VizualAge: A Novel Approach to Laser Ablation ICP-MS U-Pb Geochronology Data Reduction. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 36(3), 247-270. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2012.00158.x>
- Pindell, J.L. (1993). Regional synopsis of Gulf of Mexico and Caribbean evolution. In: J.L. Pindell, B.F. Perkins (eds.). *Mesozoic and Early Cenozoic Development of the Gulf of Mexico and Caribbean Region: A Context for Hydrocarbon Exploration* (pp. 251-274). SEPM Society for Sedimentary Geology. <https://doi.org/10.5724/gcs.92.13.0251>
- Renne, P.R.; Swisher, C.C.; Deino, A.L.; Karner, D.B.; Owens, T.L.; DePaolo, D.J. (1998). Intercalibration of standards, absolute ages and uncertainties in  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating. *Chemical Geology*, 145, 117-152. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00159-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00159-9)
- Rodríguez, G.; Arango, M.I.; Bermúdez, J.G. (2012a). Batolito de Sabanalarga, plutonismo de arco en la zona de sutura entre las cortezas oceánica y continental de los Andes del norte. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 32, 81-98.
- Rodríguez, G.; González, H.; Restrepo, J.J.; Martens, U.; Cardona, J.D. (2012b). Ocurrence of granulites in the northern part of the western cordillera of Colombia. *Boletín de Geología*, 34(2), 37-53.
- Rodríguez, G.; Zapata, G. (2012). Características del plutonismo Mioceno superior en el segmento norte de la cordillera Occidental e implicaciones tectónicas en el modelo geológico del noroccidente colombiano. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 31, 5-22.
- Rodríguez, G.; 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 de Ciencias de la Tierra*, 33, 17-38.
- Rubatto, D. (2002). Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184(1-2), 123-138. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(01\)00355-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00355-2)
- Ruprecht, P.; Simon, A.C.; Fiege, A. (2020). The survival of mafic magmatic enclaves and the timing of magma recharge. *Geophysical Research Letters*, 47(14), e2020GL087186. <https://doi.org/10.1029/2020GL087186>

- Sláma, J.; Košler, J.; Condon, D.J.; Crowley, J.L.; Gerdes, A.; Hanchar, J.M.; Horstwood, M.S.A.; Morris, G.A.; Nasdala, L.; Norberg, N.; Schaltegger, U.; Schoene, B.; Tubrett, M.N.; Whitehouse, M.J. (2008). Plešovice zircon - A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1-2), 1-35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>
- Stacey, J.S.; Kramers, J.D. (1975). Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26(2), 207-221. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(75\)90088-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90088-6)
- Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*, 12(1), 1-33. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(76\)90052-0](https://doi.org/10.1016/0012-8252(76)90052-0)
- Streckeisen, A. (1979). Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites, and melilitic rocks: Recommendations and suggestions of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Geology*, 7(7), 331-335. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1979\)7<331:CANOVR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1979)7<331:CANOVR>2.0.CO;2)
- Taboada, A.; Rivera, L.A.; Fuenzalida, A.; Cisternas, A.; Philip, H.; Bijwaard, H.; Olaya, J.; Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19(5), 787-813. <https://doi.org/10.1029/2000TC900004>
- Toro-Toro, L.M.; Vallejo, F.; Salazar-Ríos, A.; Murcia, H.; Osorio-Ocampo, S.; García-Arias, M.; Arredondo, C. (2020). Granulitic rocks at the Western Cordillera of Colombia: Evidence of metamorphism in the Colombian Caribbean Oceanic Plateau. *Journal of South American Earth Sciences*, 101, 102632. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102632>
- Vallejo, C.; Spikings, R.A.; Luzieux, L.; Winkler, W.; Chew, D.; Page, L. (2006). The early interaction between the Caribbean Plateau and the NW South American Plate. *Terra Nova*, 18(4), 264-269. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2006.00688.x>
- Villagómez, D. (2010). Thermochronology, geochronology and geochemistry of the Western and Central cordilleras and Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia: The tectonic evolution of NW South America. PhD Thesis. Université De Genève. <https://doi.org/10.13097/archive-ouverte/unige:14270>
- Villagómez, D.; Spikings, R.; Magna, T.; Kammer, A.; Winkler, W.; Beltrán, A. (2011). Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia. *Lithos*, 125(3-4), 875-896. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.05.003>
- Villagómez, D.; 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, 228-249. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.12.008>
- Weber, M.; Gómez-Tapias, J.; Cardona, A.; Duarte, E.; Pardo-Trujillo, A.; Valencia, V.A. (2015). Geochemistry of the Santa Fé 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. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.04.002>
- Wiebe, R.A. (2016). Mafic replenishments into floored silicic magma chambers. *American Mineralogist*, 101(2), 297-310. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5429>
- Wiedenbeck, M.; Allé, P.; Corfu, F.; Griffin, W.L.; Meier, M.; Oberli, F.; Von Quadt, A.; Roddick, J.C.; Spiegel, W. (1995). Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and Re Analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1), 1-23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x>
- Wiedenbeck, M.; Hanchar, J.M.; Peck, W.H.; Sylvester, P.; Valley, J.; Whitehouse, M.; Kronz, A.; Morishita, Y.; Nasdala, L.; Fiebig, J.; Franchi, I.; Girard, J.P.; Greenwood, R.C.; Hinton, R.; Kita, N.; Mason, P.R.D.; Norman, M.; Ogasawara, M.; Piccoli, P.M.; Rhede, D.; Satoh, H.; Schulz-Dobrick, B.; Skår, O.; Spicuzza, M.J.; Terada,

- K.; Tindle, A.; Togashi, S.; Vennemann, T.; Xie, Q.; Zheng, Y.F. (2004). Further characterisation of the 91500 zircon crystal. *Geostandard, and Geoanalytical Research*, 28(1), 9-39. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2004.tb01041.x>
- Zapata, G.; Rodríguez, G. (2011). Basalto de El Botón, arco volcánico mioceno de afinidad shoshonítica al norte de la cordillera Occidental de Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 30, 77-91.
- Zapata-García, G.; Rodríguez-García, G. (2020). New contributions to knowledge about the Chocó-Panamá Arc in Colombia, including a new segment south of Colombia. In: J. Gómez, D. Mateus-Zabala (eds.). *The Geology of Colombia* (pp. 417-450). Volume 3. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.14>
- Zapata-Villada, J.P.; Giraldo, W.; Rodríguez, G.; Geraldés, M.C.; Obando, M. (2021a). Geoquímica y geocronología U-Pb de la cuarzodiorita de Sabanalarga y el gabro de Santa Fe, Colombia. *Boletín la Sociedad Geológica Mexicana*, 73(1), A280520. <https://doi.org/10.18268/bsgm2021v73n1a280520>
- Zapata-Villada, J.P.; Cardona, A.; Serna, S.; Rodríguez, G. (2021b). Late Cretaceous to Paleocene magmatic record of the transition between collision and subduction in the Western and Central Cordillera of northern Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 112(Part 1), 103557. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103557>

---

---

Fecha de recibido: 08 de septiembre de 2022

Fecha de aceptado: 28 de abril de 2023

---

---