

Edades U-Pb en circón en neises y anfibolitas del Complejo de Puquí y el Grupo Valdivia, y nueva nomenclatura estratigráfica sugerida para unidades de los alrededores del Proyecto Hidroitungo

U-Pb zircon ages in neisses and amphibolites of the Puquí Complex and the Valdivia Group, and new stratigraphic nomenclature suggested for units around the Hidroitungo Project

Gabriel Rodríguez-García*  & Carlos Sabrica 
(* grodriguez@sgc.gov.co, csabrica@unal.edu.co
Grupo de Estudios Geológicos Especiales, Medellín, Colombia.

Manuscrito recibido: 6 de junio de 2023.

Recibido en formato revisado: 17 de agosto de 2023.

Aceptado: 22 de agosto de 2023

Resumen

Las nuevas edades U-Pb en circón obtenidas en unidades metamórficas del Complejo de Puquí y el Grupo Valdivia, de un sector al noroccidente de Antioquia, entre las cordilleras Central y Occidental del norte de los Andes, evidencian tres eventos geológicos regionales diferentes: 1) edades de cristalización durante el Ordovícico (Neis de La Vereda Rodríguez) comparable a las edades obtenidas más al oriente y al sur en el Neis de La Miel y el Neis de La Perla; 2) Metamorfismo y metamorfismo anatóctico durante el Triásico medio (Neis de Pescadero, Neis Porfiroblástico de Toledo, Anfibolitas de Puente La Palestina y edades en rocas deformadas) evento regional común a otros cuerpos de neises de la cordillera Central en el denominado Terreno Tahamí; 3) edades máximas de depositación cretácicas (ca. 72 Ma), en una unidad de esquistos de cuarzo, moscovita, biotita, similares a las obtenidas en rocas metamórficas y deformadas en la margen occidental de Suramérica e interpretadas como resultado de la colisión del Plateau oceánico contra la margen continental. Proponemos nueva nomenclatura para unidades anteriormente cartografiadas dentro del Complejo de Puquí, como son el Neis de La Vereda Rodríguez, el Neis Porfiroblástico de Toledo y las Anfibolitas de Puente La Palestina, con base en los resultados de geocronología y la cartografía existente.

Palabras clave: Colombia; edades U-Pb; rocas metamórficas; Tahamí; Cordilleras Central y Occidental.

Abstract

New U-Pb in zircon ages obtained in metamorphic units of the Puquí Complex and the Valdivia Group, from a sector in northwestern Antioquia, between the Central and Western Cordilleras of the Northern Andes, evidence three different regional geological events: 1) crystallization ages during the Ordovician (La Vereda Rodriguez Gneiss), comparable to ages obtained further east and south in the La Miel Gneiss and La Perla Gneiss; 2) Metamorphism and anatectic metamorphism during the Middle Triassic (Pescadero Gneiss, Toledo Porphyroblastic Gneiss, Puente La Palestina Amphibolites, and ages in deformed rocks), a regional event common to other gneissic bodies of the Central Cordillera in the Tahamí Terrane; 3) maximum Cretaceous depositional ages (ca. 72 Ma) in a biotite-moscovite-quartz schists unit, similar to those obtained in metamorphic and deformed rocks in the western margin of South America, and interpreted as a result of the collision of the oceanic Plateau against the continental margin. We propose a new nomenclature for previously mapped units within the Puquí Complex, such as the La Vereda Rodríguez Gneiss, the Toledo Porphyroblastic Gneiss, and the Puente La Palestina Amphibolites, based on geochronology results and existing mapping.

Keywords: Colombia; U-Pb ages; Metamorphic rocks; Tahamí; Western and Central cordilleras

Como citar este artículo:

Rodríguez-García, G. y Sabrica, C., (2023). Edades U-Pb en circón en neises y anfibolitas del Complejo de Puquí y el Grupo Valdivia, y nueva nomenclatura estratigráfica sugerida para unidades de los alrededores del Proyecto Hidroitungo. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA, 54, pp. 27 - 47. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.109380>.

1. Introducción

Las unidades metamórficas datadas, alrededor del proyecto Hidroituango, son parte de una serie de bloques que se acoplaron a la margen activa de Gondwana a partir del Jurásico, contra el basamento Neoproterozoico (Terreno Chibcha) y contra las rocas de arco de margen continental del Carbonífero, Pérmico, Triásico medio y Jurásico temprano a medio, que conforman el basamento continental en el norte de Suramérica (Rodríguez *et al.*, 2022a). Los bloques acoplados a la margen continental comprenden basamentos metamórficos diversos y heterogéneos en composición, origen y edad. Se han reconocido ortoneises ordovícicos como los neises de La Miel y La Perla, entre otros (Restrepo *et al.*, 2009; Villagómez *et al.*, 2011; Martens *et al.*, 2014, Rodríguez *et al.*, 2023a), así como anfibolitas de La Aguadita y Caldas (Rodríguez *et al.*, 2016; Correa *et al.*, 2020) del Terreno Anacona – (Martens *et al.*, 2014). Numerosos cuerpos de neises, granitoides anatócticos, esquistos y anfibolitas se distribuyen a lo largo y ancho de la cordillera Central y conforman el mayor basamento metamórfico acoplado, el cual arroja edades de metamorfismo y anatexis del Triásico medio (Restrepo *et al.*, 1991; 2009; 2011; Vinasco *et al.*, 2006; Cochrane *et al.*, 2014; Martens *et al.*, 2014; Correa Martínez *et al.*, 2020; Rodríguez *et al.*, 2023b) y conforman el Terreno Tahamí. Datos más recientes indican que la corteza metamórfica de la cordillera Central, y localmente de la Occidental, es heterogénea y se han determinado orógenos y bloques de corteza metamórfica del Jurásico tardío (Blanco Quintero *et al.*, 2014; Rodríguez *et al.*, 2023a), del Cretácico inferior (Rodríguez *et al.*, 2016; Correa Martínez *et al.*, 2020), del Cretácico medio (Restrepo *et al.*, 2012; Rodríguez *et al.*, 2016; Correa Martínez *et al.*, 2020) y del Cretácico superior, con una distribución espacial aún no determinada (Correa Martínez *et al.*, 2020). En el pasado se agruparon las unidades y se denominaron Grupo Valdivia (Hall *et al.*, 1972), Complejo Cajamarca y Complejo de Puquí – (Hall *et al.*, 1972; Maya y González, 1995) y se asociaron al Terreno Tahamí.

El levantamiento geológico, el muestreo de campo y los análisis geocronológicos U-Pb en circón, realizados a lo largo del corredor vial Hidroituango – Puerto Valdivia e Hidroituango – Ituango, dentro de las actividades de los proyectos: Geología de Rescate y Ortoneises de la cordillera Central del Servicio Geológico Colombiano, en unidades metamórficas que estaban cartografiadas como Grupo Valdivia, Complejo de Puquí, Neis de Pescadero y neises porfiroblásticos, muestran la heterogeneidad de los basamentos metamórficos acoplados a la margen continental occidental de Gondwana. En este trabajo se presenta el levantamiento geológico de la vía que une el Valle de Toledo con Puerto Valdivia realizado por Correa y García (2018), nuevos datos de geocronología U-Pb (LA-ICP-MS) en circón y de petrografía permiten separar nuevas unidades metamórficas y hacer un aporte al conocimiento del metamorfismo en los Andes de Colombia.

2. Marco geológico

El área de estudio se localiza entre las fallas Espíritu Santo y Santa Rita, ubicadas geográficamente en las cordilleras Occidental y Central, del lado occidental de la Falla Espíritu Santo y del río Cauca, y del lado oriental de Sistema de Fallas de Romeral, hace parte de lo que se ha conocido como el terreno Tahamí (Restrepo y Toussaint, 2020). La geología del área está conformada por rocas metamórficas descritas como Grupo Valdivia, Complejo de Puquí (Hall *et al.*, 1972; González, 2001) y Neis de Pescadero (Restrepo *et al.*, 1991) (Fig. 1). El Grupo Valdivia está compuesto por metamórfitas de bajo a medio grado: esquistos, neises y ocasionales bandas de meta-sedimentitas y filitas; en contactos netos y gradacionales, con algunos sectores donde afloran rocas deformadas (milonitas), relacionadas principalmente al trazo de la Falla Santa Rita.

El Complejo de Puquí, en el sentido de González (2001), comprende neises micáceos, metatonalitas y migmatitas complejas descritas por Hall *et al.* (1972), forma un bloque acunado de 750 km² en la parte noroccidental de las cordilleras Central y Occidental de Colombia, está cubierto al norte por sedimentos del Neógeno y Cuaternario. Se describió como una unidad constituida por rocas de mediano a alto grado de metamorfismo: anfibolitas y neises, con cuerpos tabulares de rocas ígneas básicas y ultrabásicas. Los contactos litológicos son generalmente netos y fallados, con relaciones litológicas complejas, abundantes estructuras migmatíticas y potentes zonas miloníticas a lo largo de la vía Puerto Valdivia – Valle de Toledo.

3. Material y método

3.1 Recopilación de información

La compilación de información y el levantamiento geológico de la vía fue realizado por Correa y García (2018). La base geológica empleada corresponde a la de las Planchas 104-Ituango, 105-Valdivia, 115-Toledo a escala 1:100 000, elaboradas por Álvarez *et al.* (1975), que comprenden la geología de los cuadrángulos H7-Ituango y H8-Yarumal (Hall *et al.*, 1972), la memoria explicativa del mapa geológico de Antioquia (González, 2001) y la memoria explicativa del mapa fotogeológico con control de campo de la Plancha 93-Cáceres (Zapata y Cossio, 1999).

3.2 Trabajo de campo

El levantamiento geológico se realizó de manera continua a lo largo del corredor vial Valle de Toledo-Hidroituango-Puerto Valdivia y Hidroituango-Ituango, identificando con estaciones de campo los afloramientos con características geológicas importantes y con mejores condiciones de exposición; adicionalmente se registraron todos los cambios litológicos y texturales, los contactos y las estructuras encontradas. Se tomaron muestras para análisis petrográficos y dataciones radiométricas de acuerdo con las características observadas y las dimensiones de los cuerpos de roca identificados.

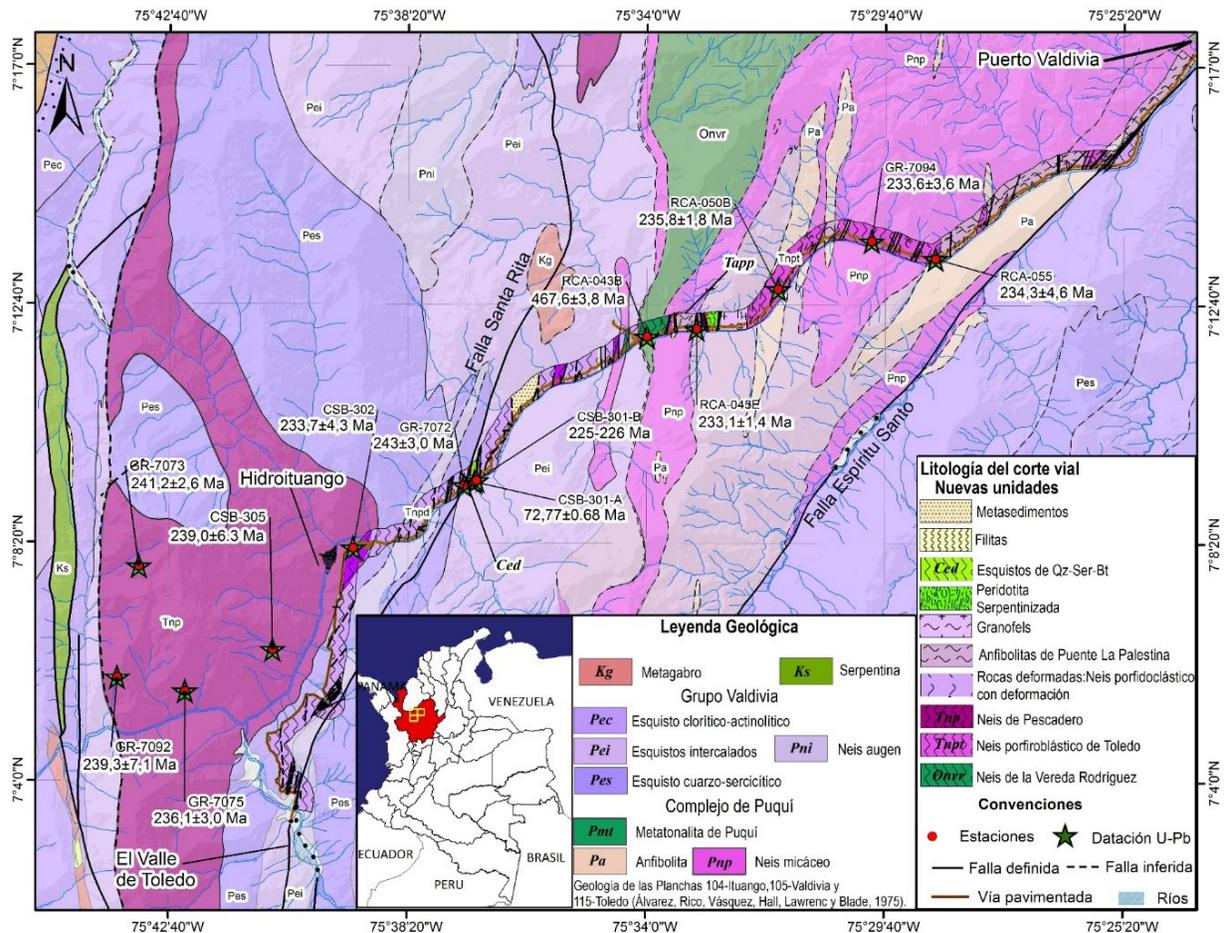


Figura 1. Mapa geológico del área de estudio. Fuente: modificado de las planchas geológicas 104 Ituango, 105 Valdivia (Álvarez *et al.*, 1975) y corte vial de Correa y García (2018).

3.3 Análisis de laboratorio

Las secciones delgadas se elaboraron en el Laboratorio de Petrografía del Servicio Geológico Colombiano de Bogotá y Medellín. El análisis e interpretación de las secciones delgadas se realizó en microscopios petrográficos marca Leitz Laborlux 12 Pol y Olympus BX53M, con descripción de las texturas, minerales y conteo modal manual entre 150 y 400 puntos de los minerales. Las microfotografías fueron adquiridas en cámaras Olympus Q-Color5™ y Olympus UC50 acopladas a los microscopios mencionados. En las tablas se utilizaron las abreviaturas de minerales de Whitney y Evans (2010).

Se obtuvieron trece edades U-Pb por LA-ICP-MS en circón (*Laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry*), en el Laboratorio de Geocronología del Servicio Geológico Colombiano (SGC) (Tabla Suplementaria 1-TS1). Antes de los análisis *in situ* por ablación láser, las superficies pulidas de los granos de circón fueron fotografiadas en catodoluminiscencia (CL) (Figuras Suplementarias 1-FS1), utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM IT-300LV equipado con un detector de catodoluminiscencia Gatan miniCL EGA 0028. Posteriormente las muestras fueron lavadas con agua desionizada de resistividad 18,2 MΩ y, antes de ser

introducidas en la celda de ablación, la superficie fue limpiada con HNO₃ ultrapuro (1 mol/L).

Las dataciones U-Pb se obtuvieron según la metodología de Peña *et al.* (2018). Los análisis se realizaron en un equipo de ablación Photon Machines con un láser Excimer de 193 nm, acoplado a un espectrómetro de masas tipo Element 2. Los isótopos utilizados para la integración manual son ²³⁸U, ²⁰⁶Pb y ²⁰⁴Pb. Como patrones de referencia se usaron: Plešovice (Sláma *et al.*, 2008), FC-1 (Coyner *et al.*, 2004), circón 91500 (Wiedenbeck *et al.*, 1995) y Mount Dromedary (Renne *et al.*, 1998).

4. Resultados

4.1 Características macroscópicas y microscópicas de las unidades metamórficas en los alrededores del proyecto Hidroituango

Al occidente de Hidroituango aflora el Neis de Pescadero constituido por rocas de estructura néisica descritas por Muñoz (1980) y posteriormente por González y Londoño (2002). Al oriente de la presa aflora una secuencia de esquistos, filitas y neises del Grupo Valdivia (Hall *et al.*, 1972) y en la vía Hidroituango - Puerto Valdivia las rocas están representadas por anfibolitas y neises del

Complejo de Puquí (Hall *et al.*, 1972). De estas unidades metamórficas se separó el Neis de la Vereda Rodríguez, Neis de Pescadero, Neis porfiroblástico de Toledo, Anfíbolitas de Puente La Palestina y se describen algunas rocas deformadas.

Neis de la Vereda Rodríguez. El Neis de La Vereda Rodríguez aflora al nororiente de la represa de Hidroituango, había sido descrito como “Neis micáceo” (Hall *et al.*, 1972) (Fig. 1); presenta estructura gnésica y localmente esquistosa, con budines de 1-3 cm de espesor de cuarzo, feldespato y bandas lepidoblásticas de clorita que pueden estar plegadas (Fig. 2 g). Localmente el neis se encuentra intercalado con bandas félsicas y máficas deformadas. Los contactos de esta unidad, a lo largo de la vía Hidroituango-Puerto Valdivia, son fallados, al oriente con un cuerpo de neis augen y al occidente con un neis micáceo.

Microscópicamente esta unidad corresponde a un neis porfiroblástico de plagioclasa-cuarzo-biotita-moscovita con turmalina (Fig. 3 a y b). Presenta textura porfiroblástica con cristales de plagioclasa de 1 cm de diámetro y textura granolepidoblástica con láminas de moscovita, biotita, clorita y cuarzo deformado. Las micas se encuentran flexionadas y se agrupan con agregados de cuarzo en lentes discontinuos de 3 a 4,2 mm de espesor. El Neis está constituido por plagioclasa (40 %), cuarzo (30%), biotita (15%), moscovita (8%), clorita (5), turmalina (2 %) y como minerales accesorios, grafito, circón, sericita y titanita.

Neis de Pescadero. El Neis de Pescadero aflora al occidente de la represa de Hidroituango; las rocas presentan texturas granoblásticas a granolepidoblásticas y estructura néisica, con bandas claras de cuarzo - feldespato y oscuras de moscovita, clorita y biotita y porfidoblastos de granate (Fig. 2 a y c). La roca está foliada, tiene lentes de cuarzo de 1-2 mm de espesor. Localmente, el neis es cortado por diques y venas de pegmatitas de cuarzo, feldespatos y turmalina (1%), de grano medio a grueso (Fig. 2b). Los contactos a lo largo del corte son netos entre el neis y los esquistos.

Esta unidad está constituida por neises de plagioclasa-cuarzo-moscovita-clorita con zoisita y biotita, neises de cuarzo-feldespato-biotita-moscovita-granate ± zoisita ± clorita ± turmalina, pegmatitas graníticas y en el borde oriental cerca de la represa de Hidroituango por un neis micáceo con granate y zoisita. Los neises presentan textura granolepidoblástica, con láminas orientadas de moscovita y clorita y porfidoblastos de granate bordeado por láminas de sericita y moscovita, y cuarzo en mosaicos de grano fino (Fig. 3 d y e). Están compuestos por plagioclasa (31,5-21,24 %), feldespato potásico (3,7-0 %), cuarzo (48,4-46,6 %), biotita (12,4-1,7 %), moscovita (30,8-11 %), clorita (15-6 %) y granate (12,6%); como minerales accesorios tiene apatito, circón, turmalina y titanita. Se considera un neis de dos micas, con protolito sedimentario. Las pegmatitas presentan textura alotriomórfica inequigranular con cuarzo poiquilítico a intersticial y plagioclasas poiquilíticas con gotas de cuarzo en la matriz. Están compuestas por plagioclasa (16,4 %), feldespato potásico (59,9 %), cuarzo (23,2%), moscovita (1 %), clorita (15-6 %) y como minerales accesorios tienen apatito, circón, turmalina y titanita.

Neis porfiroblástico de Toledo. El Neis porfiroblástico de Toledo, aflora al nororiente de la presa de Hidroituango, fue descrito como “Neis micáceo” (Hall *et al.*, 1972), tiene textura granoporfiroblástica e incipiente lepidoblástica y estructura néisica (Fig. 2 f, i), es de tamaño de grano grueso, inequigranular, de color

gris oscuro con orientación mineral. Está compuesto por feldespato (40%), cuarzo (30%), biotita (25%) y moscovita (5%). Los porfiroblastos de feldespato y cuarzo varían entre 12-60 mm y está marcado por bandas de biotita de grano medio, inequigranulares con textura granolepidoblástica. Los contactos con las unidades adyacentes son fallados y netos

Microscópicamente, está constituido por un neis porfiroblástico de cuarzo-plagioclasa-moscovita-biotita y granate (Fig. 3 i, l). Este neis presenta porfiroblastos de plagioclasa, cuarzo y granate bordeados por láminas de biotita, moscovita acompañada de cuarzo recristalizado y textura granolepidoblástica con orientación de biotita, moscovita y agregados de cuarzo (Fig. 3 c y f). La biotita y moscovita están flexionadas y deformadas en láminas discontinuas y el cuarzo está recristalizado con tamaño de grano fino. El neis está constituido por cuarzo (40%), plagioclasa (25%), moscovita (15%), biotita (12%), granate (8 %) y como minerales accesorios, grafito, circón, sericita y apatito.

Anfíbolitas de Puente La Palestina. Las Anfíbolitas de Puente La Palestina aflora al nororiente de Hidroituango, es un cuerpo tabular delgado con orientación NNE, las rocas son masivas, equigranulares, de grano medio (1-2 mm), con bandas de anfíbol y bandas félsicas de plagioclasa (Fig. 2 h). Localmente, presenta estructura migmatítica y contactos fallados. Se clasifican como anfíbolitas con textura nematoblástica. Están constituidas por hornblenda actinolítica (66-43 %), plagioclasa (24-44 %) y epidota (7%) (Fig. 3 g y h); como minerales accesorios tiene apatito, titanita, opacos, circón, calcita y cuarzo. La hornblenda actinolítica se presenta en cristales primarios alargados y en rombos, de tamaños entre 0,7 mm y 2,0 mm, de color amarillo tenue a marrón pálido, con clivaje bien definido en dos direcciones, localmente con leve alteración a clorita. La plagioclasa es xenomórfica con tamaños entre 100 µm y 350 µm, con fuerte alteración a saussurita. La epidota es anhedral, incolora, de relieve alto, clivaje en una dirección y se encuentra asociada a la plagioclasa.

Rocas deformadas. Las rocas deformadas están constituidas por intercalaciones métricas de esquistos cuarzo sericiticos, esquistos miloníticos y neises porfidoclasticos con deformación milonítica. Los esquistos son de textura lepidoblástica, con estructura esquistosa (Fig. 2 e). Están constituidos por cuarzo, biotita y moscovita. El cuarzo se encuentra en láminas y lentes deformados de 1-2 cm de espesor y las micas se presentan en láminas muy finas. Los neises porfidoclasticos con deformación milonítica presentan textura porfidoclastica y granolepidoblástica (Fig. 2 d) con bandas claras de cuarzo, feldespato y bandas oscuras de biotita y anfíboles.

Petrográficamente, las rocas deformadas corresponden a neises porfidoclasticos de cuarzo-plagioclasa-moscovita con turmalina y esquistos miloníticos de hornblenda actinolítica-plagioclasa con cuarzo y calcita. Los neises presentan textura lepidoblástica con orientación de láminas de moscovita, clorita y sericita que marcan la foliación de la roca y porfidoclastos de cuarzo, plagioclasa y turmalina (Fig. 3 j y k). Los esquistos miloníticos presentan porfidoclastos finos de plagioclasa con extinción anómala, anfíboles doblados y flexionados que marcan la foliación de la roca. Estas rocas están constituidas por hornblenda actinolítica (66%), cuarzo (35-4%), plagioclasa (23-26%), sericita (19,5%), moscovita (10%), clorita (8,4 %) y como minerales accesorios turmalina, grafito, circón, epidota, calcita y titanita.

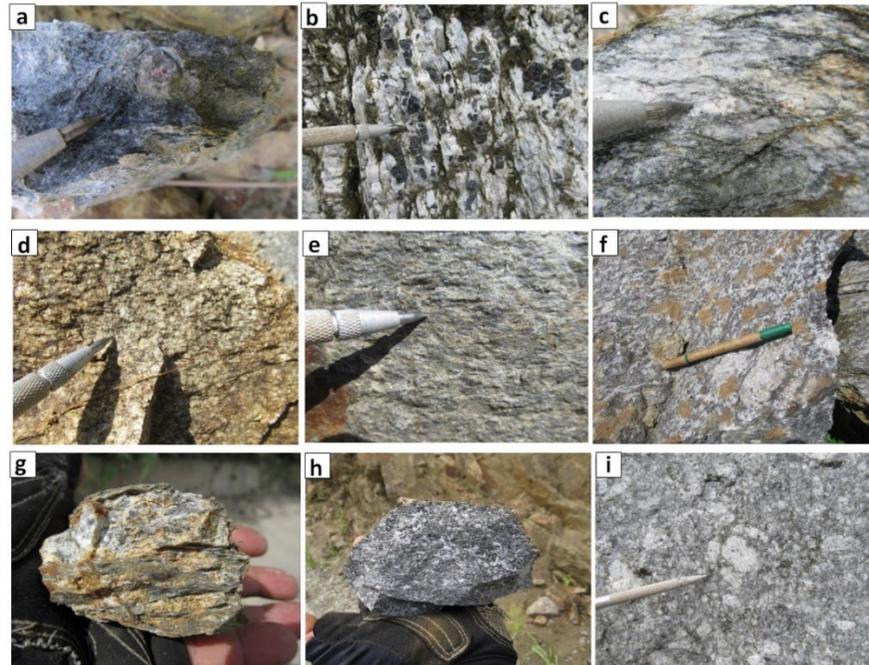


Figura 2. Características macroscópicas de rocas del Grupo Valdivia y el Complejo de Puquí. a y c) Neis de Pescadero, aspecto macroscópico de neis de cuarzo-feldespato-biotita-moscovita-granate ± zoisita ± clorita ± turmalina; b) Neis de Pescadero, diques de pegmatita con turmalina; d) cuerpos de neis deformados, neis porfiroclástico con deformación milonítica; e) esquistos cuarzo sericitico; f e i) Neis Porfiroblástico de Toledo; g) Neis de la Vereda Rodríguez; h) Anfibolita de Puente La Palestina.

Fuente: los autores.

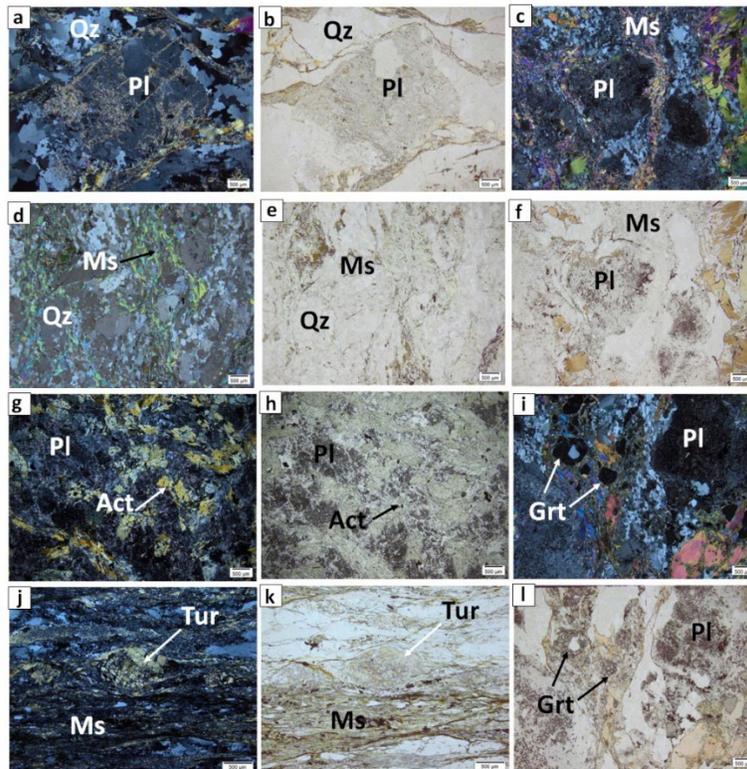


Figura 3. Características microscópicas de rocas del Grupo Valdivia y el Complejo de Puquí. a y b) nicolos cruzados y paralelos (Nx y NIl); aspecto microscópico del Neis de la Vereda Rodríguez; neis porfiroblásticos de plagioclasa-cuarzo-biotita-moscovita con turmalina; c, f, i y l) Neis porfiroblástico de Toledo; neis porfiroblástico de cuarzo-plagioclasa-moscovita-biotita y granate; d y e) (Nx y NIl) Neis de Pescadero; neis de plagioclasa-cuarzo-moscovita-clorita con zoisita y biotita; g y h) (Nx y NIl) Anfibolitas de Puente La Palestina, anfibolita: j y k) (Nx y NIl) rocas deformadas; neis porfiroclásticos de cuarzo-plagioclasa-moscovita con turmalina.

Fuente: los autores.

Tabla 1.
Edades U-Pb en rocas de unidades metamórficas.

Muestra	Latitud	Longitud	Altura (m)	Clasificación	Método	Edad (Ma)	MSWD	Unidad litológica
GR-7073	7°07'54.64"	75°43'12.74"	1314	Neis de Qz-Pl-Ms-Bt-Zo	U-Pb en circón	241,2±2,6	0,61	Neis de Pescadero
GR-7075	7°05'38.25"	75°42'21.99"	751	Neis de Qz-Pl-Ms, Chl con Zo y Bt	U-Pb en circón	236,1±3,0	1,15	Neis de Pescadero
CSB-305	7°06'25.65"	75°40'47.43"	715	Neis de Qz-Pl-Ms con Bt	U-Pb en circón	239,0±6,3	3,0	Neis de Pescadero
GR-7092	7°05'54.52"	75°43'36.00"	1022	Dique de granito pegmatítico	U-Pb en circón	239,3±7,1	3,7	Neis de Pescadero
RCA-050B	7°12'58.82"	75°31'37.13"	348	Neis porfiroblástico de Pl+Qz+Act con Bt y Chl	U-Pb en circón	235,8±1,8	2	Neis porfiroblástico de Toledo
RCA-043B	7°12'06.02"	75°33'59.81"	268	Neis de Qz, Flk con Ms	U-Pb en circón	467,6±3,8	1,3	Neis de la Vereda Rodríguez
RCA-055	7°13'32.20"	75°28'45.85"	331	Milonita	U-Pb en circón	234,3±4,6	0,34	Roca de falla
RCA-045E	7°12'14.48"	75°33'05.77"	268	Anfibolita	U-Pb en circón	233,1±1,4	1,8	Anfibolitas de Puente La Palestina
CSB-301-A	7°09'26.41"	75°37'07.16"	312	Esquisto de Qz-Ser-Bt retrograda a Chl con Tur	U-Pb en circón	72,77±0,68	3,3	Neis Porfiroclástico
CSB-301-B	7°09'28.22"	75°37'05.16"	304	Neis porfiroclástico de Qz-Pl-Ms con tur	U-Pb en circón	225,87±7,52 y 226,01±6,26		Neis Porfiroclástico
CSB-302	7°08'17.45"	75°39'20.10"	270	Neis micáceo con granate y zoisita	U-Pb en circón	233,7±4,3	3,4	Neis de Pescadero
GR-7072	7°09'23.36"	75°37'18.54"	309	Esquisto milonítico formado a partir de anfibolita constituida por Pl y Anf	U-Pb en circón	243,0±3,0	2,8	Cuerpo de Anfibolita deformado
GR-7094	7°13'51.26"	75°29'55.02"	368	Neis porfiroblástico de Pl+Qz+Bt con Grt	U-Pb en circón	233,6±3,6	3	Neis porfiroblástico de Toledo

Fuente: los autores.

5. Edades

Para determinar las edades de metamorfismo de las diferentes unidades se dataron 13 muestras de roca por el método LA-ICP-MS (*Laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry*) (Tabla suplementaria 1 -Ts1), previa descripción petrográfica. Para la selección de las muestras se tuvo en cuenta la distribución espacial de las muestras y las unidades metamórficas. Los resultados y la localización de las dataciones se presentan en la Fig. 1 y en la Tabla 1 Se describen por unidad litológica, a partir de la nueva nomenclatura propuesta en esta investigación.

5.1 Neis de la Vereda Rodríguez

De esta unidad se analizó una sola muestra (RCA-043B), que corresponde a un neis de cuarzo, feldespato con moscovita. Los circones de la muestra RCA-043B forman dos poblaciones. La primera corresponde a circones de forma achatada, redondeada, incoloros a verde claro. Los segundos son subelongados en forma de tallos incoloros y con tamaños entre 67 μm y 125 μm . Las imágenes de catodoluminiscencia muestran diferentes texturas: cristales con núcleos heredados oscuros y bordes de sobre crecimiento ígneo con texturas concéntricas alrededor de los núcleos, cristales con núcleos y bordes con zonaciones oscilatorias de tonalidad gris oscuro a claro y con edades similares en bordes y núcleos y cristales subredondeados que corresponden a xenocristales heredados (Fig. 4).

De la muestra RCA-043B se separaron 68 circones, se realizaron 113 ablaciones y se descartaron un total de 31 análisis que tienen discordancias >10 y errores >5. Los datos aceptados (82)

arrojaron resultados de $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ entre $387\pm 15,4$ Ma y $3000\pm 128,2$ Ma. Se presentan dos edades en bordes de cristales, que arrojan edades concordantes devónicas de $402,4\pm 11,7$ Ma y $387\pm 15,4$, con relaciones Th/U de 0,53 y 0,67, que sugieren ser ígneas, pero no forman agrupación. Se obtuvo una edad promedio ponderada a partir de 23 datos, obtenidos en bordes y núcleos de cristales con estructura concéntrica, que arrojaron una edad promedio ponderada de $467,6\pm 3,8$ Ma (Ordovícico) (Fig. 5d), con MSWD=1,3 y relaciones Th/U entre 0,1 y 1,10, que se interpreta como la edad de cristalización de la roca. Se presentan abundantes herencias en núcleos y algunos bordes de xenocristales heredados ígneos, con edades desde $492,4\pm 11$ Ma (Cámbrico) hasta $3000\pm 128,2$ Ma (Arcaico), reconociéndose 8 agrupaciones de datos, siete de ellas representan eventos ígneos que arrojaron edades promedio ponderadas de 2008 ± 35 (n=4), 1681 ± 50 Ma (n=5), 1486 ± 56 Ma (n=5), 580 ± 23 Ma (n=3), $539,8\pm 7,4$ Ma (n=5), $519,1\pm 5,2$ (n=9) y $493,8\pm 9,6$ (n=3) y una población metamórfica de 998 ± 30 Ma (n=6). Las edades mayores a 1100 Ma se calcularon a partir de la relación $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$.

5.2 Neis de Pescadero

Del Neis de Pescadero se dataron 5 muestras, cuatro son de neises (GR-7073, GR-7075, CSB-302 y CSB-305) y una de un dique de pegmatita (GR-7092).

Los circones de las cuatro muestras de neises son de tonalidad amarilla translúcida a transparentes, achatados, algunos ovalados con terminaciones subredondeadas y algunos son multifacéticos o prismáticos, de tamaños variables entre 40 μm a 170 μm . En las imágenes de catodoluminiscencia muestran cristales con núcleos heredados y bordes homogéneos

en tonos de gris claro, que corresponden a bordes de sobre crecimiento metamórfico. Pueden mostrar núcleos con zonaciones oscilatorias de tonalidad gris oscuro a claro y algunos cristales exhiben texturas complejas (Fig. 6). Los

circones de la muestra de pegmatita (GR-7092) son ovalados y de escasos prismáticos en forma de tallos, traslúcidos con un tinte rosado.

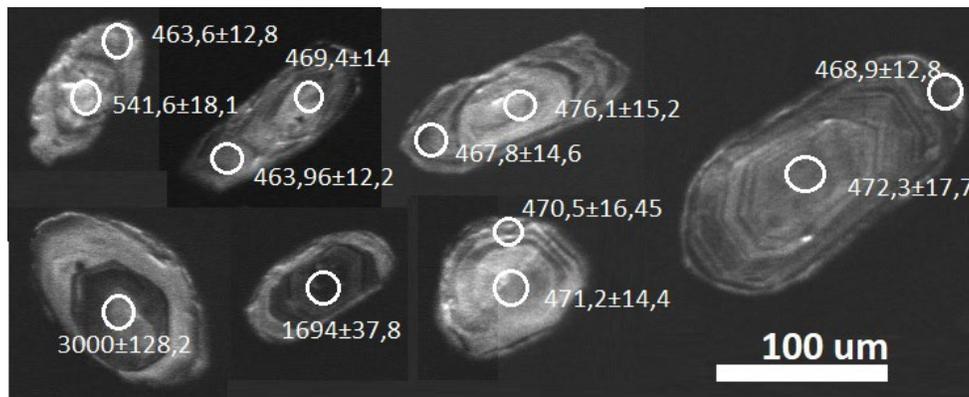


Figura 4. Imágenes de catodoluminiscencia de cristales de circon representativos de la muestra RCA-043B del Neis de la Vereda Rodríguez. Fuente: los autores.

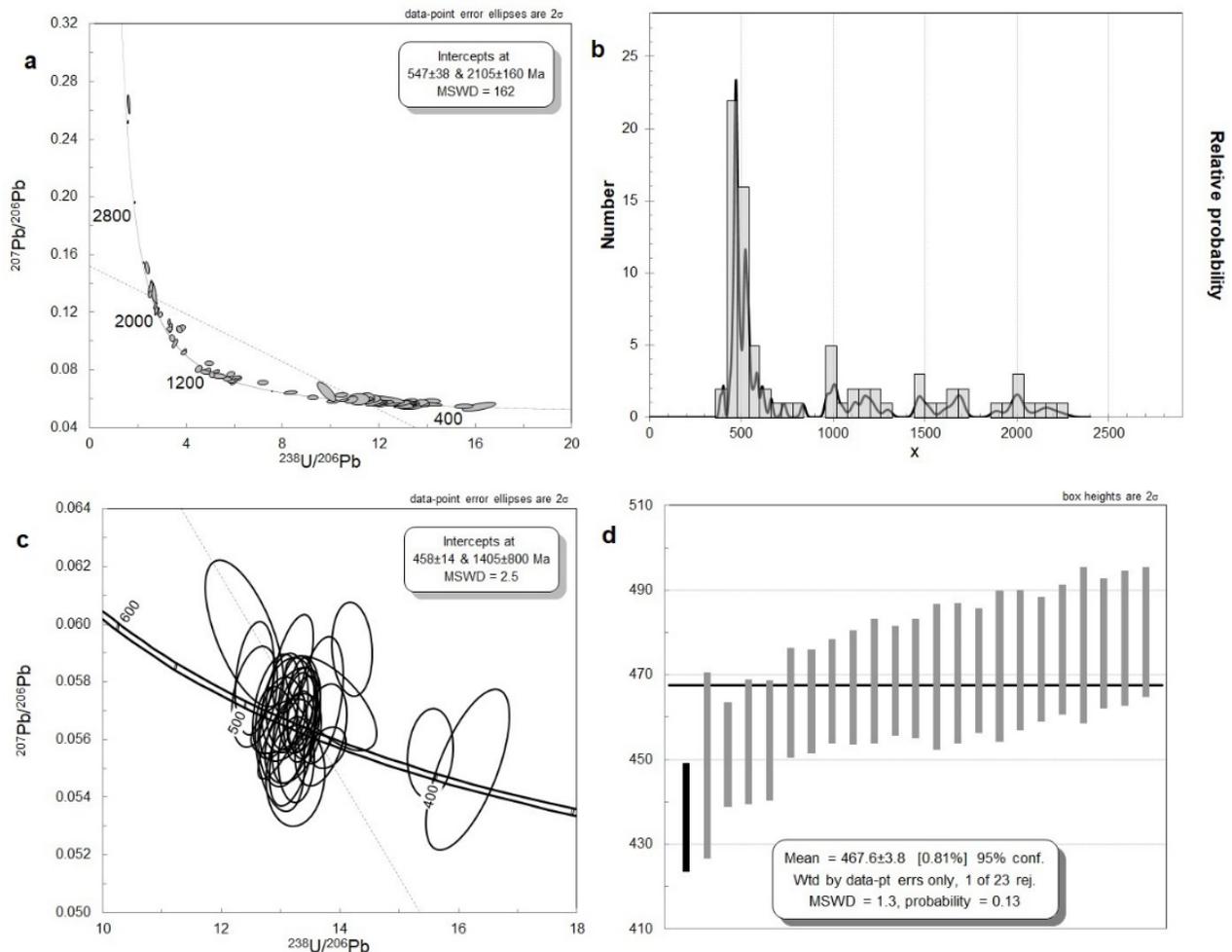


Figura 5. Geocronología de la muestra RCA-043B del Neis de la Vereda Rodríguez. a y c) Diagramas de concordias Tera Wasserburg; b) densidad de probabilidad y d) edad media ponderada de cristalización, en negro datos rechazado en el cálculo de la edad. Fuente: los autores

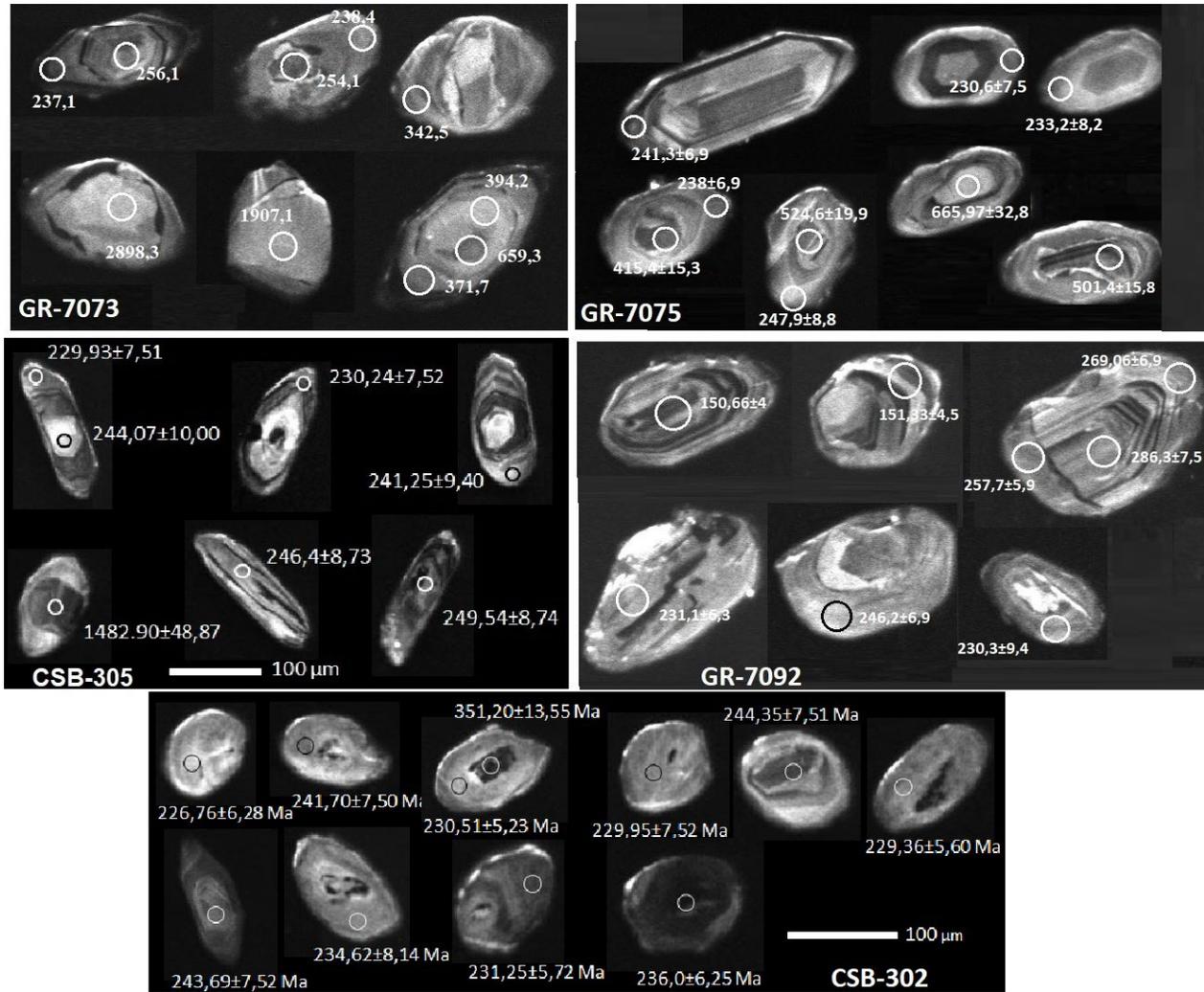


Figura 6. Imágenes de catodoluminiscencia de cristales de circón representativos de cada una de las muestras datadas del Neis de Pescadero. Fuente: los autores

Para el cálculo de la edad ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) de las cuatro muestras de neises se consideran únicamente los análisis con discordancias <10 y errores <5%.

La muestra GR-7073 fue clasificada como neis de Qz-Pl-Ms-Bt-Zo. Cincuenta y dos cristales de circón fueron seleccionados, se realizaron 81 ablaciones y se descartaron un total de 34 análisis. Los datos aceptados (47) arrojaron resultados de $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ entre 237,09±1,9 Ma y 2898,29±117 Ma. Se presentan siete cristales con borde de sobre crecimiento metamórfico, que arrojan una edad promedio ponderada de 241,2±2,6 Ma con MSWD=0,61, la cual se considera la edad de metamorfismo de la roca, con relaciones Th/U entre 0,01 y 0,12 (Fig. 7 a, b). Se obtuvieron dos edades promedio ponderadas que representan edades heredadas en bordes metamórficos de 257,2±3,2 Ma con MSWD=0,92 (n=6) y relación Th/U entre 0,02 y 0,08; y de 369,2±5,6 con MSWD=0,62 (n=6). Se presentan núcleos heredados ígneos con edades de 254±11 Ma, con MSWD=3,6 (n=4), y relación Th/U entre 0,21 y 1,28; cuatro valores dispersos de edades entre 341,68±15,4 Ma y 279,11±8,7 Ma (Carbonífero a Pérmico); una edad promedio ponderada de

394,2±5,6 Ma, con MSWD=0,59 (n=5) y Th/U entre 0,10 y 0,93; diez valores Neoproterozoicos que no conforman poblaciones entre 541,35±17,5 Ma y 862,5±26,8 Ma; dos datos Mesoproterozoicos de 1164,8±33,8 y 1547,9±49,2 Ma, uno Paleoproterozoico de 1907,1±54,6 Ma y uno discordante Mesozoico de 2898,3±117,4 Ma (Fig. 7c).

La muestra GR-7075 fue clasificada microscópicamente como neis de Qz-Pl-Ms-Chl con Zo y Bt. Cincuenta y dos cristales de circón fueron seleccionados, se realizaron 95 ablaciones y se descartaron un total de 50 análisis. Los datos aceptados (45) arrojaron resultados de $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ entre 230,57±7,5 Ma y 1263,9±55,7 Ma. Se presentan once cristales con borde de sobre crecimiento metamórfico, que arrojan dos edades de metamorfismo: la más reciente corresponde a una edad promedio ponderada de 236,1±3,0 Ma, con MSWD=1,15 (n=6) (Fig. 7 e), la cual se considera el último metamorfismo de la roca, con relaciones Th/U entre 0,05 y 0,39. Se obtuvo una edad heredada en bordes metamórficos de 251,4±3,4 Ma con MSWD=1,2 (n=5) y relación Th/U entre 0,08 y 0,37. Se presentan núcleos heredados ígneos que

arrojaron una edad promedio de $250,5 \pm 9,7$ Ma, con $MSWD=3,8$ ($n=5$), y relación Th/U entre 0,53 y 0,87. Además, se presentan 28 valores dispersos que no forman agrupaciones importantes de datos y que corresponden a núcleos heredados o xenocristales con edades heredadas entre $289,5 \pm 4$ Ma y $1263,9 \pm 55,7$ Ma (Fig. 7 f).

La muestra CSB-305 fue clasificada como neis de Qz-PI-Ms con Bt. Sesenta cristales de circón se seleccionaron, se realizaron 105 ablaciones y se descartaron cuarenta y ocho resultados. De los datos obtenidos, dos ablaciones no se tuvieron en cuenta para el cálculo de la edad por ser discordantes y presentar inconsistencias en la edad del núcleo y el borde del circón. Las edades obtenidas y aceptadas varían en un rango entre $229,83 \pm 7,51$ Ma y $1482,90 \pm 48,87$ Ma (Fig. 7 i). La edad más joven se obtuvo a partir de siete circones con edades entre $229,83 \pm 7,51$ Ma y $247,30 \pm 9,39$ Ma en bordes de sobrecrecimiento metamórfico, los cuales arrojaron una edad de $239,0 \pm 6,3$ Ma $MSWD=3,0$ y Th/U entre 0,03 y 0,07, que es interpretada como edad de metamorfismo de la roca (Fig. 7 h).

Los circones presentan núcleos heredados con edades entre $1482,90 \pm 48,87$ Ma (Mesoproterozoico) y $238,06 \pm 7,51$ Ma (Triásico). En el análisis de las herencias se consideran los núcleos ígneos y metamórficos mediante la información de las imágenes de CL y los valores de Th/U. Bajo el criterio anterior los núcleos ígneos presentan resultados $^{206}Pb/^{238}U$ de $1482,90 \pm 48,87$ y $1013,49 \pm 39,49$ Ma (Mesoproterozoico); $773,56 \pm 21,81$ y $565,42 \pm 21,10$ Ma (Neoproterozoico); $537,65 \pm 17,47$ y $508,19 \pm 16,40$ Ma (Cámbrico); $334,47 \pm 11,78$ y $329,70 \pm 17,32$ Ma (Carbonífero); $289,43 \pm 11,78$ y $253,32 \pm 7,52$ Ma (Pérmico); $252,17 \pm 8,76$ y $238,06 \pm 7,51$ Ma (Triásico) con edad promedio ponderada de $248,2 \pm 3,0$ Ma, $MSWD=2,8$ ($n=24$) y Th/U de 0,12 y 0,6. El metamorfismo heredado es representado por seis cristales en bordes de sobrecrecimiento metamórfico con edades $^{206}Pb/^{238}U$ de $299,80 \pm 11,15$ Ma y $261,09 \pm 8,75$ (Pérmico) (Fig. 7i), los cuales se consideran herencias debido a que hay edades en núcleos ígneos con bordes metamórficos más jóvenes que estos bordes metamórficos.

La muestra CSB-302 se recolectó en la vía que comunica el Valle de Toledo con Puerto Valdivia Antioquia y fue clasificada como neis micáceo con granate y zoisita, contiene Qz (6,3 %) + Ms (36,8 %) + Gt (12,6 %) + Zo (5,1 %) + Chl (7,6 %) + Ser (27,3%) + Grt (3,3 %) y como accesorios Zrn y Ttn. Sesenta cristales de circón se seleccionaron y se realizaron 96 ablaciones. Para el cálculo de la edad $^{206}Pb/^{238}U$ se eliminaron 46 datos con discordancias >10 y errores >5 ; las ablaciones discordantes en el diagrama de concordia Tera-Wasserburg y los circones con inconsistencias en la edad del núcleo y el borde del circón no se tuvieron en cuenta para el cálculo de la edad. Las edades obtenidas y aceptadas varían en un rango entre $226,76 \pm 6,28$ Ma y $364 \pm 13,53$ Ma (Fig. 7l). De acuerdo con los resultados se obtuvieron dos edades. La primera se obtuvo en bordes de sobrecrecimiento y núcleos sub-redondeados del circón y arrojaron una edad U-Pb de $233,7 \pm 4,3$ Ma con $MSWD = 3,4$ (Fig. 7j, k) y relación Th/U entre 0,01 y 0,1 y es interpretada como edad de metamorfismo de la roca. La segunda edad se obtuvo en circones de textura homogénea con ausencia de zonaciones oscilatorias y arrojó una edad U-Pb de $235,1 \pm 4$ Ma, con $MSWD = 3,4$ y relación Th/U entre 0,007 y 0,1 que es interpretada como edad de anatexia metamórfica durante el mismo evento de

metamorfismo. Por lo tanto, el neis registra dos procesos geodinámicos dentro de un mismo proceso metamórfico, con presencia de anatexia en circones de textura homogénea y metamorfismo en bordes de sobrecrecimiento del circón.

Los sedimentos que formaron el neis micáceo con granate y zoisita registran circones heredados tanto ígneos como metamórficos con edades U-Pb entre $256,69 \pm 7,49$ Ma (Triásico) y $364 \pm 13,53$ Ma (Devónico). En el análisis de las herencias se consideran los núcleos ígneos y metamórficos mediante la morfología del circón en imágenes de CL y los valores de Th/U. Bajo el criterio anterior, los núcleos ígneos arrojaron poblaciones de circones con edades promedio ponderadas $^{206}Pb/^{238}U$ de $264,8 \pm 4,8$ Ma, 291 ± 10 Ma, 326 ± 20 Ma y $352,6 \pm 5,2$ Ma (Carbonífero). El metamorfismo heredado está representado por circones dispersos que no forman población con edades $^{206}Pb/^{238}U$ de $252,48 \pm 8,11$ Ma y $255,60 \pm 9,40$ Ma (Triásico) y un circón de $277,87 \pm 44$ Ma (Pérmico).

Las herencias ígneas más jóvenes, de las muestras del Neis de Pescadero, concuerdan con las edades de los ciclos magmáticos descritos para la margen occidental de Gondwana durante el Carbonífero, Pérmico y Triásico (Rodríguez *et al.*, 2022a). Las herencias metamórficas son complicadas de relacionar a eventos metamórficos anteriores, porque no tenemos información que nos permita relacionar las edades con unidades que tienen estas edades de metamorfismo. Las edades de metamorfismo y metamorfismo anatético del Neis de Pescadero son correlacionables con las edades de muchos de los neises de la cordillera Central, por ejemplo, los neises de Samaná, Naranjales, Alto de Las Palmas entre otros (Rodríguez *et al.*, 2023b, en evaluación). Las herencias metamórficas con edades U-Pb de $299,80 \pm 11,15$ Ma y $261,09 \pm 8$, se correlacionan con las edades heredadas de 280 Ma de Vinasco *et al.* (2006) y en la fase final de formación del neis se registra metamorfismo con edad U-Pb de $239,0 \pm 6,3$ Ma y anatexia en el mismo evento metamórfico.

La muestra GR-7092 fue clasificada como un dique de granito pegmatítico que atraviesa el Neis de Pescadero y está constituido por cuarzo, feldespatos blancos, moscovita y turmalina. Cuarenta y ocho cristales de circón fueron seleccionados, se realizaron 34 ablaciones y descartaron siete resultados. Los datos aceptados (25) arrojaron resultados de $^{206}Pb/^{238}U$ entre $383,06 \pm 11,7$ Ma y $150,66 \pm 4$ Ma. Se presentan dos cristales que arrojaron edades de $150,66 \pm 4$ Ma y $151,33 \pm 4,5$ Ma, el primer dato tiene estructura zonada concéntrica y relación Th/U= 1,19 que sugiere origen ígneo y el segundo corresponde a un borde de un cristal con relación Th/U=0,019, que podrían corresponder a circones asociados a venillas que cortan la roca. Siete cristales con borde de sobrecrecimiento metamórfico, arrojaron una edad promedio ponderada de $239,3 \pm 7,1$ Ma, con $MSWD=3,7$, la cual es similar a la edad de metamorfismo de la roca de caja (Figs. 7 m, n), con relaciones Th/U entre 0,01 y 0,12. Se obtuvieron dos edades promedio ponderadas que representan edades heredadas en cristales con estructura concéntrica de $266,5 \pm 3,6$ Ma con $MSWD=2,1$ ($n=10$) y relación Th/U entre 0,39 y 1,3; y de $281,4 \pm 3,5$ con $MSWD=0,84$ ($n=4$) y relación Th/U entre 0,66 y 1,13, que corresponden a herencias ígneas del Pérmico. Se presentan núcleos heredados ígneos con edades de $302,42 \pm 7$ Ma, $324,78 \pm 9,9$ y $383,06 \pm 11,7$ Ma (Carbonífero y Devónico) (Fig. 7 o).

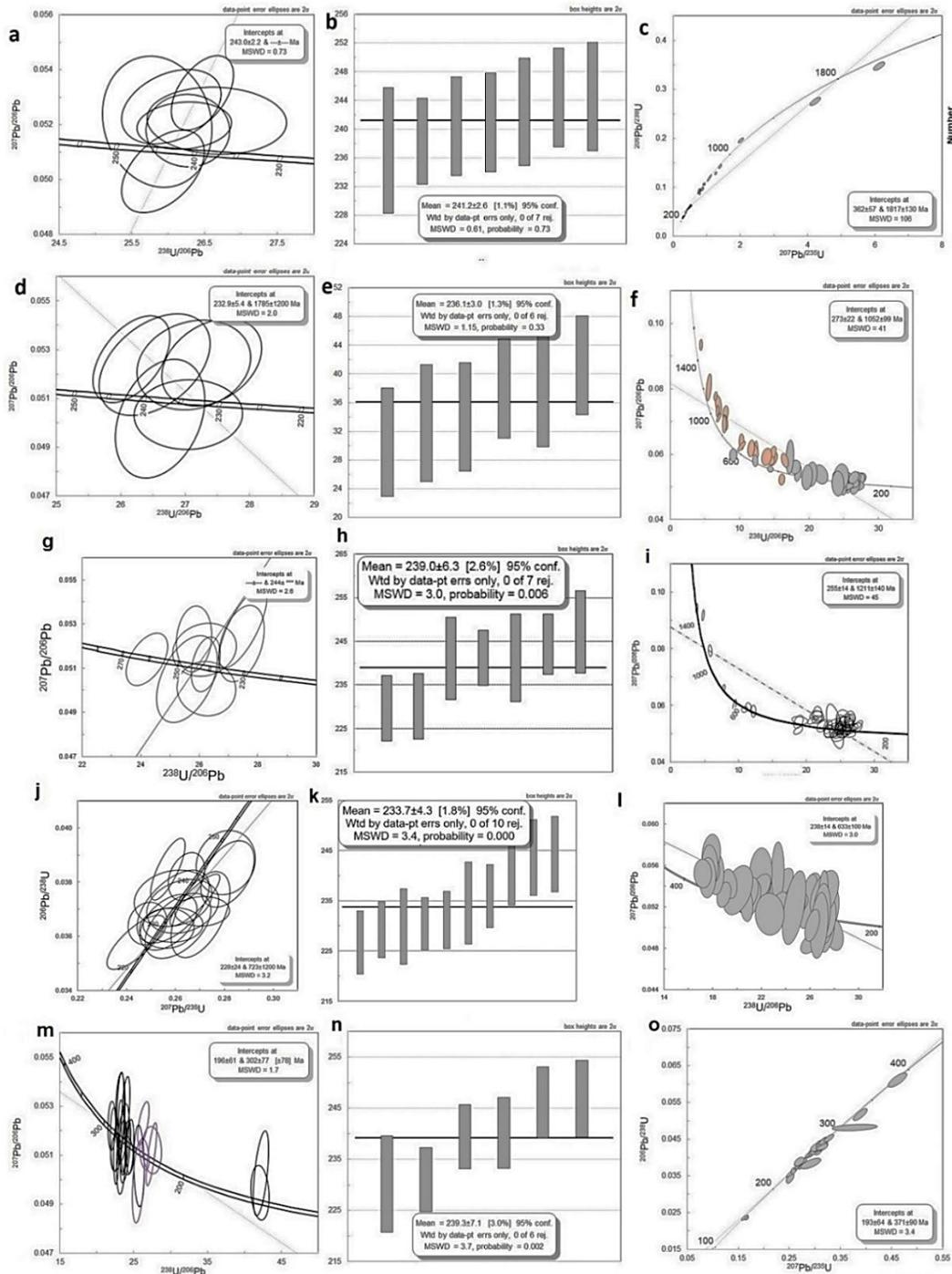


Figura 7. Geocronología de las muestras GR-7073 (a,b,c), GR-7075 (d,e,f), CSB-305 (g,h,i), CSB-302 (j,k,l) y GR-7092 (m,n,o). Diagramas de Tera Wasserburg de la edad de metamorfismo, edad media ponderada y concordia con herencias.

Fuente: los autores

5.3 Neis porfiroblástico de Toledo

Del Neis porfiroblástico de Toledo se dataron las muestras GR-7094 y RCA-050B. Los circones de la GR-7094 son

ovalados de aspecto metamórfico, con escasos cristales prismáticos en forma de tallos con terminaciones redondeadas, incoloros y traslúcidos, de tamaños variables entre 40 a 170 μm . Las imágenes de catodoluminiscencia muestran cristales

ovalados a multifacéticos cortos, con núcleos heredados y bordes homogéneos en tonos de gris claro que corresponden a bordes de sobre crecimiento metamórfico, con desarrollo en algunos circones de caras cristalinas que sugieren metamorfismo anatóctico. Los circones pueden mostrar núcleos con zonaciones oscilatorias a bandeadas de tonalidad gris oscuro a claro y algunos cristales exhiben texturas complejas (Fig. 8). Los circones prismáticos en forma de tallos son escasos y tienen textura ígnea en bandas. La muestra RCA-50B presenta circones prismáticos de tamaños entre 85 y 195 μm , con bordes de color gris claro de sobrecrecimiento, desarrollados por metamorfismo anatóctico y núcleos heredados de colores más oscuros, algunos sin núcleos y de color homogéneo (Fig. 10).

La muestra GR-7094 fue clasificada microscópicamente como neis porfiroblástico de Pl+Qz+Bt con Grt. Veinticinco cristales de circón fueron seleccionados, se realizaron 34

ablaciones y se descartaron un total de 15 análisis. Los datos aceptados (19) arrojaron resultados de $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ entre $225,52 \pm 5,9$ Ma y $372,8 \pm 10,4$ Ma. Se presentan doce cristales, 7 con borde de sobre crecimiento metamórfico, 3 homogéneos metamórficos y dos núcleos con relación Th/U < 0,2, que arrojan una edad promedio ponderada de $233,6 \pm 3,6$ Ma, con MSWD=3 (n=12) (Fig. 9 a y b), la cual se considera la edad del último metamorfismo de la roca, con relaciones Th/U entre 0,07 y 0,52. Se obtuvo una segunda edad en bordes metamórficos de $247,6 \pm 6,6$ Ma con MSWD=1,3 (n=4) y relación Th/U entre 0,03 y 0,14 que se interpreta como el primer metamorfismo de la roca. Además, se presentan 3 datos de herencias concordantes a $372,8 \pm 10,4$ Ma y $322,36 \pm 8,7$ Ma y $262,16 \pm 9,97$ que corresponden a núcleos ígneos (Fig. 9 c).

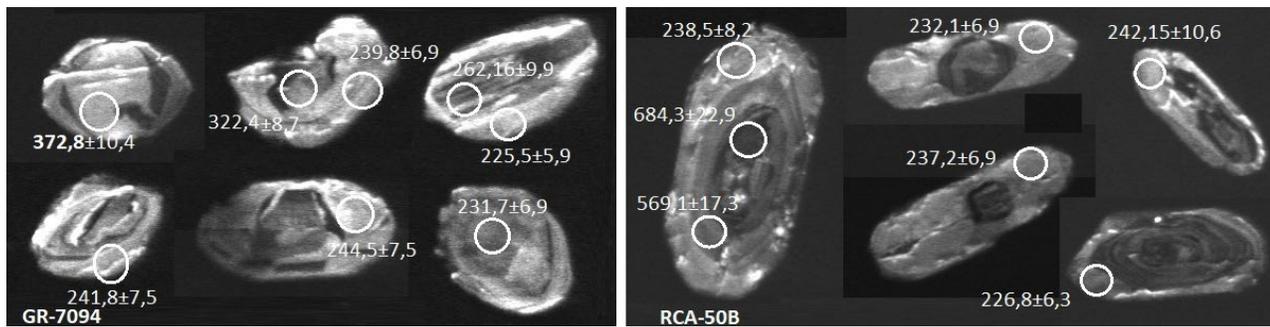


Figura 8. Imágenes de catodoluminiscencia de cristales de circón representativos de cada una de las muestras datadas del Neis porfiroblástico de Toledo. Fuente: los autores

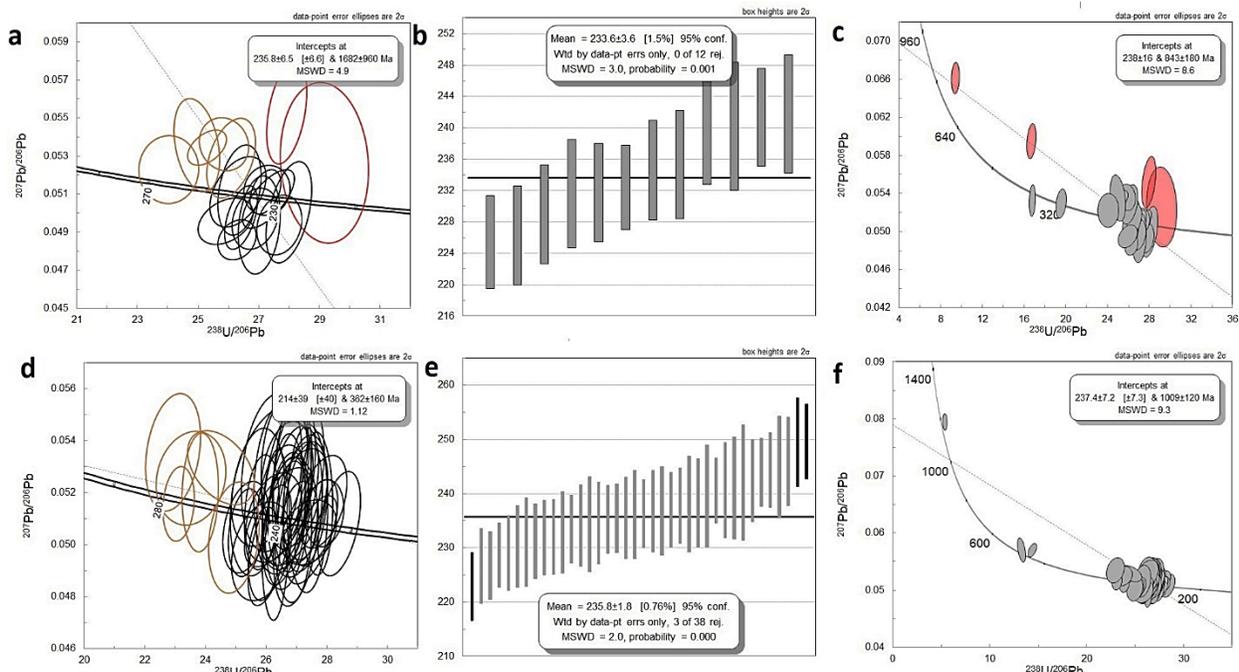


Figura 9. Geocronología de las muestras del Neis porfiroblástico de Toledo. a,b,c) GR-7094 y d,e,f) RCA-50B. Diagramas de Tera Wasseburg de la edad de metamorfismo, edad media ponderada y concordia Tera Wasseburg con herencias. Fuente: los autores

La muestra RCA-50B fue clasificada microscópicamente como Neis porfiroblástico de Pl+Qz+Act con Bt y Chl. Sesenta y tres cristales de circón fueron seleccionados, se realizaron 75 ablaciones y se descartaron un total de 28 análisis. Los datos aceptados (47) arrojaron resultados de $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ entre $222,96 \pm 6,3$ Ma y $1104,25 \pm 42,1$ Ma. Se presentan 38 cristales con borde de sobre crecimiento metamórfico anatóctico, con relación Th/U entre 0,18 y 0,95, que arrojan una edad promedio ponderada de $235,8 \pm 1,8$ Ma, con $\text{MSWD}=2$ ($n=38$) (Figs. 9 d y e), la cual se considera la edad de metamorfismo anatóctico que afectó la roca. Se obtuvo una segunda edad en dos núcleos ígneos de $253,6 \pm 8,7$ Ma y $257,5 \pm 10,6$ Ma y una edad promedio a partir de bordes metamórficos de $270 \pm 4,3$ Ma con $\text{MSWD}=1,18$ ($n=4$) y relación Th/U entre 0,09 y 0,4. Además, se presentan 3 datos de herencias concordantes $1104,25 \pm 42,1$ Ma, $432,9 \pm 14$ Ma y $368,9 \pm 15,2$ Ma que corresponden a núcleos ígneos (Fig. 9 f).

Las texturas de los circones que definen la edad en las diferentes unidades de neises triásicos tienen bordes de sobrecrecimiento metamórfico, desarrollo de bordes cristalinos a partir de fundidos anatócticos, núcleos parcialmente asimilados por el fundido y desarrollo de cristales prismáticos a partir de fundido anatóctico (Rodríguez *et al.*, 2023b, en evaluación). Las relaciones Th/U de los

bordes metamórficos y anatócticos varían entre 0,01 y 0,40 en rocas con estructura néisica y granular (Cochane *et al.*, 2014 y Rodríguez *et al.*, 2023b, en evaluación).

5.4 Anfibolitas de Puente la Palestina

La muestra RCA-045E fue clasificada como anfibolita. Los circones son redondeados a subredondeados, translucidos de color verde claro a incoloros y tamaños entre $53 \mu\text{m}$ y $115 \mu\text{m}$. Las imágenes de catodoluminiscencia muestran cristales subredondeados predominantemente homogéneos hasta cristales con débil zonación concéntrica, en tonos de gris medio (Fig. 10).

Cuarenta y ocho cristales de circón se seleccionaron y se realizaron 59 ablaciones. Para el cálculo de la edad $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ se eliminaron 10 datos con discordancias >10 y errores >5 . Las edades obtenidas y aceptadas varían entre $220,15 \pm 7,55$ Ma y $252,5 \pm 8,15$ Ma (Fig. 11a). Se obtuvieron 49 datos en bordes y núcleos de cristales sin mayores diferencias de edad, que arrojan una edad promedio de $233,1 \pm 1,4$ Ma, con $\text{MSWD}=1,8$ (Fig. 11b) y relaciones Th/U entre 0,11 y 0,27. La edad se interpreta como edad de metamorfismo de la roca.

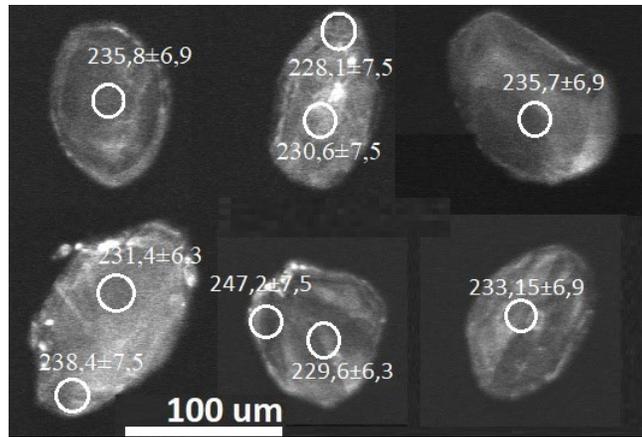


Figura 10. Imágenes de catodoluminiscencia de cristales de circón representativos de muestra RCA-045E. Fuente: los autores

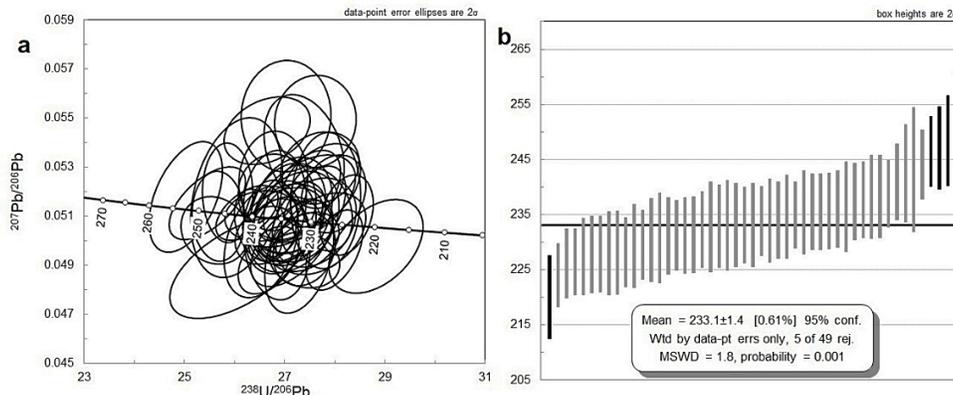


Figura 11. Geocronología de la muestra RCA-045E. a) Diagramas de Tera Wasserburg de la edad de metamorfismo y b) edad media ponderada. Fuente: los autores.

5.5 Edades en rocas deformadas

La muestra CSB-301B fue clasificada como neis porfidoclastico con deformación milonítica de cuarzo-plagioclasa-moscovita con turmalina y como accesorios tiene Zrn y Gra. Los circones son prismáticos cortos, subelongados a elongados y subredondeados, algunos son multifacéticos de color verde claro traslucidos y tamaños entre 48 μm y 126 μm. En imágenes de catodoluminiscencia los núcleos son de textura homogénea, algunos con borde de sobrecrecimiento metamórfico y otros núcleos muestran texturas complejas. Con frecuencia los cristales prismáticos exhiben textura homogénea, con ausencia de zonaciones oscilatorias y evidencia de anatexia (Fig.12).

Sesenta cristales de circón se seleccionaron y se realizaron 101 ablaciones. Para el cálculo de la edad ²⁰⁶Pb/²³⁸U se eliminaron 59 datos con discordancias >10 y errores >5 y 10 circones discordantes en la concordia Tera-Wasserburg. Las edades obtenidas y aceptadas varían entre 225,87±7,52 Ma y 1063,68±29,25 Ma (Fig. 13 c). De acuerdo con los resultados se obtuvieron dos edades. La primera se obtuvo en dos bordes de sobrecrecimiento metamórfico con edades U-Pb de

225,87±7,52 Ma y 226,01±6,26 Ma, con relación Th/U de 0,03 y 0,02 y estarían representando la edad de metamorfismo de la roca. La segunda edad se obtuvo en circones de textura homogénea con leves zonaciones oscilatorias que arrojaron una edad promedio ponderada U-Pb de 238,4±4,2 Ma (Fig. 13 a, b), con MSWD=3,2 y relación Th/U entre 0,05 y 0,002 interpretada como edad de anatexia.

Los núcleos heredados arrojaron edades U-Pb entre 242,65±6,01 Ma (Triásico) y 1063,68±29,25 Ma (Mesoproterozoico). En el análisis de las herencias se consideran los núcleos ígneos y metamórficos según la morfología del circón en imágenes de CL y los valores de Th/U. Los núcleos ígneos heredados arrojaron una serie de circones que no forman población con edades U-Pb de 267±69 Ma y 299±82 Ma (Pérmico); 317,72±15,46 Ma y 319,22±11,12 Ma (Carbonífero); 466,23±11,55 Ma (Ordovícico); 509,87±15,11 Ma (Cámbrico); 572,50±11,44 Ma y 974,11±22,03 Ma (Neoproterozoico) y 1063,63±29,25 Ma (Mesoproterozoico). Las herencias en circones metamórficos arrojaron una edad U-Pb de 244,3±3,5 con MSWD= 0,27 y Th/U de 0,02-0,07 y dos circones con edades U-Pb de 277,11±9,32 Ma y 288,29±9,96 Ma (Fig. 13 c).

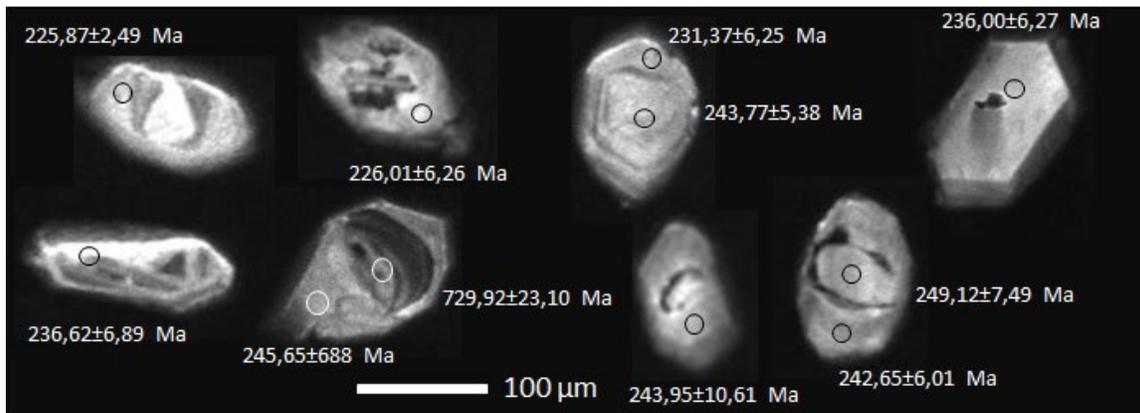


Figura12. Imágenes de catodoluminiscencia de cristales de circón de la muestra CSB-301B. Fuente: los autores

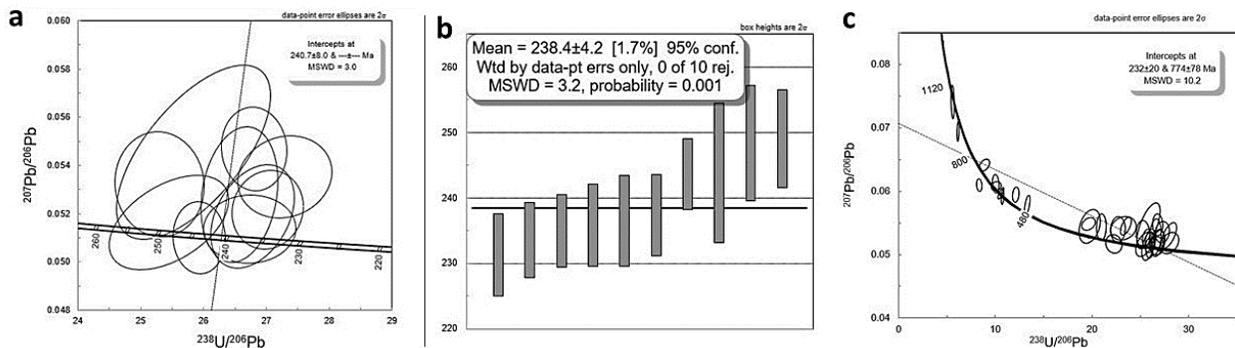


Figura 13. Geocronología de la muestra CSB-301B. a) Diagrama de concordia Tera-Wasserburg con edad de anatexia, b) edad media ponderada anatexia y c) diagrama de concordia Tera-Wasserburg con edades de metamorfismo, anatexia y sus herencias. Fuente: los autores

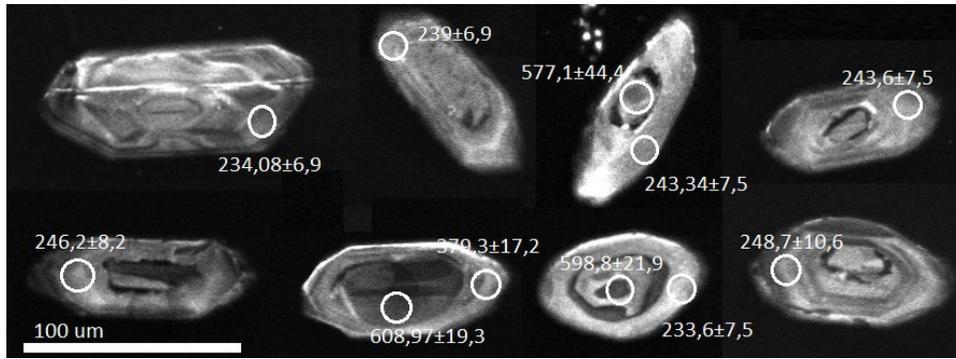


Figura 14. Imágenes de catodoluminiscencia de cristales de circon representativos de muestra GR-7072. Fuente: los autores

La muestra GR-7072 fue clasificada como un esquist milonítico formado a partir de anfibolita constituida por plagioclasa y anfíbol y como accesorios cuarzo, titanita, apatito epidota, calcita y biotita. Los circones son prismáticos en forma de tallos y cristales cortos con terminaciones achatadas, algunos subredondeados, translucidos de 40 a 100 µm. Las imágenes de catodoluminiscencia muestran cristales multifacéticos, con núcleos heredados y bordes homogéneos a ligeramente zonados, en tonos de gris claro que corresponden a bordes de sobre crecimiento metamórfico, en algunos se reconoce la reacción entre el borde metamórfico y el núcleo heredado. Presentan desarrollo de caras cristalinas; pueden mostrar núcleos con zonaciones oscilatorias y bandeadas. Algunos cristales son prismáticos y tienen textura concéntrica (Fig. 14).

Cincuenta y tres cristales de circon se seleccionaron y se realizaron 66 ablaciones. Para el cálculo de la edad $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ se eliminaron 27 datos con discordancias >10 y errores >5. Las edades obtenidas y aceptadas varían entre 233,6±7,5 Ma y 1233±32,35 Ma (Fig. 15 c). Se obtuvieron 21 datos, la mayoría en bordes de sobrecrecimiento metamórfico o metamorfismo anatóctico, que arrojan una edad promedio ponderada de 243,0±3,0 Ma, con MSWD=2,8 (Fig. 15 a, b) y relaciones Th/U entre 0,07 y 0,76, la mayoría de valores con Th/U < 0,4. Se obtuvo una segunda edad en bordes de cristales de 270,9±7,3 Ma, con MSWD=2,2 que representan una edad heredada del Pérmico con relación Th/U de 0,06 a 0,89, puede corresponder a combinación de datos ígneos y metamórficos de acuerdo a la estructura de los circones y a los valores de Th/U. El resto de las edades heredadas se distribuyen entre 1233±32,35 Ma

y 311,1±14,2 Ma, como se muestra en la Fig. 15 c.

La muestra RCA-055 fue clasificada como una milonita. Los circones son achatados a redondeados, de color verde claro a incoloros y tamaños entre 50-87 µm. Las imágenes de catodoluminiscencia muestran cristales subredondeados, con núcleos heredados gris oscuro y bordes homogéneos en tonos de gris claro, que corresponden a bordes de sobre crecimiento metamórfico, en algunos se reconoce la reacción entre el borde metamórfico y el núcleo heredado (Fig. 16).

La determinación de la edad de esta roca es compleja, no muestra poblaciones bien definidas. Se realiza la interpretación teniendo en cuenta la localización de los puntos de ablación. Cincuenta y seis cristales de circon se seleccionaron y se realizaron 75 ablaciones. Para el cálculo de la edad $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ se eliminaron 33 datos con discordancias >10 y errores >5. Las edades obtenidas y aceptadas varían entre 233±6,3 Ma y 1354±36,6 Ma (Fig. 17 a). La edad más joven se obtuvo a partir de dos datos obtenidos en bordes de circones que arrojan una edad promedio ponderada de 234,3±4,6 Ma (Fig. 17 b y c), con MSWD=0,34 y relación Th/U entre 0,45 y 0,54, que puede ser interpretada de dos maneras, como edad máxima de depositación o edad de metamorfismo del protolito. Las demás poblaciones y edades se consideran herencias que se reparten en edades de cristalización ígnea a 244,3±5,8 (n=2), 260,4±7,9 (n=7), 327±14 (n=7) y 428,7±7,2 (n=5) y edades metamórficas heredadas a 247,7±5,9 (n=2) y 287±12 Ma (n=4) y datos dispersos entre 451 Ma y 1354 Ma (Fig. 17 a)

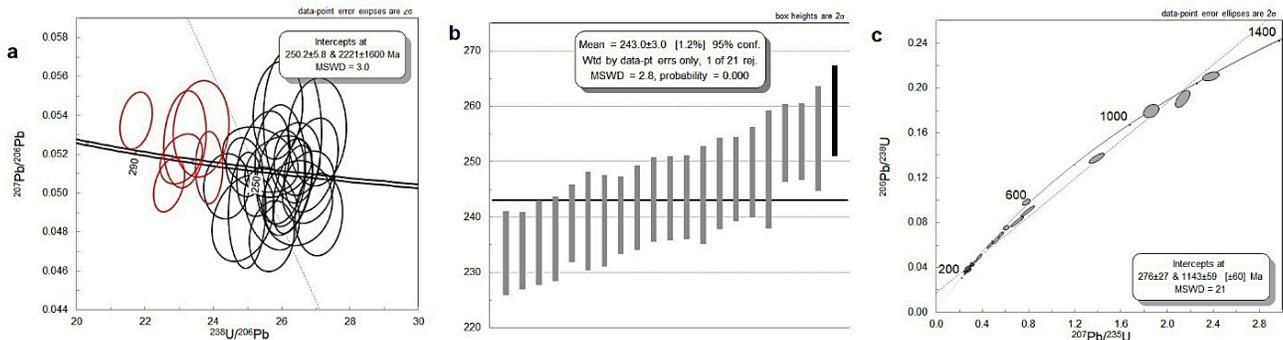


Figura 15. Geocronología de la muestra GR-7072. a) Diagramas de Tera Wasserburg de la edad de metamorfismo triásicas y en rojo datos Pérmicos; b) edad media ponderada y c) concordia Tera Wasserburg con herencias. Fuente: los autores.

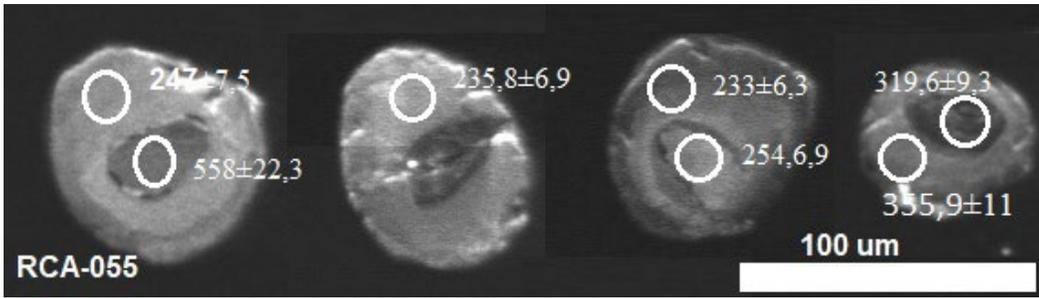


Figura 16. Imágenes de catodoluminiscencia de cristales de circón representativos de muestra RCA-055. Fuente: los autores.

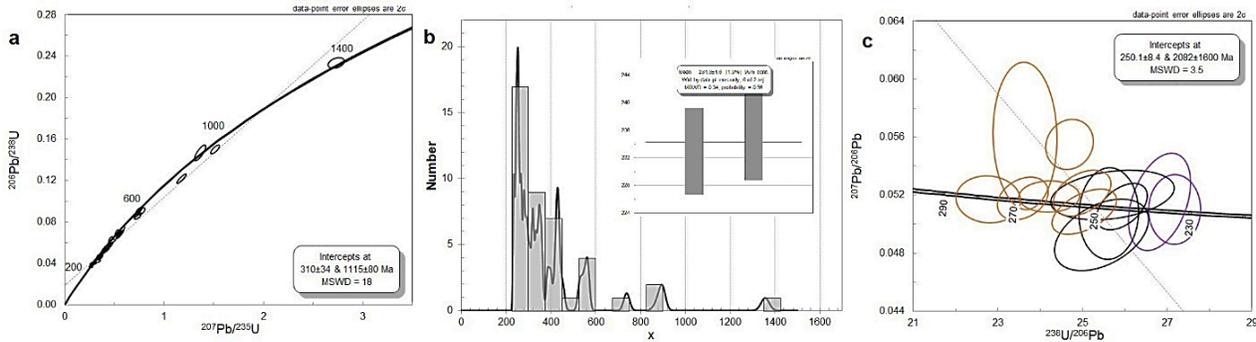


Figura 17. Geocronología de la muestra RCA-055. a) Diagramas de concordia de todas las edades aceptadas, b) densidad de probabilidad y edad media ponderada y c) diagrama Tera Wasserburg de las edades más jóvenes. Fuente: los autores.

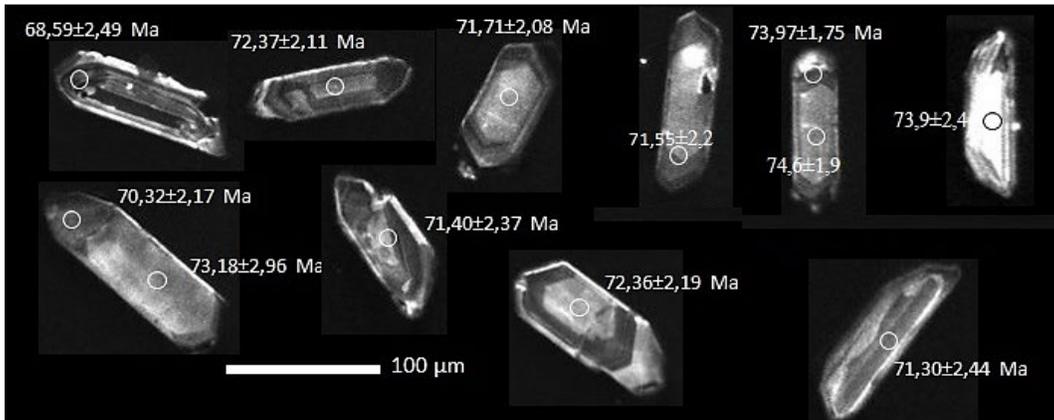


Figura 18. Imágenes de catodoluminiscencia de circón de la muestra CSB-301A. Fuente: los autores

La muestra CSB-301A fue clasificada como esquistos de cuarzo-sericita-biotita retrógrada a clorita con turmalina y como accesorios tiene Zrn y Grt. Los circones son prismáticos largos, subelongados a elongados, algunos son multifacéticos de color marrón a translúcidos y tamaños entre 66 a 204 µm. En imágenes de catodoluminiscencia los cristales son de textura homogénea, otros muestran núcleos con leves zonaciones oscilatorias de tonalidades gris oscuro a claro y leve borde de sobrecrecimiento (Fig. 18).

Cincuenta y dos cristales de circón se seleccionaron y se

realizaron 96 ablaciones. Para el cálculo de la edad $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ se eliminaron 32 datos con discordancias >10 y errores >5, los circones con inconsistencias en la edad del núcleo y borde del cristal y las ablaciones discordantes en el diagrama de concordia Tera-Wasserburg no se tuvieron en cuenta para el cálculo de la edad. Las edades obtenidas y aceptadas varían entre 68,59±2,43 Ma y 827,27±19,91 Ma (Fig. 19 c). La edad de la roca se obtuvo a partir de una población de 37 cristales de circón con edades U-Pb entre 68,59±2,43 Ma y 77,04±2,23 Ma que arrojaron una edad promedio ponderada U-Pb de 72,77±0,68 Ma (Fig. 19 b),

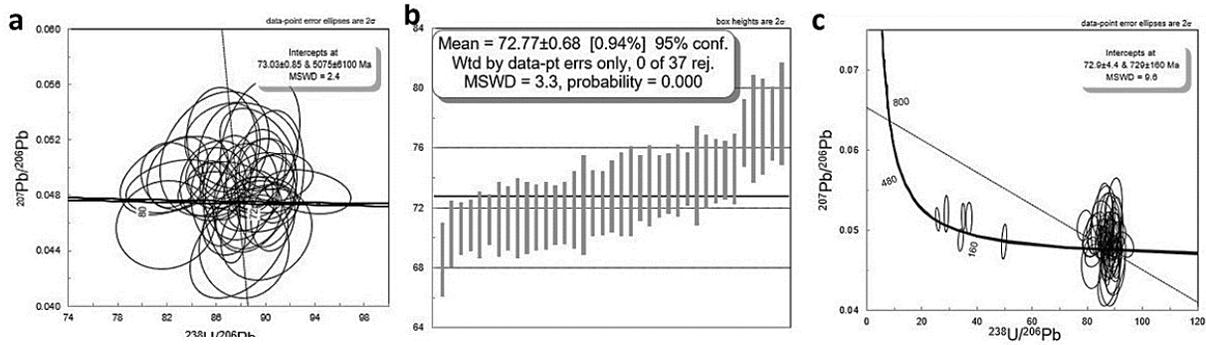


Figura 19. Geocronología de la muestra CSB-301A. a) Diagramas de concordia Tera-Wasserburg con la edad máxima de depositación, b) edad promedio ponderada que representa la edad máxima de depositación de la roca y c) diagrama de concordia Tera-Wasserburg con edad media ponderada y herencias.

Fuente: los autores

con $MSWD=3.3$ y relación Th/U entre 0,1 y 0,5 que es interpretada como la edad máxima de depositación de la roca.

Los núcleos heredados arrojaron edades entre $77,32\pm 3,57$ Ma (Cretácico) y $827,27\pm 19,91$ Ma (Neoproterozoico). Los circones con edades superiores a $77,32\pm 1,86$ Ma se consideran heredados, ya que al ser graficados generan dispersión y un MSWD mayor a 5. Las herencias en núcleos ígneos y metamórficos se analizaron mediante la morfología del circón en imágenes de CL y los valores de Th/U. Los núcleos ígneos heredados arrojaron una serie de circones que no forman población con edades U-Pb de $170,96\pm 5,06$ (Jurásico), $218,99\pm 5,73$ (Triásico) y $827,27\pm 19,91$ (Neoproterozoico). Los cristales con bordes metamórficos arrojaron una edad promedio ponderada de $73,0\pm 1,2$ Ma, con $MSWD = 2,3$, relación Th/U de 0,09 a 0,2. Los cristales que no forman población dieron edades U-Pb de $128,05\pm 3,0$ Ma (Cretácico), $181,36\pm 4,93$ Ma y $186,79\pm 4,93$ Ma (Jurásico) y $245,70\pm 6,89$ Ma (Triásico).

6. Discusión

6.1 Unidades y correlación

Los resultados obtenidos indican al menos la presencia de unidades que se formaron durante tres eventos regionales de diferente edad: 1- neises que cristalizaron durante el Ordovícico (ca. 467 Ma); 2- neises y anfibolitas con metamorfismo en facies anfibolita y que pueden tener anatexia metamórfica formada en el Triásico medio (ca. 233 a 243 Ma) y 3- esquistos con edad máxima de depositación del Cretácico superior (ca. 72 Ma).

6.2 Unidad ordovícica

El Neis de la Vereda Rodríguez fue considerado como uno de los cuerpos micáceos del Complejo de Puquí (Hall et al., 1972); corresponde a un bloque tectónico limitado por fallas de acuerdo al levantamiento de la geología a escala 1:5000 entre Hidroituango y Puerto Valdivia (Correa y García, 2018) (Fig. 1), el cual arrojó una edad de cristalización en circones ígneos con estructura concéntrica de $467,6\pm 3,8$ Ma, que corresponde

al Ordovícico y arrojó dos datos del Devónico en bordes de cristales que fueron interpretadas como edades ígneas, pero que no tienen significado claro. El Neis de la Vereda Rodríguez se correlaciona, en la cordillera Central, con el Neis de La Miel con una edad de $470 +15/-11$ Ma (Martens et al., 2014) y con el Neis de La Perla con una edad de $477,7 \pm 4,8$ Ma (Rodríguez et al., 2023a), que se han asociado al Terreno Anacona de Martens et al. (2014) y Restrepo y Toussaint (2020). En la cordillera Oriental y los Andes de Mérida, esta unidad se correlaciona con el Neis de Bucaramanga, cuerpos de ortoneises, y numerosos granitos y ortogneis de los Andes de Mérida descritos por Van der Lelij et al. (2016).

6.3 Unidades triásicas

Las unidades triásicas de este estudio corresponden a cuerpos de neises y anfibolitas que fueron cartografiadas dentro del Complejo de Puquí y el Grupo Valdivia de (Hall et al., 1972). Tres unidades de edad Triásica se dataron en este trabajo (Neis de Pescadero, Neis porfiroblástico de Toledo y Anfibolitas de Puente La Palestina; además, de algunas rocas deformadas) con edades de metamorfismo y metamorfismo anatético entre $241,2\pm 2,6$ Ma y $233,6\pm 3,6$ Ma.

La correlación de los cuerpos de neises y anfibolitas se hace con otros cuerpos de neises que afloran en la cordillera Central y se realiza a partir de las edades U-Pb conocidas y las edades de metamorfismo y/o anatexia descritas recientemente por Correa Martínez et al. (2020), Rodríguez et al. (2022b, 2023b) y Zapata et al. (2022). Los neises de Naranjales, Samaná, Horizontes, Abejorral, Puente Peláez, Las Palmas y el Granofels de Normandía presentan picos de metamorfismo y anatexia a ca. 243 Ma y ca. 237 Ma (Rodríguez et al., 2023b). Los neises de Río Verde, Cedeño, Manizales y el Complejo Puquí tienen edades alrededor de ca. 237 Ma (entre 232 y 239 Ma) (Rodríguez et al., 2023b). El Neis de Chinchiná y algunas rocas de los neises de Abejorral, Horizontes y Puente Peláez presentan metamorfismo posterior alrededor de ca. 227 Ma. Las edades obtenidas en el Neis de Pescadero entre $241,2\pm 2,6$ Ma y $233,7\pm 4,3$ Ma son similares a las obtenidas en los neises de Naranjales, Samaná, Horizontes, Abejorral, Puente Peláez, Las

Palmas, Río Verde, Cedeño, Manizales, el Complejo Puquí y el Granofels de Normandía. Las edades de $235,8 \pm 1,8$ Ma y $233,6 \pm 3,6$ Ma para el Neis porfiroblástico de Toledo son similares a las edades de los neises de Río Verde, Cedeño y Manizales y otras edades del Complejo de Puquí y concuerdan con algunos datos de los neises de Naranjales, Samaná, Horizontes, Abejorral, Puente Peláez, Las Palmas, Pescadero y el Granofels de Normandía.

La edad de la Anfibolita de Puente La Palestina de $233,1 \pm 1,4$ Ma y de una milonita con protolito de anfibolita de $234,3 \pm 4,6$ Ma, son comparables a las edades reportadas por Sabrica (2022) y Sabrica *et al.* (2023) en un lente de anfibolita con bandas calcosilicatadas, localizado al interior del Neis de Naranjales, que arrojó una edad de metamorfismo de $238,2 \pm 2,2$ Ma y con la edad reportada por Rodríguez *et al.* (2023a) en la Anfibolita de Padua de $232,5 \pm 2,3$ Ma. La edad reportada por Cochrane *et al.* (2014) para una anfibolita localizada a ~ 20 km al este de El Retiro, con edad U–Pb en circón de $239,7 \pm 2,4$ Ma (Anfibolitas de El Retiro en Martens *et al.*, 2014) es ligeramente anterior a la edad de las Anfibolitas de La Espadera-Chupadero de $224,4 \pm 2,9$ Ma reportada por Ibáñez Mejía *et al.* (2020).

6.4 Unidad cretácica

Una muestra de esquistos de Qz-Ser-Bt (CSB-301 A) arrojó una edad promedio ponderada de $72,77 \pm 0,68$ Ma, que interpretamos como edad máxima de depositación del protolito sedimentario de esta roca. Los esquistos forman una delgada unidad entre rocas que dieron edades de metamorfismo Triásicas (Fig. 1). La edad máxima de depositación se obtuvo a partir de una población de 37 circones con leves zonaciones oscilatorias, asociados a un evento ígneo, lo que implica que el metamorfismo que tiene la roca fue posterior, es decir, más joven de 72 Ma. Las herencias en circones metamórficos arrojaron una edad promedio ponderada de $73,0 \pm 1,2$ Ma, en una población de 11 circones, con núcleos ígneos que son discordantes en el diagrama Tera-Wasserburg y desarrollan bordes de sobrecrecimiento que representan el metamorfismo heredado y algunos núcleos con leves zonaciones de $73,36$ Ma registran bordes de sobrecrecimiento metamórfico. Lo que permite sugerir que los circones ígneos que representa la edad máxima de depositación son relativamente coetáneos con el metamorfismo. Edades similares fueron reportadas por Zapata *et al.* (2021) en un esquistos de Qz-Bt-Ms-Gr-Chl y metavulcanitas. La edad máxima de depositación que estos autores obtuvieron fue de $70,07 \pm 5,8$ Ma y consideraron que estas rocas son resultado de la colisión entre el plateau oceánico y la margen continental de Suramérica, cuyo registro en la unidad volcánica-sedimentaria con metamorfismo en facies esquistos verde es de 71 Ma a 69 Ma, junto con diques que intruyen las milonitas básicas.

La dificultad de correlación con las rocas descritas por Zapata *et al.* (2021), es la posición geotectónica de la unidad de esquistos en el sector de Hidroituango, donde se encuentra rodeada de rocas metamórficas de edad triásica (Fig. 1). Los esquistos con edad máxima de depositación Cretácica se encuentran asociados a la traza de la Falla Santa Rita y están al

oriente del límite colisional entre el plateau oceánico-arco insular cretácico con las rocas metamórficas de la cordillera Central.

6.5 Herencias

Las herencias del Neis de la Vereda Rodríguez (Ordovícico) se reparten entre $492,4 \pm 11$ Ma (Cámbrico) y $3000 \pm 128,2$ Ma (Arcaico), reconociéndose siete conjuntos ígneos que arrojaron edades promedio ponderadas de 2008 ± 35 Ma y 1681 ± 50 Ma (Paleo-proterozoico), 1486 ± 56 Ma (Meso-proterozoico), 580 ± 23 Ma (Edicariano), $539,8 \pm 7,4$ Ma, $519,1 \pm 5,2$ Ma y $493,8 \pm 9,6$ Ma (Cámbrico), y una población metamórfica de 998 ± 30 Ma (Neoproterozoico) que se correlaciona con la edad de metamorfismo del orógeno Putumayo (Ibáñez, 2020). Se presenta datos dispersos del Neo-arcaico y Meso-arcaico que sugieren que la fuente de esta unidad fue el Cratón Amazónico y el Orógeno Putumayo (Fig. 20).

Los neises de Pescadero y Toledo (Triásicos) tienen circones heredados que representan eventos metamórficos anteriores al último evento de metamorfismo y anatexia metamórfica que ocurrió en el Triásico medio. Las herencias sugieren eventos metamórficos alrededor de *ca.* 369 Ma (Devónico), que correlacionamos con cuerpos de neises localizados al interior de la margen occidental de Gondwana, como el Neis de Sibundoy con edades de metamorfismo similares (Rodríguez y Sabrica, 2023c). Otros metamorfismos heredados parecen haber ocurrido en el Pérmico, alrededor de *ca.* 270 Ma y entre *ca.* 251 *ca.* 257 Ma, este último con edad promedio ponderadas alrededor de *ca.* 252 Ma, no se conoce con certeza unidades que muestren esta edad como efecto del último metamorfismo, pero es corriente encontrar estas herencias en los neises Triásicos de la cordillera Central (Sabrica, 2022; Rodríguez *et al.*, 2023b, Vinasco *et al.*, 2006) (Fig. 20).

Las herencias ígneas más antiguas en los neises de Pescadero y Toledo corresponden a núcleos de circones que arrojan edades del Arcaico de *ca.* 2900 Ma, que relacionamos con unidades del cratón Amazónico. Núcleos heredados del Paleo-proterozoico y Meso-proterozoico sugieren aporte del Cratón amazónico y del Orógeno Putumayo (Terreno Chibcha). Para los núcleos ígneos con edades repartidas entre *ca.* 508 Ma y *ca.* 860 Ma (Cámbrico y Neo-proterozoico), no está claramente establecida la fuente. Herencias en núcleos ígneos del Ordovícico arrojan edades promedio ponderadas alrededor de *ca.* 469 Ma, las cuales se asocian a unidades del Orógeno Famatiniano como el Neis de Bucaramanga y los ortoneises de los macizos de Santander y Mérida o bloques de ortoneises de la cordillera Central como los neises de La Miel y La Perla (Martens *et al.*, 2014; Rodríguez *et al.*, 2023a). Para las poblaciones de núcleos de circones ígneos de las muestras de los neises de Pescadero y Toledo, con población de edades alrededor de *ca.* 352 Ma, no conocemos a que evento ígneo se relaciona. Algunas de las herencias en núcleos de circones ígneos, corresponden con los ciclos de los arcos de margen continental descritos para la margen occidental de Gondwana, en el Carbonífero, Pérmico y Triásico medio, con edades entre

ca. 333 Ma y ca. 300 Ma, entre ca. 297 Ma y ca. 257 Ma y entre ca. 245 Ma y ca. 251 Ma, cuya fuente son los plutones y rocas volcánicas de los arcos del Carbonífero, Pérmico y Triásico que ocurrieron en la margen occidental de Gondwana (Rodríguez *et al.*, 2022a) (Fig. 20).

Las herencias en circones de las unidades de neises sugieren que algunos eventos ígneos y metamórficos ocurrieron al tiempo, lo más probable en posiciones geotectónicas diferentes, es decir, algunas herencias en circones representan magmatismo y otras representan unidades metamórficas con edades similares, este traslape de edades ígneas y metamórficas es frecuente a principios y mediados del Pérmico (Vinasco *et al.*, 2006; Rodríguez *et al.*, 2022a).

La muestra de esquistos de Qz, Ser, Bt presenta edades en circones que varían entre 68,59±2,43 Ma y 827,27±19,91 Ma. La máxima edad de depositación se obtuvo a partir de seis datos que arrojaron una edad promedio ponderada de 72,77±0,68 Ma en circones ígneos, correlacionables con el magmatismo de arco de margen continental que dio origen, entre otros, a la Cuarzodiorita de Sabanalarga y al Batolito Antioqueño, que cristalizó entre ca. 71.5 ca. 76.5 Ma (Jaramillo *et al.*, 2017;

Zapata-Villada *et al.*, 2021). Los núcleos ígneos heredados arrojaron una serie de circones que no forman población con edades U-Pb de 170,96±5,06 (Jurásico) correlacionables con los arcos Ibagué-Segovia y Mocoa-Santa Marta (Rodríguez *et al.*, 2020a; 2020b; 2022a), 218,99±5,73 (Triásico) correlacionable con el magmatismo del Triásico – Jurásico Inferior del macizo de Santander (Rodríguez *et al.*, 2017; 2020 y 2022a) y 827,27±19,91 (Neoproterozoico) correlacionable con edades del Orógeno Putumayo (Ibáñez Mejía, 2020). Las herencias en circones metamórficos arrojaron una edad promedio ponderada de 73,0±1,2 Ma, que pueden estar relacionada a las primeras etapas de la colisión entre el plateau oceánico y la margen continental del Norte de Suramérica. Algunas edades metamórficas heredadas en cristales que no forman poblaciones metamórficas corresponden a edades de 128,05±3,0 Ma (Cretácico) no correlacionable con ningún evento, de 181,36±4,93 Ma y 186,79±4,93 Ma (Jurásico) similares a edades de metamorfismo del Neis de Purí (Pinilla *et al.*, 2023) y de 245,70±6,89 Ma (Triásico) comparable con las edades de metamorfismo y de anatexia de los neises triásicos (Fig. 20).

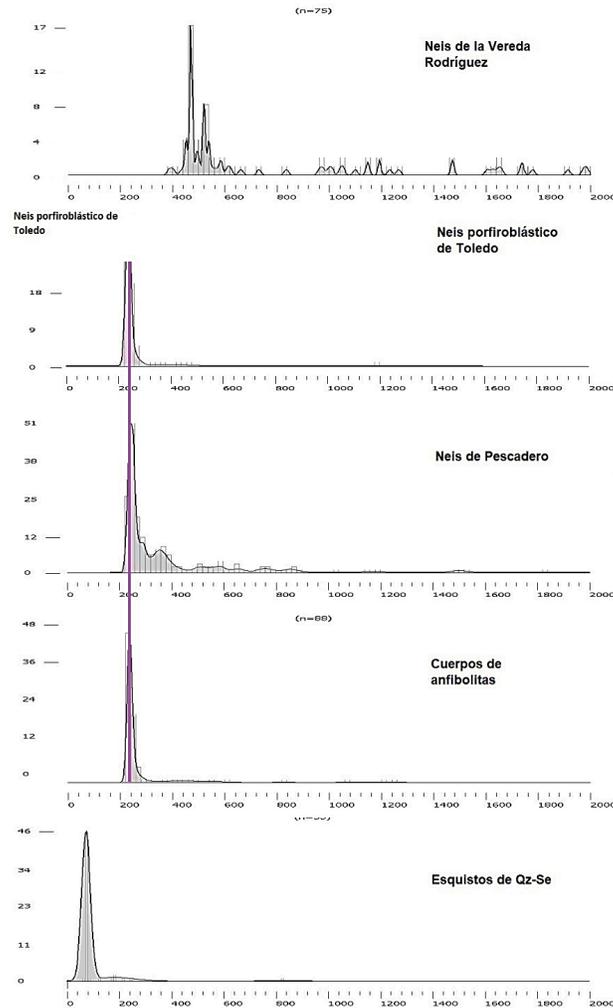


Figura 20. Diagrama de correlación de herencias ígneas de las unidades metamórficas. Fuente: los autores

7. Conclusiones

Las unidades metamórficas que afloran en los cortes viales del proyecto de Hidroituango- Puerto Valdivia registran un metamorfismo anatóxico en neises y anfíbolitas con edades U-Pb entre $233,1 \pm 1,4$ Ma y $247,6 \pm 6,6$ Ma en bordes de sobre crecimiento del circón y edades de anatóxia U-Pb de $235,1 \pm 4$ Ma y $238,4 \pm 4,2$ Ma en circones de textura homogénea.

Los resultados geocronológicos muestran que las rocas más antiguas corresponden al Neis de la Vereda Rodríguez con edad de cristalización U-Pb de $467,6 \pm 3,8$ Ma (Ordovícico) que es correlacionable con el Neis de La Miel con edad U-Pb de 470 ± 15 -11 Ma, y el Neis de La Perla de $477,7 \pm 4,8$ Ma y probablemente corresponde a un bloque tectónico adosado en la secuencia de neises de edad Triásica.

La unidad de rocas deformadas arrojó una edad U-Pb de $72,77 \pm 0,68$ Ma, que es interpretada como la edad máxima de depositación de la roca y una serie de herencias en circones metamórficos con edad U-Pb de $73,0 \pm 1,2$ Ma, que se correlaciona con las primeras etapas de la colisión entre el plateau oceánico y la margen continental del Norte de Suramérica y probablemente se adosó a la secuencia de rocas triásicas como un bloque tectónico.

El Neis de Pescadero, Neis porfiroblástico de Toledo, Anfíbolitas de Puente La Palestina y varios cuerpos de rocas deformadas se correlacionan geocronológicamente con los neises de Naranjales, Samaná, Horizontes, Abejorral, Puente Peláez, Las Palmas, Padua, Río Verde, Cedeño, Manizales, Complejo de Puquí, Granofels de Normandía y el Stock del Buey

Agradecimientos

Se le agradece al director Oscar Eladio Paredes por promover la investigación en el Servicio Geológico Colombiano. A los laboratorios de química, elaboración de secciones delgadas y geocronología del Servicio Geológico Colombiano y a Jimmy Muñoz del Laboratorio de Geocronología del SGC por realizar la datación radiométrica U-Pb en circón.

Referencias

- Álvarez, J., Rico, H., Vásquez, H., Hall, R.B., Blade, L.V. (1975a). Geología de la Plancha 105 Valdivia. Escala 1:100.000: INGEOMINAS, escala 1:100.000. (informe y trabajo inédito)
- Álvarez, J., Rico, H., Vásquez, H., Hall, R., Blade, L. (1975b). Mapa geológico del Cuadrángulo Yarumal (H-8) y parte del Cuadrángulo Ituango (H-7), Colombia: INGEOMINAS escala 1:100.000, 1 plancha. (informe y trabajo inédito)
- Blanco-Quintero, IF, García-Casco, A., Toro, LM, Moreno, M., Ruiz, EC, Vinasco, CJ, Cardona, A., Lázaro, C., Morata, D. (2014). Colisión de terrenos del Jurásico tardío en el margen noroccidental de Gondwana (complejo Cajamarca, flanco oriental de la cordillera Central, Colombia). *International Geology Review*, 56(15), pp. 1852-1872. DOI: <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.963710>.
- Cochrane, R., Spikings, R., Gerdes, A., Ulianov, A., Mora, A., Villagomez, D., Putlitz, B., Chiaradia, M. (2014). Permo-Triassic anatexis, continental rifting and the disassembly of western Pangaea. *Lithos* 190, pp. 383-402.
- Correa, R.A. y García, J.F. (2018). Informe de levantamientos geológicos sobre el corredor vial Valle de Toledo - Proyecto hidroeléctrico Ituango - Puerto Valdivia, departamento de Antioquia. Servicio Geológico Colombiano. 143 P.
- Correa-Martínez, A.M., Martens, U., Rodríguez, G. (2020). Collage of tectonic slivers abutting the eastern Romeral Fault System in central Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, art. 102794.
- 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 2004*, abstract id. V51C-0584.
- González, H. (2001). Mapa geológico del Departamento de Antioquia, escala 1: 400.000, Memoria Explicativa. INGEOMINAS, Colombia. 240 P
- Hall, R., Álvarez, J., Rico, H., Vásquez, H. (1972). Geología de los departamentos de Antioquia y Caldas (sub-zona II-A). *Boletín Geológico*, 20(1), pp. 1-85.
- Ibáñez-Mejía, M., Restrepo, J.J., García-Casco, A. (2020). Tectonic juxtaposition of Triassic and Cretaceous meta-(ultra)mafic complexes in the Central Cordillera of Colombia (Medellin area) revealed by zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes. In Bartorelli, A., Teixeira, W, e de Brito B., Eds., *Geocronologia e evolução tectônica do continente Sul-Americano: a contribuição de Umberto Giuseppe Cordani*. Sociedade Brasileira de Geologia. Solaris Edições e Produções Culturais e Multimídia Ltda., São Paulo, Brazil. pp. 418-443.
- Ibáñez-Mejía, M., (2020). The Putumayo Orogen of Amazonia: a synthesis. In: Gómez, J., and Mateus-Zabala, D., Eds., *The geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, Bogotá, Colombia. pp. 101-131. DOI: <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.06>
- Jaramillo, J.S., Cardona, A., León, S., Valencia, V., Vinasco, C., (2017). Geochemistry and geochronology from Cretaceous magmatic and sedimentary rocks at $6^{\circ}35'0$ N, western flank of the Central cordillera (Colombian Andes): magmatic record of arc growth and collision: *Journal of South American Earth Sciences*, 76, pp. 460-481.
- Martens, U., Restrepo, J.J., Ordóñez-Carmona, O. y Correa-Martínez, A.M., (2014). The Tahamí and Anaconda terranes of the Colombian Andes: missing links between South American and Mexican Gondwana margins. *The Journal of Geology*, 122(5), pp. 507-530. DOI: <https://doi.org/10.1086/677177>
- Maya, M., González, H., (1995). Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Bol. Geol.* 35, pp. 43-51.
- Muñoz, J., (1980). Estudio petrológico del Grupo Valdivia. Tesis grado, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, 194 P. Medellín, Colombia.
- Pinilla, A. Rodríguez, G., Sabrica, C.A., Ramírez, D.A., Zapata, J.P., Correa-Martínez, A.M., y Muñoz, J.A., (2023). Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia. Gneis de Cedeño. Servicio Geológico Colombiano, Medellín, Colombia.
- 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, pp. 117-152. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00159-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00159-9).
- Restrepo, J.J., Toussaint, J.F., González, H., Cordani, U., Kawashita, K., Linares, E., y Parica, C., (1991). Precisiones geocronológicas sobre el Occidente Colombiano. In: *Memorias, Simposio sobre Magmatismo Andinos y su marco tectónico*, Manizales, Colombia, Tomo I, pp. 1-22.
- Restrepo, J.J., Ordoñez-Carmona, O., Armstrong, R., and Pimentel, M.M., (2011). Triassic metamorphism in the northern part of the Tahamí Terrane of the central cordillera of Colombia. *J.S. Am. Earth Sci.* 32, pp. 497-507. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.04.009>
- Restrepo, J.J., Ordoñez-Carmona, O., Martens, U., y Correa, A.M., (2009). Terrenos, complejos y provincias en la cordillera central de Colombia. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo* 9, pp. 49-56.
- Restrepo, J., (2008). Obducción y metamorfismo de ofiolitas triásicas en el flanco Occidental del terreno Tahamí, Cordillera Central de Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra* 22, pp. 49-100.
- Restrepo, J.J., Ibáñez-Mejía, M., and García-Casco, A., (2012). U-Pb zircon ages of the Medellín Amphibolites (Central Cordillera of Colombia) reveal mid-Cretaceous tectonic juxtaposition of Triassic and mid-Cretaceous metamorphic complexes. In: VIII Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, Medellín, Colombia, Medellín.
- Restrepo, J.J., and Toussaint, J.F., (2020). Tectonostratigraphic terranes in Colombia: an update. First part: continental terranes. *The Geology of Colombia*. In: Gómez, J., and Mateus-Zabala, D. (Eds.), *Proterozoic – Paleozoic*. Servicio Geológico Colombiano, vol. 1. Publicaciones Geológicas Especiales 35, Bogotá, Colombia. 27 P. DOI: <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>
- Rodríguez, G., González, H., Zapata, G., Cossio, U., y Correa-Martínez, A.M., (2016). Geología de la plancha 147 Medellín Oriental. Escala 1:50.000 Versión 2016. Servicio Geológico Colombiano, 465 P.
- Rodríguez, G., Zapata, G., Correa-Martínez, A. M., y Arango, M., (2017). Caracterización del magmatismo triásico-jurásico del macizo de Santander. Servicio Geológico Colombiano.
- Rodríguez, G., Correa-Martínez, A.M., Arango, M.I., Zapata, G., y Bermúdez, J.G., (2020). Catálogos de las unidades litoestratigráficas de Colombia: Macizo de Santander. Vol. 1. Servicio Geológico Colombiano. DOI: <https://doi.org/10.32685/9789585279445>
- Rodríguez-García, G., Zapata, J.P., Correa-Martínez, A.M., Ramírez, D.A., y Obando, G., (2020b). Aportes al conocimiento del plutonismo del arco Mocoa-Santa Marta durante el Jurásico temprano-medio, en la margen noroccidental de los Andes, Colombia. *Boletín de Geología*, 42(3), PP. 15-50. DOI: <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n3-2020001>
- Rodríguez García, G., Correa-Martínez, A.M., Zapata, J.P., Ramírez, D.A. and Sabrica, C.A., (2022a). Evolution of arc magmatic cycles from the Carboniferous to the Early Cretaceous in the western paleomargin of Gondwana, north of the Andes. *Boletín Geológico*, 49(2), art 663. DOI: <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.49.2.2022.663>
- Rodríguez, G., Sabrica, C., Correa-Martínez, A.M., Ramírez, A., Zapata, J.P., Obando, G. y Muñoz, J.A., (2022b). Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia. Neis de Samaná, cordillera Central. Servicio Geológico Colombiano, Medellín, Colombia.
- Rodríguez, G., Correa-Martínez, A.M., Zapata, J.P., Ramírez, D., Sabrica, C. y Obando, G., (2023a). Actualización geológica de las planchas: 226, 244, 245, 262, 263, 281, 282, 301, 322 y 344 Departamentos de Tolima, Huila, Cauca y Valle del Cauca. Escala 1:100.000
- Rodríguez, G., Sabrica, C., Zapata, J.P., Ramírez, D., y Correa-Martínez, A.M., (2023b). Neises y granitoides anatócticos triásicos de la cordillera Central de Colombia: composición, edad de metamorfismo, correlación, características de los circones y origen. *Boletín de Geología*, en revisión.
- Rodríguez, G. y Sabrica, C., (2023c). Redefinición del Complejo Migmatítico de La Cocha - Río Téllez, con base en nuevos datos de campo, petrografía, litogeoquímica y geocronología. *Boletín de Ciencias de la Tierra* (en prensa)
- Sabrica-Buendía, C., (2022). Ambiente geodinámico del Gneis de Naranjales y su relación con las rocas metamórficas encajantes. Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Sabrica, C.A., Rodríguez, G., Ramírez, D., Correa-Martínez, A.M., Zapata, J.P., Obando, G. Muñoz, J.A., Rayo, I., y Ureña C.I., (2023). Catálogo de unidades estratigráficas de Colombia, Neis de Naranjales, Cordillera Central. Servicio Geológico Colombiano, Medellín, Colombia.
- Sláma, J., Kosler, 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., and Whitehouse, M.J., (2008). Plesovice zircon — a new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249, pp. 1-35.
- Van der Lelij, R., Spikings, R., and Mora, A., (2016). Thermochronology and tectonics of the Mérida Andes and the Santander Massif, NW South America. *Lithos*, (248-251), pp. 220-239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.01.006>
- Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W., and Beltran, A., (2011). Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia: *Lithos*, 125, pp. 875-896.
- Vinasco, C.J., Cordani, U.G., González, H., Weber, M., and Peláez, C. (2006). Geochronological, isotopic, and geochemical data from Permo-Triassic granitic neisses and granitoids of the Colombian Central Andes. *J.S. Am. Earth Sci.* 21, pp. 355-371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.007>
- Wiedenbeck, M., Allé, P., Corfu, F., Griffin, W.L., Meier, M., Oberli, F., von Quadt, A., Roddick, J.C., and Spiegel, W., (1995). Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1), pp. 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x>
- Whitney, D.L., and Evans, B.W., (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1), pp. 185-187. DOI: <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Zapata, G. y Cossio, U., (1999). Geología de la Plancha 93 Cáceres. INGEOMINAS, Medellín, Colombia.
- Zapata-Villada, J.P., Cardona, A., Serna, S., and Rodríguez, G., (2021). 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), art. 103557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103557>

Zapata-Villada, J.P., Ramírez, D.A., Rodríguez, G., Sabrica, C., Correa-Martínez, A. M., Obando, G., Muñoz, J. (2022). Catálogo de unidades litoestratigráfica de Colombia. Neis de Horizontes, cordillera Central. Medellín: Servicio Geológico Colombiano. (informe y trabajo inédito)

G. Rodríguez-García, se graduó en 1987 con el título de Ing. Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Posteriormente, completó estudios de especialización en la École Nationale Supérieure des Mines de París en 1995, en evaluación técnica-economía de los proyectos mineros. Ha trabajado durante 36 años en el Servicio Geológico Colombiano. Fue el jefe de cartografía de la Regional sede Ibagué, coordinador de proyectos y coordinador de la sede del Servicio Geológico de Medellín y del grupo de investigación Estudios Geológicos Especiales. Fue profesor de Geología de Colombiana, Geología de Campo I y Geología Física en la Universidad EAFIT y director de geología de Grupo Argos. Ha escrito numerosas publicaciones, incluidos más de 30 mapas geológicos, numerosos catálogos estratigráficos de unidades de Colombia, libros y artículos de geología y entomología.
ORCID: 0000-0003-1422-3523

C.A. Sabrica-Buendía, se graduó en el año 2009 como Geólogo de la Universidad de Caldas, Colombia. Posteriormente, completó estudios de Magíster en Ingeniería - Recursos Minerales de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, en el año 2023. Ha trabajado durante 13 años en diferentes áreas como son: control de calidad de adquisición de datos sísmicos 2D y 3D, exploración de depósitos de oro y cobre en empresas privadas. Ha realizado trabajos de cartografía geológica a escala 1:50.000, 1:100.000, en el Servicio Geológico donde es coautor de 6 planchas geológicas y ha participado en los proyectos de Geología de Rescate y Ortoneises de la cordillera Central, donde es coautor de 4 catálogos litoestratigráficos de Colombia y 2 artículos.
ORCID: 0000-0002-6906-6097