

GEOQUÍMICA Y PETROLOGÍA DE LAS METABASITAS DEL COMPLEJO ARQUÍA (MUNICIPIO DE SANTA FE DE ANTIOQUIA Y RÍO ARQUÍA, COLOMBIA): IMPLICACIONES GEODINÁMICAS

GEOCHEMISTRY AND PETROLOGY OF METABASITES OF THE ARQUIA COMPLEX (SANTA FE DE ANTIOQUIA AND ARQUIA CREEK, COLOMBIA): GEODYNAMIC IMPLICATIONS

ELVIRA CRISTINA RUIZ-JIMÉNEZ

M.Sc., Departamento de Ciencias Geológicas Universidad de Caldas. Manizales, Colombia, elvira.ruiz@ucaldas.edu.co

IDAEL F. BLANCO-QUINTERO

PhD., Departamento de Geociencias. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

LUZ MARY TORO-TORO

M.Sc., Departamento de Ciencias Geológicas Universidad de Caldas. Manizales, Colombia

MARIO MORENO-SÁNCHEZ

PhD., Departamento de Ciencias Geológicas Universidad de Caldas. Manizales, Colombia.

CESAR JAVIER VINASCO

PhD., Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

ANTONIO GARCÍA-CASCO

PhD., Departamento de Mineralogía y Petrología, Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, Universidad de Granada-CSIC España.

DIEGO MORATA

PhD., Departamento de Geología y Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA, Fondap-Conicet). Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. - Universidad de Chile, Santiago, Chile.

ARLEY GÓMEZ-CRUZ

MSc., Departamento de Ciencias Geológicas Universidad de Caldas. Manizales, Colombia

Recibido para evaluación: 30 Octubre 2012/Aceptación: 15 Noviembre: 2012 / Recibida Versión Final: 29 Noviembre 2012

Resumen: Las metabasitas del Complejo Arquía (Cordillera Central, Colombia) corresponden a rocas Mesozoicas de afinidad oceánica imbricadas tectónicamente y emplazadas sobre el paleomargen colombiano y posteriormente afectadas por el sistema de Fallas de Romeral. Estas rocas están parcialmente cubiertas por rocas clásticas Oligo-Miocenas de la Formación Amagá e intruidas localmente por cuerpos sub-volcánicos del Mio-Plioceno. La composición de las metabasitas indica afinidad toleítica (basaltos y andesitas basálticas; $\text{SiO}_2=45.86-49.69$ wt%, $\text{FeO}+\text{MgO}=14.6-25.26$ wt% y $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=1.8-2.91$ wt%, relaciones $\text{Nb}/\text{Y}=0.017-0.216$) con patrones de REE caracterizados por LREE ligeramente empobrecidos y patrones menos fraccionados y relativamente planos en las tierras raras pesadas (HREE). La composición en elementos traza muestra patrones fraccionados en los LILE, con enriquecimientos significativos en Cs, Ba y Pb y una ligera anomalía negativa en Nb para algunas de las muestras. Los HFSE evidencian patrones relativamente planos y, en general, cercanos a uno. Una relación genética con magmatismo de abisal y de retro-arco de islas puede inferirse de las relaciones $\text{Th}/\text{Yb} - \text{Nb}/\text{Yb}$. Todas estas características sugieren, por tanto, que los protolitos de las metabasitas corresponden a un ambiente geodinámico de formación de fondo oceánico (MORB), que sugiere estar ubicado en el retro-arco Andino (i.e., Colombian seaway) durante el Cretácico temprano, y refuerzan la idea de que el complejo Arquía es una mélangé tectónica formada durante un proceso colisional arco-continente Mesozoico.

Palabras clave: Arquía, retro-arco andino, Colombia.

Abstract: The Arquía complex metabasites (Central Cordillera, Colombia) correspond to Mesozoic rocks of oceanic affinity tectonically juxtaposed against the Colombian paleo-margin in upper cretaceous times and subsequently deformed by the Romeral fault system. These rocks are partially covered by clastic rocks of the Oligo-Miocene Amagá Formation and locally intruded by Mio-Pliocene sub-volcanic rocks. The composition of metabasites indicates a tholeiitic affinity (basalts and basaltic andesites; $\text{SiO}_2: 45.86 - 49.69$ wt%; $\text{FeO}+\text{MgO}: 14.6-25.26$ wt%; $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}: 1.8-2.91$ wt% with $\text{Nb}/\text{Y}=0.017-0.216$ ratios) with slightly depleted LREE patterns followed by less fractionated and flat HREE patterns. The HFSE, in turn, shows in general flat patterns, close to 1. Trace element plots yields

fractionated patterns for LILE's, with markedly enrichment in Cs, Ba, Pb and a slightly negative Nb anomaly for some samples. On the other hand, a genetic relationship with abyssal and back-arc magmatism can be envisaged through Th/Yb - Nb/Yb ratios. It is suggested that the protolith for metabasites are MORB, formed in the Andean back-arc (i.e., the colombian seaway) in lower cretaceous times. These ideas reinforce the interpretation that Arquía Complex is a tectonic melange formed during an arc-continent collision in upper cretaceous times.

Keywords: Arquía, Andean back-arc, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

En el borde W del margen de Sudamérica, aunque ha predominado la subducción de las placas de origen Pacífico bajo la placa continental, existen también registros de la acreción de terrenos oceánicos exóticos, particularmente en los Andes del Norte (Kerr, et. al., 1996; Beaudon, et al. 2005; Pindell y Kennan, 2009; Vallejo, et. al., 2009; Villagomez, et. al., 2008). Estos materiales juveniles fueron transferidos al continente de manera episódica (Bahlburg, et. al., 2009). Los procesos de subducción involucran también el continuo reciclaje en el manto de los materiales asociados a la zona de convergencia, i.e., sedimentos oceánicos y de trinchera, corteza oceánica, manto litosférico y sublitosférico y materiales erosionados tectónicamente de la placa suprayacente. La región norte de la cordillera de Los Andes (i.e., Perú septentrional-Ecuador-Colombia-Venezuela) se ha formado a partir de continuos procesos de colisión de arcos de islas y fragmentos de plateau oceánicos con margen de Suramérica, acompañados por acreción y subducción de fragmentos de terrenos aloctonos Cretácicos de origen oceánico (Villagómez, et al., 2011).

En términos generales, la corteza oceánica abisal (tipo MORB) está caracterizada por rocas basálticas empobrecidas en elementos traza incompatibles (LILE). El eventual incremento en el contenido LILE's ocurre normalmente a causa de procesos de alteración hidrotermal en zonas de divergencia donde se forma nueva corteza oceánica y en zonas de convergencia donde la litosfera oceánica subducente se pliega (Ranero, et al., 2003). En este sentido los sedimentos asociados a la placa subducente juegan un importante papel en el proceso de modificación de la composición de los productos de subducción y acreción a través de la infiltración de fluidos derivados de la corteza subducente por reacciones metamórficas prógradas (e.g., Stern, 2002; Iwamori, 1998).

En este trabajo se integran consideraciones geológicas, petrográficas y geoquímicas de metabasitas pertenecientes al Complejo Arquía en el sector Santafé de Antioquia – Río Arquía (límites Antioquia-Caldas) con el fin de conocer

el ambiente de formación de sus protolitos y establecer comparaciones con los protolitos de otras unidades de metabasitas localizadas dentro del mismo complejo.

2. GEOLOGÍA REGIONAL

La región noroccidental de los Andes del Norte, desde el extremo norte de Perú hasta el norte de Venezuela, se caracteriza por estar conformada por una serie de terrenos oceánicos mesozoicos amalgamados al basamento/margen continental autóctono/para-autóctono (e.g., Maya y González, 1995, Kerr et al., 1997 2002; Giunta et al., 2002, Weber et al., 2002, Villagómez et al., 2008, Vallejo et al., 2009, Pindell y Kennan, 2009.). Desde la publicación del trabajo pionero de Barrero 1979, la sutura entre el margen continental colombiano y los terrenos cretácicos de origen oceánico se ha situado en la llamada falla Cauca-Almaguer (Maya y González 1995; Nivia, et al. 2006) o "Romeral" (e.g. Cooper et al. 1995; Kerr, et al. 1997; Villamil 1999; Taboada, A. et al. 2000; Villagómez, et al. 2008). Al occidente de la Falla Cauca-Almaguer afloran los basaltos de edad Cretácica Temprana del complejo Amaime (Aspden and McCourt 1986; Moreno-Sánchez and Pardo-Trujillo 2003) y las secuencias de plateau oceánico del Cretácico Tardío de la Cordillera Occidental (CCOP), que probablemente se formaron en el Pacífico como parte del Plateau oceánico del Caribe (Kerr et al., 1997; 1998). Hoy existen suficientes datos para proponer que una sutura de orden mayor entre los terrenos de afinidad oceánica y el margen continental en Colombia se halla situada más al este de lo que tradicionalmente se ha planteado, ya que al oriente de la Falla Cauca-Almaguer, en el flanco occidental de la Cordillera Central, se han reconocido litodemas de afinidad oceánica como los Complejos Arquía y Quebradagrande, los cuales fueron reunidos por Cediél et al. (2003), en una unidad denominada "Romeral Melange".

Inicialmente las rocas agrupadas dentro del Complejo Arquía fueron estudiadas y descritas en el sector comprendido entre el Río Arquía (Caldas) y el municipio de La Pintada (Antioquia) desde mediados de la década del 70 (Restrepo y Toussaint, 1976), incluyendo

anfibolitas granatíferas, esquistos verdes y esquistos negros con metamorfismo barroviiano y un origen a partir de cabalgamiento de corteza oceánica. Según una datación K/Ar en hornblenda realizada por estos autores, se considera el metamorfismo como de edad Cretácico medio (113 +/- 5 M.a). Arias y Caballero (1978) identifican además anfibolitas sausríticas, esquistos cuarzo-moscovíticos, gabros y serpentinitas, todos ellos afectados por metamorfismo regional en facies de esquistos verde, anfibolita-epidota y anfibolita-almadino, con origen a partir de un cabalgamiento de corteza oceánica durante el cierre de una cuenca marginal. González, 1980,

denomina esta unidad como Esquistos Anfíbólicos del Río Cauca, extendiéndola hacia el norte y hacia el sur, originados a partir de protolitos volcano-sedimentarios, pelíticos e ígneos básicos y emplazados tectónicamente. En estos sectores las rocas se hallan comúnmente intruidas por una serie de pequeños cuerpos y diques graníticos s.l. no deformados que según datos geocronológicos tienen edades Mioceno tardío - Plioceno, entre 6 y 7 Ma (K/Ar en biotita y hornblenda; González, 1976, Restrepo *et al.*, 1981 y Frantz *et al.*, 2007) y se hallan cubiertas localmente por rocas volcánicas Mio-Pliocenas y por rocas clásticas Oligo-Miocenas. (Figura 1).

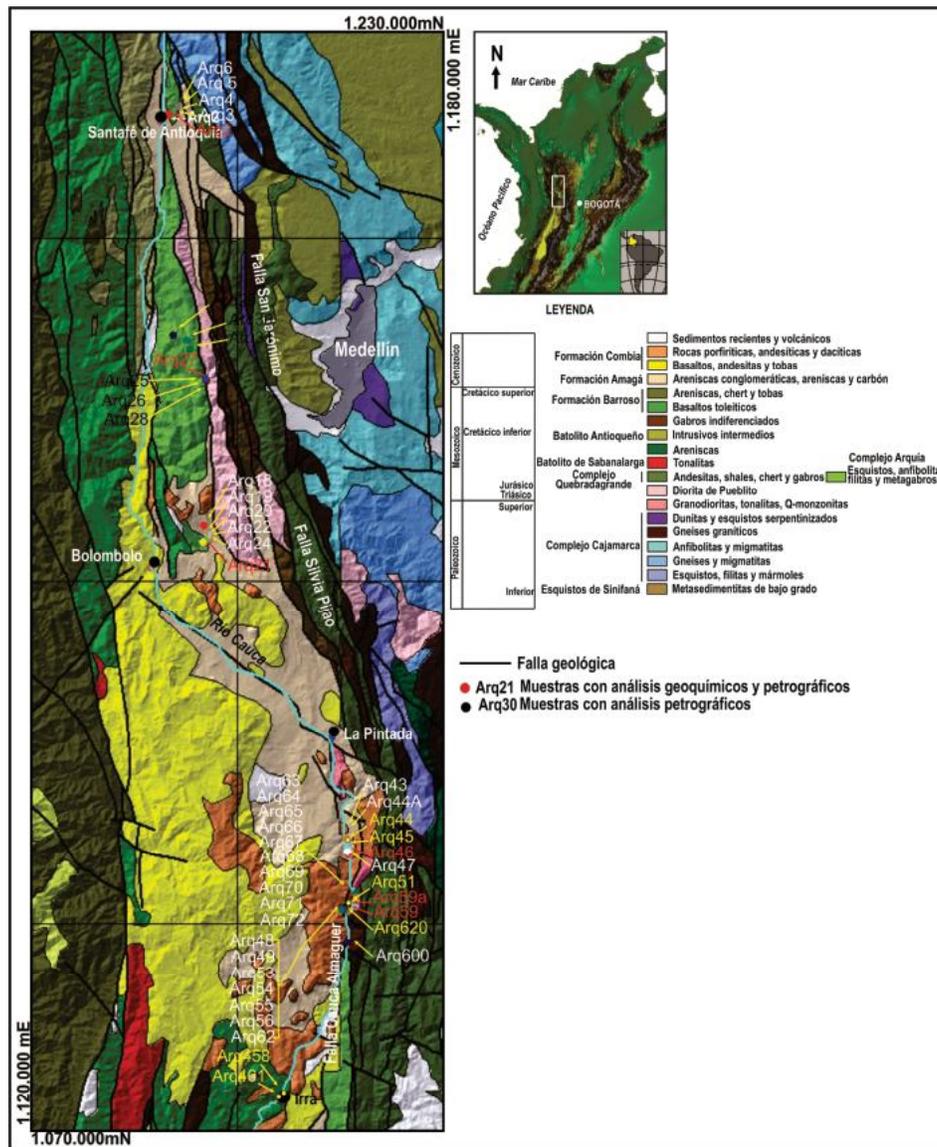


Figura 1. Mapa geológico del sector comprendido entre los municipios de Irira (Risaralda) y Santafé de Antioquia, flanco occidental de la Cordillera Central de Colombia. Modificado de Gómez, et al., (2007). Localización de muestras analizadas.

Maya y González (1995) definen el Complejo Arquía como una unidad litodémica limitada al occidente por la Falla Cauca-Almaguer y al oriente por la Falla Silvia-Pijao, extendiéndose hasta el Ecuador. En esta unidad se incluyen desde norte a sur: Esquistos de Sabaletas, Grupo Arquía, Esquistos de Lisboa-Palestina, Grupo Bugalagrande, Complejos Bolo Azul y El Rosario, Esquistos de Barragán, Esquistos de Jambaló y la secuencia Metamórfica de Buesaco. Posteriormente Moreno-Sánchez y Pardo-Trujillo (2003) proponen modificar la denominación por Complejo Arquía-Guamote, al incluir la división Guamote y las eclogitas del Complejo Raspas, en el Ecuador. Estos autores plantean además que dentro de las unidades del Complejo Arquía se entremezclan tectónicamente rocas metasedimentarias de posible origen continental. McCourt et al. (1984) concluyen que algunos de los litodemas hoy incluidos en el Complejo Arquía, como son las anfibolitas del Rosario, metagabros de Bolo Azul, y los esquistos de Bugalagrande, formaron parte de un arco de islas que colisionó con el margen este del Complejo Cajamarca durante el Carbonífero. Sin embargo, las edades radiométricas obtenidas hasta la fecha en los diferentes litodemas del complejo sugieren únicamente eventos metamórficos mesozoicos. Los datos disponibles aportan edades que van desde el Triásico (Restrepo 1991; Vinasco, et al. 2006) hasta el Cretácico Temprano (Toussaint y Restrepo 1975; Restrepo, et al. 2008; Moreno-Sánchez y Pardo-Trujillo 2003; Bustamante, 2008; 2011; Giraldo 2010; Villagómez, 2008 y Villagómez et al., 2011). Algunos autores, basados en relaciones de campo, infieren las rocas del Complejo Arquía como Paleozoicas (Mccourt, 1984; Nivia et al., 2006, Gómez et al., 2007, Rodríguez 2011).

Durante la última década los estudios a las rocas del Complejo Arquía han incluido análisis geoquímicos que han permitido identificar los ambientes tectónicos de generación de los protolitos magmáticos. Estos estudios arrojan un origen variado, desde rocas formadas en arcos de islas a dorsales oceánicas, que luego experimentaron condiciones de metamorfismo que alcanzaron condiciones de equilibrio en facies esquistos verdes, anfibolita con epidota y anfibolita en el sector norte (e.g. Dorado y Ortiz, 2006; Marín, 2009; Giraldo, 2010; García 2011; Valencia, 2011 y Cedeño, 2011, Restrepo et al., 2011) y condiciones de metamorfismo en facies esquistos verdes, esquistos azules y eclogita, en los sectores más meridionales como Pijao y Barragán, y al sur, en Ecuador, el Complejo Raspas (Bustamante, 2008; Ríos-Reyes, et al., 2008; Bosch et al., 2002).

3. PETROGRAFÍA

Las metabasitas del Complejo Arquía estudiadas para este trabajo corresponden a esquistos verdes y anfibolitas, ubicadas en el sector comprendido entre los municipios de Santafé de Antioquia (Antioquia) e Irra (Risaralda), dentro del sistema de fallas de Romeral. La secuencia de esquistos verdes consiste de esquistos de color verde oscuro a verde claro, con buen desarrollo de la esquistosidad con rumbos que varían desde N26°E hasta N86°W y con buzamientos moderados a fuertes generalmente hacia el W. A menudo se encuentran intercalados, a manera de bandas centimétricas a métricas, con esquistos cuarzo-moscovíticos con grafito (e.g. río Arquía y antigua vía férrea Arauca-La Pintada, **Figura 2a**), o en contacto fallado con serpentinitas o anfibolitas en el río Arquía (**Figura 2b**). Petrográficamente corresponden a esquistos cuarzo cloríticos con moscovita, esquistos cloríticos, esquistos de actinolita/hornblenda con clorita y esquistos cuarzo actinolíticos, con una mineralogía compuesta por actinolita (24 – 45 % modal), clorita (8 - 35 %), hornblenda (< 5 %), zoisita/clinozoisita (18 - 3 %), cuarzo (37-5 %), plagioclasa (4-6 %) y moscovita (4-1 %) (**Figura 2c**). Los minerales accesorios más comunes son calcita, titanita, hematita, magnetita e ilmenita. Las texturas características son nematoblástica dada por la actinolita, lepidoblástica dada por la clorita y porfiroblástica dada por epidota (**Figura 2d**).

Las anfibolitas son rocas de color verde muy oscuro, con ligeras variaciones a verde claro, que generalmente presentan bandeamiento composicional de plagioclasa y hornblenda, ocasionalmente con granate (**Figuras 2e y 2f**). En algunos sectores presentan un buen desarrollo de la esquistosidad, con rumbos que varían desde N3°E hasta N30°W y con buzamientos hacia el W. La asociación en equilibrio consiste de hornblenda, plagioclasa, cuarzo, epidota y granate; como accesorios aparecen rutilo, titanita y apatito. La composición modal de este tipo de rocas está representada por hornblenda como mineral metamórfico más abundante (46-42 %), plagioclasa (28-25 %), granate (15-17 %), cuarzo (9-14%), y feldespato potásico (2 %). Los minerales del grupo de las epidotas se encuentran en proporciones menores a 6 %. En algunas muestras el granate se encuentra parcialmente reemplazado por clorita a través de fracturas o en los bordes de los cristales. Así mismo,

localmente se observan carbonatos. Las texturas características son nematoblástica, la cual es definida

por la orientación de la hornblenda y porfiroblástica, dada por el granate (**Figuras 2g y 2h**).

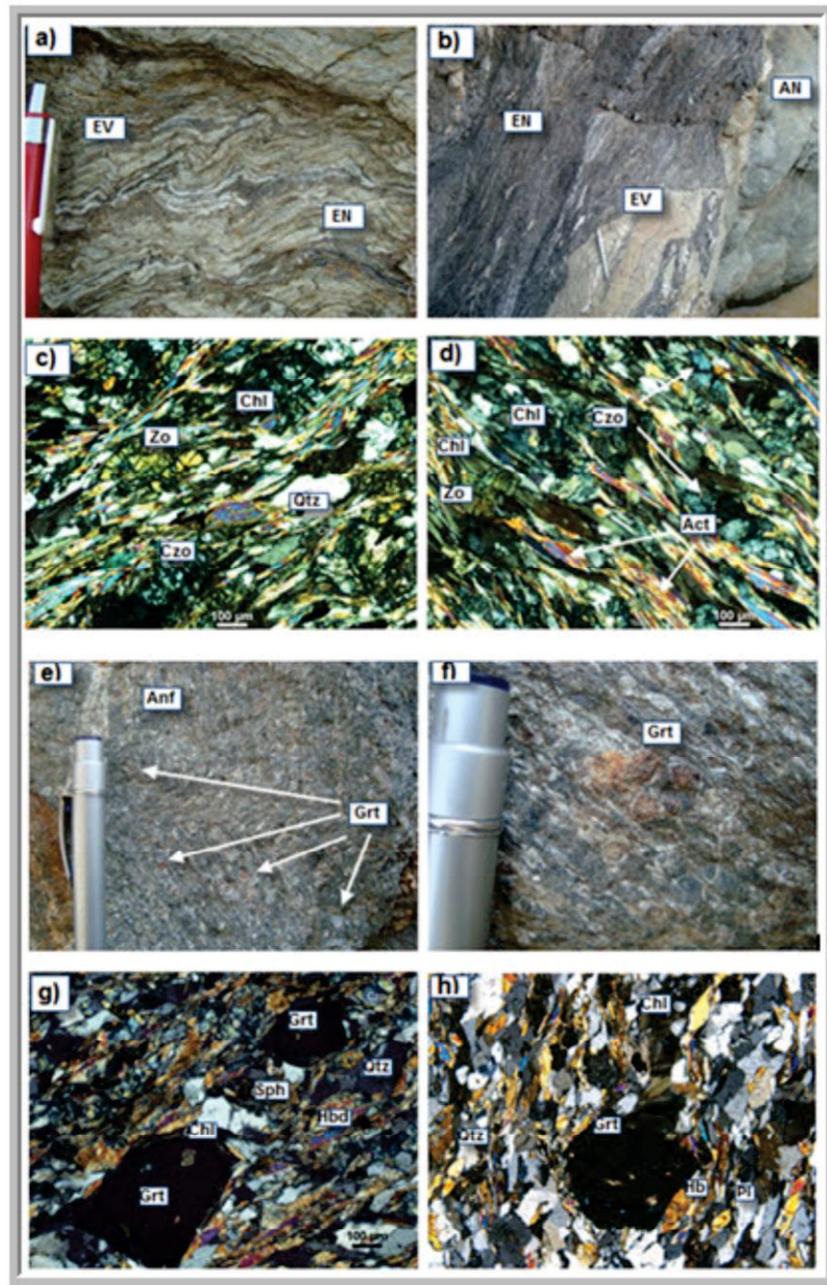


Figura 2. Metabasitas del Complejo Arquía. a) Intercalación de esquistos verdes (EV) y esquistos negros (EN), sector Santafé de Antioquia; b) intercalación de esquistos verdes (EV) y esquistos negros (EN) en contacto fallado con anfibolitas (AN), río Arquía; c) y d) microfotografías de esquisto actinolítico con epidota; textura nematoblástica dada por actinolita (Act) y porfiroblástica dada por clinozoisita (Czo), presencia de clorita (Chl), cuarzo (Qtz) y zoisita (Zo); e) y f) anfibolitas con granate (Grt), río Arquía; g) y h) microfotografías de anfibolita con granate, de grano medio a fino; presencia de granate (Grt), clorita (Chl), cuarzo (Qtz), esfena (Sph) y hornblenda (Hb); textura nematoblástica dada por hornblenda (Hb) y porfiroblástica dada por granate (Grt).

4. GEOQUÍMICA

4.1. Metodología

Los análisis de elementos mayores y traza de 6 muestras representativas, se realizaron en el Centro de Instrumentación Científica (CIC, de la Universidad de Granada). Las composiciones de elementos mayores y de Zr se determinaron sobre perlas de vidrio hechas de 0,6 g de muestra diluida en 6 g de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$. Para ello se utilizó un equipo de fluorescencia de rayos X (XRF) Magix PHILIPS Pro (PW-2440). La precisión fue de $\pm 1,5\%$ para las concentraciones superiores a 10 wt %. La precisión de Zr y LOI fue de $\pm 4\%$ en una concentración de 100 ppm. Los elementos traza, excepto el Zr, se determinaron por Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS) con fuente de ionización por antorcha de plasma y filtro de iones por cuadrupolo PERKIN ELMER Sciex-Elan 5.000. Las determinaciones se realizaron tras una digestión en HF y HNO_3 de 0.1 g de polvo de muestra en un contenedor de teflón a 180 °C y 200 psi durante 30 minutos, secado por evaporación, y disolución en 100 ml de HNO_3 diluido al 4%. La precisión de los resultados fue de $\pm 2\%$ y $\pm 5\%$ para concentraciones de 50 y 5 ppm, respectivamente. Los elementos mayores (wt%) y los elementos trazas (ppm) son mostrados en la Tabla 1. Los datos de mayores ploteados en las figuras y usados en el texto fueron recalculados a 100 %, sin tener en cuenta el LOI (pérdida por ignición).

4.2. Elementos mayores y clasificación de los protolitos

Las metabasitas estudiadas tienen concentraciones en SiO_2 (45.86–49.69 %) y $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (1.65 - 2.91 %) típicas de basaltos de afinidad toleítica (Le Maitre, et al., 1989; **Figura 3a**), y contenidos de $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.43$ – 16.58 wt%, $\text{FeO}_{\text{tot}} = 8.92$ - 11.69 , $\text{MgO} = 5.84$ - 8.86 wt%, $\text{CaO} = 9.11$ - 12.98 wt% y $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 3.76$ - 36.2 (Tabla 1). Considerando la posibilidad de movilidad del álcalis ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$), las muestran ploteadas en diagramas de clasificación que utilizan elementos inmóviles, como el Nb/Y contra Zr/Ti (Pearce, 1996), indican composición basáltica (**Figura 3b**), con una afinidad claramente toleítica (valores Nb/Y= 0.017-0.216). Se destaca que las rocas tienen altos valores de MgO (5.84-8.86 %), de Cr (125.51-350.62 ppm) y Ni (49.39-144.46 ppm).

4.3. Elementos de tierras raras (REE) y otros elementos trazas litófilos.

Los patrones de los REE normalizados a condrito (McDonough and Sun, 1995) muestran comportamientos ligeramente empobrecidos en los LREE, con $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.26$ – 1.68 , y patrones menos fraccionados y relativamente planos en los REE pesados, con $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.256$ – 0.32 (**Figura 4a**); con abundancias entre 10 y 30 veces con respecto a los valores condriticos. Los patrones multi-elementos para las muestras estudiadas en algunas de ellas evidencian enriquecimientos significativos en Cs, Ba, U y Pb, y una evidente anomalía negativa en Nb en el diagrama araña (spider) normalizado a N-MORB (Sun and McDonough 1989; **Figura 4b**). Los HFSE evidencian patrones relativamente planos y cercanos a 1. Estas características sugieren que los protolitos de las metabasitas corresponden a MORB.

	Anfibolitas			Esquistos		
	ARQ21	ARQ59A	ARQ59B	ARQ2	ARQ27	ARQ46
SiO ₂	46.29	48.54	47.00	45.86	49.69	46.66
Al ₂ O ₃	14.52	14.46	14.43	16.58	14.67	15.64
Fe ₂ O ₃	12.99	11.80	11.86	10.23	10.42	9.91
MnO	0.18	0.22	0.22	0.14	0.17	0.18
MgO	5.84	8.86	7.83	8.26	7.60	8.30
CaO	12.98	9.11	9.98	10.53	11.43	11.48
Na ₂ O	1.90	1.68	2.46	1.81	1.88	1.50
K ₂ O	0.09	0.12	0.45	0.05	0.50	0.15
TiO ₂	2.23	1.51	1.66	1.88	0.90	1.03
P ₂ O ₅	0.22	0.13	0.14	0.26	0.09	0.07
LOI	2.16	2.83	3.13	3.53	2.02	4.52
SUMA	99.40	99.26	99.16	99.13	99.37	99.44
Li	7.01	22.33	13.89	24.40	14.79	19.60
Rb	0.49	2.86	13.90	0.99	15.81	5.84
Cs	0.02	1.21	4.06	0.11	0.43	0.79
Be	0.68	3.78	4.63	1.42	0.52	0.65
Sr	221.56	109.49	97.47	250.30	101.15	127.16
Ba	5.74	60.48	85.93	10.29	221.42	182.58
Sc	48.22	43.73	42.94	40.50	41.97	43.07
V	443.88	297.22	335.73	274.02	262.74	263.65
Cr	125.51	249.13	269.61	318.16	325.31	350.62
Co	51.71	53.99	60.48	46.86	49.00	45.69
Ni	49.37	79.83	71.25	144.46	102.07	75.59
Cu	102.87	41.28	64.69	52.31	44.47	102.91
Zn	105.54	103.26	109.81	86.70	76.56	82.77
Ga	24.44	16.67	17.70	18.74	13.23	14.87
Y	55.26	31.26	35.16	35.13	17.70	24.10
Nb	2.99	0.89	3.04	7.58	2.30	0.41
Ta	0.38	0.57	0.79	0.76	0.28	0.17
Zr	135.40	82.50	97.50	151.30	46.50	45.50
Hf	0.52	1.37	1.69	0.64	0.50	0.52
Mo	1.95	5.18	6.17	2.66	1.04	1.46
Sn	2.10	2.32	2.48	1.86	0.44	0.72
Tl	0.04	0.57	0.85	0.15	0.13	0.15
Pb	1.09	14.23	2.68	1.48	0.75	2.26

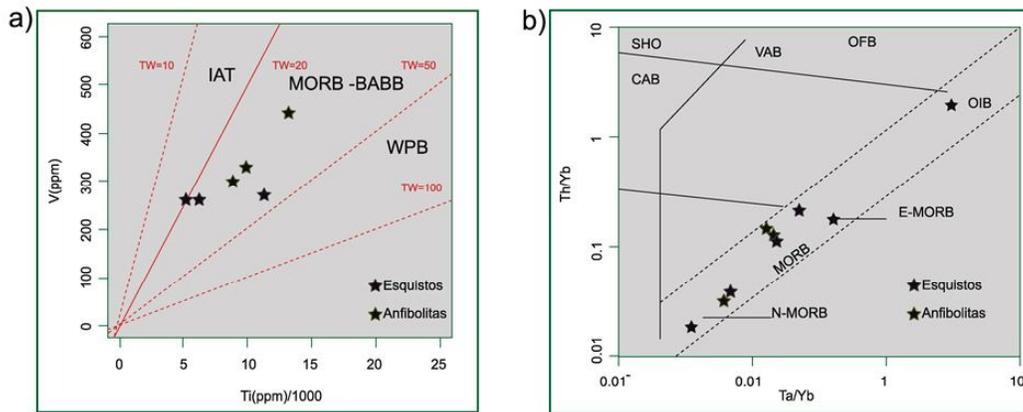


Figura 5. Diagramas de discriminación de ambientes tectónicos. a) Ti versus V (Shervais 1982): MORB, basaltos de ridge medio-oceánicos; BABB, basaltos back-arc; IAT, basaltos de arcos de islas; WPB, basaltos intraplaca. b) Th/Yb versus Ta/Yb (Pearce, 1982 - 1983) mostrando los campos shonshonítico (SHO), basaltos calco-alcalinos (CAB), toleitas de arcos de islas (IAT), basaltos de arcos volcánicos (VAB) y basaltos de fondo oceánico (OFB).

Con el fin de determinar si la movilidad de elementos como Cs, Ba, U y Pb, y la anomalía en Nb se puedan atribuir a los procesos metamórficos experimentados por los protolitos o a aporte de fluidos derivados de sedimentos en una zona de subducción, las muestras fueron analizadas usando la relación La/Nb la cual en basaltos oceánicos es comúnmente <2.5 , en basaltos de arco es típicamente >2 (Plank, 2005) y en corteza continental es de 2 a 3 (e.g. Plank & Langmuir, 1998; Barth et al., 2000); así mismo la relación Th/La permite diferenciar basaltos oceánicos (MORB y OIB) de corteza continental, teniendo valores cercanos a 0.3 en corteza continental y valores <0.1 para basaltos oceánicos, mientras los valores Th/La relacionados al manto primitivo y a condritos son cercanos a 0.12 (Hofmann, 1988; Sun & McDonough, 1989) y valores Th/La <0.2 para el manto (Plank, 2005). En el diagrama de Pearce y Norry (1979, **Figura 6a**) las muestras presentan valores La/Nb <2.5 y valores Th/La

<0.2 , excepto para la muestra ARQ59a, por lo cual la geoquímica de los LILE se puede atribuir a la movilidad de estos elementos durante el metamorfismo y no a contaminación por sedimentos en zonas de subducción. Se modelaron además las muestras sobre el diagrama Th/Yb versus Nb/Yb (Pearce y Peate, 1995), teniendo en cuenta que las variaciones Th - Nb son indicadores muy sensitivos de adición cortical (e.g., Pin y Mirini, 1993; Pin y Paquette, 1997), de manera particular en magmas agotados (Pearce, 2008) y en él se observa como algunas de las rocas estudiadas, que evidencian el agotamiento en Nb, se localizan sobre el campo de arcos oceánicos, con lo cual no se infiere contribución de fluidos derivados de la zona de subducción; las otras muestras se localizan dentro del campo de los MORB, con lo cual tampoco se infiere efecto relacionado con zona de subducción (**Figura 6b**), confirmando que la movilidad de los LILE se debe al metamorfismo experimentado por las rocas.

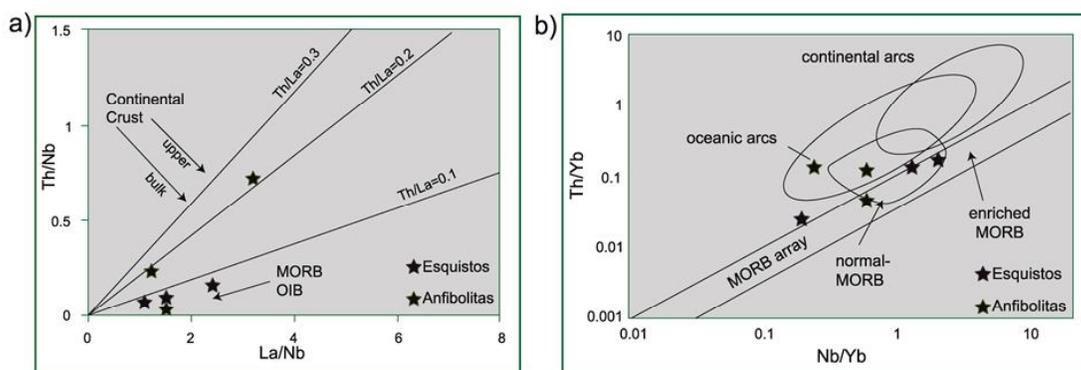


Figura 6. Diagramas de discriminación a) Th/Nb versus La/Nb (Pearce y Norry (1979) y b) Th/Yb versus Nb/Yb (Pearce y Peate, 1995), para basaltos de ridge medio oceánicos (MORB), basaltos de islas oceánicas (OIB), arcos oceánicos y arcos continentales.

Los resultados geoquímicos obtenidos son comparables con los encontrados por otros autores para unidades de rocas que por su posición estructural hacen parte del denominado Complejo Arquía:

En Villagómez (2010) se presentan datos de geoquímica de REE para cuatro muestras de anfibolitas (dos de ellas con granate) y tres muestras de esquistos anfibólicos correspondientes a la unidad metamórfica denominada Anfibolita Granatífera de Pijao (Toussaint y Restrepo, 1978b), localizada sobre el flanco occidental de la cordillera Central, entre Armenia y Pijao, en el Quindío. Los contenidos de REE muestran patrones normalizados al condrito ligeramente empobrecidos en LREE y patrones menos fraccionados y relativamente planos en HFSE, donde las muestras evidencian enriquecimientos de entre diez y treinta veces con respecto al condrito, siguiendo el patrón de rocas generadas en ambientes tipo MORB (Figura 7a); en el diagrama de elementos normalizado a N-MORB las anfibolitas muestran patrones fraccionados en los LILE, con algunos enriquecimientos significativos y los elementos HFSE evidencian patrones relativamente planos y cercanos a 1. El enriquecimiento en elementos altamente incompatibles como el Ba y el Pb es

interpretado por el autor como producto de procesos de alteración (Figura 7b).

Bustamante (2008) presenta datos geoquímicos para cinco muestras de anfibolitas que hacen parte de una unidad de rocas metamórficas localizadas sobre el flanco occidental de la cordillera Central, cerca de Barragán al noreste del departamento del Valle del Cauca. Los contenidos de REE muestran patrones normalizados ligeramente empobrecidos en LREE y patrones relativamente planos en HSFE, siguiendo el patrón de rocas generadas en ambientes tipo MORB como en casos anteriores (Figura 7a). En el diagrama de elementos normalizados a N-MORB se observa que la distribución de los LILE muestra patrones fraccionados, con enriquecimientos significativos en Ba para algunas muestras; los elementos HFSE evidencian patrones relativamente planos y cercanos a 1 (Figura 7b).

En conclusión, las características geoquímicas de las muestras analizadas en este trabajo son muy similares a las de muestras de otros cuerpos rocosos del Complejo Arquía. No obstante, nuestras conclusiones difieren de Villagómez (2010) quien propone un ambiente de punto caliente para algunas muestras de la zona de Pijao.

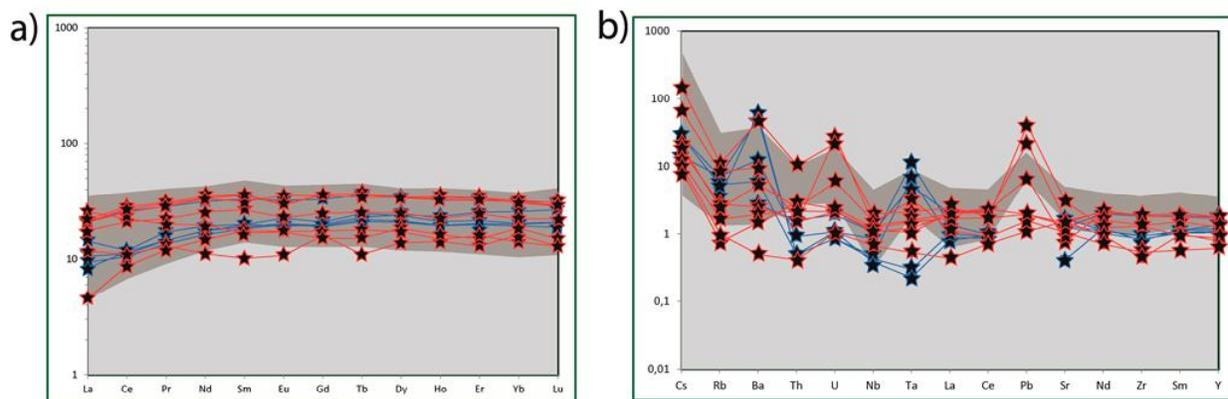


Figura 7. Comparaciones de las metabasitas estudiadas (en sombreado gris) con otros resultados obtenidos para unidades localizadas tectónicamente dentro del Complejo Arquía. a) Diagrama de tierras raras (REE) normalizadas a condrito (McDonough and Sun, 1995) y b) Diagrama multielementos normalizado a N-MORB (Sun y McDonough, 1989). En color rojo los datos de Villagómez (2010) y en color azul los datos de Bustamante (2008).

6.2. Implicaciones regionales.

Las rocas que constituyen el Complejo Arquía se presentan como una amalgama de bloques fallados, de diferentes orígenes y edad, en donde la característica común en todos es la presencia de rocas muy

deformadas y con diferentes grados de metamorfismo (Maya y González 1995; Moreno-Sánchez y Pardo-Trujillo 2003). Todos los bloques tectónicos que constituyen este complejo se encuentran en mutuo contacto formando una franja estrecha y alargada, en sentido norte sur, que se puede trazar desde el Golfo

de Guayaquil en el Ecuador hasta el norte de Colombia (Moreno-Sánchez y Pardo-Trujillo 2003). Tanto el límite occidental como el oriental de este Complejo con los complejos vecinos representan grandes fallas en dirección regionales, como son la falla Silvia-Pijao al oriente y la falla Cauca-Almaguer al occidente (Maya y González 1995). En el área de estudio, entre Santafé de Antioquia y el río Arquía, el complejo Arquía presenta rocas básicas metamorfizadas en facies de esquistos verdes y anfíbolitas, llegando a anfíbolitas con granate, lo que evidencia un metamorfismo regional. De acuerdo con la composición química se sugiere que estas escamas tectónicas representan una corteza oceánica (MORB+IAT?) acrecionada al margen oeste de la Placa Suramericana por procesos de subducción/colisión.

Las unidades al occidente del Complejo Arquía, Valle del Cauca y Cordillera Occidental están constituidas por rocas básicas (basaltos y gabros) y rocas sedimentarias marinas de edad Cretácica Temprana ("Complejo Amaime") y Cretácica Tardía en su mayor extensión (ver compilación en Moreno-Sánchez y Pardo-Trujillo 2003; Nivia, et al. 2006; Villagómez, et al. 2011). El Complejo Quebradagrande, inmediatamente al oriente del Complejo Arquía, está constituido por un basamento oceánico tipo MORB (Álvarez, 1987; Toro-Toro, et al., 2010) y una cobertura de sedimentitas, lavas, y tobas con firma calco-alcalina (Álvarez 1987; Nivia, et al. 2006). Las sedimentitas (conglomerados y cuarzoarenitas) al este del complejo Quebradagrande provienen de la erosión un basamento continental sin influencia de arco volcánico (Nelson, 1957; Gómez-Cruz, et al., 1995; Moreno-Sánchez, et al., 2008). En contraste con lo anterior, en el flanco occidental son comunes los depósitos de gravas de origen volcánico con abundantes bloques de andesitas y basaltos (Moreno-Sánchez, et al., 2008). Los depósitos clásticos del Complejo Quebradagrande no aportan evidencias de exhumación de rocas del Complejo Arquía (Moreno-Sánchez, et al., 2008). Según datos bioestratigráficos, la edad del Complejo Quebradagrande estaría situada entre el Berriasiano y el Albiano medio (ver compilación de edades en Moreno-Sánchez y Pardo-Trujillo 2003), lo que concuerda con edades radiométricas de Villagómez, et al., (2011). Por su naturaleza mixta (MORB-Arco) y su disímil petrografía se sugiere que el Complejo Quebradagrande podría representar un sistema arco-cuenca (*Back arc basin?*) situado en el margen continental Suramericano.

Datos de paleomagnetismo presentados por Bayona et al., (2006) sugieren que durante el Jurásico gran parte de los terrenos andinos (ej. valle superior del Magdalena, Macizo de Santander) fueron desplazados hacia el norte a lo largo del margen Suramericano autóctono, lo que está de acuerdo con las conclusiones de Scott (1978). Todos los complejos enunciados han estado sometidos a esfuerzos transpresivos con desplazamientos dextro-laterales durante el Cretácico Tardío y el Cenozoico (Kellogg and Vega 1995; Kennan and Pindell 2009).

Varios escenarios han sido propuestos para las rocas del Complejo Arquía: Nivia, et al. (2006) sugieren que este complejo es de edad Neoproterozoica y ligan su origen a las rocas del Complejo Cajamarca. Sin embargo esta idea ha sido considerada insostenible por Restrepo, et al. (2009). Tanto Villagómez, et al., (2011) como Moreno-Sánchez y Pardo-Trujillo (2003) sugieren que el Complejo Arquía es un complejo acrecionario formado al frente del arco volcánico de edad Cretácica Temprano o arco tras-americano de Pindell (1993). Las rocas MORB del complejo sugieren que los protolitos se originaron en un ambiente de ridge mediooceánico o cuenca marginal (retro-arco), aunque también pueden incluir montes marinos; esto, además de las condiciones del metamorfismo, es interpretado por Villagómez et al., (2011) como evidencias suficientes para sugerir que el Complejo Arquía representa un canal de subducción del arco de Quebradagrande y que se exhumó entre 117 y 107 Ma. Bustamante, et. al., (2011) plantean que el Complejo Arquía contiene una asociación de bloques heterogéneos que incluyen fragmentos Pre-Triásicos, bloques metamórficos del Albiano-Aptiano y cuerpos de rocas del Maastrichtiano-Daniano.

Con los resultados geoquímicos obtenidos se propone que las metabasitas asociadas al Complejo Arquía, en los sectores estudiados, se formaron a partir de protolitos generados en ambientes oceánicos tipo MORB, que evidencian muy poca o ninguna participación de fluidos derivados de un slab en la zona de subducción, con lo cual la movilidad de los LILE se puede atribuir al metamorfismo experimentado por las rocas. Representan remanentes de corteza oceánica, formados probablemente en una cuenca oceánica marginal de supra-subducción durante el Cretácico Temprano/Medio (**Figura 8**), por lo cual estas rocas podrían ser interpretadas como fragmentos

provenientes del retro-arco Caribeño, en el denominado “*Colombian Marginal Seaway*” (Kennan y Pindell, 2009) acrecionados a la margen continental después del Cretácico Medio y localizados entre los sistemas de fallas Cauca y Romeral (Restrepo, et al., 2009).

7. CONCLUSIONES

Las metabasitas del Complejo Arquía analizadas en este trabajo muestran características geoquímicas afines con rocas generadas en una zona de dorsal oceánica formadas a partir de una fuente mantélica empobrecida, aunque algunas de ellas sugieren un

ambiente de suprasubducción. Su composición en elementos traza (REE) sugiere composiciones MORB, ligeramente modificado, mientras los diagramas multi-elementales presentan patrones fraccionados en los LILE, con enriquecimientos significativos en Ba y Pb, y una leve anomalía negativa en Nb para algunas de las muestras, mientras que los HFSE evidencian patrones relativamente planos y en general cercanos a 1. Estas características y las de otras unidades del complejo estudiadas por otros autores sugieren que el mismo representa un complejo acrecionario que contiene cuerpos de rocas de diferente origen, composición y edad.

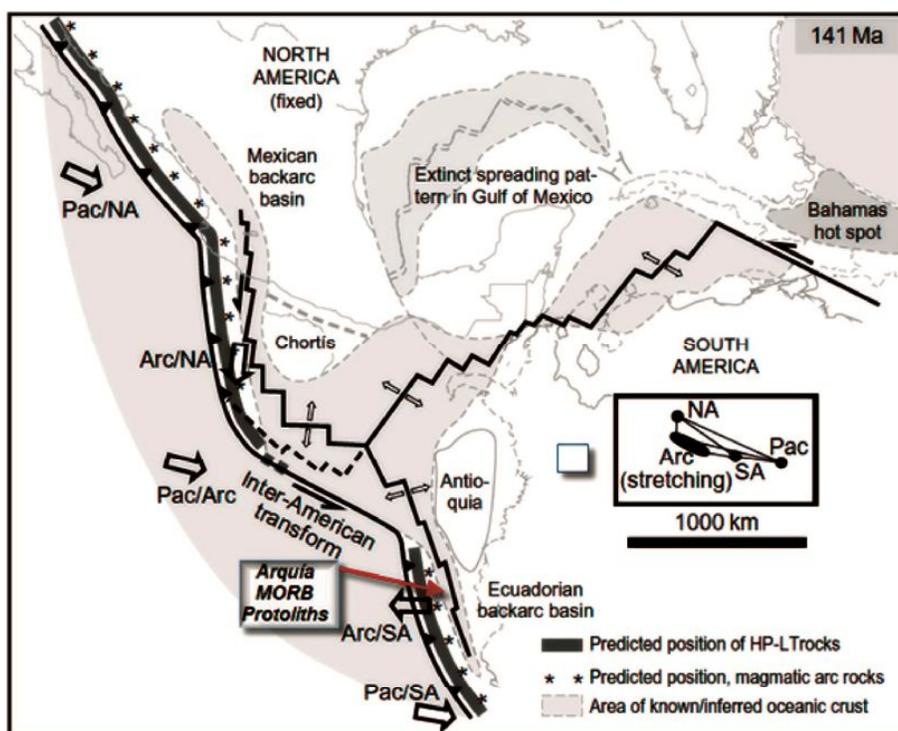


Figura 8, Posible zona de generación de los protolitos de los esquistos y anfibolitas del Complejo Arquía estudiados (modificado de Pindell et al., 2011).

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento a COLCIENCIAS, por su apoyo financiero para la realización de este proyecto y al proyecto del Ministerio Español de Ciencia e Innovación CGL2009-12446. Este trabajo es una contribución al proyecto IGCP-546 “Subduction Zones of the Caribbean”. De igual forma agradecemos a los hoy geólogos Yuly Tatiana Valencia Morales y Andrés Felipe Cedeño Motta.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Álvarez, J. A. (1987). Geología del complejo ofiolítico de Pácora y secuencias relacionadas de arco de islas (Grupo Quebradagrande) Colombia. Medellín, Ingeominas: 1-81.
- [2] Aspdén, J. A. y McCourt, W. J. (1986). Mesozoic oceanic terrane in the Central Andes of Colombia. *Geology* 14: 415-418.
- [3] Barrero, D. (1979). Geology of the central Western Cordillera, west of Buga and Roldanillo, Colombia.

Publicación Geológica Especial. Universidad Nacional. Medellín: 1-75.

- [4] Bahlburg, H., Vervoort, J.D., Du Frane, S.A., Bock, B., Augustsson, C., Reimann, C. (2009). Timing of crust formation and recycling in accretionary orogens: Insights learned from the western margin of South America. *Earth-Science Reviews* 97 (2009) 215–241.
- [5] Barth, M. G., McDonough, W. F. & Rudnick, R. L. (2000). Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust. *Chemical Geology* 165, 197–213.
- [6] Bayona, G., Rapalini, A., Costanzo-Alvarez, V. (2006). Paleomagnetism in Mesozoic rocks of the Northern Andes and its implications in Mesozoic tectonics of northwestern South America. *Earth Planets Space* 58: 1255-1272
- [7] Beaudon, E., Martelat, J.-E., Amortegui, A., Lapierre, H., y Jaillard, E. (2005). Metabasites de la cordillere occidentale d'Equateur, temoins du soubassement oceanique des Andes d'Equateur. *Comptes Rendus Geosciences* 337(6): 625-634.
- [8] Bosch, D., Gabriele, P., Lapierre, H., Malfere, J-L., Jaillard, e. (2002). Geodynamic significance of the Rupas Metamorphic Complex (SW Ecuador): geochemical and isotopic constraints. *Tectonophysics* 345: 83-102.
- [9] Bustamante, L. A. (2008). Geotermobarometria, geoquímica, geocronología e evolução tectônica das rochas da fácies xisto azul nas áreas de Jambaló (Cauca) e Barragán (Valle del Cauca), Colômbia. Instituto de Geociencias. Sao Paulo, Universidade de Sao Paulo. PhD: 179.
- [10] Bustamante, A., Juliani, C., Hall, C.M., Essene, E.J. (2011). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages from blueschists of the Jambaló region, Central Cordillera of Colombia: implications on the styles of accretion in the Northern Andes. *Geologica Acta*, Vol. 9, N° 3-4, 351 - 362.
- [11] Cedié, F., Shaw, R. P., Cáceres, C. (2003). Tectonic Assembly of the Northern Andean Block. Mexico and the Caribbean region: plate tectonics, basin formation and hydrocarbon habitats. C. Bartolini, R. T. Buffler and J. F. Blickwede, American Association of Petroleum Geologist, memoir 79: 815– 848.
- [12] Cooper, M. A., Addison, F. T., Alvarez, R., Hayward, A., Howe, S., Pulham, A.J., Taborda, A. (1995). Basin development and tectonic history of the llanos basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 79(10): 1421-1443.
- [13] Frantz, J.C., Ordonez, O., y Chemale, F., 2007. Caracterización de ambientes geológicos con mineralizaciones de Oro en los Andes Colombianos. En: VIII Congreso Colombiano de Minería. Memorias CD. Medellín, 2007.
- [14] García-Casco, A., Iturralde-Vinent, M.A. y Pindell, J. (2008) Latest Cretaceous collision/accretion between the Caribbean Plate and Caribean: Origin of metamorphic terranes in the Greater Antilles. *International Geology Review* Vol. 50, 781-809. DOI: 10.2747/0020-6814.50.9.781
- [15] Giraldo, M. I. (2010). Esquema geodinámico de la parte noroccidental de la Cordillera Central de Colombia. Facultad de Minas. Medellín, Universidad Nacional de Colombia Maestría en Ingeniería-Materiales y Procesos: 146.
- [16] Giunta, G., Beccalavu, L., Coltorti, M., Siena, F., Vaccaro, C. (2002). The southern margin of the Caribbean Plate in Venezuela: tectono-magmatic setting of the ophiolitic units and kinematic evolution. *Lithos* 63, 19 - 40.
- [17] Gómez-Cruz, A. d. J., Moreno-Sánchez, M., Pardo-Trujillo, A. (1995). Edad y origen del “complejo metasedimentario Aranzazu-Manizales” en los alrededores de Manizales (departamento de Caldas, Colombia). *Geología Colombiana* 19: 83-93.
- [18] Gómez, J., Nivia, A., Montes, N.E., Jiménez, D.M., Tejada, M.L., Sepúlveda, M.J., Osorio, J.A., Gaona, T., Diederix, H., Uribe, H. & Mora, M., compiladores. 2007. Mapa Geológico de Colombia. Escala 1:2'800.000. INGEOMINAS, segunda edición, 2 hojas. Bogotá.
- [19] González, H. (1976). Geología del cuadrángulo J-8 Sonsón. INGEOMINAS, informe 1704, 421p. Bogotá.
- [20] González, H. (1980). Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina). *Boletín Geológico INGEOMINAS* 23, 174 p.
- [21] Hofmann, A. W. (1988). Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters* 90, 297–314.
- [22] Iwamori, H. 1998. Transportation of H₂O and melting in subduction zones. *Earth and Planetary Science Letters* 160 (1-2), 65-80.
- [23] Kelley, K.A., Plank, T., Ludden, J., Staudigel, H. (2003) Composition of altered oceanic crust ad ODP Sites 801 and 1149. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 4. doi: 10.1029/2002GC0000435.

- [24] Kellogg, J. N. y Vega V. (1995). Tectonic development of Panama, Costa Rica, and Colombian Andes: constrains from Global Positioning System geodetic studies and gravity. *Geologic and tectonic development of the Caribbean plate boundary in southern Central America*. P. Mann. Boulder, Colorado, Geological Society of America. Special Paper 295: 75-90.
- [25] Kennan, L., Pindell, J.L. (2009). Dextral shear, terrane accretion and basin formation in the Northern Andes: best explained by interaction with a Pacific-derived Caribbean Plate? *Geological Society, London, Special Publications* 328 (1), 487-531.
- [26] Kerr, A. C., Tarney, J., Marriner, G. F., Nivia, A., Klaver, G. Th. y Saunders, A.D. (1996). The geochemistry and tectonic setting of late Cretaceous Caribbean and Colombian volcanism *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 9, Issues 1–2, January–March 1996, Pages 111-120
- [27] Kerr, A. C., Marriner, G.F., 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: 677-702.
- [28] Kerr, A. C., Tarney, J. Marriner, G.F., Nivia, A., Saunders, A.D. (1997b). The Caribbean-Colombian Cretaceous Igneous Province: The internal anatomy of an oceanic plateau. Large igneous provinces: continental, oceanic and planetary flood volcanism. J. Mahoney and M. Coffin, American Geophysical Union. *Geophysical Monograph* 100: 123-144.
- [29] Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre Le Bas, M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Wolley, A.R., Zanettin, B. (1989). A classification of igneous rocks and glossary of terms: Blackwell, Oxford, 196 p.
- [30] Maya, M., González, H. (1995). Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico, Ingeominas* 35(2-3): 43-57.
- [31] McCourt, W. J., Aspden, J. A., Brook, M. (1984). New geological and geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by multiple accretion. *Journal of the Geological Society, London* 141: 831-845.
- [32] McCourt, W. J. y Feininger, T. (1984). "High pressure metamorphic rocks in the Central Cordillera of Colombia." *British Geological Survey Reprint Series* 84(1): 28-35.
- [33] Miller, D.M., Goldstein, S.L., Langmuir, C.H. (1994). Cerium/lead and lead isotope ratios in arc magmas and the enrichment of lead in the continentes. *Nature* 368, 514-520.
- [34] Moreno-Sánchez, M., Gómez-Cruz, A. d. J., Toro, L.M. (2008). Proveniencia del material clástico del Complejo Quebradagrande y su relación con los complejos estructurales adyacentes. *Boletín de Ciencias de la Tierra* 22: 27-38.
- [35] Moreno-Sánchez, M. y Pardo-Trujillo, A. (2003). Stratigraphical and sedimentological constrains on western Colombia: implications on the evolution of the Caribbean Plate. The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics. C. Bartolini, R. T. Buffler and J. F. Blickwede, *American Association of Petroleum Geologist, memoir* 79: 891-924.
- [36] Nelson, H. W. (1957). Contribution to the geology of the Central and Western Cordillera of Colombia in the section between Ibagué and Cali. *Leidse Geologische Mededlingen* 22: 1-76.
- [37] Nivia, A., Marriner, G. F.; Kerr, A. C. y Tarney, J. (2006). The Quebradagrande Complex: a Lower Cretaceous ensialic marginal basin in the Central Cordillera of the Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 21(4): 423-436.
- [38] Pearce, J.A., 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe, R.S. (Ed.), *Orogenic Andesites*. Wiley, Chichester, U.K., pp. 528–548.
- [39] Pearce, J.A. (1996). A user guide to basalt discrimination diagrams . In: Wyman, D. A. (eds) *Trace Elements Geochemistry of Volcanics Rocks. Applications for Massive Sulphide Exploration*. Geological Asociation of Canada, Short Course Notes 12, 79 - 113.
- [40] Pearce, J.A. y Norry, M.J. (1979). Contributionsto *Mineralogy and Petrology*, 69, 33-47.
- [41] Pearce, J.A., Peate, D.W., 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *nnu. Rev. Earth Planet. Sci.* 23, 251–285.
- [42] Pindell, J. L. (1993). Regional synopsis of Gulf of Mexico and Caribbean evolution. 13th annual research conference proceedings, Mesozoic and Early Cenozoic development of the Gulf of Mexico and Caribbean Region. Houston, Society of Economic Paleontologist and Mineralogist Foundation.

- [43] Pindell, J. L., Maresch, W. V., Martens, U. y Stanek, Klaus. (2011). The Greater Antillean Arc: Early Cretaceous origin and proposed relationship to Central American subduction mélanges: implications for models of Caribbean evolution. *International Geology Review*, DOI: 10.1080/00206814.2010.510008.
- [44] Plank, T. (2005). Constraints from Thorium/Lanthanum on Sediment Recycling at Subduction Zones and the Evolution of the Continents. *Journal Petrology*, volumen 26, 5, 921-944.
- [45] Plank, T. & Langmuir, C. H. (1998). The chemical composition of subducting sediment: implications for the crust and mantle. *Chemical Geology* 145, 325–394.
- [46] Restrepo, J. J. (1991). Datación de algunos plutones de Antioquia por el método de trazas de fisión. *Boletín de Ciencias de la Tierra* 10: 95-108.
- [47] Restrepo, J. J., Ordóñez-Carmona, O., Moreno-Sánchez, M. (2009). A comment on “The Quebradagrande Complex: A Lower Cretaceous ensialic marginal basin in the Central Cordillera of the Colombian Andes by Nivia et al.” *Journal of South America Earth Sciences* 28: 204-205.
- [48] Restrepo, J. J., Toussaint, J. F., González, H., 1981. Edades Mio-Pliocenas del magmatismo asociado a la Formación Combia. *Departamentos de Antioquia y Caldas. Colombia: Geología Norandina*, Vol. 3, pp. 21-26.
- [49] Restrepo, J. J., Toussaint, J.F., González, H., Cordani, U., Kawachita, K., Linares, E., Parica, C. (1991). Precisiones geocronológicas sobre el Occidente Colombiano. *Simpósio sobre Magmatismo Andino y su marco tectónico*, Manizales, Universidad de Caldas.
- [50] Rodríguez, J.V., Vinasco, C., Marín, E. (2009). Emplazamiento de la Diorita de Pueblito e implicaciones tectónicas, NW Cordillera Central. *XII Congreso Colombiano de Geología*. Paipa, Boyacá.
- [51] Satudigel, H., Plank, T., White, B., Schmicke, H.-U. (1996). Geochemical fluxes during seafloor alteration of the basaltic upper oceanic crust: DSP sites 417 and 418. In: Bebout, G. (Ed.), *Subduction: Top to Bottom*. American Geophysical Union, pp. 19-38.
- [52] Scott, G. R. (1978). Translation of accretionary slivers: Triassic results from the Central Cordillera of Colombia (abstract). *EOS* 59: 1058-1059
- [53] Shervais, J.W., 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth and Planetary Science Letters* 59, 101 - 118.
- [54] Stern, R.J., 2002. Subduction zones. *Rev. Geophys.* 40. doi:10.1029/2001RG000108.
- [55] Sun, S. S. y McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Magmatism in Ocean Basins*. London, Geological Society, Special Publications.
- [56] Taboada, A., Rivera, L.A., Fuenzalida, A., Cisternas, H., Philip, H., Bijwaard, J., Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics* 19: 787-813.
- [57] Toro-Toro, L. M., Hincapié, J.G., Ossa, M.C.A. (2010). Petrografía y geoquímica de los metagabros del río Olivares sector nnw de Manizales (Caldas) . *Boletín de Geología UIS* 32(2): 73-83.
- [58] Toussaint, J. F. y Restrepo, J. J. (1978b). Edad cretácea de una anfibolita granatífera de Pijao, Quindío. *Publ. Esp. Geol. Univ. Nacional*, N°17, p1-2. Medellín.
- [59] Toussaint, J. F. y Restrepo, J. J. (1989). Acreciones sucesivas en Colombia: Un nuevo modelo de evolución geológica. *V Congreso Colombiano de Geología*.
- [60] Vallejo, C., Winkler, W., Spikings, R. A., Luzieux, L., Heller, F. and Bussy, F. (2009). Mode and timing of terrane accretion in the forearc of the Andes in Ecuador, *Geological Society of America Memoirs*, 204.
- [61] 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.
- [62] Villagómez, D., Spikings, R., Seward, D., Magna, T., Winkler, W., Kammer, A. (2008). Thermotectonic history of the Northern Andes. *7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2008)*, Nice.
- [63] Villamil, T. (1999). Campanian-Miocene tectonostratigraphy, depocenter evolution and basin development of Colombia and western Venezuela. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 153(239-275).
- [64] Verna, S.P. (2006). Extension related origin of magmas from a garnet bearing source in the Los Tuxtlas volcanic field, México. *International Journal of Earth Sciences*, 95, 871-901.

[65] Vinasco, C. J., U. G. Cordani., González, H., Weber, M., Peláez, C. (2006). Geochronological, isotopic, and geochemical data from Permo-Triassic granitic gneisses and granitoids of the Colombian Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 21(4): 355-371.

[66] Weber, M.B.I., Tarnet, J., Kempton, P.D., Kent, R.W. (2002). Crustal make-up of the northern Andes: evidence

based on deep crustal xenolith suites, Mercaderes, SW Colombia. *Tectonophysics* 345, 49 - 82.

[67] Wood, D.A., Joron, J.L., Treuil, M. (1979). Re-Appraisal of the Use of Trace-Elements to Classify and Discriminate between Magma Series Erupted in Different Tectonic Settings: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 45, p. 169-188.

