

# SUBDIVISIÓN DE LAS METAMORFITAS BÁSICAS DE LOS ALREDEDORES DE MEDELLÍN – CORDILLERA CENTRAL DE COLOMBIA

por

Ana María Correa M.<sup>1</sup>, Uwe Martens<sup>2</sup>, Jorge Julián Restrepo A.<sup>3</sup>,  
Oswaldo Ordóñez-Carmona<sup>4</sup> & Marcio Martins Pimentel<sup>5</sup>

## Resumen

**Correa A.M., U. Martens, J. J. Restrepo, O. Ordóñez-Carmona & M. Martins.:** Subdivisión de las metamorfitas básicas de los alrededores de Medellín – Cordillera Central de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (112): 325-344. 2005. ISSN 0370-3908.

Las características encontradas en las metamorfitas básicas que afloran en los alrededores de la ciudad de Medellín permiten diferenciar al menos dos grupos principales: uno compuesto por grandes cuerpos de metabasaltos anfibolíticos sin texturas reliquia que corresponden a la mayor parte de la unidad *Anfibolitas de Medellín* y otro grupo formado por cuerpos menos extensos de plutones bandeados y metamorfizados, los cuales constituyen los *Metagabros de El Picacho*. Los metagabros se metamorfizaron hidrotermalmente en facies esquisto verde - anfibolita baja y corrientemente presentan estructuras miloníticas y están relacionados espacialmente con las Dunitas de Medellín, conformando, junto con éstas, el *Complejo Ofiolítico de Aburrá*.

**Palabras clave:** Anfibolitas, gabros bandeados, Medellín, El Picacho, Cordillera Central, Colombia.

- 1 Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. A.A. 1027 Medellín – Colombia, Instituto de Geociencias – Universidad de Brasilia – Brasil. CEP 70910-900. Correo electrónico: anamacor@unb.br
- 2 Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. A.A. 1027 Medellín – Colombia, Centro Universitario del Norte, Universidad de San Carlos de Guatemala. Correo electrónico: uwe.martens@geoguate.net
- 3 Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. A.A. 1027 Medellín – Colombia. Correo electrónico: jrestrep@epm.net.co
- 4 Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. A.A. 1027 Medellín – Colombia. Correo electrónico: oordonez@unalmed.edu.co
- 5 Instituto de Geociencias – Universidad de Brasilia – Brasil. CEP 70910-900.

### Abstract

Based on the features discovered in metamorph rocks from Medellín, two different rock units may be identified. One of them, *Medellin Amphibolites*, is an extensive amphibolitic body that shows no relics of its metavolcanic protolith and is frequently associated with metasediments. We redefine this unit as not enclosing banded metagabbros, which should be regarded as a separate lithostratigraphic unit that we designate *El Picacho Metagabbros*. El Picacho Metagabbros show greenschist- to lower-amphibolite-facies parageneses, conspicuous mylonitic structure, no relation to metasediments, and spatial association to the Medellín Dunite. We propose that these gabbros and peridotites constitute the *Aburrá Ophiolitic Complex*.

**Key words:** Amphibolites, banded gabbros, Medellín, El Picacho, Central Cordillera, Colombia.

### Geología regional

El basamento metamórfico del eje de la cordillera Central en los alrededores de Medellín está compuesto por metabasitas y gneises de alto grado, asociados con esquistos de bajo grado (Botero, 1963; Echeverría, 1973; Restrepo & Toussaint, 1984). Botero (1963) agrupó estas rocas dentro del Grupo Ayurá – Montebello, que fue subdividido por Echeverría (1973) en la Zona Ayurá para el conjunto de alto grado, y la Zona Montebello para el de grado bajo. Restrepo & Toussaint (1982; véase también Restrepo *et al.*, 1991), al identificar varios metamorfismos superpuestos en las metamorfitas de la cordillera, eventos Devónico-Carbonífero, Pérmico-Triásico, y Cretácico, proponen renombrar la unidad como Complejo Polimetamórfico de la Cordillera Central. En efecto, trabajos geocronológicos recientes con el sistema U-Pb Shrimp, apoyan la idea del carácter polimetamórfico de la unidad (Ordóñez, 2001; Vinasco *et al.*, 2003).

El complejo incluye cuerpos mayores de anfibolitas (Figura 1) que se agrupan bajo el nombre de Anfibolitas de Medellín (Restrepo & Toussaint, 1984) por su ubicación cercana a dicha ciudad. Dataciones de tales rocas, como las obtenidas por Restrepo *et al.* (1991), sirvieron de fundamento para proponer un evento metamórfico cretácico; se sugirió que las metabasitas serían correlacionables con las rocas del Complejo Arquía, correspondiendo a la parte básica de una ofiolita que se habría metamorfoseado en una zona de subducción cretácica (Toussaint, 1996). McCourt *et al.* (1984) estudiaron rocas del Complejo Arquía más al sur, y no concuerdan con una edad cretácica para el metamorfismo, sino que la consideran paleozoica o anterior. Dataciones recientes Ar-Ar de las Anfibolitas de Medellín (Martens & Dunlap, 2003) indican que las edades cretácicas obtenidas se deben a perturbaciones térmicas producidas por la intrusión de grandes plutones mesozoicos como el Batolito Antioqueño; la edad de metamorfismo sería más antigua, posiblemente dentro del lapso Pérmico-Triásico.

Al norte y oriente del valle de Aburrá yace la Dunita de Medellín, una unidad ultramáfica elongada que contiene cuerpos menores de harzburgita (Figura 1), en contacto tectónico, generalmente subhorizontal, con las anfibolitas de Medellín (Restrepo & Toussaint, 1974; Álvarez, 1987). El emplazamiento de las rocas ultramáficas probablemente ocurrió entre el Triásico y el Cretácico (Restrepo & Toussaint, 1974 y 1978; Álvarez, 1987) aunque propuestas más recientes sugieren que el emplazamiento pudo darse antes o durante la orogenia Pérmico-Triásica (Restrepo, 2003). En la literatura hay referencias en las que se plantea que tanto las anfibolitas como las ultramafitas pertenecen a una ofiolita desmembrada (Álvarez, 1987; Toussaint, 1996), sin que al momento se hayan señalado otras litologías en los alrededores de Medellín que puedan formar parte de tal.

Otros cuerpos geológicos importantes en la parte septentrional de la cordillera Central son los intrusivos mesozoicos de composición básica a intermedia, dentro de los que se destaca el Batolito Antioqueño, del cual se han obtenido edades de enfriamiento del sistema K/Ar en biotita entre ~ 65 y 90 Ma. Al oriente de Medellín el batolito es intrusivo en anfibolitas y gneises de alto grado, y posiblemente también en los cuerpos ultramáficos (Restrepo & Toussaint, 1984; Álvarez, 1987), limitando al Cretácico Tardío la edad mínima del metamorfismo de las anfibolitas y del emplazamiento de las ultramafitas.

### Objetivo

Varios autores han advertido diferencias considerables en las anfibolitas que afloran en los alrededores de Medellín (valle de Aburrá) y han dejado duda sobre la conveniencia de agruparlas en una sola unidad litoestratigráfica (Restrepo, 1986; INGEOMINAS, 1996; Rendón, 1999). Las diferencias son especialmente notables entre las metabasitas que yacen en las vertientes oriental y occidental del valle.

Este trabajo tiene como objeto presentar una subdivisión de las metamorfitas básicas que afloran en los alrededores de Medellín en dos unidades principales, con base en las notables diferencias estructurales, petrográficas y geoquímicas que presentan, y proponer un origen particular para cada una. Se verá que en la zona hay grandes

cuerpos anfibolíticos que no tienen estructuras reliquia y que se interpretan como metabasaltos, y cuerpos menos extensos de metagabros bandeados, que constituyen una unidad más que puede ser integrada dentro de una posible ofiolita desmembrada en los alrededores del valle de Aburrá.

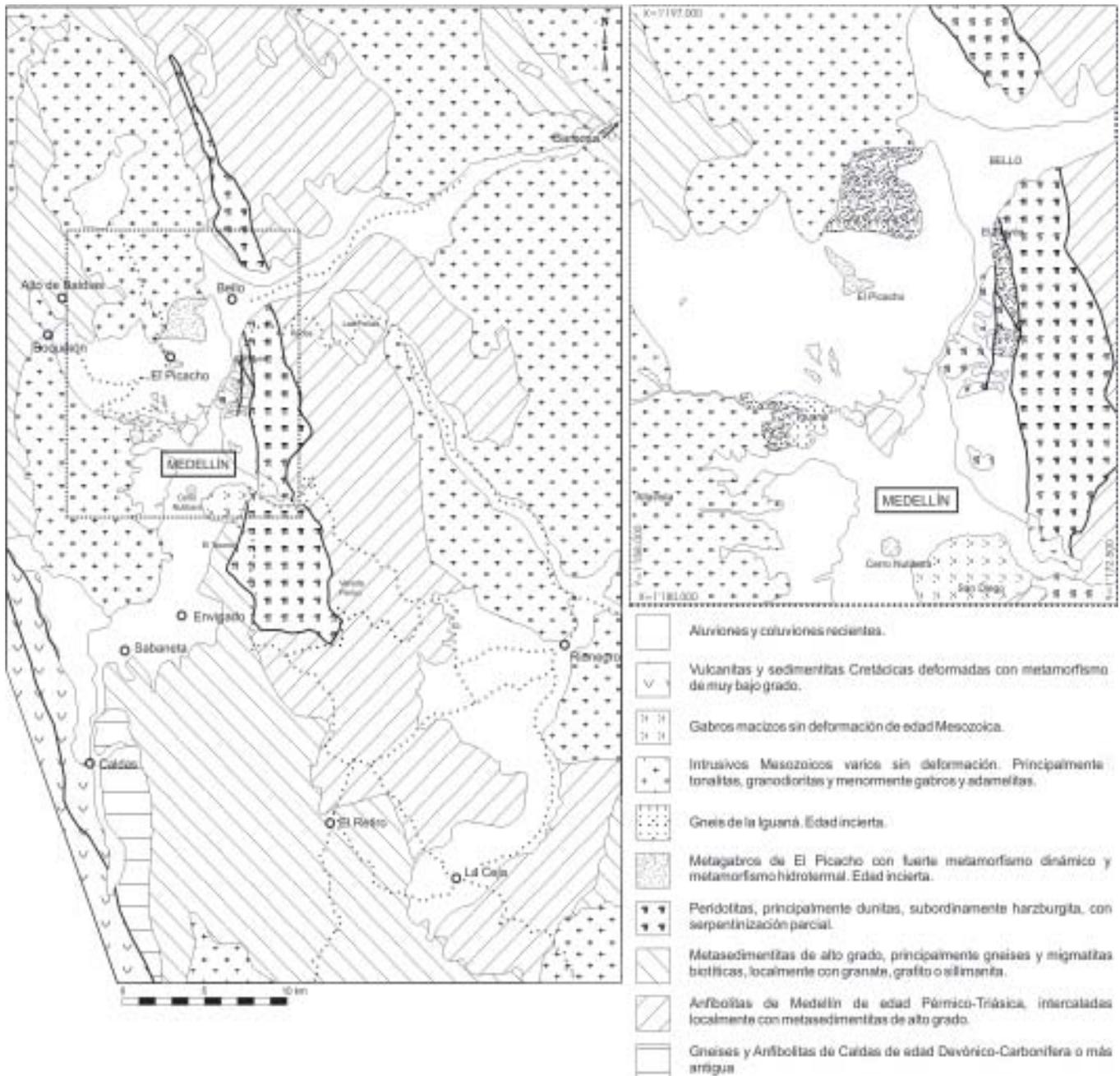


Figura 1. Mapa geológico de los alrededores de la ciudad de Medellín. Adaptado de Botero (1963), Ingeominas (1997), Rendón (1999), Estrada (2003)

Este trabajo se desarrolló principalmente como tesis de grado en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional, Sede Medellín.

### Metagabros de El Picacho

Los *Metagabros de El Picacho* se definen como una nueva unidad en la litoestratigrafía de los alrededores de Medellín. Estas rocas afloran en el cerro El Picacho y sus alrededores (sector noroccidental de Medellín; Figura 1), en el cerro Nutibara (centro de la ciudad), sector de El Tesoro (oriente), autopista Medellín Bogotá y barrio El Playón (nororiente). Se encuentra además gran cantidad de bloques de metagabros en los extensos depósitos de vertiente al occidente de Medellín; en menor cantidad existen bloques dispersos en la vereda Perico al oriente de la ciudad. A diferencia de las Anfibolitas de Medellín, los Metagabros de El Picacho afloran como cuerpos aislados, de menor tamaño y no están asociados con paragneises.

### Características mineralógicas y estructurales

La paragénesis mineral está representada por minerales primarios y secundarios, siendo estos últimos los más abundantes. Los minerales primarios son clinopiroxeno y plagioclasa. Los minerales secundarios son anfíboles, plagioclasa y en menor cantidad cuarzo, epidota, y ocasionalmente opacos (Tabla 1).

El clinopiroxeno es anhedral, en granos pequeños, de incoloro a verde claro. Los clinofanfíboles ocurren en cristales prismáticos medios con bordes irregulares, cuyo pleocroísmo varía de incoloro a verde muy claro, y en agregados aciculares a fibrosos finos (Figura 2a), con pleocroísmo de verde claro a verde azulado. Este mineral reemplaza a un máfico anterior, un piroxeno y quizá otro anfíbol primario. La plagioclasa está intensamente saururizada, lo que indica que la plagioclasa original tenía un componente cálcico importante. No fue posible determinar su composición por el método Michel Lévy. Los granos son anhedrales de bordes completamente irre-

**Tabla 1.** Composición mineralógica de los Metagabros de El Picacho y Anfibolitas de Medellín, Boquerón y El Retiro analizadas en lámina delgada.

Muestra	Unidad <sup>1</sup>	Hbl	Act/Trm	Pl	Qtz	Bt	Grt	CPx	Tnt	Opacos	Chl	Ep	Cc	Ap	Zrn
CMK004A	A.M.	50		40	5				3					Acc.	?
CMK 015	A.M. <sup>2</sup>	45		40						3	2	2		Acc.	Acc.
CMK 021	A.M. <sup>2</sup>	60		20	15					3				?	?
CMK 022A	A.M.	55		30	10				3	Acc.	<2	<2			Acc.
CMK 023	M.P.		45	45				?				10			
CMK 028A	M.P.		60	40					Acc.			<2			
CMK 028B	M.P.		50	48					Acc.			2			
CMK 030	A.M.	55		40	3				2	Acc.				Acc.	Acc.
CMK 033A	A.M.	35		35	5			20	Acc.	Acc.		<2			
CMK 033B	A.M.	40		50					5						Acc.
CMK 034A	A.M. <sup>2</sup>	65		25	5	3	<2		<2	2				Acc.	Acc.
CMK 034C	A.M. <sup>2</sup>	65		25	5				<2	3	<2	<2		Acc.	Acc.
CMK 038A	A.B.	50		35	10				3	2					
CMK 039	A.B.	50		35	10				4	Acc.					
CMK 040A	M.P.		55	40				1		Acc.		4			
CMK 042A	A.B.	55		35	13				1	Acc.					
CMK 042B	A.B.	60		35					2	2				Acc.	
CMK 044	M.P.?	50		40				1		8					
CMK045	A.R.	50		40				5	Acc.	5				Acc.	Acc.
CMK 046	A.M.	65		15	10		Acc.		Acc.	2	<2			Acc.	Acc.
CMK057	A.R.	45		35	10				2	5	3			Acc.	
CMK 113A	A.M. <sup>2</sup>	60	<2	30		3				3	<2	<2		Acc.	
CMK 119D	A.M. <sup>2</sup>	50		40		2			<2	3	<2	<2			
CMK 120A	A.M. <sup>2</sup>	40		20	10		15	5	2	5	<2	<2	<2	Acc.	Acc.
CMK 141	A.M.	50		40	5				2						
CMK 144	M.P.	45		50				5							

<sup>1</sup> A.M. Anfibolita de Medellín; M.P. Metagabro de El Picacho; A.B. Anfibolita de Boquerón; A.R. Anfibolita de El Retiro.

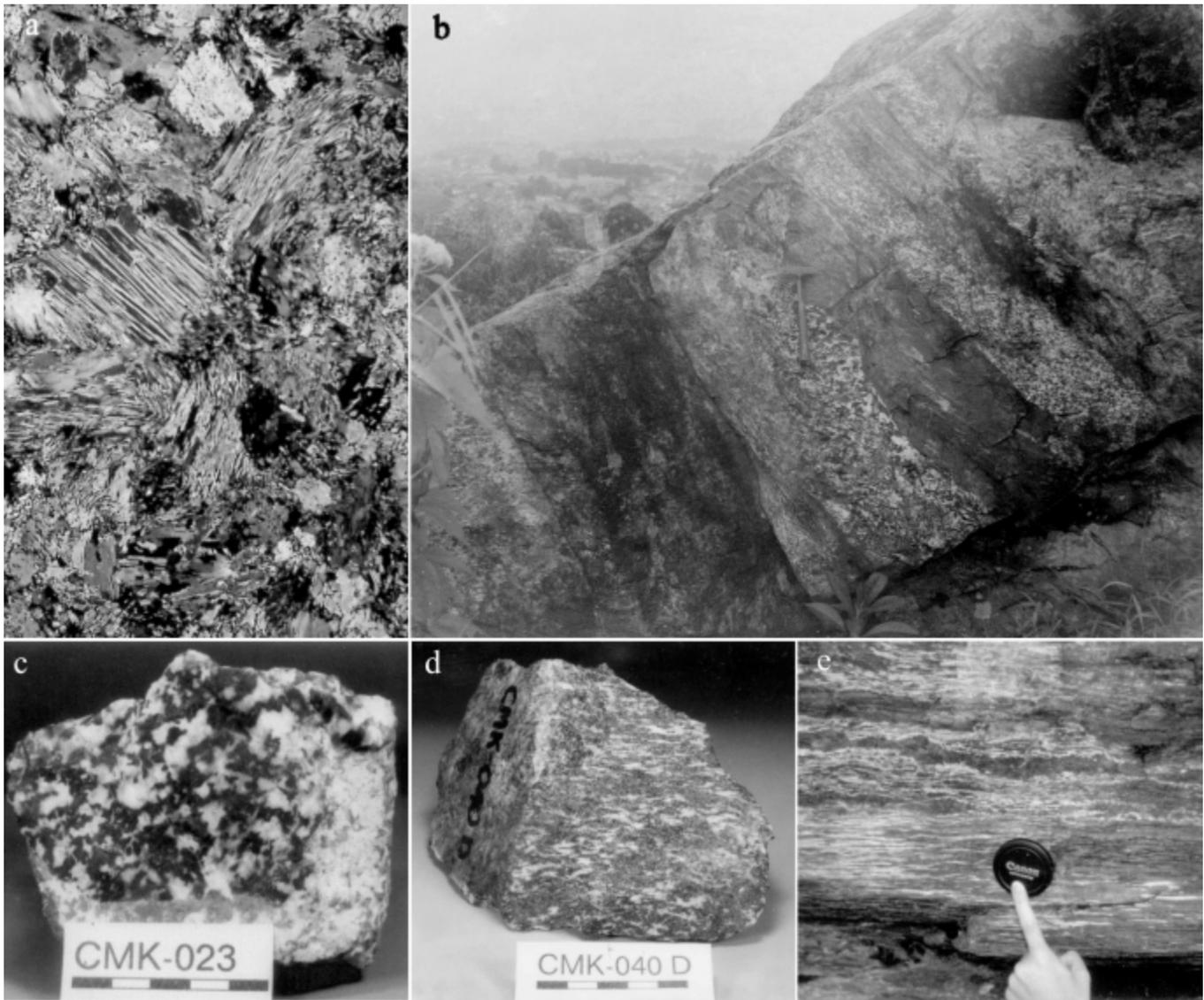
<sup>2</sup> Anfibolitas intercaladas con metasedimentitas de alto grado.

gulares, aunque se conservan pequeños residuos de los cristales primarios.

Las estructuras de los metagabros de El Picacho son de dos clases: reliquias y metamórficas. Las estructuras reliquias de un protolito ígneo corresponden a bandeamiento composicional y estructural. El bandeamiento composicional está definido por la presencia de capas centimétricas a decimétricas, unas ricas en minerales ferromagnesianos y otras ricas en félsicos. El bandeamiento estructural se carac-

teriza por la alternancia de bandas de grano grueso a muy grueso con bandas de grano fino (Figura 2b).

En los planos perpendiculares a la lineación, donde es posible ver las estructuras originales, las rocas son faneríticas de grano grueso y localmente muy grueso (Figura 2c). Los anfíboles y agregados de éstos alcanzan 1.5 cm de largo y 1 cm de ancho, tienen desarrollo cristalino moderado, con exfoliación notable, mientras que la plagioclasa es de menor tamaño y en escala mesoscópica es anhedral.



**Figura 2.** Fotografías de los Metagabros de El Picacho. (a) Fotomicrografía de la muestra CMK 040A, en los que se notan la textura de la roca y los anfíboles aciculares. (b) Bandeamiento composicional y estructural del afloramiento en el cerro El Picacho (martillo mide 32 x 17 cm). (c) Corte perpendicular a la lineación de la muestra CMK 023, en los que aún se descubre la textura ígnea de la roca (cuadros de la escala miden 1 cm). (d) Textura de la muestra CMK 040D en plano paralelo a la lineación. (e) Afloramiento en la vereda Perico, en el que se notan los fuertes efectos dinámicos de la roca (tapa de cámara fotográfica mide 58 mm).

Las estructuras metamórficas se deben a deformación dinámica y entre las más comunes se encuentran: lineación fuerte por alargamiento (“stretching lineation”), “flasers”, pequeñas cintas félsicas replegadas de manera discontinua, pequeñas zonas de cizalla, y bandas que se abren y se cierran (“pinch and swell”). Con menor frecuencia se encuentra una fábrica LS. Estos rasgos permiten clasificar las muestras de algunos sectores como milonitas (Figura 2d).

En los bloques de la vereda Perico el espesor de las bandas es menor al original debido a los efectos dinámicos y es común la presencia de boudines (Figura 2e).

Además de las características propias de una deformación dinámica, los metagabros exhiben evidencias de alteración hidrotermal, que provocó reemplazamiento de los máficos por anfíboles aciculares posiblemente del tipo actinolita. A partir de la paragénesis actinolita + plagioclasa + epidota, se deduce que el metamorfismo pudo ocurrir en las facies esquisto verde o anfibolita baja (Bucher & Frey, 2002). La alteración hidrotermal pudo ocurrir en las etapas finales de la deformación como resultado de la circulación de fluidos en las zonas de cizallamiento o pudo ser también un evento térmico posterior al metamorfismo dinámico, ya que las relaciones estructurales indican que los anfíboles aciculares no presentan rasgos de deformación.

#### Protolito y nomenclatura de la unidad

El protolito de los metagabros de El Picacho correspondió a rocas ígneas plutónicas de composición básica, faneríticas, de grano grueso y equigranulares. Fueron rocas ígneas bandeadas. Dada la transformación mineralógica que sufrieron es difícil determinar con precisión el protolito específico de éstas. Sin embargo, debido a las características minerales y estructurales heredadas, es posible inferir que correspondieron a gabros y/o noritas.

La unidad Metagabros de El Picacho que aquí se propone, no se había señalado en la estratigrafía de la zona, porque las rocas que la conforman eran consideradas como parte de las Anfibolitas de Medellín en el sentido de Restrepo & Toussaint (1984). La propuesta del nombre tiene las siguientes justificaciones: “Metagabros” porque las rocas conservan bien las estructuras de una roca ígnea plutónica básica (recuerda a un gabro), a pesar de los cambios inducidos por el metamorfismo dinámico e hidrotermal; “de El Picacho”, por ser en el cerro El Picacho donde se hallan los mejores afloramientos con las características reliquias del protolito.

#### Anfibolitas de Medellín

Al oriente de la ciudad de Medellín aflora un cuerpo elongado en dirección N-S compuesto por metabasitas de alto grado asociadas localmente con paquetes de esquistos y paragneises cuarzo-feldespáticos con biotita. Como se explicó antes, Restrepo & Toussaint (1984) consideraron estas metabasitas como parte fundamental de las *Anfibolitas de Medellín*, denominación que en esta publicación se toma en un sentido más restringido, al considerar aquellas metabasitas no asociadas con paragneises que afloran principalmente al occidente y norte de la ciudad como parte de los Metagabros de El Picacho.

El cuerpo metamórfico en consideración se extiende hacia el sur hasta los municipios de El Retiro y La Ceja, donde adicionalmente se han señalado migmatitas y granulitas. Hacia el norte el cuerpo metamórfico llega hasta el municipio de Belmira. La extensión en planta de la unidad comprende aproximadamente 72 km a lo largo y un ancho promedio de 6 km (Figura 1). Hay abundantes afloramientos de buen tamaño donde las anfibolitas se presentan frescas. Vale destacar aquellos de las carreteras Medellín-Bogotá, Santa Elena y Variante Palmas-Aeropuerto.

#### Características mineralógicas y estructurales

La asociación mineralógica típica en esta unidad es hornblenda + plagioclasa + esfena +/- cuarzo +/- opacos (ilmenita, sulfuros) con apatitos y circones muy pequeños como accesorios (Tabla 1, Figura 3a). Hay algunas variaciones en la composición mineralógica por la presencia de paquetes donde adicionalmente aparece granate o diópsido, los cuales corrientemente se encuentran donde hay metasedimentitas intercaladas. Éstas están compuestas por esquistos o gneises cuarzo-feldespáticos con biotita, que localmente contienen granate, sillimanita, grafito o moscovita. Recientemente se reportó cummingtonita en las anfibolitas de la cuchilla Las Peñas (Estrada-Carmona, 2003).

La hornblenda es x = amarillo claro, y = verde oliva, z = verde azulado en el sector de Rodas, parte alta de Santa Elena y descenso a La Fe. El anfíbol de las muestras tomadas en Las Peñas, variante al aeropuerto, quebrada El Guamo y carretera a la Ceja es pardo, lo cual se debe a un mayor contenido de Ti en el mineral (Miyashiro, 1994). La composición de la plagioclasa, medida ópticamente por el método Michel-Lévy varía entre An<sub>42</sub> y An<sub>53</sub> (andesina-labradorita), composición que es típica de la facies de anfibolitas (Bucher & Frey, 2002). En general, las plagioclasas son más cálcicas donde los anfíboles tienen coloraciones más pardas.

Las asociaciones mineralógicas encontradas indican condiciones correspondientes a la facies de anfibolitas. La asociación plagioclasa ( $\sim\text{An}_{30-50}$ ) + hornblenda +/- granate +/- biotita es característica de la parte central de esta facies, con temperatura mínima cercana a 600°C (Bucher & Frey, 2002). Donde el anfíbol es pardo, hay diópsido o donde la textura denota reducción del cociente área/volumen de los granos, las condiciones posiblemente fueron de facies anfibolita alta. Una muestra de la cuchilla Las Peñas (Figura 3d) con la paragénesis hornblenda + plagioclasa + granate + cuarzo + clinopiroxeno indica temperatura superior a 650°C, correspondiente a la transición entre la facies de anfibolitas y de granulitas. Debe anotarse que la estimación es válida para un gradiente barroviano que se ha verificado en las rocas del lugar pues allí el granate tiene primordialmente composición de almandino (Estrada-Carmona, 2003). Si bien las condiciones de presión y temperatura pudieron favorecer el desarrollo de granates, éstos son escasos en las Anfibolitas de Medellín, posiblemente porque el cociente FeO/MgO es insuficientemente alto (Miyashiro, 1994).

Macroscópicamente la unidad se caracteriza por la presencia de pocas bandas cuarzo-feldespáticas de espesor milimétrico a centimétrico, y por lineación sintectónica de anfíboles (foliación nematoblástica, Figura 3c).

El estudio microestructural de las Anfibolitas de Medellín permitió determinar el carácter polifásico-polimetamórfico (?) de las rocas, ya que se presentan al menos tres fases tectónicas. Las anfibolitas granatíferas tienen inclusiones alineadas o a modo de S dentro de los granates (D1) que son oblicuas en relación con la lineación externa a este mineral (D2). Las muestras tomadas en Copacabana y Rodas presentan crenulaciones cilíndricas (D3; Figura 3b) sobreimpuestas a las microestructuras anteriores. Estos resultados concuerdan con el estudio microestructural efectuado por Tamayo (1984) en la carretera Medellín-Bogotá.

#### Contacto con otras unidades

El contacto entre las Anfibolitas y las Dunitas de Medellín está bien representado en un tramo de 1,5 km de longitud en la autopista Medellín – Bogotá, sector de Rodas. Allí hay afloramientos decamétricos en los que se presenta una compleja asociación de anfibolitas, dunitas, esquistos talcosos, esquistos cloríticos localmente microplegados (Figura 3e) y esquistos actinolíticos, resultado de una mezcla tectónica. Ha habido consenso entre autores al considerar que la dunita reposa sobre la anfibolita debido a un cabalgamiento y que en muchos

sitios el contacto es subhorizontal (Restrepo & Toussaint, 1974; Álvarez, 1987).

Ya Botero (1963) había notado que el Batolito Antioqueño es intrusivo en las Anfibolitas de Medellín, lo cual se constata muy bien en la cuchilla las Peñas, donde se observan xenolitos de rocas foliadas dentro de la roca granítica. Además la intrusión genera migmatitas de inyección con aspecto brechoso en las metasedimentitas y anfibolitas de Las Peñas.

Todos los contactos entre anfibolitas y metasedimentitas que se observaron son concordantes. Generalmente, se pasa de manera transicional del cuerpo principal de anfibolitas a intercalaciones de metasedimentitas y anfibolitas. Ejemplos de ello se tienen en la carretera Alto de Las Palmas-Variante al Aeropuerto y en la cuchilla Las Peñas.

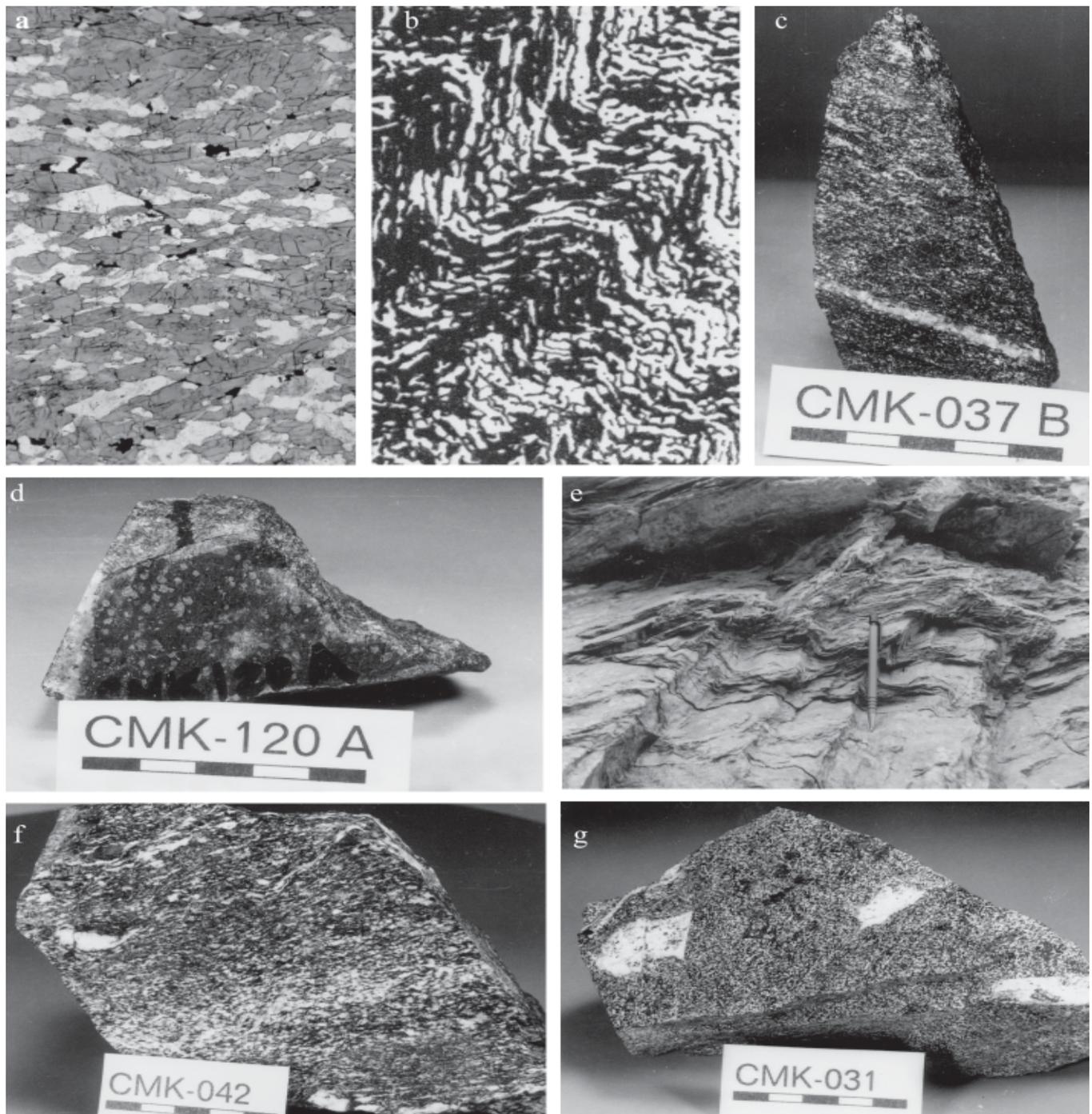
#### Anfibolitas de Boquerón

En la carretera que comunica a Medellín con el Occidente, a la altura del sitio conocido como El Boquerón, y en las quebradas Agua Fría y La Seca ubicadas cerca del lugar, afloran en pequeñas exposiciones, dada la cobertura de extensos depósitos de vertiente, un conjunto de anfibolitas con rasgos muy peculiares, que aquí se propone denominar *Anfibolitas de Boquerón*. Dentro del depósito de vertiente las anfibolitas se presentan en bloques métricos y en ciertas áreas aparecen mezcladas con los bloques de los Metagabros de El Picacho.

#### Características mineralógicas y estructurales

Los minerales que componen las Anfibolitas de Boquerón son hornblenda + plagioclasa + esfena +/- cuarzo + opacos (Tabla 1), asociación diagnóstica de la facies de anfibolitas a presión baja o media.

La hornblenda es media a gruesa, anhedral a subhedral, y algunas contienen cristales finos y redondeados de plagioclasa. La fórmula de pleocroísmo  $x = \text{crema}$ ,  $y = \text{verde amarillento}$ ,  $z = \text{verde azulado}$ , sugiere condiciones de la parte baja de la facies de anfibolitas. La plagioclasa se encuentra en agregados lenticulares o en bandas discontinuas que se abren y se cierran compuestas por granos finos, equidimensionales, con poligonización, aunque también se distinguen granos mayores muy sauritizedados con macla polisintética. La esfena es abundante y está íntimamente asociada con ilmenita. En cantidad moderada, se presenta la formación de minerales secundarios como anfíboles aciculares desordenados, epidota y clorita.



**Figura 3.** (a) Macrofotografía de una típica Anfibolita de Medellín tomada en el cuerpo principal al Este de Medellín (rectángulos de la escala miden 1 cm cada uno). (b) Dibujo de la crenulación de las Anfibolitas de Medellín en el sector de Rodas y Copacabana. (c) Anfibolita del cuerpo principal al Este de Medellín; se notan las bandas milimétricas de minerales félsicos. (d) Anfibolita granatífera del sector de Las Peñas; nótese la abundancia de granate y la menor intensidad en la foliación de la roca, en comparación con las otras muestras. (e) Esquistos de color verde muy plegados en la zona de contacto entre la Dunita y las Anfibolitas de Medellín.

A escala macroscópica se denota una intercalación de bandas milimétricas a centimétricas de grano medio donde la proporción de félsicos es más notable, y bandas de grano fino más máficas. De forma paralela al bandeamiento composicional hay esquistosidad y lineación por orientación de la hornblenda (Figura 3f).

Estas anfibolitas muestran rasgos de metamorfismo dinámico tales como bandas boudinadas, hornblendas oclares (“augen”) y agregados lenticulares de félsicos. A escala microscópica existen bandas de hornblenda que se abren y se cierran, que en parte bordean agregados lenticulares félsicos, y determinan una textura anastomosada. Los cristales gruesos de hornblenda están doblados y exhiben extinción ondulatoria, y las plagioclasas, aunque alteradas, denotan estar dobladas y acuñaadas. El cuarzo se presenta en agregados recristalizados dinámicamente en forma de cinta incipiente (“ribbon”).

Geoquímicamente, estas metabasitas guardan semejanza con las Anfibolitas de Medellín, especialmente en el contenido relativamente alto de Ti que se traduce en contenidos de esfena de hasta 4%. No obstante, las estructuras dinámicas recuerdan más a un cuerpo ígneo fanerítico deformado, rasgo semejante al encontrado en los Metagabros de El Picacho, cuya ubicación geográfica es cercana.

### Contactos con otras unidades

Hay diques que intruyen las Anfibolitas de Boquerón cerca a la quebrada Seca, donde la metabasita presenta efectos térmicos que se atribuyen a la intrusión del Batolito de Ovejas, apófisis del Batolito Antioqueño, o del Stock de Altavista. Lamentablemente los contactos con las otras unidades adyacentes, como los Metagabros de El Picacho y las metasedimentitas de alto grado que afloran en el alto de Baldías, no fueron observados debido al gran depósito de vertiente que cubre la región.

### Otros cuerpos de anfibolitas

Al norte de Boquerón, en el alto de Baldías, paquetes métricos a decamétricos de metasedimentitas, principalmente gneises cuarzo-feldespáticos con biotita, que localmente contienen granate o sillmanita, presentan al menos tres paquetes de anfibolitas intercaladas cuyo espesor puede llegar a 50 m. Se trata de anfibolitas con fuerte lineación, compuestas por hornblenda + plagioclasa +/- cuarzo +/- esfena. Algunas denotan efectos térmicos, ciertamente atribuibles a la intrusión del Batolito de Ovejas, con formación de albíta y epidota, y modificación de la fábrica a una más desordenada.

Hacia el sur, las Anfibolitas de Medellín se extienden hasta los municipios de El Retiro y La Ceja, en donde es común encontrar algo de granate o diópsido; su mineralogía detallada se describe en la tabla 1. Allí las metabasitas se encuentran como paquetes intercalados con esquistos micáceos a veces grafitosos, gneises y migmatitas. Estas últimas son relativamente abundantes en el lugar. Una zona de extensión limitada presenta granulitas básicas y granofelsas.

Estructuralmente, las anfibolitas en El Retiro y La Ceja pueden ser casi macizas hasta fuertemente lineadas (foliación nematoblástica, Figura 3g), y pueden mostrar reducción del cociente área/volumen de los granos. Se intentó determinar en un corte en la carretera Las Palmas, si existía límite tectónico entre las Anfibolitas de Medellín y aquellas de El Retiro. Al no encontrar evidencias de tal, se propone simplemente una variación lateral que incluye zonas con abundantes migmatitas en El Retiro, estas últimas también presentes en otros sitios, como Las Peñas o Alto de las Palmas, pero no en tan copiosa cantidad.

Otro cuerpo que se estudió en el marco de este trabajo se encuentra ubicado en el municipio de Barbosa e incluye anfibolitas y metasedimentitas, principalmente esquistos cuarzo-micáceos con grafito. El cuerpo es alargado en dirección NW y está bordeado completamente por el intrusivo Batolito Antioqueño. Las características encontradas en Barbosa permiten proponer una correlación con las Anfibolitas de Medellín y sus metasedimentitas asociadas.

Debe mencionarse que en los alrededores del municipio de Caldas, hay cuerpos de anfibolitas, algunas muy graníferas, y cuyas características mineralógicas y asociaciones son muy disímiles a las presentes en las Anfibolitas de Medellín y Metagabros de El Picacho. Las relaciones entre las metamorfitas en Caldas, que incluye gneises, anfibolitas graníferas, esquistos biotíticos con granate y estauroлита, esquistos cuarzomoscovíticos de bajo grado en facies esquisto verde y migmatitas de alto grado al E, aún no se comprenden plenamente, aunque recientemente **Montes** (2003) propone una transición gradual del grado metamórfico de W a E. Por sus notables diferencias y complejidad, las anfibolitas señaladas no se han tenido en cuenta para este trabajo.

### Geoquímica

Los análisis químicos que a continuación se discuten fueron realizados en el Instituto de Geociencias de la Universidad de Brasilia (Brasil), bajo el convenio

existente entre esa universidad y la Universidad Nacional de Colombia.

Se analizaron 19 muestras de roca total para elementos mayores y traza (los análisis representativos se presentan en las tablas 2 y 3). Las concentraciones de los elementos mayores en la forma de óxidos (excepto  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ) y de los elementos traza fueron determinadas por espectrometría de emisión con plasma (ICP-AES). La concentración de  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$  se determinó usando un espectrómetro de absorción atómica Perkin Elmer. La concentración de volátiles fue determinada a través de métodos gravimétricos y la concentración de Fe ferroso por volumetría.

Es importante considerar la posible movilidad de los elementos químicos de las metamafitas debido a procesos post-ígneos. Aunque no existen criterios definitivos para establecer el comportamiento de los elementos durante metamorfismo y meteorización (Grauch, 1989), diversos autores (e.g. Rollinson, 1993) citan elementos móviles e inmóviles ante diferentes procesos. Entre los inmóviles

están: las tierras raras pesadas, Y, Zr, Ti, Nb, P, Al, Co, Ni, V y Cr. Con el fin de observar si las rocas en cuestión presentan alteraciones químicas significativas de los elementos mayores, se construyeron algunos diagramas de Beswick & Soucie (1978) (Figura 4). En los diagramas 4a, 4b y 4c las muestras están alineadas y definen tendencias, lo que sugiere que las rocas no sufrieron alteraciones post-magmáticas importantes de los elementos involucrados. En el gráfico 4d la dispersión de los puntos indica movilidad, así por ejemplo, Ca y Na se movilizaron en relación con el K. La dispersión existente en varios diagramas de variación (Figura 7) también sustenta la interpretación anterior y sugiere movilidad de otros elementos mayores.

### Resultados analíticos

De acuerdo con los datos geoquímicos obtenidos y según lo muestran los diagramas Sílice vs. Alcalis Total (Figura 5a y 5b), los protolitos de las Anfibolitas de Medellín y El Retiro correspondieron a rocas de composición basáltica, con carácter subalcalino y de afinidad

**Tabla 2.** Análisis representativos de elementos mayores para muestras de los Metagabros de El Picacho, las Anfibolitas de Boquerón, Medellín y El Retiro.

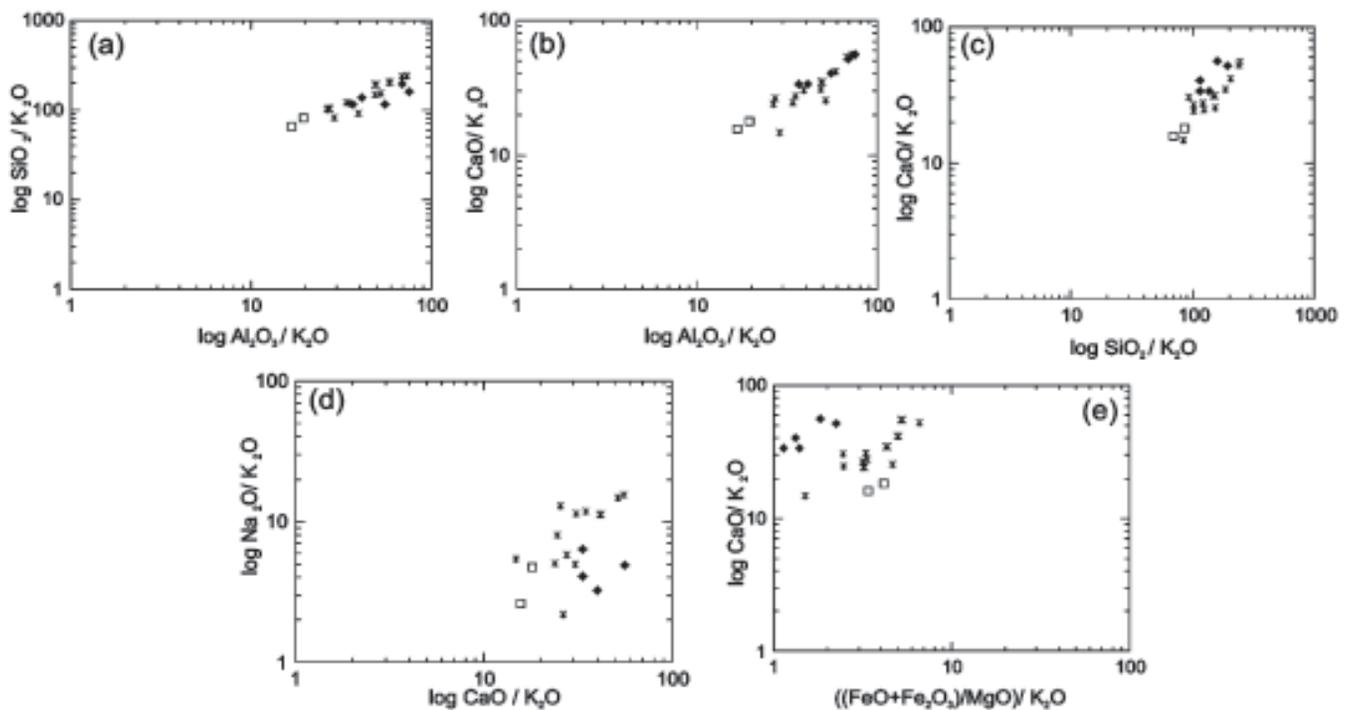
Grupo	Muestra	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PF	Total	# Mg
I	CMK-028A(AM-1)	49.65	0.46	14.85	0.77	5.16	0.10	11.87	12.02	2.30	0.36	0.05	1.77	99.36	64.60
	CMK-028B(AM-2)	44.72	0.29	21.07	1.55	2.87	0.06	8.65	15.61	1.37	0.28	0.05	2.63	99.15	64.60
	DM-2	46.76	0.26	16.51	1.65	5.19	0.09	12.77	12.34	1.87	0.24	0.03	1.35	99.06	63.26
	CMK-040	47.35	0.17	22.85	3.32	0.00	0.05	6.13	16.41	1.32	0.41	0.05	1.37	99.43	64.87
	CMK-101	47.47	0.60	15.04	6.30	0.00	0.11	13.57	13.81	1.66	0.41	0.06	0.52	99.55	68.29
II A	CMK-042A (AM-3)	52.77	1.19	13.89	1.17	7.83	0.15	7.47	9.79	3.33	0.28	0.12	1.03	99.02	43.07
	CMK-042B(AM-4)	48.99	1.45	16.63	1.09	8.84	0.14	6.64	8.14	4.15	0.32	0.16	1.89	98.44	37.83
	CMK-039(AM-6)	47.84	1.68	13.83	2.22	8.54	0.18	8.16	10.43	2.94	0.20	0.17	1.25	97.44	41.07
II B	CM-030A(AM-5)	48.61	1.71	15.61	1.53	7.80	0.17	8.87	9.94	3.66	0.32	0.09	0.81	99.12	46.52
	CMK-096B	48.20	1.77	16.34	8.91	0.00	0.18	10.41	8.45	3.09	0.57	0.14	0.39	98.45	53.88
	CMK-103	49.75	1.71	14.54	11.06	0.00	0.23	8.10	11.33	2.37	0.41	0.17	0.80	100.47	42.28
	CMK-105	51.10	1.70	13.90	9.16	0.00	0.15	8.93	10.11	3.30	0.41	0.12	0.88	99.76	49.36
	CMK-033A(AM-8)	44.98	0.97	18.86	1.09	7.64	0.16	7.45	14.62	2.37	0.48	0.12	2.06	100.80	43.74
	CMK-033B(AM-9)	48.61	1.40	14.78	1.85	7.43	0.14	8.80	11.01	3.11	0.20	0.14	1.72	99.19	46.54
	CMK-094	50.40	1.62	13.06	11.79	0.00	0.19	7.44	11.80	2.46	0.49	0.15	0.58	99.98	38.69
	CMK-074A	50.00	1.89	13.30	12.12	0.00	0.20	7.79	13.10	1.06	0.49	0.18	0.53	100.66	39.13
	CMK-044(AM-7)	49.67	1.33	14.19	1.68	8.62	0.18	8.57	9.96	2.67	0.24	0.15	0.97	98.23	43.22
III	CMK-045	48.85	2.43	11.22	2.1	11.94	0.23	6.65	10.26	2.68	0.57	0.22	0.19	98.69	30.22
	CMK-057	49.08	2.51	12.04	1.99	11.33	0.28	6.26	11.12	1.86	0.71	0.22	0.80	99.48	30.06

Óxidos expresados en porcentaje por peso (%). PF, pérdida por ignición.

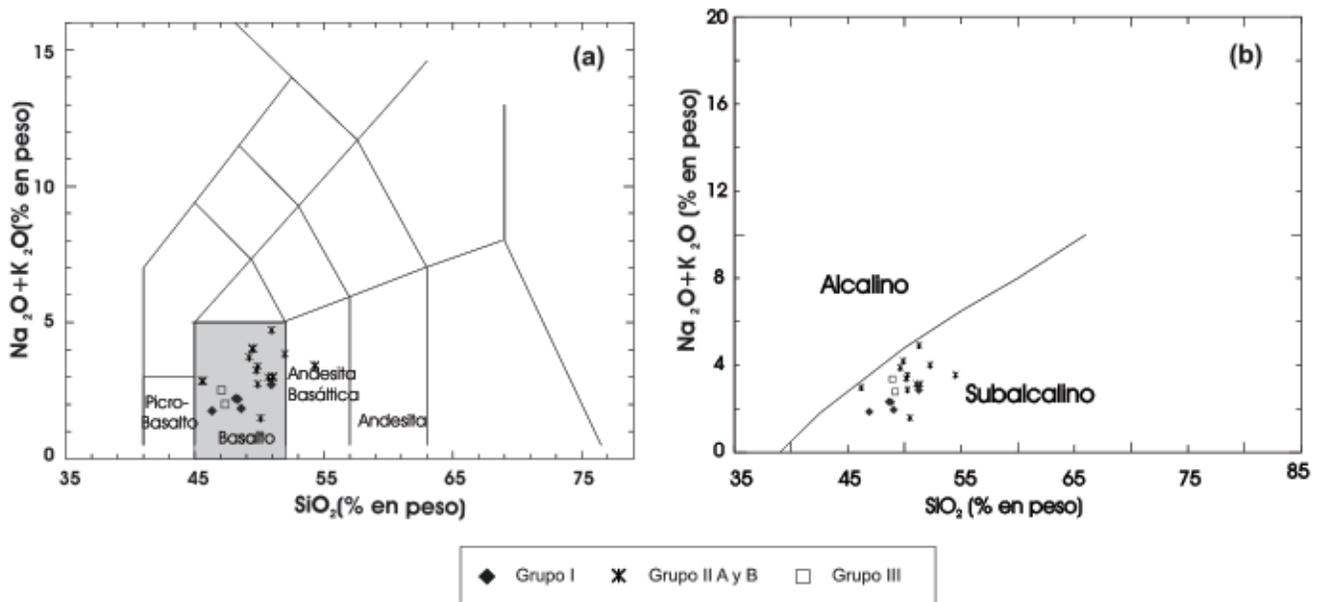
**Tabla 3.** Análisis representativos de elementos traza para muestras de los Metagabros de El Picacho, las Anfibolitas de Boquerón, Medellín y El Retiro.

Grupo	Muestra	V	Ba	Sr	Nb	Zr	Y	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Ho	Er	Yb
I	CMK-028A(AM-1)	148	39	101	6.0	67	10	2.60	6.60	5.80	2.40	0.57	3.20	2.30	0.72	1.70	1.20
	CMK-028B(AM-2)	72	23	168	7.0	135	6	3.60	7.00	4.60	2.30	0.53	2.00	1.50	0.50	1.20	0.83
	DM-2	97	775	110	6.0	7	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	CMK-040	n.d	25	337	n.d	98	3	8.59	12.99	5.87	8.13	0.56	3.96	1.83	1.07	1.85	0.42
	CMK-101	n.d	21	81	n.d	164	13	5.81	10.12	6.47	8.00	0.85	4.79	3.66	1.60	3.08	1.32
II A	CMK-042A (AM-3)	210	49	130	9.0	41	21	3.60	10.40	8.40	4.20	0.88	5.60	4.20	1.10	3.20	2.50
	CMK-042B(AM-4)	204	67	214	10.0	48	26	3.80	9.10	8.00	3.00	0.97	6.50	5.30	1.00	3.40	3.10
	CMK-039(AM-6)	252	85	121	11.0	43	34	4.70	10.20	10.30	3.80	1.20	6.00	6.00	1.10	3.70	3.50
II B	CM-030A(AM-5)	231	41	114	16.0	148	24	2.20	5.60	6.10	1.80	0.83	5.10	4.20	0.93	2.70	2.60
	CMK-096B	n.d	37	108	n.d	45	33	6.17	14.25	11.49	9.66	1.39	6.51	6.41	2.08	4.52	3.01
	CMK-103	n.d	52	198	n.d	83	47	9.34	21.25	16.12	9.28	1.62	7.09	7.26	1.88	4.85	3.24
	CMK-105	n.d	26	141	n.d	106	32	4.93	11.77	11.15	7.10	1.17	4.65	5.52	1.44	3.84	2.58
	CMK-033A(AM-8)	198	58	164	8.0	98	21	3.30	5.20	4.90	2.00	0.95	4.60	4.00	0.68	2.30	2.20
	CMK-033B(AM-9)	203	36	121	9.0	69	24	3.10	6.80	7.70	2.70	1.00	5.50	4.70	0.87	2.90	2.70
	CMK-094	n.d	55	118	n.d	66	41	4.80	13.63	11.91	6.24	1.38	4.78	6.71	1.60	4.22	3.16
	CMK-074A	n.d	62	144	n.d	111	46	8.75	21.56	17.22	9.30	1.70	7.90	8.70	2.44	5.58	3.95
	CMK-044(AM-7)	196	88	185	12.0	71	22	5.20	12.40	9.60	2.80	1.10	6.10	4.50	0.84	2.80	2.70
III	CMK-045	n.d	111	269	n.d	129	49	15.37	35.00	23.66	15.09	2.49	10.57	10.14	2.6	6.16	4.27
	CMK-057	n.d	154	243	n.d	137	50	14.26	36.36	23.6	9.92	2.01	7.18	8.02	1.91	4.81	3.27

Elementos expresados en p.p.m. n.d.= no determinado.



**Figura 4.** Diagramas de **Beswick & Soucie (1978)** para las metamorfitas básicas de los alrededores de Medellín. Símbolos: rombo lleno = metagabros de El Picacho, asterisco = anfibolitas de Medellín y Boquerón, cuadrado vacío = anfibolitas de El Retiro.



**Figura 5.** Diagrama sílice vs. álcalis total. (a) Diagrama según *Le Bas et al.* (1986) para clasificación de rocas volcánicas. (b) Campos alcalino y subalcalino de acuerdo con *Irvine & Baragar* (1971). Símbolos como en la figura 4

toleítica (Figura 6). Los protolitos de los metagabros de El Picacho fueron rocas gabroides (campo de basaltos en la figura 5a) de carácter subalcalino (Figura 5b).

Desde el punto de vista de los elementos mayores y traza es posible diferenciar tres grupos geoquímicos (ver

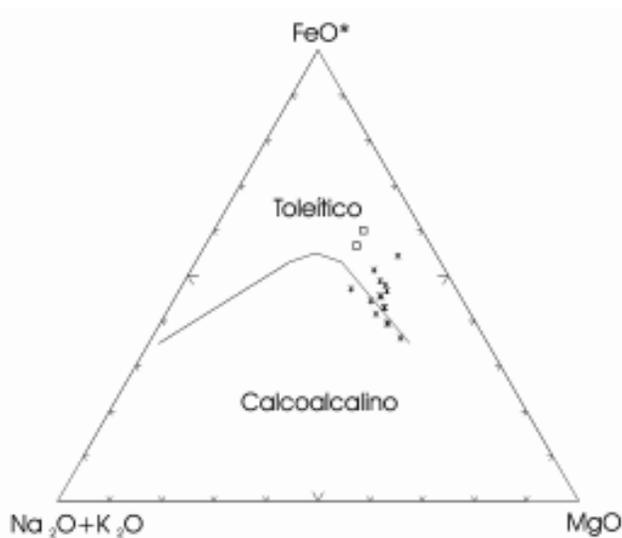
diagramas de variación de #Mg vs. otros elementos, en la figura 7): el Grupo I representa las características geoquímicas de la unidad Metagabros de El Picacho, el Grupo II incluye las muestras de las unidades Anfibolitas de Boquerón y de Medellín, y el Grupo III reúne las anfibolitas de El Retiro.

El Grupo I muestra una amplia variación de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con valores desde 14.85 a 22.85, valores bajos de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3.32 - 7.42), de MnO (0.5-0.11) y de TiO<sub>2</sub> (0.17-0.46). Estos valores de TiO<sub>2</sub> indican bajos contenidos de Ti en los piroxenos o anfíboles primarios y reflejan la ausencia o escasa presencia de ilmenita primaria.

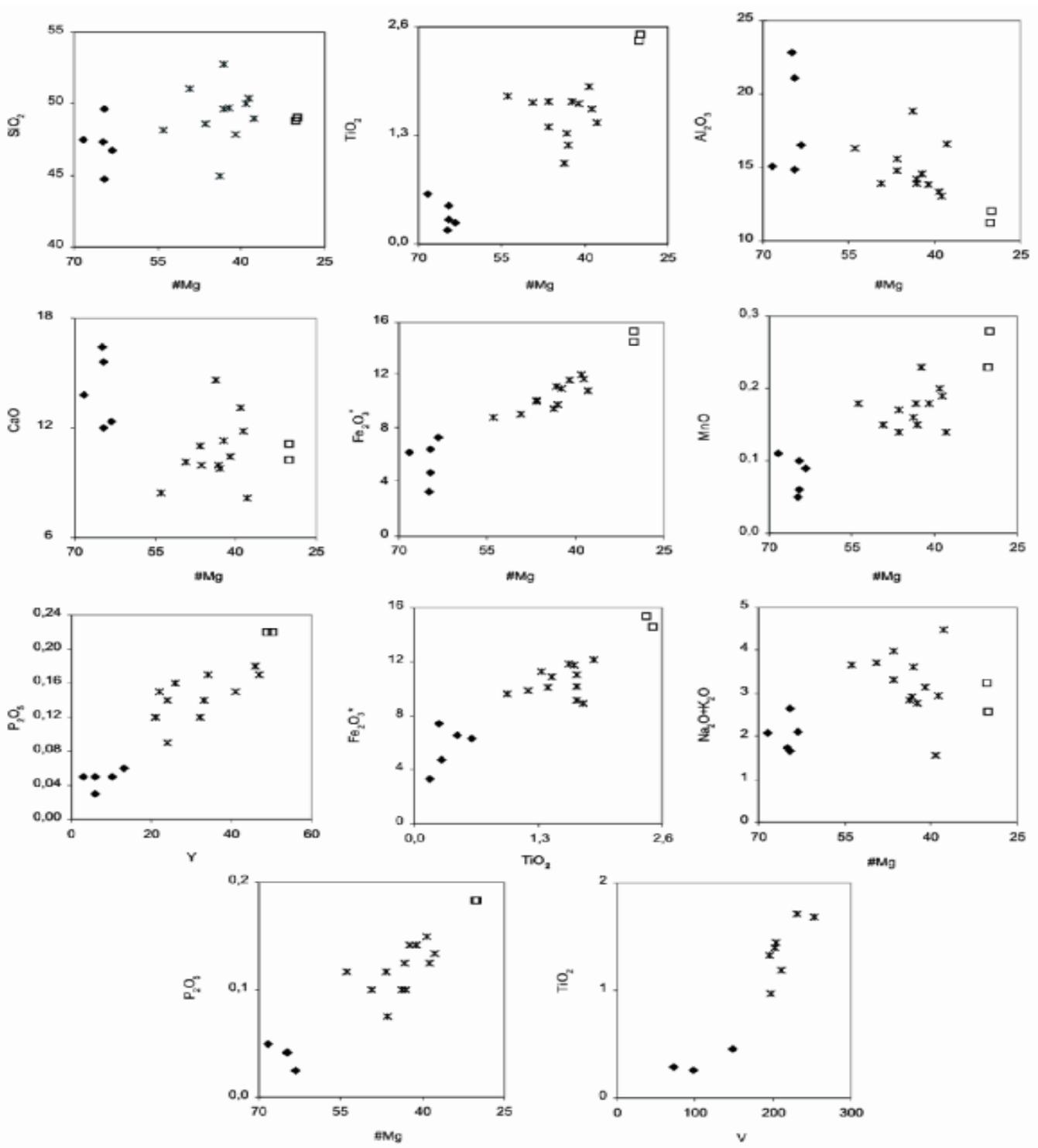
Estas rocas presentan #Mg variables entre 63 y 69, mayores con respecto al Grupo II. El número de magnesio #Mg se calculó así:  $[100 \times \text{MgO}/(\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3^*)]$ , siendo Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* el hierro total.

Los patrones de tierras raras (Figura 8a) y multielementales (Figura 9a) son irregulares, y no muestran tendencias que sean típicas de algún ambiente tectónico.

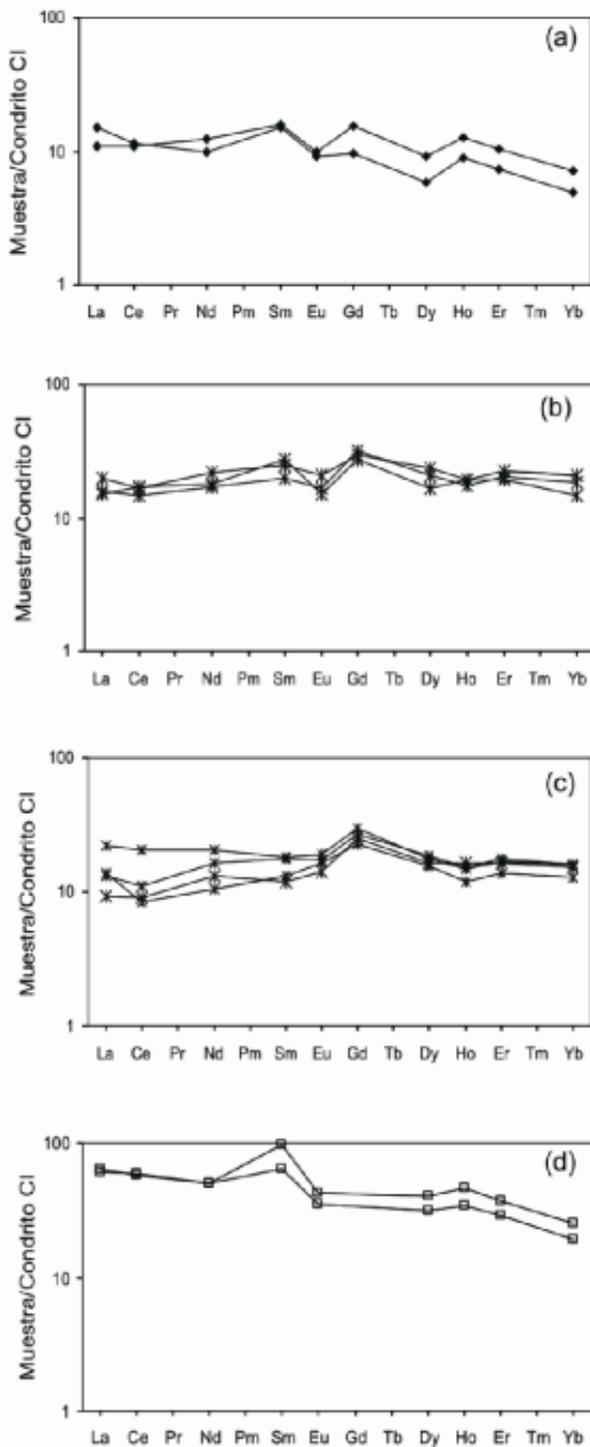
El Grupo II, con relación al Grupo I, muestra poca variación de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> desde 13.30 a 16.34, de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* (>de 8%) y de MnO (0.14-0.23). Este grupo tiene un contenido más alto de TiO<sub>2</sub>, reflejo de la cantidad apreciable de esfena e ilmenita registradas en la petrografía. Los valores de #Mg son menores a los del Grupo I. La relación inversa entre el



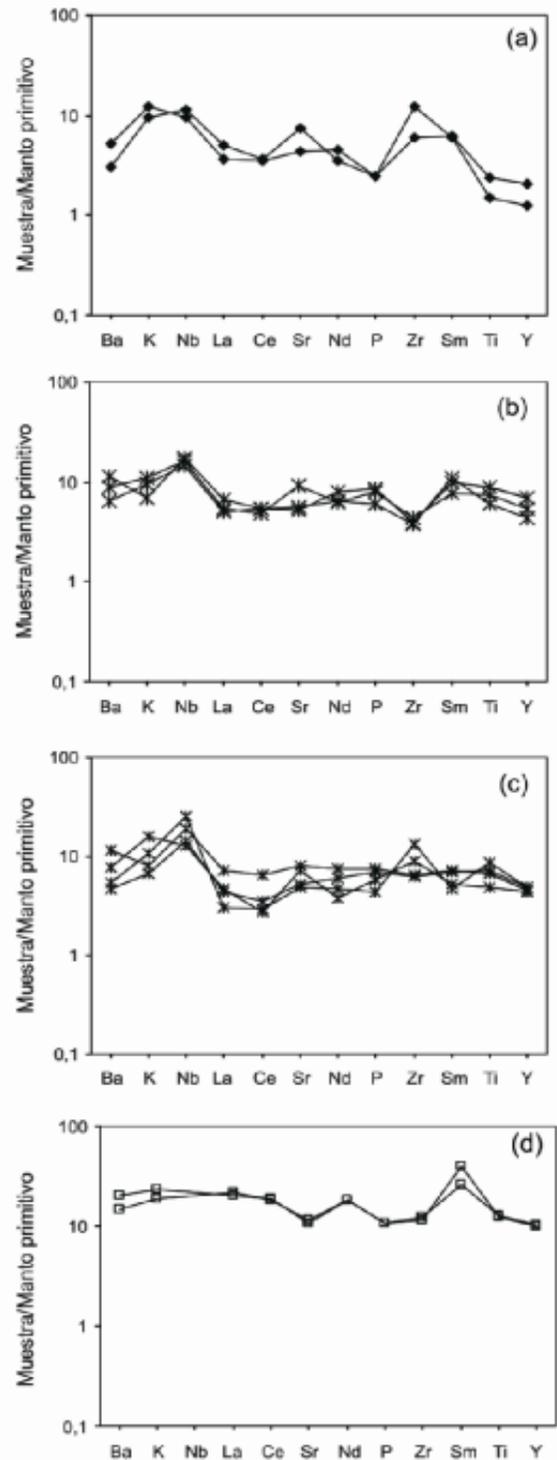
**Figura 6.** Diagrama AFM de *Irvine & Baragar* (1971) donde se observa la tendencia de cristalización toleíticas de las anfibolitas de Medellín, Boquerón y El Retiro. Símbolos como en la figura 4



**Figura 7.** Diagramas de variación de #Mg con respecto a elementos mayores y diagramas entre algunos elementos traza. Símbolos como en la figura 4.



**Figura 8.** Patrones de elementos de las tierras raras de las unidades de metabasitas. (a)-Metagabros de El Picacho, (b)-Anfibolitas de Boquerón, (c)-Anfibolitas de Medellín, (d)-Anfibolitas de El Retiro. Valores normalizados contra el Condrito CI (Sun & McDonough, 1989).



**Figura 9.** Diagramas multielementales de las unidades de metabasitas. (a)-Metagabros de El Picacho, (b)-Anfibolitas de Boquerón, (c)-Anfibolitas de Medellín, (d)-Anfibolitas de El Retiro. Valores normalizados con respecto al Manto primitivo (Wood *et al.*, 1979).

MgO y el  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$ ,  $\text{SiO}_2$  y MgO, y proporcional entre  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  sugiere que los magmas protolitos de estas rocas siguieron tendencias de cristalización toleítica, conclusión también obtenida a partir del diagrama AFM (Figura 6).

Las tendencias encontradas en los diagramas #Mg vs.  $\text{P}_2\text{O}_5$  y Y vs.  $\text{P}_2\text{O}_5$  (Figura 7) sugieren cristalización de apatito. Los diagramas de  $\text{TiO}_2$  contra  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y V contra  $\text{TiO}_2$  indican la existencia de minerales tales como ilmenita.

Al considerar los elementos traza no existen muchas diferencias entre las muestras de anfibolitas, sin embargo dividimos el Grupo II en A (Anfibolitas de Boquerón) y B (Anfibolitas de Medellín). En el Grupo II A los patrones de distribución de REE (Figura 8b) son relativamente paralelos y planos, mientras que el Grupo II B exhibe un patrón de tierras raras con tendencia levemente positiva (Figura 8c). Las anfibolitas de Boquerón muestran una leve anomalía negativa de Eu que se puede explicar por fraccionamiento de plagioclasa. Dicha anomalía no es clara en las Anfibolitas de Medellín. Los patrones multielementales (Figuras 9b y c) también son paralelos en ambos subgrupos, siendo la diferencia más notable la anomalía negativa de Zr en las muestras del II A y positiva en dos del IIB.

Los patrones de tierras raras y aquellos de los diagramas multielementales, para el Grupo II, están comprendidos entre los patrones citados para toleítas de arco de isla y MORB, para el campo propuesto entre N-MORB y E-MORB por **Wilson** (1989).

El Grupo III presenta valores menores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y mayores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  y de MnO que los otros dos grupos. También es el grupo con más alto contenido de  $\text{TiO}_2$ . Los valores bajos de MgO y de #Mg (~30) sugieren que el protolito de estas rocas se generaron de magmas parentales diferenciados o más evolucionados que las fuentes de los otros dos grupos.

Los patrones de tierras raras son paralelos con pendiente negativa (Figura 8d) indicando enriquecimiento de las tierras raras livianas en relación con las pesadas, siendo ésta una característica que diferencia este grupo de los otros dos. Este patrón guarda semejanza con el presentado por basaltos de cuencas tras-arco, basaltos de arco de isla o por E-MORB. El patrón exhibido en los diagramas multielementales (Figura 9d) muestra enriquecimiento de casi todos los elementos en aproximadamente 30 veces con relación al manto primitivo, excepto el Sm que presenta una anomalía positiva alta.

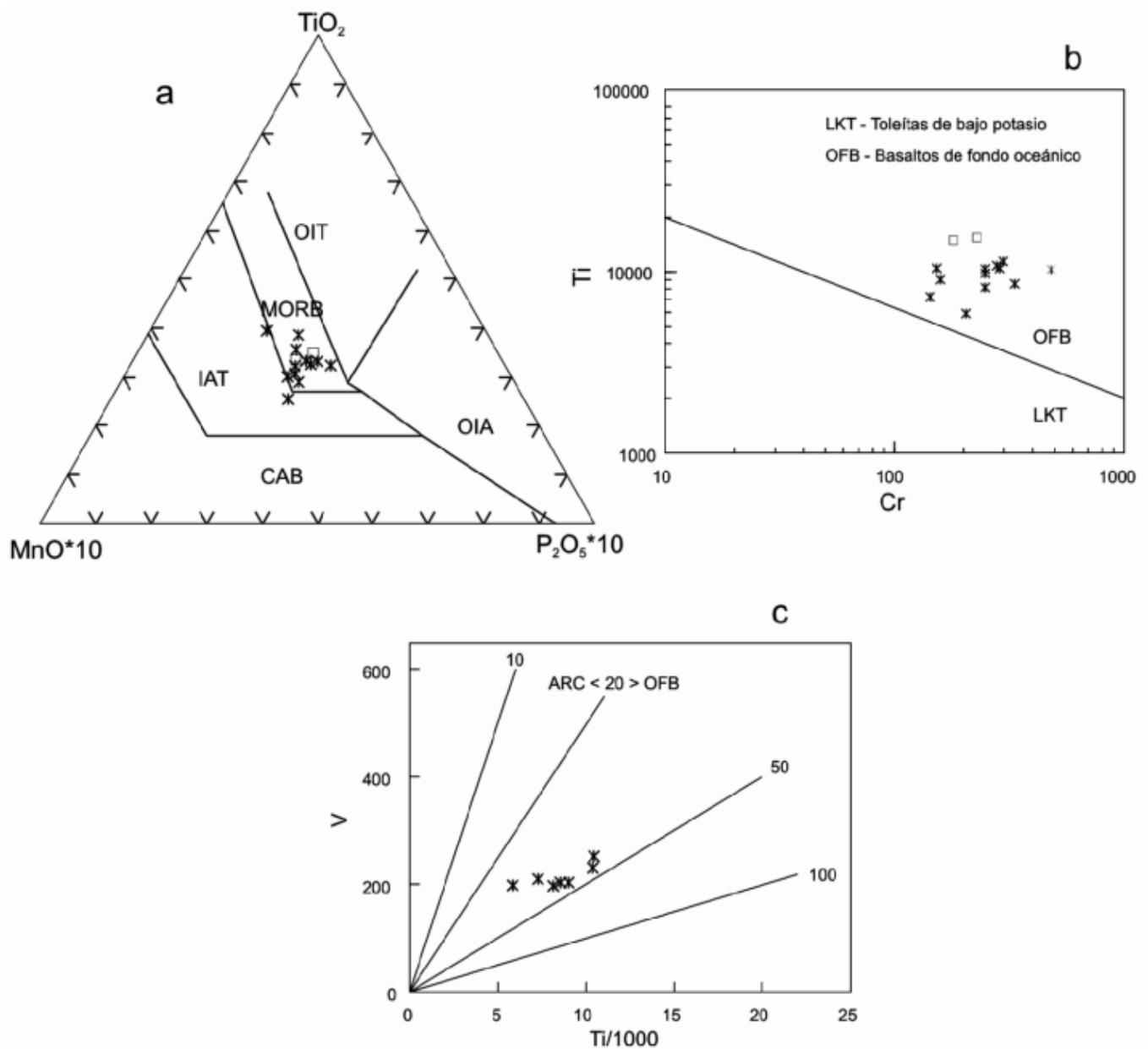
Con miras a tener más información sobre el ambiente tectónico de los protolitos de las anfibolitas, se elaboraron varios diagramas discriminantes (Figura 10), en los cuales las rocas estudiadas caen dentro del campo MORB.

Las muestras de metagabros no aparecen en los diagramas porque son rocas gruesogranulares resultado de diferenciación magmática que no representan magmas parentales; estos diagramas sólo se pueden usar para rocas que muestren la afinidad de los magmas originales.

## Geocronología

En el desarrollo de este trabajo se intentaron llevar a cabo dataciones Sm-Nd isócrona de granate y roca total en anfibolitas granatíferas y esquistos granatíferos de la carretera a Santa Elena (sector de El Guamo), la carretera Medellín-Bogotá (sector de Las Peñas) y del alto de Baldías. Lamentablemente los resultados no fueron satisfactorios; en algunos casos el granate no concentró suficientemente las tierras raras, y en otros, los resultados obtenidos no pudieron correlacionarse cronológicamente con las edades que se conocen para el basamento de la cordillera Central. Como no hay pruebas internas en este tipo de datación, que además se fundamenta en una isócrona de dos puntos, se decidió descartarlos de los resultados. También se intentó elaborar una isócrona de rocas totales con muestras de las unidades principales que se identificaron, pero los puntos no presentan suficiente dispersión en la isócrona para calcular una edad ígnea confiable.

No existen al momento dataciones de los Metagabros de El Picacho. Muestras recolectadas en El Boquerón fueron analizadas por **Martens & Dunlap** (en prep.), quienes intentaron una datación con el sistema Ar-Ar en hornblendas. El espectro resultó de difícil interpretación y dudosa validez, con edades que oscilan entre ca. 100-145 Ma. Será necesario esperar un trabajo geocronológico serio y extenso para determinar confiablemente la edad de los Metagabros de El Picacho y las Anfibolitas de Boquerón. Las Anfibolitas de Medellín, por el contrario, se han datado en varias oportunidades (**Restrepo et al.**, 1991 y referencias contenidas allí; **Martens & Dunlap**, 2003). Las abundantes edades cretácicas obtenidas se deben a perturbaciones térmicas originadas durante la intrusión del voluminoso Batolito Antioqueño; el metamorfismo orogénico se dio antes, probablemente durante el lapso Pérmico-Triásico. Este resultado es concordante con las edades K/Ar 251 +/- 21 Ma y Sm/Nd 226 +/- 17 Ma obtenidas en las granulitas y granofelsas asociadas de El Retiro (**Restrepo et al.**, 1991; **Ordóñez et al.**, 2001), y las dos fechas Ar-Ar de ca. 230 Ma obtenidas por **Vinasco et al.** (2001) en anfibolitas recolectadas en El Retiro durante la ejecución de este trabajo. Como se planteó anteriormente, es probable que las metamorfitas de alto grado de este lugar pertenezcan a una misma unidad junto con las rocas de alto grado de Medellín y por eso la correlación cronológica se considera válida.



**Figura 10.** Diagramas discriminantes de ambientes tectónicos para las anfibolitas de Medellín, Boquerón y El Retiro. a) **Mullen** (1983). Campos: MORB-basaltos de dorsal medio-oceánica, OIT-toleitas de islas oceánicas, OIA- basaltos alcalinos de islas oceánicas, CAB-basaltos calcoalcalinos de arcos de isla, IAT-toleitas de arco de isla. b) **Pearce** (1975). c) **Shervais** (1982). Campos: ARC-basaltos de arco, OFB-basaltos de fondo oceánico. Símbolos como en la figura 4.

## Discusión

Las notables diferencias geoquímicas, mineralógicas y estructurales descubiertas en las metabasitas de los alrededores de Medellín obligan a una subdivisión de éstas.

Los Metagabros de El Picacho muestran estructuras que revelan su protolito ígneo plutónico, como una unidad de gabros con estratificación ígnea. Este tipo de intrusiones bandeadas pueden presentarse en complejos estratificados (**Wager & Brown**, 1968) o como parte de la cámara magmática de ofiolitas (**Coleman**, 1977). Los va-

lores relativamente altos del #Mg indican que los magmas basálticos parentales eran poco evolucionados; sin embargo la información geoquímica es insuficiente para dar luz sobre el ambiente de formación y el tipo de manto del cual se derivaron. Como parte de un complejo ofiolítico, estas rocas se pudieron generar en varios ambientes como una dorsal medio-oceánica, una cuenca trasarco, una cuenca antearco, un arco de islas o un 'plateau' oceánico.

Los gabros fueron afectados por metamorfismo dinámico dúctil, que milonizó variablemente las rocas. Éstas sufrieron posteriormente, o al final de la deformación dinámica, otro metamorfismo de tipo hidrotermal, a temperaturas correspondientes a la facies anfibolita. La alteración hidrotermal generó una disposición desordenada de anfíboles secundarios, principalmente clinofanfíboles verdes, que en algunas muestras están sobreimpuestos a la fábrica milonítica. Se propone que el metamorfismo dinámico se produjo durante el proceso de emplazamiento del fragmento de corteza oceánica sobre una corteza continental y el hidrotermal por la acción de fluidos y el calor residual de tal corteza.

Las Anfibolitas de Medellín, por su parte, no presentan texturas relictas de su protolito. El tamaño del cuerpo, la presencia de grafito en algunos paquetes de anfibolitas y la asociación local con metasedimentitas sin rocas calcáreas, sugiere un origen ígneo volcánico. La intercalación milimétrica a centimétrica de anfibolitas y metasedimentitas indica sedimentación y vulcanismo contemporáneos.

La geoquímica indica que se trata de metabasitas con una tendencia de cristalización toleítica y que la fuente pudo corresponder a un magma intermedio entre aquellos que generan los basaltos N-MORB y E-MORB. Los ambientes más probables de formación para esta unidad son una cuenca tras-arco o una dorsal oceánica con aporte de sedimentos continentales. En una cuenca tras-arco los basaltos generados pueden tener características geoquímicas similares a las de un MORB (Wilson, 1989). En el caso de que haya sido este el ambiente de generación, se trató de una cuenca evolucionada muy alejada de la zona de subducción, pues no se aprecian los rasgos geoquímicos propios de ésta, como anomalías negativas de Nb y enriquecimiento en tierras raras livianas.

El conjunto de basaltos y sedimentitas se metamorfizó en facies anfibolita durante un metamorfismo orogénico; no hay evidencias de metamorfismo hidrotermal o dinámico que afecte de manera global a la unidad. Si bien estas anfibolitas tienen fábrica lineal, ésta es por la disposición de los anfíboles columnares que sintectónicamente

crecieron disponiéndose de manera casi paralela (foliación nematoblástica), y no por un cizallamiento posterior a la formación de la metamorfita. No se descubre el anastomosamiento y las estructuras típicas de las rocas fuertemente deformadas dúctilmente. La mineralogía indica condiciones de metamorfismo de más alto grado que en los Metagabros de El Picacho, incluso en la transición de la facies de anfibolitas a la de granulitas.

Otra unidad importante, pero de limitada extensión, son las Anfibolitas de Boquerón, compuestas por metabasitas de grano medio en facies de anfibolita, posiblemente baja, que contienen abundante esfena. Las rocas tienen bandeado composicional, foliación en la que predomina la esquistosidad sobre la lineación, evidencias de metamorfismo dinámico y minerales secundarios como anfíboles aciculares desordenados, epidota y esfena. Los rasgos estructurales sugieren correlación con los Metagabros de El Picacho, pero su geoquímica es semejante a la de las Anfibolitas de Medellín.

Por otro lado, las anfibolitas de El Retiro comparten características de campo, petrográficas y de condiciones metamórficas con las Anfibolitas de Medellín, pero presentan algunas diferencias geoquímicas con éstas. Así, el #Mg es más bajo y los patrones de tierras raras muestran leve enriquecimiento en elementos de las tierras raras livianas lo que sugiere que el protolito correspondió a magmas parentales diferenciados o más evolucionados que las fuentes de las Anfibolitas de Medellín. No obstante es necesario realizar estudios geoquímicos detallados para determinar si esas variaciones geoquímicas se pueden explicar a través de un proceso de diferenciación magmática o si indican magmas diferentes para las Anfibolitas de Medellín y El Retiro. Aún se desconoce si los protolitos de estas anfibolitas estuvieron relacionados espacial y temporalmente.

La asociación en los alrededores de Medellín de las metabasitas descritas junto con cuerpos ultramáficos, invita a considerar la existencia de un complejo ofiolítico. Las ultramafitas, principalmente dunitas, provendrían del manto litosférico; los metagabros se habrían derivado de los gabros bandeados de una cámara magmática en la parte intermedia de la ofiolita; y las anfibolitas sin rasgos relictos que están asociadas a metasedimentitas serían la parte superior de la ofiolita, donde basaltos, doleritas y sedimentos se habrían metamorfizado bajo condiciones de alto grado. Incluso el límite tectónico que separa las unidades no sería de extrañar, ya que en muchos ejemplos de ofiolitas en el mundo, éstas se presentan desmembradas como bloques dispersos limitados tectónicamente (anónimo, 1972).

No obstante, es necesario ser precavidos con esta interpretación, ya que las características encontradas en los Metagabros de El Picacho y las Anfibolitas de Medellín, sugieren una historia metamórfica disímil para cada unidad. Los Metagabros de El Picacho tienen texturas ígneas relictuales, evidencias de cizallamientos fuertes y alteración hidrotermal que genera texturas desordenadas. Ninguno de estos rasgos está presente en las Anfibolitas de Medellín, que en cambio, presentan fábrica sintectónica de un metamorfismo orogénico, asociaciones minerales que indican alto grado incluso alcanzando la transición a la facies de granulitas, y una cantidad notablemente superior de esfenas.

Preferimos, por esto, proponer dos conjuntos principales: uno ofiolítico, compuesto por las ultramafitas y los metagabros, para el que se propone el nombre *Complejo Ofiolítico de Aburrá*, y otro, compuesto por las Anfibolitas de Medellín (s.s.) y los gneises de alto grado asociados.

Los conjuntos propuestos pueden extenderse para incluir otras litologías de los alrededores de la ciudad. El Gneis de la Iguañá (**Restrepo & Toussaint**, 1982), ubicado en el sector del mismo nombre (Figura 1), se ha correlacionado con gneises paleozoicos de la cordillera Central. En nuestra opinión debería estudiarse con más detalle para establecer si, por el contrario, hace parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá. Este cuerpo corresponde a un granitoide milonitizado, de coloración clara, constituido principalmente por plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico en la mayoría de muestras, poca biotita, grandes cristales de epidota, y zircón como accesorio, con una fábrica lineada-milonítica. Si bien su composición parece ser relativamente ácida, las estructuras que tiene son muy semejantes a aquellas presentes en los Metagabros de El Picacho, los cuales están asociados espacialmente con el gneis.

Hacia el sur, las Anfibolitas de Medellín y las metasedimentitas de alto grado se extienden a las poblaciones de El Retiro y La Ceja, pero allí no se han registrado, al momento, cuerpos de extensión considerable de ultramafitas o de metagabros. No se conoce ningún sistema de fallas importante que separe las unidades de este lugar de las Anfibolitas de Medellín, y en nuestra opinión, al menos las anfibolitas de uno y otro lugar, deberían considerarse un solo cuerpo. También hay una prolongación de las anfibolitas hacia el norte que llega al menos hasta Belmira.

Parece razonable incluir por grado metamórfico otros cuerpos metasedimentarios de alto grado, en conjunto con las Anfibolitas de Medellín y sus extensiones. Destacan las rocas del alto de Baldías, los gneises y migmatitas al

sur de Envigado, y las migmatitas en El Retiro. Ya **Echeverría** (1973) había propuesto una subdivisión semejante al definir la Zona La Ayurá, si bien su interpretación tiene significativas diferencias con la nuestra.

La información geocronológica que se tiene hasta el presente es insuficiente para determinar si las Anfibolitas de Medellín y los Metagabros de El Picacho conforman un único complejo ofiolítico contemporáneo que fue desmembrado. Con la información existente son concebibles dos escenarios. En uno, un fragmento basal de corteza oceánica y otro de manto litosférico de edad incierta (Dunita de Medellín + Metagabros de El Picacho) se emplazan sobre un extenso cinturón metamórfico, que incluye anfibolitas, después de que éste fue generado en un metamorfismo orogénico Pérmico-Triásico y antes de la intrusión del Batolito Antioqueño en el Cretácico. En este caso el Complejo Ofiolítico de Aburrá estaría formado exclusivamente por las ultramafitas y los metagabros bandeados de los alrededores de Medellín. Una segunda propuesta, desarrollada recientemente por **Restrepo** (2003), plantea un metamorfismo Pérmico-Triásico conjunto entre Anfibolitas y Dunitas de Medellín, durante el que no sólo ultramafitas y metagabros, sino también las Anfibolitas de Medellín, se habrían emplazado sobre un basamento metamórfico más antiguo.

## Conclusión

En este estudio se descubrió que algunos cuerpos de metabasitas en los alrededores de Medellín corresponden a intrusiones ígneas bandeadas que fueron metamorfoseadas dinámicamente, luego hidrotermalizadas, y cuya geoquímica, mineralogía y estructuras particulares, hacen necesario separarlas en una nueva unidad litoestratigráfica cuyo nombre se propone sea Metagabros de El Picacho. Estas metabasitas deben considerarse aparte de la unidad Anfibolitas de Medellín, compuesta por metavulcanitas y metasedimentitas subordinadas, y que se formaron durante un metamorfismo orogénico de alto grado.

Los Metagabros pueden agruparse junto con las Dunitas de Medellín en una unidad que aquí se define como Complejo Ofiolítico de Aburrá, y que corresponde a la parte basal de una corteza oceánica cuyo ambiente de generación aún no se conoce. Queda por verse si las Anfibolitas de Medellín hacen parte del mismo complejo, pues si bien puede tratarse de la parte superior de la ofiolita metamorfoseada bajo condiciones de alto grado, hay muchas diferencias, especialmente en la sucesión y tipo de eventos metamórficos, que sugieren dos historias geológicas disímiles para cada unidad de metabasitas.

Los datos que actualmente se tienen de las Anfibolitas de Boquerón son insuficientes para dilucidar su origen, y su correlación es aún incierta. Las Anfibolitas de El Retiro se consideran extensiones laterales hacia el sur de las Anfibolitas de Medellín aunque sus rasgos geoquímicos y el tipo de metasedimentitas asociadas son un tanto disímiles.

La información geocronológica disponible indica que el metamorfismo de alto grado de las Anfibolitas de Medellín y de El Retiro se dio durante el lapso Pérmico-Triásico. La edad de los Metagabros de El Picacho, y en general, del Complejo Ofiolítico de Aburrá, no ha sido determinada. El emplazamiento del complejo ofiolítico pudo darse asociado con el metamorfismo Pérmico-Triásico citado, o bien, posteriormente.

### Agradecimientos

Queremos agradecer al CIMEX y al Centro del Carbón de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, y al laboratorio de trazas de fisión de la Universidad EAFIT (Medellín) por permitir la preparación de muestras, y a los laboratorios de Geoquímica y Geocronología de la Universidad de Brasilia (Brasil) por la ejecución de los análisis químicos. Agradecimiento especial a todos nuestros amigos, geólogos o no, por acompañarnos a las excursiones de campo. Al geólogo Álvaro Nivia por la ayuda brindada en la interpretación de los datos geoquímicos.

Los dos primeros autores agradecen especialmente a los profesores Jorge Julián Restrepo y Oswaldo Ordóñez-Carmona por la orientación del trabajo dirigido de grado que dio origen a este artículo.

### Bibliografía

- Álvarez, J., 1987. Tectonitas dunitas de Medellín, departamento de Antioquia, Colombia. *Boletín Geológico Ingeominas*. **28** (3): 9-44.
- Anónimo, 1972. Penrose Field Conference on ophiolites. *Geotimes*, **17** (12): 24-25.
- Beswick, A.E. & Soucie, G., 1978. A correction procedure for metasomatism in an Archean greenstone belt. *Precambrian Res.* **6**: 235-248.
- Botero, G., 1963. Contribución al conocimiento geológico de la zona central de Antioquia. En: *Anales de la Facultad de Minas*. (57): 1-101.
- Bucher, K. & Frey, M., 2002. *Petrogenesis of metamorphic rocks*. Springer Verlag, Berlin. 318 p.
- Coleman, R.G., 1977. Ophiolites. Ancient Oceanic Lithosphere? SpringerVerlag, Berlin. 229 p.
- Estrada-Carmona, J., 2003. Caracterización geológica de las rocas metamórficas en los alrededores de la cuchilla Las Peñas. Universidad Nacional, Facultad de Minas, Medellín. Tesis (inédita). 91 p.
- Echeverría, L.M., 1973. Zonación de las rocas metamórficas del valle de Aburrá y sus alrededores. En: *Anales de la Facultad de Minas*. (58): 30-56.
- Grauch, R.I., 1989. Rare earth elements in metamorphic rocks. En: *Reviews in Mineralogy*. **21**: 147-167.
- INGEOMINAS, 1996. Memoria explicativa del mapa geológico generalizado del departamento de Antioquia. Escala 1:400.000. Medellín.
- \_\_\_\_\_. 1997. Mapa geológico generalizado del departamento de Antioquia. Escala 1:400.000. Medellín.
- Irvine, T. N. & Baragar, W. R., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. En: *Can. J. Earth Sci.* **8**: 523-548
- Le Bas M. J., Le Maitre R. W., Streckeisen A. & Zanettin B., 1986 - A chemical classification of volcanic rocks based on the Total Alkali-Silica Diagram. *J. Petrol.*, **27**: 745-750
- Martens, U. & Dunlap, W.J., 2003. Características del metamorfismo Cretácico del terreno Tahamí como se infiere a partir de edades Ar/Ar obtenidas en las Anfibolitas de Medellín, cordillera Central de Colombia (resumen). En: *Memorias IX Congreso Colombiano de Geología*. Medellín: 47-48.
- McCourt, W. J., Aspden, J. A. & Brook, M., 1984. New geological and geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by multiple accretion. *J. Geol. Soc. London*. **141**: 831-845.
- Miyashiro, A., 1994. *Metamorphic petrology*. Oxford University Press, Londres. 404 p.
- Montes, L.F., 2003. Relación entre las metamorfitas de alto y bajo grado en el sur del valle de Aburrá. IX Congreso Colombiano de Geología, Medellín (resúmenes).
- Mullen, E. D., 1983. MnO/TiO<sub>2</sub>/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters* **62**: 53-62.
- Ordóñez, O., 2001. Caracterização isotópica Rb-Sr e Sm-Nd dos principais eventos magmáticos nos Andes Colombianos. Tesis de Doctorado (inédita). Universidad de Brasilia. 176 p.
- \_\_\_\_\_. Pimentel, M., Correa, A.M., Martens, U., Restrepo, J.J., 2001. Edad Sm/Nd del metamorfismo de alto grado de El Retiro (Antioquia). En: VIII Congreso Colombiano de Geología, Manizales (C.D.).
- Pearce, J. A., 1975. Basalt geochemistry used to investigate past tectonic environments on Cyprus. *Tectonophysics* **25**: 41-67
- Rendón, D. A., 1999. Cartografía y caracterización de las unidades geológicas del área urbana de Medellín. Universidad Nacional, Facultad de Minas, Medellín. Tesis de grado (inédita).
- Restrepo, J. J., 1986. Metamorfismo en el sector norte de la Cordillera Central de Colombia. Universidad Nacional, Facultad de Ciencias, Medellín. 276 p.

- \_\_\_\_\_. 2003. Edad de generación y emplazamiento de ofiolitas en la cordillera Central: un replanteamiento (resumen). En: Memorias IX Congreso Colombiano de Geología. Medellín: 48-49.
- \_\_\_\_\_ & **Toussaint, J. F.**, 1974. Obducción Cretácica en el Occidente Colombiano. Anales de la Facultad de Minas. (58): 73-105.
- \_\_\_\_\_. 1978. Edades radiométricas de algunas rocas de Antioquia, Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra. (5-6): 1-18.
- \_\_\_\_\_. 1982. Metamorfismos superpuestos en la Cordillera Central de Colombia. En: Actas del V Congreso Latinoamericano de Geología. 3: 505-512.
- \_\_\_\_\_. 1984. Unidades litológicas de los alrededores de Medellín. En: Conferencia sobre riesgos geológicos del valle de Aburrá: 1-26.
- Restrepo A. J.J., Toussaint, J.F., González, H., Cordani, U., Kawashita, K., Linares, E. & Parica, C.**, 1991. Precisiones geocronológicas sobre el Occidente Colombiano. En: Simposio sobre magmatismo andino y su marco tectónico. Manizales. 1: 1-21.
- Rollinson, H.**, 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Group, Essex. 352p.
- Shervais, J.W.**, 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. Earth Planet. Science Lett., **59** (1): 101-118.
- Sun, S.-s., McDonough, W.F.**, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. En: Saunders, A.D. & Norry, M.J. (eds.), Magmatism in the Oceanic Basins. Geological Society of America Special Publication **42**: 313 – 345.
- Tamayo, L.M.**, 1984. Análisis y mediciones de miniestructuras en la anfibolita del Grupo Ayurá-Montebello. Medellín, Universidad Nacional, Facultad de Minas. Tesis de grado (inédita).
- Toussaint, J. F.**, 1996. Evolución Geológica de Colombia 3: Cretácico. Universidad Nacional, Facultad de Minas, Medellín. 277p.
- Vinasco, C., Cordani, U., González, H., Vasconcelos, P., Liu, D.**, 2003. Tectonomagmatic evolution of the northern part of the Central Cordillera of Colombia using Ar-Ar and U-Pb Shrimp methodologies (resumen). En: Memorias IX Congreso Colombiano de Geología. Medellín: 57-58.
- Vinasco, C.J., Cordani, U.G., Vasconcelos, P.**, 2001. 40Ar/39Ar dates in the Central Cordillera of Colombia: evidence for an upper Triassic regional tectonomagmatic event. En: III Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, Pucón - Chile.
- Wager, L.R. & Brown, G.M.**, 1968. Layered igneous rocks. W.H. Freeman, San Francisco. 588 p.
- Wilson, M.**, 1989. Igneous petrogenesis. Chapman & Hall, Londres. 466 p.
- Wood, D.A., Tarney, J., Varet, J., Saunders, A.D., Bougault, H., Joron, J.-L., Treuil, M. and Cann, J.R.**, 1979. Geochemistry of basalts drilling in the North Atlantic by IPOD Leg 49: implications for mantle heterogeneity. Earth Planet. Sci. Lett., **42**: 77-97.

Recibido el 4 e octubre de 2004.

Aceptado para su publicación el 15 de junio de 2005.