

CONTRIBUCION AL CONOCIMIENTO DE LAS ANFIBOLITAS Y DUNITAS DE MEDELLÍN (COMPLEJO OFIOLÍTICO DE ABURRÁ)

CONTRIBUTION TO THE KNOWLEDGE OF AMPHIBOLITES AND DUNITAS OF MEDELLÍN (COMPLEJO OFIOLÍTICO OF ABURRÁ)

EURICO PEREIRA

IGM, Apartado 1089, 4466-956 S. Mamede Infesta, Portugal, eurico.pereira@igm.pt

FRANKLIN ORTIZ

CIMEX-ICNE, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia, fortiz@perseus.unal.edu.co

HAZEL PRICHARD

University of Cardiff, hazel@hprichard.freerve.co.uk

Recibido para revisar 15 de Abril de 2005, aceptado 1 de Noviembre de 2005, versión final 3 de Marzo de 2006

RESUMEN: En el oriente y norte de Medellín, aflora un cuerpo alargado de dunita metamórfica con dirección noroeste y un área aproximada de 60 km², en contacto tectónico con ortoanfíbolitas. Estos dos cuerpos hacen parte de un fragmento de corteza oceánica desmembrada, formando parte integral del Complejo Ofiolítico de Aburrá (Correa y Martens, 2000), hecho también admitido anteriormente por Toussaint (1996) al considerar a las anfíbolitas de Medellín como ofiolitas incluidas dentro del Complejo Arquía. Aunque hasta ahora no se han identificado sectores intermedios de la corteza oceánica tales como son los “flaser”-gabros y el complejo de diques, las anfíbolitas muestran una huella química de un MORB-E enriquecido en los elementos litófilos incompatibles (LIL) y, en casos esporádicos, de un MORB T de basaltos transicionales oceánicos. El contacto tectónico entre las dunitas y las anfíbolitas exhibe una variedad de situaciones de retromorfismo y de alteración hidrotermal.

La dunita es uniforme en composición, altamente magnesiana y contiene varios cuerpos de cromita podiforme. A resaltar, desde el punto de vista metalogénico es la determinación, por primera vez, de contenidos anómalos de elementos del grupo del platino (EGP) en esta dunita. Los EGP más comunes son antimoniouros, arseniuros y aleaciones. Específicamente los más comunes incluyen antimoniouros de Pd, algunas veces con Hg-Cu-Au, esperrilita (PtAs₂) y PtCu; otros son PtCuS, una aleación Pt-Ni-Fe, un arseniuro de Pd-Pt-Hg, un PdCu₆SbAs y un sulf-arseniuro Os-Ir-Ni. Es notoria en ella la serpentización que se hace más intensa hacia las zonas donde se concentró el movimiento tectónico. Es común encontrar estructuras de estratificación primaria, marcadas por el alineamiento de minerales, a lo largo de la lineación de estiramiento y microplegamiento que ha sido interpretado como indicativo de que dicha unidad estuvo sometida a flujo deformacional bajo condiciones de metamorfismo de grado medio registrado en las dunitas y en las anfíbolitas. La intensidad de la deformación y metamorfismo es muy difícil de explicar por la acreción del arco primitivo andino, contemporáneo de la abertura del Atlántico, no Jurásico, como reconocen algunos autores.

Las metabasitas pertenecen a una secuencia metamorfizada regionalmente en facies anfíbolita con granate y exhiben foliación metamórfica doblada y cizallada. Lineaciones de estiramiento y criterios cinemáticos de deformación indican consistentemente que la dirección del transporte de la ofiolita seguiría el acimut N 35°-60°E y el sentido de transporte del techo hacia el NE, esto es, sobre un borde continental de afinidad Gondwánica, pegado al borde del cratón Amazónico.

Tratándose de la interfase corteza - manto oceánico se postula que las dunitas tuvieron un emplazamiento tectónico por obducción sobre las ortoamfibolitas durante un episodio tectono-metamórfico, probablemente en el Paleozoico superior (ciclo orogénico Apalachiano o Varisco).

PALABRAS CLAVE: Anfibolita, Ofiolita, Complejo Ofiolítico, Elementos de Grupo del Platino (EGP), Dunita.

ABSTRACT: At east and north of Medellín, a metamorphic dunite body of lensoid shape outcrops with northwest strike and an approximate area of 60 square kilometers, in tectonic contact with orthoamphibolites. These two bodies make part of a fragment of dismembered oceanic crust, being integral part of the Aburra Ophiolitic Complex (Correa and Martens, 2000), also fact admitted previously by Toussaint (1996) when considering to the amphibolites of Medellín like ophiolites and included them inside the Arquía Complex. Although up to now intermediate sectors of the such oceanic crust have not been identified yet, as the "flasser"-gabbros and the dikes complexes, the amphibolites shows a chemical print of a MORB-E enriched in the large ions lithofiles (LIL) and, in sporadic cases, of a MORB T of oceanic transitional basalts. The tectonic contact between the dunites and the amphibolites exhibits a variety of retromorphism situations and of hydrothermal alteration.

The dunite is uniform in composition, highly magnesian and it contains several bodies of podiform chromite. From the metallogenic point of view it is important also to mention, for the first time, the determination of anomalous contents, overcoming in their sum 1.0 ppm, of the elements of the group of the platinum in this dunite. The most common PGM are antimonides, arsenides and alloys. Specifically they include most commonly Pd antimonides Hg-Cu-Au-bearing, sperrylite (PtAs₂) and PtCu. Other PGM include one PtCuS, one Pt-Ni-Fe alloy, one Pd-Pt-Hg arsenide, one PdCu₆SbAs, and one Os-Ir-Ni-sulf-arsenide. It is notorious on it the serpentinization that becomes more intense toward the areas where it is concentrated the tectonic movement. It is common to find structures of primary stratification, marked by the alignment of minerals, along the stretching lineation and microfolds that it has been interpreted as indicative that this unit it was subjected to flow deformational under low conditions of metamorphism of middle registered grade in the dunites and in the amphibolites. The intensity of the deformation and metamorphism is very difficult of explaining for the accretion of the Andean primitive arch, contemporary of the opening of the Atlantic, not Jurassic, like some authors recognize.

The metabasites belongs regionally to a metamorphised sequence in amphibolite facies with garnet and they exhibit bent metamorphic foliation and shearing. Stretching lineations and cinematic approaches of deformation indicate consistently that the address of the transport of the ophiolite would follow the azimuth N35° - 60°E and the sense of transport of the roof toward the NE, this is, on a continental border of Gondwanic affinity, hit on the edge of the Amazon craton.

Being the interface oceanic crust - mantel is postulated that the dunites had a tectonic emplacement for obduction on the orthoamphibolites during a tecton-metamorphic episode, probably in the upper Paleozoic (Apalachian or Variscan orogenic cycle).

KEY WORDS: Amphibolite, Ophiolite, Ophiolitic Complex, Platinum Group Elements (PGE), Dunite.

INTRODUCCIÓN

Son diversos los estudios realizados sobre la Cordillera Central, en su sector más septentrional, sector en el cual se encuentra incluida el área de Medellín. La mayoría de los autores (Echevarría, 1973; González, 1976 y 1980; Restrepo y Toussaint, 1976, 1978, 1982, 1987, 1991; Restrepo, 1986) admiten de forma

generalizada efectos policíclicos y polimetamórficos que afectaron las rocas constituyentes de esta cordillera y las diferentes unidades litoestratigráficas que la conforman, lo cual ha llevado a la propuesta de un variado número de unidades informales: Grupo El Retiro, Grupo Caldas, Grupo Arquía y Grupo Medellín (Restrepo, 1986, Restrepo y Toussaint, 1987).

En esta concepción policíclica, las edades propuestas para los diferentes grupos van desde el Proterozoico hasta el Cretáceo, habiendo sido definidos los diferentes episodios tectonometamórficos que, escalonados en el tiempo, los van sucesivamente afectando. En esencia, se considera un ciclo Precámbrico-Cámbrico inicial, un ciclo Caledónico, un ciclo Varisco y además un ciclo Mesozoico. Más rara es la opinión de otros autores al proponer un único episodio (Botero, 1963) o también, un modelo de crecimiento continental por múltiples acreciones subordinado a un solo evento metamórfico progrado para las metamorfitas que yacen en la cordillera Central y en los límites con la occidental (McCourt et al, 1984). Estos autores apuntan a una edad mínima del metamorfismo entre el Devónico y el Pérmico y dos eventos en los que se abrió el sistema, en el Cretáceo medio y en el Cretáceo Superior. Sustentan la edad del metamorfismo en una datación Rb/Sr isocrona 211 ± 51 Ma del Batolito de Santa Bárbara, que es intrusivo en el conjunto metamórfico. Por último, Parra (1987) al estudiar las anfibolitas granatíferas que afloran al NE del municipio de Bello, propone un modelo de evolución tectometamórfica continua, con temperatura superior a 300°C desde el Precámbrico hasta el Cretáceo.

Para la aclaración y dilucidación de las consideraciones arriba mencionadas un importante papel es aportado por los complejos de rocas máficas-ultramáficas. En este contexto, algunos datos preliminares relativos a la caracterización geoquímica y estructural de la asociación Anfibolita-Dunita de Medellín son presentados en este trabajo. Igualmente y dada la importancia minera y metalogénica de las ultramafitas se entregan los primeros resultados del contenido de elementos del grupo del platino, con valores anómalos de Pt y Pd, en las dunitas de Medellín.

Breve síntesis acerca de la Geología del sector.

En el sector de Medellín, podemos distinguir las siguientes Unidades informales:

- Granulitas y migmatitas. Se han descrito en las localidades de La Ceja y El Retiro al oriente de Medellín. Dada su litología y mayor grado de metamorfismo han sido consideradas por diversos autores (Toussaint et al, 1978, González, 1980 y Toussaint, 1993, Restrepo et al, 1991) como rocas del Proterozoico - Paleozoico inferior;

- Paragneises en la parte suroriental del Valle de Aburrá y Esquistos sericíticos en el Ancón. En apariencia estos últimos forman parte de una franja que se extiende desde el Alto de Minas hasta el Ancón Sur. Hacia el noroeste de Medellín, cerca de Boquerón, hay esquistos cuarzo sericíticos con cantidades variables de grafito, y la presencia en algunas zonas de porfidoblastos de granate y estaurolita o andalucita. Edades radiométricas para estas rocas son: por K-Ar en roca total de 270 ± 10 Ma (Restrepo, 1986) 160 ± 11 Ma y 182 ± 8 Ma (Restrepo et al., 1991) y por isócrona Rb-Sr de 226 ± 4 Ma (Restrepo et al, 1991);

- Anfibolitas. Afloran en una gran extensión del área, aunque no parecen formar parte de una misma unidad sino que están expuestas en zonas geográficas y tectónicas variadas, al igual que con diversas características mineralógicas y texturales así como en sus edades geocronológicas. De los cuerpos extensos de anfibolita son importantes los que se encuentran estrechamente relacionados con la Dunita de Medellín, así como con gneises y esquistos biotíticos. En las publicaciones de INGEOMINAS (1996) se presentan las anfibolitas de Medellín como rocas de edad Paleozoica aunque las relaciones de campo parecen indicar la presencia de varias anfibolitas con edades diferentes. Se encuentran amplias variaciones de los datos obtenidos por el método K-Ar en anfíbol, que van desde 60 ± 18 Ma hasta 102 ± 31 Ma (Restrepo et al, 1991). Para las anfibolitas de

Caldas existen edades por el método K-Ar, en anfíbol y roca total, entre 254 ± 9 Ma y 319 ± 48 Ma (Restrepo et al, 1991).

- Rocas ultramáficas. Se incluyen en éstas: peridotitas, dunitas, dunitas serpentinizadas y serpentinitas. Estas rocas están relacionadas con el sistema de fallas Cauca-Romeral, "Cinturón Ofiolítico Romeral", (Alvarez, 1985) y hacen parte del Complejo Ofiolítico del Cauca según Toussaint y Restrepo (1974). Es frecuente encontrarlas asociadas con gabros y basaltos. Para la mayoría de las rocas ultramáficas en referencia, se ha considerado una edad de formación del Jurásico-Cretácico temprano con un emplazamiento al continente durante el Cretáceo tardío - Paleógeno (Alvarez, 1987 e INGEOMINAS, 1996).

- Granitoides neisicos. Cuerpos de composición granitoide y estructura neisica, entre otros el llamado Ortoneis de La Miel (municipio de Caldas) y el Gneis de la Iguaná, afloran en varias localidades. El Ortoneis de Caldas esta intruyendo Anfibolitas granatíferas y los esquistos intercalados con éstas. Su edad de acuerdo con una datación por isocrona Rb-Sr es de 391 Ma (Restrepo y Toussaint, 1982) y una por K-Ar en biotita es de 343 Ma (Restrepo y Toussaint, 1978).

- Cuerpos de roca granítica. Importantes en el área son: El Batolito Antioqueño y el stock de Altavista. El primero es un cuerpo que ocupa una amplia extensión del sector norte de la cordillera Central. Su propia área es de 7.221 km² y la de cuerpos satélites 322 km² (INGEOMINAS, 1996). Aflora al oriente y nororiente de Medellín. Para el Batolito se reportan edades K-Ar por Pérez (1967) y Feininger et al. (1972) que están entre 68 ± 3 y 86 ± 3 Ma aunque Restrepo et al. (1991) obtienen para una muestra de San Luis 90 ± 5.6 Ma y de 63 ± 11 Ma en una de Bello. El *stock* de Altavista, es un cuerpo plutónico aflorando en la margen occidental del Valle de Aburrá. Esta caracterizado por presentar una gran variedad petrográfica con rocas que van desde gabros, dioritas, tonalitas hasta rocas porfídicas con matriz afanítica de

composición andesítica, que parecen ser las predominantes. El *stock* intruye el Gneis de la Iguaná y los esquistos de Ancón. El contacto con las anfibolitas existentes en el sector occidental de Medellín es intrusivo. Este stock tiene dataciones radiométricas muy variadas: por el método K-Ar en roca total, 77 Ma (Restrepo y Toussaint, 1984) y 108 ± 4 Ma; K-Ar en anfíbol, 151 ± 15 Ma y 117 ± 11 Ma; y por Rb-Sr edades modelo de 96 ± 11 Ma, 103 ± 10 Ma.

Particularidades de la Dunita y Anfibolita de Medellín

Dunita de Medellín. Esta unidad sobresale por su gran extensión, aflora como un cuerpo alargado en la parte oriental de Medellín, norte de Bello y en los sectores sur y occidental de San Pedro. La dunita suprayace mediante un contacto fallado, generalmente subhorizontal, a las Anfibolitas de Medellín. En la zona de contacto y debido a cabalgamiento de las Dunitas sobre las anfibolitas se generaron esquistos actinolíticos, cloríticos y talcosos. Es una dunita parcialmente serpentinizada. Es característico para esta unidad el que presenta estratificación primaria, resultante de actividad mantélica, foliación metamórfica y plegamiento polifásico. Por su fábrica, mineralogía y química parece estar representando la base de una Ofiolita que sufrió desmembramiento y acreció al continente.

Como consecuencia, algunas dataciones isotópicas sugieren una edad pre Devónica para la Ofiolita de Aburrá (Medellín incluida), hecho que se infiere de la intrusión de Ortoneises, con edad aproximada de 391 Ma, a las anfibolitas de Caldas (Restrepo y Toussaint, 1982). Tratándose de una edad Rb/Sr se refiere naturalmente al metamorfismo de los ortoneises y de las anfibolitas. Estos autores han definido eventos tectono-metamórficos Devono-Carboníferos y Permo-Triásicos y la presencia de complejos polimetamórficos en la Cordillera Central.

Los datos paleomagnéticos e isotópicos Sm/Nd confirman que la Avalonia occidental de los Apalaches, corresponde a un fragmento continental separado del cratón Amazónico en el Paleozoico inferior (Murphy and Nance, 2002). La Avalonia Occidental después de ser acrecionada al continente Laurentiano, en el Silúrico, durante el ciclo Caledónico, volvió a colisionar con el Gondwana W (continente Sur Americano incluido) en el ciclo Apalachiano, durante el Devónico y el Carbonífero. Siguiendo los argumentos dados por los datos isotópicos disponibles, arriba referidos, la ofiolita de Medellín deberá tener su zona de raíces en el océano Varisco, denominado Rehic, y no en el océano Iapetus Gondwanico. Como en efecto, este último océano se abrió a partir del Ordovícico entre la Avalonia Occidental (cratón Amazónico) y el continente Laurentiano, fue fundamentalmente soldado al continente Norte-Americano en el Silúrico.

Otro dato curioso se registró en los ortoneises *augen* de Medellín que están aflorando en la carretera a las Palmas. Estos exhiben una fuerte deformación cizallante tangencial, dúctil. Muestran lineaciones de estiramiento y criterios cinemáticos de movimiento, expresados por las evidentes estructuras (δ), (σ) y de cizallamiento (C/S), que consistentemente están indicando un transporte del techo hacia N35°-60° E. Es pues, posible que restos de corteza continental, originarias del cratón Amazónico, también hayan sido soldadas con la ofiolita y agregados, conjuntamente, al dominio continental Suramericano, en el Devónico-Carbonífero, durante el ciclo Apalachiano. Estas ideas son actualmente defendidas por varios autores e.g. (Dalziel et al., 1994; McElhinny et al., 2003).

Anfibolitas de Medellín. Esta unidad resalta por su presentación como un cuerpo único, que se extiende desde la Ceja en el sur hasta Belmira al norte, por aproximadamente 72 Km. y con un ancho de 6 Km., aunque es importante anotar que también se presentan anfibolitas en pequeñas dimensiones intercaladas a los metasedimentos. Diversos

estudios que de ellas se tienen postulan varios modelos sobre su origen, edad, posición estratigráfica y en algunos de ellos se ha planteado el sí tiene validez el agruparlas en una sola unidad.

Pocos son los trabajos sobre las estructuras que se tienen de las Anfibolitas de Medellín. Tamayo (1984), realiza un estudio estructural de la anfibolita, los esquistos verdes y los metasedimentos que afloran en la autopista Medellín-Bogotá. Este autor planteó un modelo con las posibles fases tectónicas durante las cuales se pudieron haber generado las estructuras observadas en estas rocas.

Las Anfibolitas localizadas geográficamente más cerca a la dunita, se hallan plegadas siguiendo una fase de deformación dúctil responsable de la foliación metamórfica (S_n) en facies anfibolítica y una fase más frágil, responsable de los doblamientos mesoscópicos con charnela horizontal de dirección aproximada de N-S y planos axiales sub-verticales. Estos últimos doblamientos apenas dan origen a una crenulación (S_{n+1}) poco penetrativa. Aún, en el plano de foliación principal (S_n) es observable una lineación de estiramiento según el acimut N°35-60°E, la misma que fue observada en los ortoneises, y el sentido de movimiento, del techo hacia el NE, inferido de los marcadores cinemáticos, tales como las estructuras (δ), (σ) y de cizallamiento (C/S).

El tipo de contacto entre las Anfibolitas de Medellín y las Dunitas de Medellín es normalmente fallado y la mejor expresión de esto se puede observar en la autopista Medellín-Bogotá. Se trata de una zona de aproximadamente un kilómetro y medio, medido sobre la carretera, donde el contacto se manifiesta por la presencia notable de esquistos verdes replegados y actinolíticos, o por zonas decamétricas donde se presentan mezclas, de manera compleja, de varios tipos de roca como anfibolitas, dunitas, esquistos de talco y anfibolita-esquistos. Los esquistos cloríticos y actinolíticos se han interpretado como generados durante el proceso de obducción; los primeros a partir de la dunita y

los segundos de la anfíbolita (Álvarez, 1987). A lo largo de todo el contacto entre dunitas y anfíbolitas, éste cambia de buzamiento, en unos sectores es subhorizontal y en otros relativamente inclinado (Álvarez, 1987).

No parece existir duda de que las anfíbolitas y dunitas integran una secuencia única de corteza-manto superior oceánico, la cual fue acrecionada al dominio continental, muy probablemente, en el ciclo Apalachiano-Varisco, habiendo sido deformada y metamorfizada durante este ciclo.

Protolito de las anfíbolitas de Medellín.

Considerando lo extenso de las exposiciones de las Anfíbolitas de Medellín, es una buena aproximación asumir que su protolito debió corresponder a un cuerpo ígneo de dimensiones muy similares. El origen ígneo sin embargo debe respaldarse con el análisis de sus características litológicas y estructurales y en las características geoquímicas de la unidad. Las inferencias litológicas y las estructuras sugieren el acoplamiento de un extenso fragmento de corteza oceánica con fragmentos continentales que registran una historia polimetamórfica y policíclica aun no totalmente esclarecida.

Son varias las situaciones, posibles de discusión, acerca de las características geoquímicas. En nuestro caso nos limitaremos a realizar una aproximación a ellas en vista de que sólo se realizaron seis análisis químicos de roca total de la Ofiolita de Medellín, tres de los cuales de ortoanfíbolitas derivados de lavas basálticas y tres de rocas ultramáficas, dunitas y piroxenitas, (Tabla I). Dado que las rocas ultramáficas dan escasa información en cuanto al análisis discriminante de paleoambientes geodinámicos, el número de muestras de ortoanfíbolitas analizadas para este objetivo resulta insuficiente. No obstante, se puede hacer una posible discusión de los resultados, comparativamente, en el caso estudiado con basaltos enriquecidos de la

dorsal del Pacífico oriental, MORB-E, (Juteau et Maury, 1997).

Proyectados los resultados de las muestras de ortoanfíbolitas de Medellín (Of.1, Of.3, Of.13) conjuntamente con los valores del caso estudiado MORB-E, en el diagrama de la Fig.1a (Winchester and Floyd, 1977), se ve que se trata de basaltos sub-alcinos y en la Fig.1b, (Irvine and Barager, 1971) se constata que todos los datos caen próximos al límite de los campos toleítico y calco-alcino, con tendencia hacia el dominio toleítico. Entretanto, los mismos valores proyectados en el diagrama Ti/Zr/Sr de la Fig. 2a, (Pearce and Cann, 1973), revelan una singularidad de la muestra Of.1. Ésta cae en el campo de los basaltos de arco de islas (IAB), mientras que las restantes se sitúan en el dominio de los basaltos oceánicos, sin que se distingan los dominios específicos de estos basaltos. La relación $V - Ti/1000$ (Shervais, 1982), expresada en la Fig.2b, conduce a los mismos resultados revelando una nítida separación de $ARC < 20 > OFB$, con la muestra Of.1 ≈ 10 .

En la Fig. 3, a partir de las relaciones entre elementos LIL (large ion lithophile), HFS (high field strength) y el comportamiento de REE, se observan las relaciones posibles con las ortoanfíbolitas de Medellín. Si se confrontan los valores normalizados a los de un manto primitivo (Sun and McDonough, 1989) con los valores del caso estudiado de basaltos enriquecidos de la dorsal del Pacífico oriental, MORB-E, se verifica que el perfil de la muestra Of.3 manifiesta características intermedias, entre un MORB-N de las crestas medias o de una cuenca marginal tras arco y de MORB-E, enriquecido. Mientras tanto la muestra Of.13 da una tendencia hacia MORB-T, transicional hacia los basaltos alcalinos oceánicos (Grenne, 1989; Juteau et Maury, 1997). En efecto, existe un aumento progresivo de los valores de K y Ti, coherentes con los valores de los elementos traza incompatibles, del mismo modo que el perfil de REE pasa de ligeramente positivo a un perfil negativo, en el sentido de los basaltos transicionales.

Con relación a los valores de los elementos incompatibles de la muestra Of. 1, estos admiten alguna discusión. En la Fig. 2a, se constata que la muestra cae en el campo de los IAB por el enriquecimiento selectivo de Rb, Ba y K, relativamente a los niveles de REE y, también porque la anomalía positiva de Sr y los valores bajos de Zr y Ti, son compatibles con este ambiente. Por otro lado, los tenores relativamente bajos de Rb, Ba y K son también indicadores de un ambiente MORB-N o de tras arco, mientras que la anomalía positiva de Sr, no es usual en este ambiente y puede reflejar un bajo fraccionamiento de plagioclasa, lo que se corrobora con la anomalía positiva de Eu.

En cualquier caso, de esta manera se halla una indefinición con relación al paleoambiente de la muestra Of.1. Tal indeterminación puede ser resuelta a través de los valores más altos de Nb y Ta y de las relaciones más bajas de La/Nb y Ba/La, no compatibles con los basaltos de arco de islas (Juteau and Maury, 1997). Estos últimos, efectivamente, muestran típicas anomalías negativas de Nb y Ta y relaciones de La/Nb y Ba/La más altas que en los MORB I, o en los MORB empobrecidos en los elementos incompatibles litófilos. Así mismo, con algunas reservas, también se sitúa la muestra OF.1 en el dominio del tipo MORB, empobrecido.

Tabla 1 - Análisis químicos de la Ofiolita de Medellín:- MORB-E: enriquecido de la dorsal del Pacífico (Análisis in: Juteau et Maury, 1997). Restantes análisis efectuadas en el Laboratorio do IGM, Portugal, por FRX, ICP-Plasma e ICP-Ms.

Table 1 - Chemical analyses of the Ofiolita de Medellín: - MORB-E: enriched of the ridge of the Pacific (Analysis in: Juteau ET Maury, 1997). Remaining analyses conducted in the Laboratory do IGM, Portugal, by FRX, ICP-Shape and ICP-Ms.

Tabla 1 – Análisis químicos de la Ofiolita de Medellín

Muestra	Of-1	Of-2	Of-3	Of-13	Of 10	Of-10A	
Litotipo	Anfibolita	Anf/Pirox	Anfibolita	Anfibolita	Dunita	Dunita	Morb-E
SiO ₂	47,17	38,22	48,83	46,31	34,96	36,91	49.80
TiO ₂	0,35	0,1	1,59	2,09	0,08	0,04	1.77
Al ₂ O ₃	16,61	10,13	15,28	14,98	2,24	0,79	16.25
Fe ₂ O ₃ T	8,22	10,4	11,41	11,71	10,32	10,04	9.78
MnO	0,13	0,11	0,16	0,2	0,15	0,13	0.17
MgO	10,96	27,84	8,53	5,54	42,23	43,26	7.55
CaO	12,27	3,9	9,11	14,11	0,08	0,32	11.00
Na ₂ O	1,96	0,2	3,3	2,35	0,2	0,2	3.08
K ₂ O	0,11	0,03	0,31	0,71	0,03	0,03	0.41
P ₂ O ₅	0,03	0,03	0,2	0,34	0,03	0,03	0.25
P.Rubro	1,94	9,03	0,91	1,37	9,92	8,6	0.20
TOTAL	99,75	99,99	99,63	99,71	100,24	100,35	99.87
Cr	528	1690	234	185	2320	748	250
Ni	196	1130	89	74	4740	3034	93
Co	48	102	33	27	147	145	36
V	170	60	289	300	24	17	264
Cu	98	166	98	72	509	184	
Zn	112	59	118	99	40	26	
Sr	163	23	167	283	14	16	220
Ba	14	7	34	95	7	7	40
Rb	3	3	5	12	3	3	4
Nb	3	3	5	22	3	3	9.3
Zr	17	3	112	147	3	3	150

Continuación Tabla 1.

Y	10	3	30	32	3	3	32
Th	5	5	5	5	5	5	
La	1,5	1	6,7	13,2	1	1	9
Ce	3,9	2	16,8	30,7	3,3	3,3	23
Pr	0,5	0,1	2,5	4,2	0,2	0,2	
Nd	2,6	0,5	11,8	19,7	1,8	1,8	16
Sm	1	0,2	3,6	5,1	0,3	0,3	
Eu	0,5	0	1,3	1,8	0,3	0,3	1.6
Gd	1,5	0,3	4,4	5,9	0,3	0,3	
Tb	0,4	0,2	0,9	1	0,2	0,2	
Dy	1,9	0,3	5,2	6,4	0,2	0,2	5.6
Ho	0,5	0,1	1,1	1,4	0,2	0,2	
Er	1,2	0,2	3,2	3,8	0,2	0,2	3.2
Tm	0,3	0,2	0,5	0,5	0,2	0,2	
Yb	1,2	0,4	3,2	3,7	0,2	0,2	3.2
Lu	0,3	0,2	0,5	0,5	0,1	0,1	

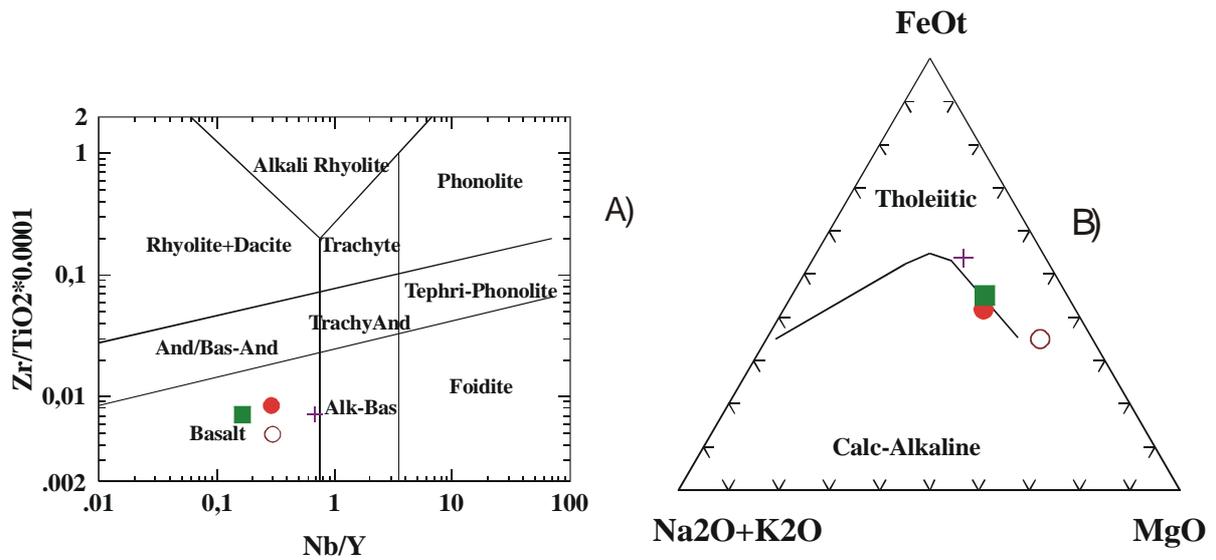


Figura 1: a) Clasificación de las ortoanfibolitos de Medellín (Winchester and Floyd, 1977); b) Proyección en el diagrama de (Irvine and Barager, 1971). Ver leyenda en la Figura 2.

Figure 1: a) Classification of the ortoanfibolitos of Medellín (Winchester and Floyd, 1977); b) Projection in the diagram of (Irvine and Barager, 1971). To see legend in figure 2.

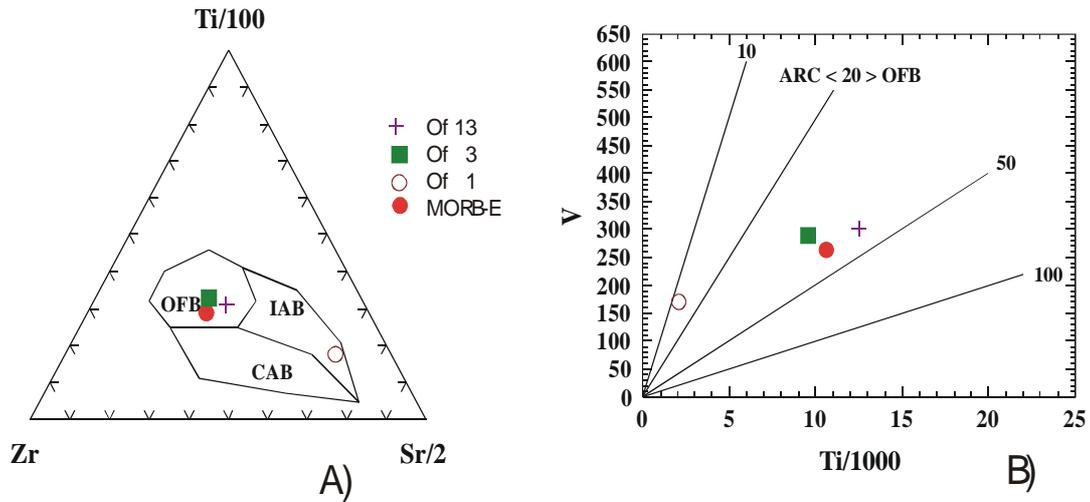


Figura 2: A) Proyección de las ortoanfibolitas de Medellín en el diagrama de Pearce and Cann, (1973); B) Proyección en el diagrama de Shervais, (1982)

Figure 2: A) Projection of the ortoanfibolitas of Medellín in the diagram of Pearce and Cann, (1973); B) Projection in the diagram of Shervais, (1982)

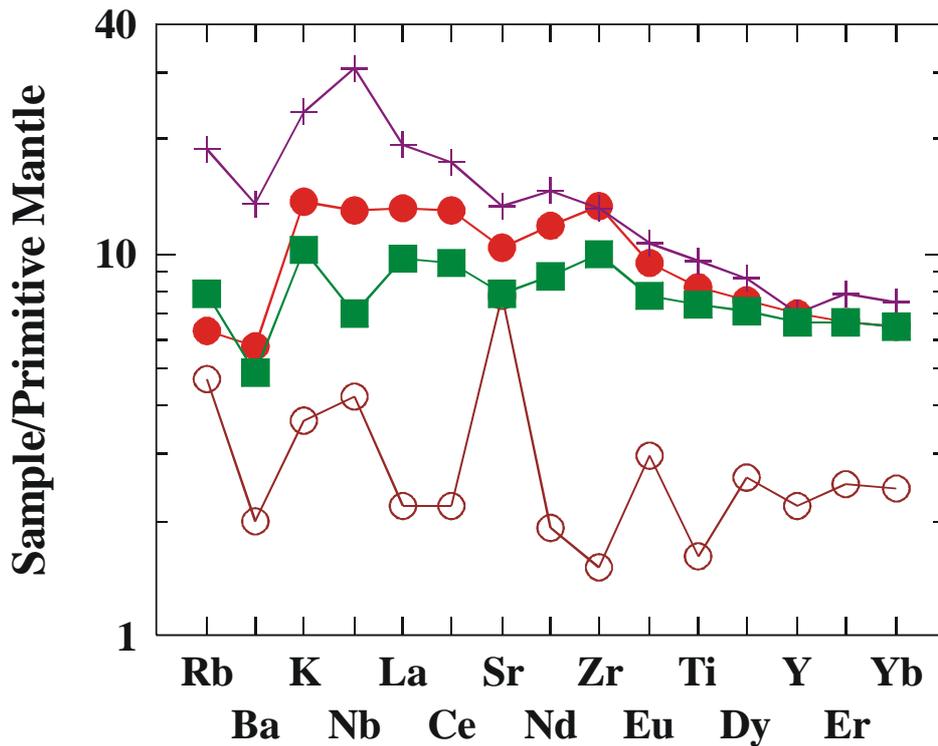


Figura 3. Diagrama multielemental de metabasaltos (ortoanfibolitas) de la Ofiolita de Medellín, comparada con el caso estudiado de MORB-E de la dorsal del Pacífico (Juteau et Maury, 1997). Ver leyenda de la Figura 3.
Figure 3. Multielementary diagram of metabasaltos (ortoanfibolitas) of the Ofiolita de Medellín, compared with the studied case of MORB-E of the ridge of the Pacific (Juteau ET Maury, 1997). To see legend of Figure 2

Aspectos metalogénicos de la Dunita de Medellín

Alvarez (1982) había enfatizado la importancia de la presencia de cuerpos de cromita podiforme en las dunitas de Medellín como depósitos característicos de ofiolitas. En 1987, este mismo autor, presenta aspectos mineralógicos y químicos de las cromititas donde resalta su similitud y afinidad a las cromititas de los depósitos ofiolíticos de Omán y Grecia. Destaca si el alto contenido de Mg y la baja relación Fe⁺²/Mg. En sus conclusiones enfatiza que las cromitas, al igual que su roca receptora, se habrían originado en la parte más baja de la zona de transición de una ofiolita.

En los trabajos preliminares que se vienen adelantando en el marco del proyecto "Metales Preciosos en Ofiolitas" de Cytad ha sido posible el seleccionar muestras de la dunita y de las cromitas de Medellín para establecer las posibilidades de determinar la presencia de elementos del grupo del platino (EGP). Los resultados iniciales son promisorios y ellos se pueden apreciar en la tabla 2. Se destacan los contenidos que superan promedios normales para este tipo de roca en las muestras OF-10-2 y OF-10-3 en las cuales alcanzan, en la suma total de sólo Pt y Pd, valores que llegan a superar a 1.0 ppm. A su vez nótese las deficiencias de EGP en las cromitas ricas en Al, (muestras OF-12, 12A, suma menor a 27 ppb), de la Dunita de Medellín; estas cromitas guardan una similitud muy notoria con la de los principales complejos ofiolíticos (Oman, Chipre, Nueva Caledonia, Turquía, California). Adicional en las cromitas es que las concentraciones de los EGP más refractarios (Os, Ir, Ru) son mayores que los menos refractarios (Rh, Pt, Pd), un patrón

característico de distribución de las cromititas ofiolíticas (Proenza, et al. 2002). De nuevo, en la presencia y abundancia de los EGP se reafirma el carácter ofiolítico de las dunitas de Medellín

EGP han sido observados en 7 sitios de la muestra OF10-2 y en 6 sitios de la OF10-3. Los EGP frecuentemente son compuestos y varían en tamaño desde 1 hasta 30 micrones en diámetro. Frecuentemente están asociados con pentlandita y/o arseniuros de Ni. Los arseniuros y sulfuros de metales básicos en las muestras OF10-2 y OF10-3 son raros y están frecuentemente asociados con granos mayores de ferri-cromita que está parcialmente alterada a magnetita. La ferricromita tiene un clivaje espectacularmente bien desarrollado.

Los EGP más comunes son antimoniueros, arseniuros y aleaciones. Específicamente ellos incluyen los más comunes antimoniueros de Pd, algunos portadores de Hg-Cu-Au, esperrilita (PtAs₂) y PtCu; otros EGP incluyen un PtCuS, una aleación Pt-Ni-Fe, un arseniuro de Pd-Pt-Hg, un PdCu₆SbAs y un sulf-arseniuro Os-Ir-Ni. Detalles de las características de los EGP se dan en las fotos. La paragénesis observada en la cual la ocurrencia de minerales de Pt-,Pd-, Os e Ir se da asociada a pentlandita y espinela de cromo sugiere un origen magmático primario con los EGP capturados por un líquido de sulfuros inmiscibles que cristalizó con cromita. Posteriormente los EGP segregan de los sulfuros y forman antimoniueros y arseniuros. Tales EGP portadores de Arseniuros y antimoniueros pueden ser primarios o secundarios y en las muestras analizadas es difícil determinarlo porque las muestras están serpentinizadas.

Tabla 2. Contenido de Metales Preciosos en dunitas y cromititas de la Dunita de Medellín.
Table 2. Precious Metal content in dunitas and cromititas of the Dunita de Medellín.

Muestra No.	OF-10	OF-10A	OF-10-1	OF-10-2	OF-10-3	OF-10-4	OF-10-5	OF-10-6	OF-M02	OF-M03 (a)	OF-M03 (b)	OF-M14	OF-12	OF-12A
Tipo de Roca	Dunita	Dunita	Dunita + Sx+ Es	Dunita + Sx	Dunita alter. Hidrot	Dunita + Mg	Dunita + Mg	Dunita	Cromita	Cromita				
Pt (ppb)	20	14	0 y 6	293 y 78	874 y 307	0 y 14	0 y 16	0 y 18	0 y 6	0 y 7	0 y 3	0 y 7	4	3
Pd (ppb)	31	10	2 y 9	3 y 300	16 y 810	5 y 25	3 y 21	4 y 36	3 y 8	3 y 10	0 y 8	3 y 7	0	0
Ir (ppb)	2	4	0	24	20	0	0	0	0	0	0	0	7	3
Os (ppb)	3	3	4	0	6	3	3	3	4	3	2	4	0	0
Ru (ppb)	4	6	2y 6	1 y 3	5 y 13	2 y 6	2 y 6	2 y 6	2 y 8	2 y 8	1 y 4	2 y 6	14	7
Rh (ppb)	2	2	0	56	305	0	0	0	0	0	0	0	2	1
Au (ppb)	34	17	8	10	14	44	54	32	5	0	7	10	0	0

CONCLUSIÓN

Las Dunitas de Medellín fueron consideradas, en la región, como el único componente de una ofiolita desmembrada hasta el trabajo de Correa y Martens (2000). Como bien estos autores plantean, hay una estrecha relación entre el metagabro de El Picacho y la dunita y consideran que ambos hacen parte de una misma ofiolita por lo cual proponen entonces una nueva unidad litoestratigráfica en el área a la que denominaron Complejo Ofiolítico de Aburrá. Este complejo Ofiolítico, comprende en su parte basal la Dunita de Medellín y en la parte intermedia los Metagabros de El Picacho. No se ve, por ahora, razón para disociar de este complejo ofiolítico a su componente lávica, representada en las anfibolitas de Medellín. Igualmente, como lo demuestra el quimismo de las rocas máficas de Medellín, es compatible con un magma

MORB-E, enriquecido, o quizás más evolucionado, hacia un magma MORB-T, transicional hacia basaltos alcalinos, también oceánicos, tal y como reafirman los diagramas de los elementos incompatibles.

La deformación, metamorfismo y transporte, inferido de las relaciones cinemáticas, no sólo de las dunitas y de las anfibolitas, sino también, de los ortogneises *augen* a los cuales ellas están asociados, apuntan a una historia geológica común a todo este conjunto de unidades litoestratigráficas. Estas fueron adheridas a un bloque continental de origen Gondwánico, probablemente durante un episodio tectonometamórfico Apalachiano, ocurrido en el Devónico-Carbonífero.

Las edades isotópicas Meso-Cenozoicas referidas por varios de los autores, arriba mencionados, pueden ser interpretadas como

causadas por la reapertura de los sistemas radiogénicos en el ciclo Andino, a consecuencia de la acreción de un arco de islas Jurásico-Cretácico, contemporáneo con la apertura del Atlántico, o bien por las intrusiones de un arco magmático del Terciario.

La presencia en las ultramafitas de cuerpos de cromita podiforme, sus características mineralógicas y químicas, la abundancia de los EGP reafirman el carácter ofiolítico de las dunitas de Medellín. Por vez primera se detectan en la Dunita valores anómalos de EGP cuyo contenido supera 1.2 ppm y especies mineralógicas de EGP que incluyen antimoniuros, arseniuros y aleaciones. La eventual importancia económica de estos metales preciosos y de nuevos cuerpos de cromita debe ser motivo de especial interés exploratorio.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está enmarcado dentro del proyecto "*Desarrollo de guías de exploración por metales preciosos en Complejos Ofiolíticos*" del CYTED (Ciencia y Tecnología para el Desarrollo), parte de esta investigación ha sido financiado a través de este proyecto. Igualmente, los autores agradecen el apoyo recibido del Instituto Geológico Minero de Portugal (IGM) para la realización de los análisis químicos por FRX, ICP-Plasma e ICP-Ms en sus laboratorios de Porto.

REFERENCIAS

- [1]. ALVAREZ, J., 1979. Geología de la Cordillera Central de Colombia y el Occidente Colombiano y Petroquímica de los Intrusivos Granitoides Meso-Cenozoicos. Tesis de doctorado, Universidad de Chile. 1-359. Santiago de Chile.
- [2]. ALVAREZ A., J. 1982. Tectonitas dunitas de Medellín, Departamento de Antioquia, Colombia (Informe 1896). En: Boletín Geológico. Vol. 28, No. 3; p. 9-44. ISSN 0120-1425
- [3]. ALVAREZ, J., 1983. Geología de la Cordillera Central y el occidente colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides Meso-Cenozoicos, Bol. Geol. Ingeominas 26(2), 175 p.
- [4]. ALVAREZ, J., 1985. Ofiolitas y Evolución Tectónica del Occidente Colombiano. INGEOMINAS, Inf. 1988, 30 p., Medellín.
- [5]. ALVAREZ, J., 1987. Geología del complejo ofiolítico de Pácora y secuencias relacionadas de arco de islas (Grupo Quebradagrande), Colombia-Ingeominas, informe inédito. Medellín.
- [6]. ALVAREZ, J., 1989. Mapa metalogénico de las fajas ofiolíticas de la zona occidental de Colombia. Bol. Geol. Ingeominas, Vol. 30 No. 2, p. 6-23, Bogotá.
- [7]. ALVAREZ, J. y ECKART, F., 1970.- Geología detallada de la parte suroeste del Cuadrángulo I-8. Tesis, Fac. Minas, Medellín, 64 p.
- [8]. ASPDEN, J. A., & MCCOURT, W. J. 1985. A Middle Mesozoic Oceanic Terrane in the Central of the Western Colombia. Geol. Norandina. No. 9 p19-26; Bogotá.
- [9]. ASPDEN, J. A., MCCOURT, W. J. & BROOK, M. 1987. Geometrical control of subduction related magmatism: the Mesozoic and Cenozoic plutonic history of Western Colombia. J. Geol. Soc. London, 144:893-905; London.
- [10]. BARRERO, D. 1979. Geology of the Central Western Cordillera, West of Buga and Roldanillo, Colombia. Publ. Geol. Esp. Ingeominas, 1-75. Bogotá.
- [11]. BOTERO A, G. 1963. Contribución al conocimiento geológico de la zona central de Antioquia. En: Anales de la Facultad de Minas. No. 57, p. 1-101 .
- [12]. CEPEDA, A. H, y RODRIGUEZ G., 1980. Esquistos glaucofánicos en el área de Jambaló, Cauca (Colombia), Geol. Norandina. 1: 5.10. Bogotá.
- [13]. CORREA, A. M. y MARTENS, U. (2000). Caracterización geológica de las anfibolitas de los alrededores de Medellín. Tesis (inédita), Fac. de Minas, Univ. Nal de Colombia, Medellín, 363 p.

- [14]. DALZIEL, I. W.D., DALLA SALDA, L. H. AND GAHAGAN, L. M., 1994 - Paleozoic Laurentia-Gondwana interaction and the origin of the Appalachian-Andean mountain system. *Geol. Society of Am. Bull.* v. 106: 243-252.
- [15]. ECHEVERRÍA, L. M. 1973. Zonación de las rocas metamórficas del valle de Aburrá y sus alrededores. Tesis de grado. Univ. Nacional de Colombia, Fac. De Minas. 124p.
- [16]. FEININGER, T., BARRERA, D.; CASTRO, N. 1972. Geología de Antioquia y Caldas (Subzona IIB) *Bol. Geol. Ingeominas* 20(2); 1-173. Bogotá.
- [17]. GRENNE, T., 1989, Magmatic evolution of the Lokken SSZ Ophiolite, Norwegian Caledonides: relationships between anomalous lavas and high-level intrusions. *Geological Journal*, vol. 24: 251-274
- [18]. GONZALEZ, H. 1976. Geología del cuadrángulo J-8, Sonsón. Informe 1704. Ingeominas Bogotá. 421p.
- [19]. GONZALEZ, H. 1980. Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina). *Ingeominas Bol. Geol.* Vol. 23. Bogotá.
- [20]. INGEOMINAS, 1996. Memoria explicativa del mapa geológico generalizado del departamento de Antioquia. Esc. 1:400.000. Medellín
- [21]. IRVINE, T. N. AND BARAGER, W. R. A., 1971 - A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journ. of Earth Scien.* 8: 523-548
- [22]. JUTEAU, T. ET MAURY, R., 1997 - Géologie de la Croûte Océanique - Pétrologie et dynamique endogènes. Masson, ed.
- [23]. MC ELHINNY, M. W., POWEL, C. AND PISAREVSKY, S. A., 2003 - Paleozoic terranes of eastern Australia and the drift history of Gondwana, *Tectonophysics*, 362: 41-65.
- [24]. MURPHY, J. B. AND NANCE, R. D., 2002 - Sm-Nd isotopic systematics as tectonic tracers: an example from West Avalonia in the Canadian Appalachians. *Eath-Sciences Reviews*, 59: 77-100.
- [25]. PARRA, L. N. 1987. Estructuras y metamorfismo del basamento en Bello, Antioquia. En: *Memorias 1 seminario Gerardo Botero Arango, geología de la Cordillera Central*, p. 1 53-165.
- [26]. PEARCE, J. A. AND CANN, J. R., 1973 - Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis. *Earth and Plan. Scien. Letters*, 19: 290-300.
- [27]. PEREZ, G. 1967. Determinación de la edad absoluta de algunas rocas de Antioquia por métodos radiométricos. *Fac. Minas. Medellín, Dyna* 5 p.
- [28]. RESTREPO, J.J. & TOUSSAINT, J. F., 1974. Obducción Cretácea en el occidente colombiano. *Anales Fac Minas*, No. 58, p. 73-105, Medellín.
- [29]. RESTREPO, J.J. & TOUSSAINT, J. F., 1976. Edades radiométricas de algunas rocas de Antioquia, Colombia. *Pub. Esp. Geol.. Universidad Nal . de Colombia*, 61, p 1-15. Medellín.
- [30]. RESTREPO, J.J. & TOUSSAINT, J. F., 1978. Ocurrencia del Precámbrico en las cercanías de Medellín, Cordillera Central de Colombia. *Pub. Esp. Geol.* 12, p1-11. Medellín.
- [31]. RESTREPO, J.J. & TOUSSAINT, J. F., 1982. Metamorfismo sobreimpuestos en la cordillera Central de Colombia. V Congreso Latinoamericano de Geol., Argentina. *Actas* 111, 505-512.
- [32]. RESTREPO, J.J. & TOUSSAINT, J. F., 1984. Unidades litológicas de los alrededores de Medellín. I conf. de riesgos geol. del Valle de Aburra, 26p. Medellín.
- [33]. RESTREPO, J. J., TOUSSAINT, J. F., GONZALEZ, H., CORDANI, U., KAWASHITA, K, LINARES, E., PARILA, C. 1991. Precisiones geocronológicas sobre el occidente colombiano, In: *Simposio sobre magmatismo Andino y su marco tectónico. Memorias (Tomo I)* p. 1-22. Manizales.
- [34]. RESTREPO, J .J., 1986. Metamorfismo en el sector norte de la

- cordillera Central, inédito, Univ. Nal. de Colombia, seccional Medellín. Fac. de Ciencias, Medellín.
- [35]. SHERVAIS, J. W., 1982 - Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth and Plan. Scien. Letters*, 59: 101-118.
- [36]. SUN, S. S. AND MACDONOUGH, W. F., 1989 - Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Magmatism in the Ocean Basin*, *Geol. Soc. Sp. Publ.*, 42: 313-345.
- [37]. SUN, S. S., NESBITT, R. W. AND SHARASKIN, A., 1979 - Geochemical characteristics of mid-ocean ridge basalts. *Earth Planet. Sci. Letters*, V. 44 : 119-138.
- [38]. TAMAYO, L. M. 1984. Análisis y mediciones de miniestructuras en la anfibolita del Grupo Ayurá-Montebello. Univ. Nal de Colombia, Fac. De Minas.
- [39]. TOUSSAINT, J.F. 1996. Evolución Geológica de Colombia 3: Cretácico. U. Nal de Colombia Medellín. 277p
- [40]. TOUSSAINT, J. F., RESTREPO, J. J. 1978. Edad K/Ar de dos rocas básicas del flanco noroccidental de la cordillera central; pub. *Esp. Geol.* 15:1, Universidad Nacional, Medellín, Colombia.
- [41]. TOUSSAINT, J. F. & RESTREPO, J. J., 1989 Acreciones sucesivas en Colombia: Un nuevo modelo de evolución geológica. - *Mem. V. Congr. Col. Geol.*, 1: 127-146; Bucaramanga.
- [42]. WINCHESTER, J. A. and Floyd, P. A., 1977 - Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325-343.