

# Caracterización geoquímica y ambiente geodinámico de génesis de las metabasitas de la Sierra del Algarrobo (Cordillera Bética oriental)

*Geochemical characterization and geodynamic setting of the metabasites from Sierra del Algarrobo (eastern Betic Cordillera)*

Encarnación Puga <sup>(1)</sup>, José Angel Rodríguez Martínez-Conde <sup>(2)</sup>, Antonio Díaz de Federico <sup>(1)</sup>, José Ignacio Manteca Martínez <sup>(2)</sup> y Miguel Angel Díaz Puga <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR), Facultad de Ciencias, Avda. Fuentenueva s/nº, 18002 Granada, España. epuga@ugr.es; adiazdef@telefonica.net

<sup>(2)</sup> Departamento Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica, Universidad Politécnica de Cartagena, Pº Alfonso XIII nº 52, 30203 Cartagena (Murcia), Spain. josea.rmconde@upct.es; nacho.manteca@upct.es

<sup>(3)</sup> Departamento de Hidrogeología y Química Analítica, Universidad de Almería. Calle Sacramento, s/n., La Cañada de San Urbano, 04129 Almería, España. mdpuga@ual.es

## ABSTRACT

*The metabasites cropping out in the Sierra del Algarrobo have been studied from petrological and geochemical points of view. They consist of gabbros, dolerites and basalts, which were transformed into eclogites or amphibolites during the Alpine metamorphism. Their primary magmas were tholeiitic basalts originated in E-MORB to N-MORB geodynamic conditions. By comparing these metabasites with those of the Betic and Alpine-Apennine Ophiolites and with basalts from current oceanic ridges, we classify them as ophiolitic and tectonically deriving from the oceanic floor of the Jurassic Western Tethys.*

**Key words:** Betic ophiolites, Sierra del Algarrobo, Mulhacén Complex, Nevadofilábride Domain, eastern Betic Cordillera

*Geogaceta*, 46 (2009), 11-14  
ISSN: 0213683X

## Introducción y objetivos

Los afloramientos de metabasitas que son objeto de estudio en este trabajo forman parte del dominio Nevadofilábride de la hoja de Mazarrón, nº 976 del MAGNA, a escala 1:50.000, que fue publicada en 1974. En esta publicación las metabasitas fueron identificadas como diabasas, de edad supuestamente triásica o más reciente, parcialmente anfibolitizadas, entre las cuales citaron también algunas piroxenitas con olivino y serpentinitas. Esta asociación espacial de rocas básicas y ultramáficas, que es propia de una secuencia ofiolítica, no ha sido posteriormente objeto de ningún estudio petrológico-geoquímico detallado, según el conocimiento de los autores. La única mención sobre la posible existencia en la zona de afloramientos de naturaleza ofiolítica fue hecha por Manteca *et al.* (2004) y Puga *et al.* (2004 a), basándose en la naturaleza de los macroconglomerados de edad Tortonense existentes en cuencas Neógeno-Cuaternarias próximas. Por el contrario, en las últimas décadas, se han realizado numerosos estudios petrológicos, geoquímicos y de datación de edad absoluta, sobre las metabasitas del Dominio Ne-

vado-Filábride (DNF) en la región central y occidental de la Cordillera Bética (provincias de Granada y Almería), que han permitido diferenciar entre ellas tipos con diferente origen y evolución metamórfica, formando parte de algunas de sus unidades tectónicas, así como identificar entre estas una Unidad Ofiolítica, de edad jurásica, procedente del actualmente desaparecido suelo oceánico del Tethys occidental (Puga, 1990, 2005; Puga *et al.*, 2002 a, 2009).

El estudio del ambiente de génesis de las rocas ígneas básicas, metamorizadas durante la orogenia alpina, es de gran interés para la reconstrucción de la paleogeografía Mesozoica del extremo occidental del Tethys y de sus terrenos continentales circundantes, de los que proceden los materiales que actualmente componen el DNF (Guerrera *et al.*, 1993), así como para deducir la evolución geodinámica de sus diferentes complejos y unidades tectónicas durante el desarrollo de la orogenia alpina. Por esta razón, nos ha parecido de gran interés extender el estudio petrológico y geoquímico del DNF a su extremo oriental (provincia de Murcia), haciendo especial hincapié en sus rocas ígneas básicas. Dentro de esta

línea de investigación se encuadra el presente trabajo, cuyos principales objetivos son dar a conocer:

- 1) La subdivisión cartográfica del DNF en su extremo oriental en los Complejos del Veleta infrayacente (CV) y del Mulhacén (CM), que lo recubre en una serie de isleos tectónicos, así como en las unidades que forman este último complejo en la Sierra del Algarrobo.
- 2) La caracterización geoquímica de los diferentes litotipos que forman los afloramientos de metabasitas de esta sierra y la deducción del ambiente geodinámico en que se generaron sus magmas
- 3) La correlación de estas metabasitas con otros tipos de rocas similares que forman parte de la Asociación Ofiolítica Bética (AOB) del CM y con otras asociaciones de Ofiolitas Alpino-Apenínicas.

## Contexto geológico

La figura 1A muestra la relación espacial existente entre los diferentes complejos metamórficos que forman el extre-

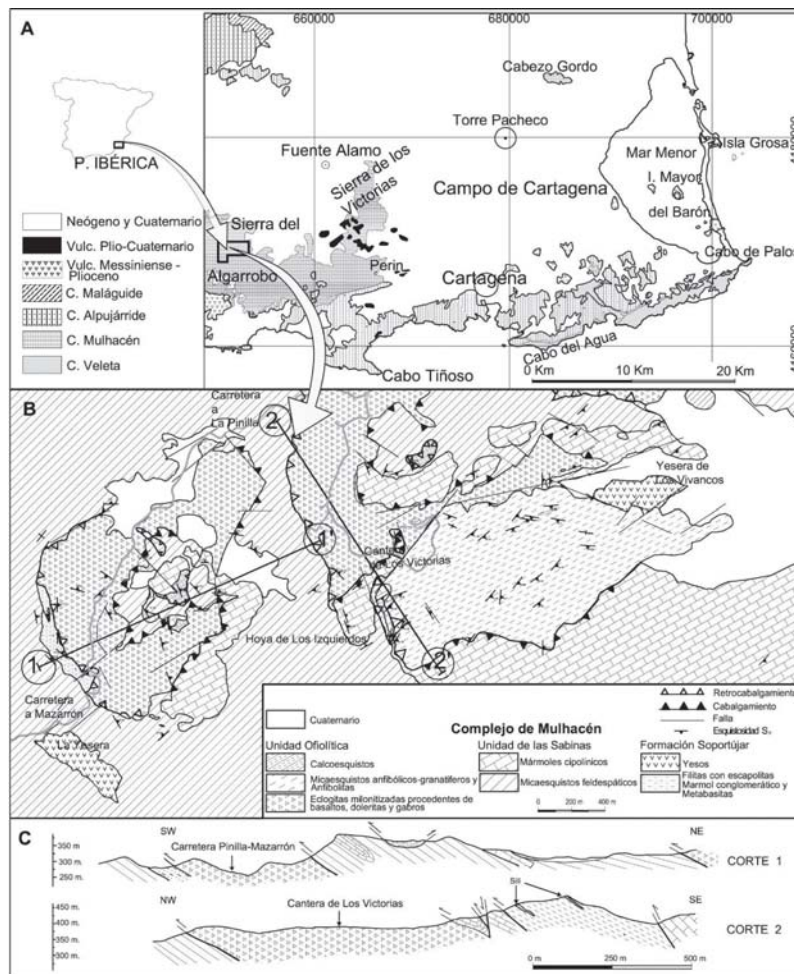


Fig. 1.- Relaciones de campo de los afloramientos de metabasitas estudiadas.

Fig. 1.- Field relationships of the studied metabasite outcrops.

mo oriental de la Cordillera Bética (Veleta, Mulhacén, Alpujarride y Maláguide), la gran extensión de materiales neógenos y cuaternarios depositados sobre los anteriores, así como algunas áreas formadas por vulcanismo de edad Messiniense-Plioceno o bien Cuaternario. La diferenciación cartográfica del DNF en el área de estudio en los complejos del Veleta y del Mulhacén, que se muestra en la figura 1A, se ha realizado siguiendo los criterios expuestos en Puga et al., 2002 a y 2004 a. Se indica también en esta figura el esquema de situación de la figura 1B, correspondiente a la zona del CM de la Sierra del Algarrobo, cuyas metabasitas han sido objeto de estudio en este trabajo y que han sido identificadas por sus características petrológicas y geoquímicas como formando parte de la Unidad Ofolítica. En las figuras 1B y C están representadas las relaciones espaciales de estos afloramientos de metabasitas con otras litologías, como calcoesquistos y micaesquistos anfibólico-granatíferos, que forman parte de la secuencia

sedimentaria de la misma unidad, entre los que se encuentran intercalados algunos sills de anfibolita de espesor métrico. Se muestra también la relación tectónica de las metabasitas ofiolíticas eclogitizadas y anfibolitizadas, con los mármoles y micaesquistos feldespáticos de la Unidad de las Sabinas, o con los materiales intraorogénicos que integran la Formación Sopotújar, de menor grado de metamorfismo que el resto del CM (Puga et al., 1996, 2002 a).

**Caracterización geoquímica de las metabasitas y ambiente de génesis de sus magmas**

Se han analizado 16 muestras de metabasitas de la Sierra del Algarrobo en el Centro de Instrumentación Científica de la UGR, mediante FRX e ICP-MS y los isótopos de Sr y Nd de 6 de ellas mediante TIMS. Las rocas analizadas son representativas de las diferentes litologías primarias presentes en los afloramientos mostrados en la figura 1B

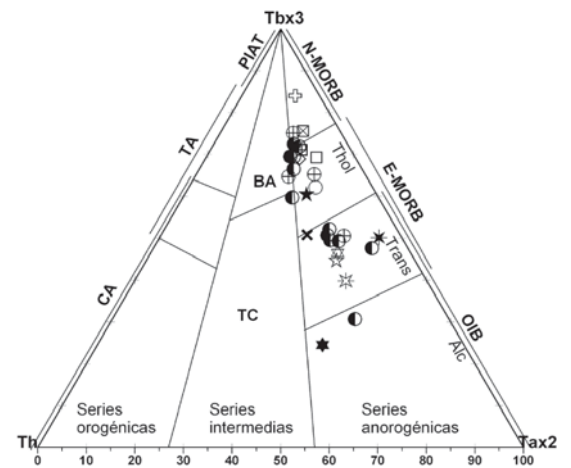


Fig. 2.- Proyección de las razones Th : Tbx3 : Tax2 de las metabasitas del Algarrobo, junto con las metabasitas ofiolíticas y los basaltos de dorsal oceánica utilizados para comparación, en el diagrama de Cabanis & Thieblemont (1988). Clave de símbolos: Metabasitas del Algarrobo: (●) = Gabros, doleritas and basaltos, (⊕) = Sills; Ofolitas Béticas: (☆) = basaltos de Córdar, (✱) = gabros de Córdar, (★) = basaltos de Lugros, (✱) = gabros de Lugros; basaltos enriquecidos en LREE de Ofolitas Alpino-Apenínicas: (◆) = Calabria, (▽) = Norte de los Apeninos, (⊞) = Balagne, (□) = Nebbio, (⊠) = Montgenèvre, (○) = Platta; basaltos de dorsal oceánica: valores medios para (✱) = E-MORB y (⊕) = N-MORB; (✱) and (☆) = E-MORB de la Dorsal Medio-Atlántica a 45°N y 63°N respectivamente.

Fig. 2.- Th : Tbx3 : Tax2 plot of Algarrobo metabasites, together with the ophiolitic metabasites and the mid-ocean-ridge basalts used for comparison, in Cabanis & Thieblemont's (1988) diagram. Key to symbols: Algarrobo metabasites: (●) = Gabros, dolerites and basaltos, (⊕) = sills; Betic ophiolites: (☆) = Córdar basalts, (✱) = Córdar gabbros, (★) = Lugros basalts, (✱) = Lugros gabbros; LREE-enriched basalts from Alpine-Apenine ophiolites: (◆) = Calabria, (▽) = Northern Apenines, (⊞) = Balagne, (□) = Nebbio, (⊠) = Montgenèvre, (○) = Platta; mid-ocean-ridge basalts: (✱) = E-MORB and (⊕) = N-MORB average values; (✱) and (☆) = E-MORB from mid-Atlantic ridge at 45°N and 63°N respectively.

que, de acuerdo con sus texturas ígneas preservadas, corresponden a: basaltos, gabros y rocas filonianas. Las últimas se presentan formando escasos diques, de espesor decimétrico a métrico, que intruyen indistintamente en gabros y basaltos, o bien se alojan formando sills entre los metasedimentos de la secuencia sedimentaria ofiolítica que recubre a los afloramientos de rocas básicas. Todos estos tipos de rocas ígneas están afectados por el metamorfismo y la deformación alpinos, al igual que las rocas de origen sedimentario encajantes, o en contacto tectónico con los cuerpos ígneos. Este metamorfismo transformó las paragénesis ígneas, total o parcialmente, en otras propias de la facies de las eclogitas que fueron, a su vez, en gran parte obliteradas por paragénesis correspondientes a la facies de las anfibolitas de albita-epidota.

Los resultados analíticos han sido representados en las figuras 2 a 4, junto con los valores medios de metabasitas de otros afloramientos ofiolíticos béticos o

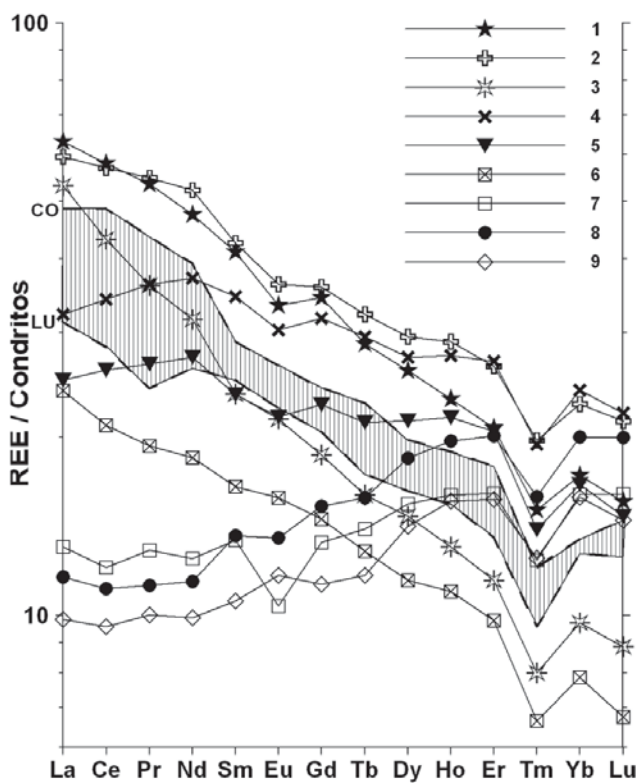


Fig. 3.- Curvas de tierras raras (REE) normalizadas a condritos de metabasitas del Algarrobo. Tipos de rocas analizados, ordenados según valores decrecientes de su contenido en La: n° 1= Ferrogabro eclogitizado, n° 2 = basalto anfibolitizado, n° 3 = dolerita parcialmente anfibolitizada, n° 4 = sill basáltico anfibolitizado, n° 5 = gabro eclogitizado, n° 6 = gabro eclogitizado y anfibolitizado, n° 7 = basalto vitrofídico ligeramente anfibolitizado, n° 8 = dolerita parcialmente anfibolitizada, n° 9 = gabro cumulítico eclogitizado. Zona rayada = Ofiolitas Béticas, límite superior (CO) = valores medios de los basaltos de Cóbdar, límite inferior (LU) = valores medios de los basaltos de Lugros.

Fig. 3.- Patterns of rare-earth elements (REE) normalized to chondrites in the metabasites from Algarrobo. Analyzed types of rocks, ordered following their decreasing La content: n° 1 = eclogitized ferrogabbro, n° 2 = amphibolitized basalt, n° 3 = partly amphibolitized dolerite, n° 4 = amphibolitized basaltic sill, n° 5 = eclogitized gabbro, n° 6 = eclogitized and amphibolitized gabbro, n° 7 = slightly amphibolitized vitrophyric basalt, n° 8 = partly amphibolitized dolerite, n° 9 = eclogitized cumulitic gabbro. Ruled area = Betic Ophiolites, upper limit (CO) = average values of Cóbdar basalts, lower limit (LU) = average values of Lugros basalts.

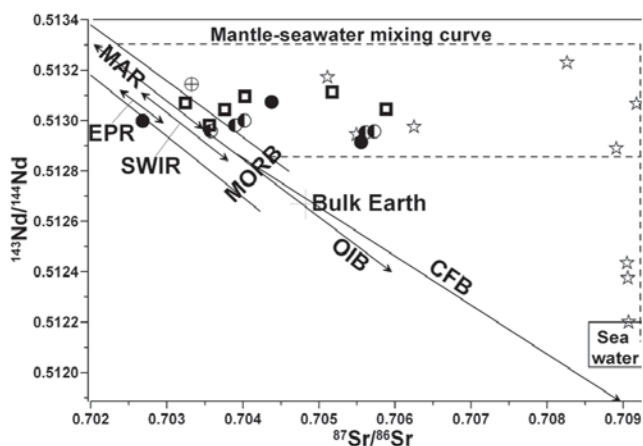


Fig. 4.- Razones isotópicas actuales de  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  vs.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en las metabasitas del Algarrobo comparadas con las de otras ofiolitas béticas y con las de peridotitas abisales (?) procedentes de varias zonas de fractura que afectan dorsales oceánicas (según datos de Snow et al., 1994). Las líneas discontinuas representan curvas de mezcla manto-agua oceánica calculadas por estos autores para las peridotitas

abisales representadas en esta figura. Clave de símbolos: Metabasitas del Algarrobo, (n) = Gabros, doleritas y basaltos, (L) = sills; Ofiolitas Béticas: (•) = metabasitas de Cóbdar, (◻) = metabasitas de Lugros. EPR = Cresta del Este del Pacífico, MAR = Dorsal Medio Atlántica; SWIR = Dorsal del Suroeste de la India; OIB = Basaltos de Islas Oceánicas; CFB = basaltos de inundación continental.

Fig. 4.- Present day  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  vs.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios in Algarrobo metabasites compared with other Betic Ophiolites and with abyssal peridotites (empty stars) (\*) occurring in several mid-ocean ridge fracture zones (data from Snow et al., 1994). Broken lines show mantle-seawater mixing curves calculated by these authors for the abyssal peridotites represented in this figure. Key to symbols: Algarrobo metabasites (•) = Gabbros, dolerites and basalts; (◻) = sills; Betic ophiolites: (•) = metabasic rocks from Cóbdar; (◻) = metabasic rocks from Lugros. MORB values for different present ridges: EPR (Eastern Pacific Rise), MAR (Mid Atlantic Ridge) and SWIR (South Western Indian Ridge); OIB values (Oceanic Island basalts); CFB values (Continental flood basalts).

alpino-apenínicos y de los diferentes tipos de magmas generados en las dorsales oceánicas. La procedencia de estos análisis, utilizados con fines comparativos con los de las metabasitas de la Sierra del Algarrobo, puede verse en Puga et al., 2004 b, 2009 y Puga, 2005.

La figura 2 muestra la proyección de todas las metabasitas del Algarrobo analizadas, procedentes de rocas intrusivas y efusivas, dentro del campo de los basaltos toleíticos y transicionales hacia alcalino sódicos, al igual que las rocas básicas ofiolíticas y los basaltos actualmente generados en las dorsales oceánicas que hemos utilizado para comparación. Los sills básicos que se emplazaron dentro de la secuencia sedimentaria ofiolítica que recubre a los cuerpos ígneos, durante un periodo de sedimentación oceánica subsecuente al del desarrollo de la etapa principal de magmatismo, presentan el mismo carácter toleítico y transicional que el resto de las rocas ígneas recubiertas por estos metasedimentos. La asignación de las metabasitas del Algarrobo a esta serie magmática es también corroborada, en algunas metabasitas con reliquias de la paragénesis ígnea bien conservada, por su orden de cristalización, consistente en: espinela, olivino, plagioclasa, clinopiroxeno, apatito y óxidos de Fe-Ti. La discriminación del ambiente de génesis de los magmas que originaron las metabasitas del Algarrobo, así como los de las rocas ofiolíticas y de dorsal oceánica utilizadas para comparación, se pone de manifiesto también en la figura 2. En esta figura, todo este conjunto de rocas se proyectan en el campo de las series magmáticas anorogénicas, compuestas por magmas básicos, de naturaleza toleítica o transicional, procedentes de un manto astenosférico y generados en el ambiente distensivo propio de las zonas de acreción de suelo oceánico de las dorsales. La mayor parte de las metabasitas del Algarrobo, tanto las que forman parte del conjunto ígneo infrayacente como las que se inyectan en sills en la secuencia sedimentaria que lo recubre, se proyectan en el campo de las rocas de dorsal tipo E-MORB, aunque algunas lo hacen dentro del campo de los magmas tipo N-MORB. Los magmas tipo E-MORB se originan actualmente en determinados puntos de la dorsal Atlántica (entre otras) y formaron parte también de las ofiolitas béticas y alpino-apenínicas procedentes del Océano Tethys occidental, como se muestra en la proyección de algunas de sus rocas en la figura 2, aunque los magmas tipo N-MORB son mas abundantes a lo largo de las dorsales oceánicas.

En la figura 3 se han representado solamente 9 análisis, representativos de todos los tipos de metabasitas presentes en la Sierra del Algarrobo, para mayor claridad. Los tipos de rocas a los que corresponden los análisis seleccionados se indican al pie de esta figura haciendo referencia a los números en la leyenda de la misma. Se han seleccionado curvas de REE que muestran las diferentes tendencias de estos elementos, lo que indica su procedencia de diferentes magmas, desde tipos E-MORB, con valores de la razón  $(La/Yb)_N$  comprendidos entre 5.5 y 2.6 (curvas 3 y 2), pasando por tipos T-MORB, con valores de esta razón próximos a la unidad (curvas 4 y 5), hasta tipos N-MORB, con valores  $(La/Yb)_N$  comprendidos entre 0.6 y 0.8 (curvas 7 a 9). Como puede verse en la figura 3 y su pie, no hay relación entre cada una de estas tendencias y el tipo de roca ígnea, intrusiva o efusiva, a la que corresponde el análisis, ni tampoco con el tipo o grado de transformación metamórfica que han experimentado las diferentes muestras de metabasitas analizadas. La comparación de los análisis de REE correspondientes a sills intrusivos en la secuencia sedimentaria (curvas 2 y 4), con el resto de las metabasitas de este afloramiento procedentes de gabros, basaltos y doleritas, muestra: a) su procedencia de magmas similares (tipo E-MORB a T-MORB) y b) un contenido en HREE ligeramente superior en los sills analizados, que puede interpretarse como la procedencia de sus magmas de una fuente mantélica algo más superficial. La comparación de las tendencias de las curvas de REE del Algarrobo con las representadas en la zona rayada, delimitada por los valores medios de los basaltos de las ofiolitas de Cóbdar (CO) y de Lugros (LU) (Puga, 2005; Puga *et al.*, 1995, 2009), muestra: a) una gran similitud de las metabasitas procedentes de magmas tipo E-MORB del Algarrobo, con los de los otros afloramientos de ofiolitas béticas, de las zonas central y occidental del CM, y b) la peculiaridad de la presencia de magmas tipo N-MORB en las metabasitas del Algarrobo (que son excepcionales en las otras ofiolitas béticas), que pudieron originarse a partir de una porción del manto superior más empobrecido en LREE, o bien durante un periodo más avanzado del proceso de desarrollo de estos magmas, a partir del mismo tipo de manto que previamente había generado los magmas tipo E-MORB.

La figura 4 muestra rangos de variación muy parecidos, tanto en las razones de isótopos de Sr como en las de Nd, entre

los diferentes tipos de metabasitas del Algarrobo y las procedentes de los afloramientos de ofiolitas de Cóbdar y Lugros. En estos tres afloramientos el rango de variación de las razones isotópicas de  $^{143}Nd/^{144}Nd$  está comprendido dentro del rango de valores propio de las dorsales actuales, mientras que la variación en las razones de  $^{87}Sr/^{86}Sr$  es mayor para algunas de estas metabasitas, sobre todo para las procedentes de basaltos, que presentan procesos de transformación metasomática en fondo oceánico (Puga *et al.*, 2002b). Esta mayor dispersión para las razones isotópicas del Sr puede interpretarse como una variación post-magmática debida a la interacción de las rocas con el agua oceánica. Snow *et al.*, (1994) interpretan la dispersión de las razones isotópicas de Sr de las peridotitas abisales, representadas en esta figura, por contaminación de las mismas con el agua oceánica actual cuya razón isotópica  $^{87}Sr/^{86}Sr$  es de 0.7092. En el caso de las ofiolitas del Algarrobo, a semejanza de los otros afloramientos de ofiolitas béticas, las variaciones de la razón isotópica del Sr podrían deberse a su contaminación con el agua oceánica del Jurásico, cuyas razones isotópicas  $^{87}Sr/^{86}Sr$  variaban entre 0.7072-0.7075, dado que la edad de la AOB se ha determinado como Jurásico inferior-medio, sobre circones del afloramiento de Lugros, mediante el método U/Pb con SHRIMP (Puga, 2005).

### Conclusiones

- 1) El estudio comparado de las litologías presentes en la Sierra del Algarrobo y de sus relaciones espaciales mutuas, con los complejos y unidades tectónicas previamente establecidos para el DNF en la zona centro-occidental, permite concluir que las metabasitas estudiadas forman parte de la Unidad Ofiolítica del CM y que están tectónicamente en contacto con los materiales que forman la Unidad de las Sabinas y la Formación Soportújar de este mismo complejo.
- 2) Las metabasitas del Algarrobo están formadas por eclogitas y anfibolitas, procedentes de gabros, basaltos y doleritas, así como de sills de naturaleza basáltica que se inyectaron entre los metasedimentos oceánicos que recubren los cuerpos ígneos.
- 3) Los magmas que originaron los diferentes tipos de metabasitas del Algarrobo son de naturaleza toleítica y su ambiente de génesis, variable entre tipo E-MORB y N-MORB, es el propio del magmatismo que

genera el suelo oceánico a lo largo de las dorsales actuales.

- 4) La gran similitud petrológica y geoquímica de las metabasitas del Algarrobo con las presentes en los otros afloramientos ofiolíticos béticos y alpino-apeñinicos comparados, permiten considerarlas como escamas tectónicas procedentes del extremo occidental del Océano Tethys, incorporadas al margen continental del CM durante la orogenia alpina.

### Agradecimientos

Los autores agradecen la crítica constructiva de J. M. Nieto y un revisor anónimo, así como la ayuda económica recibida a través del Proyecto BTE-2003-09808 y del Grupo de Investigación de la Junta de Andalucía RNM 333.

### Referencias

- Espinosa Gody, J.M., Martín Vivaldi, J.M., Martín Alapont, J.M. y Pereda, M. (1974). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 976 (Mazarrón)*. IGME.
- Guerrera, F., Martín-Algarra, A. y Perro-ner, V. (1993). *Terra Nova*, 5, 525-544.
- Manteca Martínez, J.I., Rodríguez Martínez-Conde, J.A., Puga, E. y Díaz de Federico, A. (2004). *Revista Sociedad Geológica de España*, 17, 1-2, 27-37.
- Puga, E. (1990). *Ofioliti*, 15, 97-111.
- Puga, E. (2005). *CROP 1* Volume. Ed. I.R. Finetti, University of Trieste, Italy, Elsevier, 665-704.
- Puga, E., Díaz de Federico, A. y Demant, A. (1995). *Terra Nova*, 7, 31-43.
- Puga, E., Nieto, J.M., Díaz de Federico, A., Portugal, M. y Reyes, E. (1996). *Eclogae Geologicae Helveticae*, 89, 1, 129-162.
- Puga, E., Díaz de Federico A. y Nieto, J.M. (2002a). *Geodinamica Acta*, 15, 23-43.
- Puga, E., Ruiz Cruz, M.D. y Díaz de Federico, A. (2002b). *Canadian Mineralogist*, 40, 67-83.
- Puga, E., Díaz de Federico, A., Nieto, J.M. y Díaz Puga, M. A., Rodríguez Martínez-Conde J. A. y Manteca Martínez J. I. (2004 a). *Geotemas*, 6, 101 - 104.
- Puga, E., Díaz De Federico, A., Manteca Martínez, J. I., Rodríguez Martínez Conde, J. A. y Díaz Puga, M. A. (2004b). *Ofioliti*, 29, 2, 213-230.
- Puga, E., Díaz de Federico, A., Nieto, J. M. y Díaz Puga, M.A. (2009). *Geohéritage*, 1, 1-
- Snow, J.E., Hart, S.R. y Dick, H.J.B. (1994). *Nature*, 371, 57-60.W