

# Caracterización geoquímica de las peridotitas del macizo de Sierra de Aguas (Málaga)

*Geochemical characterization of the peridotites from the Sierra de Aguas massif (Malaga)*

J. J. Esteban <sup>(1)</sup>, J. F. Santos <sup>(2)</sup>, J. Cuevas <sup>(1)</sup> y J. M. Tubía <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Dpto. de Geodinámica, Facultad de Ciencias, Universidad del País Vasco, ap. 644. 48080 Bilbao.

<sup>(2)</sup> Dpto. de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias, Universidad del País Vasco, ap. 644. 48080 Bilbao.

<sup>(\*)</sup> gpbeguj@lg.ehu.es

## ABSTRACT

*In order to constraint geochemical differences related to the petrogenesis of the Ronda peridotites, major and trace elements combined with chondrite normalized REE patterns of the Sierra de Aguas Massif peridotites, near Carratraca (Málaga), have been compared with the similar published data from Sierra Bermeja Massif. The results establish a well geochemical distinction between previously petrographically identified granular and porphyroclastic domains. The analyses also confirm that granular peridotites represent a more depleted mantle source than the porphyroclastics, apparently related with a fractional equilibrium melting process. Nevertheless, "U-shape" REE patterns and some REE ratios point to a more complex formation process.*

**Key words:** Betic Cordillera, Ronda peridotites, major and trace elements, REE.

Geogaceta, 36 (2004), 47-50

ISSN:0213683X

## Introducción y encuadre geológico

El calentamiento o la descompresión del manto pueden originar su fusión parcial (Green y Ringwood, 1964; Green y Ringwood, 1967), provocando con ello la segregación de fluidos basálticos que dan lugar a heterogeneidades composicionales y microestructurales. En las peridotitas de Ronda la existencia de tales heterogeneidades está probada por las diferencias composicionales entre las capas de piroxenitas (Dickey, 1970; Obata, 1980; Allègre y Turcotte, 1986) o de los distintos dominios microestructurales establecidos (van der Wal y Vissers, 1993; van der Wal y Bodinier, 1996). Algunos de estos dominios presentan evidencias de haber sufrido grados variables de fusión parcial y han sido interpretados, como un manto litosférico antiguo (peridotitas porfiroclásticas), recristalizado localmente por el efecto de la percolación de fluidos basálticos (peridotitas granulares recristalizadas) (van der Wal y Bodinier, 1996; Lenoir *et al.*, 2001).

Los macizos ultramáficos de Ronda (Fig. 1A) se localizan en la provincia de Málaga. Geológicamente se sitúan en la base del manto de Los Reales del Complejo Alpujarride, en las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas (Navarro-Vilá y Tubía, 1983). Estos macizos alóctonos, conforman los mayores afloramientos de

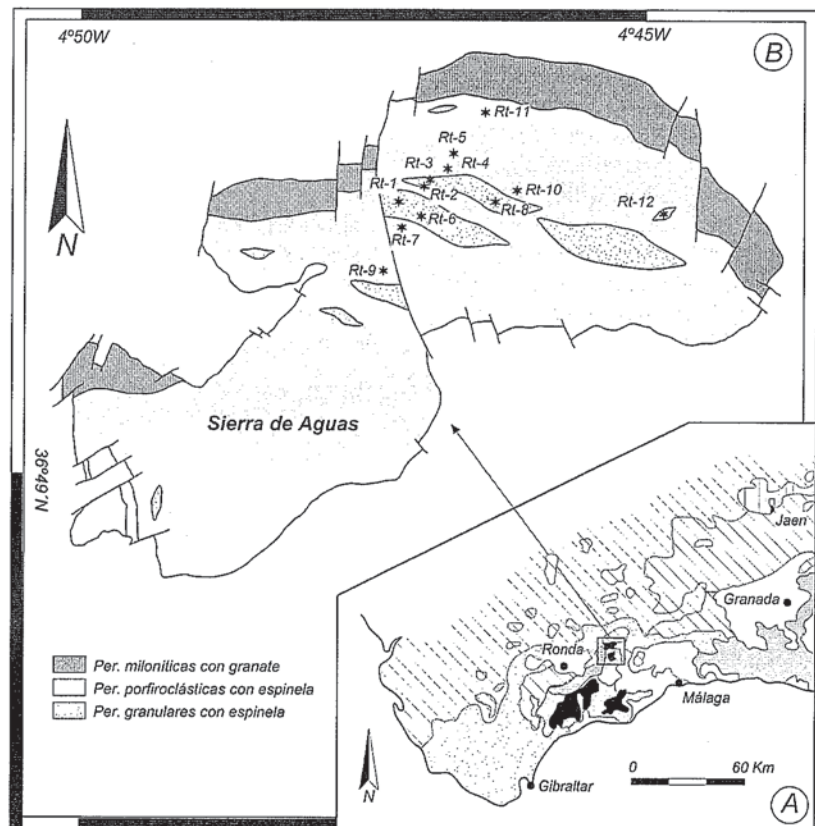


Fig. 1.- A) Localización geológica de las peridotitas de Ronda (negro) dentro las Cordilleras Béticas (Cuadrado: Macizo de Carratraca). B) Localización de las muestras analizadas en el macizo de Sierra de Aguas.

Fig. 1.- Geological location of the Ronda peridotites (black) within the Betic Cordilleras (Square: Carratraca Massif). B) Analyzed samples location from the Sierra de Aguas massif.

lherzolitas orogénicas del mundo (>450 km<sup>2</sup>) y son los únicos en los que coexisten las tres facies metamórficas definidas por O'Hara (1967). El macizo de Sierra de Aguas, el más septentrional de los dos que constituyen el denominado macizo de Carratraca (Fig. 1B), está constituido por tres dominios microestructurales formados por distintos tipos de peridotitas: granulares con espinela, porfiroclásticas con espinela, y miloníticas con granate (Fig. 1B).

En este trabajo presentamos los análisis químicos de roca total para elementos mayores, trazas y tierras raras (REE) realizados en muestras de los dominios granulares y porfiroclásticos de Sierra de Aguas. La elección de este macizo se justifica por el reconocimiento de facies granulares primarias, con relaciones cartográficas y estructurales bien determinadas (Esteban, 2003). Finalmente se compararán nuestros resultados con los publicados para el macizo de Sierra Bermeja (van der Wal y Bodinier, 1996; Lenoir *et al.*, 2001).

**Técnicas analíticas**

Se han analizado seis muestras de roca total de peridotitas granulares y otras seis de peridotitas porfiroclásticas (Tabla 1) del macizo de Sierra de Aguas (Fig. 1B). Los análisis han sido efectuados en el *Service d'Analyse de Roches et Mineraux* de la Universidad de Nancy (Francia), donde los elementos mayores han sido determinados mediante técnicas de ICP-AES ("inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry") y los elementos trazas y REE mediante ICP-MS ("inductively coupled plasma-mass spectrometry").

**Resultados de los análisis químicos de roca total**

Los resultados para elementos mayores, traza y REE, así como las composiciones modales, de las muestras analizadas están expuestos en la Tabla 1. Como norma general, las peridotitas de Sierra de Aguas presentan un elevado valor del LOI (pérdida al fuego), cercano al 10%, que refleja estados avanzados de serpentinización (30-55% de serpentina modal). Los bajos contenidos en SiO<sub>2</sub>, entre 39 y 42%, confirman el carácter ultrabásico de estas rocas y el índice de magnesio [Mg<sup>#</sup> = Mg/(Mg+ΣFe<sup>2+</sup>)], que varía de 0,89 a 0,91, es directamente correlacionable con la abundancia modal de olivino (Tabla 1). Por su parte, los elevados valores de MgO (35,11-40,29%) junto con los bajos valores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1,05-3,58%) o CaO (1,08-3,26%) indican, recalculándolos en base anhidra, su carácter residual respecto al manto primitivo de Hofmann (1988).

En diagramas de variación respecto al CaO, tanto para elementos mayores (e.j.: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Fig 2A y B) como trazas (e.j.: Yb<sub>n</sub> Fig 2C), se observan buenas correlaciones, así como un buen solapamiento de los análisis aquí presentados y parte de los de Sierra Bermeja (van der Wal y Bodinier, 1996; Lenoir *et al.*, 2001).

Los diagramas de variación respecto al MgO (no presentados) de elementos como el CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> muestran una correlación negativa, mientras que los de los elementos traza, Co ó Ni, son positivas, apoyando el comportamiento compatible de estos últimos durante la fusión del manto.

En el caso del diagrama CaO vs. MgO, y a partir de los criterios propuestos por Lenoir *et al.* (2001) para las peridotitas de Sierra Bermeja, se pueden discriminar geoquímicamente las facies texturales aquí estudiadas (Fig 2B), con relaciones CaO/MgO de 0,018-0,049 para las facies granulares y 0,035-0,093 para las porfiroclásticas.

Por lo que respecta a los contenidos en REE, normalizados para el chondrito C1 (Sun y McDonough, 1989) (Fig. 3), la mayoría de las peridotitas se caracterizan por: a) presentar patrones agotados en tierras raras ligeras (LREE), b) una disposición casi paralela entre los diferentes patrones y c) un descenso progresivo en los contenidos totales en REE desde las facies porfiroclásticas a las granulares. En detalle, se puede observar que las variaciones en el comportamiento de las LREE son más homogéneas, con relaciones (Ce/Sm)<sub>n</sub> entre 0,36 y 0,64, que el de las tierras raras pesadas (HREE) con relaciones (Eu/Yb)<sub>n</sub> de 1,07 en la muestra Rt-9 a 0,57 en la muestra Rt-12. Por último, cabe resaltar la existencia de dos muestras cuyos patrones difieren notablemente de los restantes: la muestra Rt-5 enriquecida en La y la Rt-8 en La, Ce, Pr y Nd (Fig. 3B).

**Discusión**

Las peridotitas estudiadas de Sierra de Aguas muestran una gran similitud con las peridotitas de Sierra Bermeja, tanto desde el punto de vista modal como composicional (Frey *et al.*, 1985; Remaïdi, 1993; van der Wal y Bodinier, 1996; Lenoir *et al.*, 2001). Esta similitud puede comprobarse en el gráfico CaO vs.

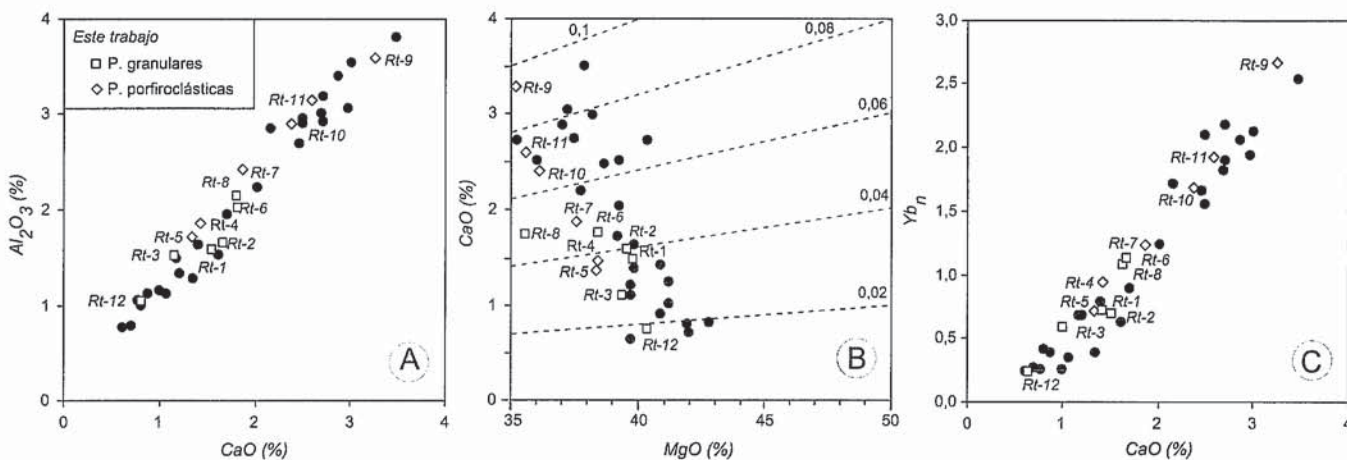


Fig. 2.- Diagramas de variación: A) CaO vs. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B) CaO vs. MgO, con sus isóneas representadas, C) CaO vs. Yb<sub>n</sub>. Se han representado con puntos negros los valores proporcionados en las tablas 1 y 2 de van der Wal y Bodinier (1996) y Lenoir *et al.* (2001).

Fig. 2.- Variation diagrams. A) CaO vs. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B) CaO vs. MgO, with its equilines, C) CaO vs. Yb<sub>n</sub>. Black dots represent geochemical data compiled from tables 1 and 2 of van der Wal & Bodinier (1996) and Lenoir *et al.*, (2001).

MgO (Fig. 2B), en el que Lenoir *et al.* (2001) señalan que las muestras con relaciones CaO/MgO <0,06 corresponden, por lo general, a peridotitas granulares recrystalizadas y porfiroclásticas. De lo observado se deduce que, excepción hecha de las muestras Rt-9, Rt-10 y Rt-11, las restantes se corresponden perfectamente con valores de CaO/MgO <0,06, para las rocas aquí identificadas petrográficamente y microestructuralmente como granulares primarias (Rt-1, Rt-2, Rt-3, Rt-6-Rt-8 y Rt-12) y porfiroclásticas (Rt-4, Rt-5 y Rt-7).

Los valores normalizados de las REE también han sido utilizados previamente para diferenciar tipos de facies petro-microestructurales en Sierra Bermeja (van der Wal y Bodinier, 1996; Lenoir *et al.*, 2001). Por comparación con los campos definidos por estos autores, podemos observar que las muestras Rt-1, Rt-2, Rt-3 y Rt-12, presentan patrones equivalentes a las peridotitas granulares recrystalizadas, mientras que las muestras Rt-9, Rt-10 y Rt-11 concuerdan con los de las peridotitas porfiroclásticas (Fig. 3). Las muestras Rt-4, Rt-6 y Rt-7 presentan la parte correspondiente de LREE similar a las de las porfiroclásticas, mientras que la parte de HREE es intermedia entre porfiroclásticas y granulares recrystalizadas.

Con respecto al origen de las peridotitas, en los diagramas de variación en relación con el MgO se observa que el quimismo de las peridotitas granulares es más residual, con contenidos superiores en MgO, Ni-Co e inferiores en CaO y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que las porfiroclásticas. Esta diferencia también es extrapolable desde el punto de vista modal; ambos subtipos corresponden a lherzolitas con espinela, si bien las granulares presentan composiciones más cercanas a las de harzburgitas que las porfiroclásticas, Ol:Opx:Cpx:Sp1 = 62:30:6:2 y 51:35:10:4, respectivamente. Estas características apuntan a que ambos tipos de rocas tendrían composiciones propias de un manto residual tras la extracción de un fundido, si bien, las peridotitas granulares corresponderían a residuos más agotados que los de las peridotitas porfiroclásticas.

El paralelismo entre los patrones de REE puede correlacionarse con el obtenido mediante modelos simples de procesos de fusión fraccionada en equilibrio. En este caso, las muestras de peridotitas granulares, con contenidos inferiores de REE, representarían rocas que han sufrido mayor grado de fusión que las peridotitas porfiroclásticas. Sin embargo,

Muestras	Rt-1	Rt-2	Rt-3	Rt-4	Rt-5	Rt-6	Rt-7	Rt-8	Rt-9	Rt-10	Rt-11	Rt-12
Tipo Textural	Gra.	Gra.	Gra.	Porf.	Porf.	Gra.	Porf.	Gra.	Porf.	Porf.	Porf.	Gra.
<b>Composiciones Modales</b>												
Olivino	43	41	37	30	25	33	24	14	33	26	25	31
Ortopiroxeno	12	12	13	16	13	13	20	24	31	14	20	21
Clinopiroxeno	4	3	3	4	3	5	6	5	8	5	5	3
Espinel	1	1	1	2	2	1	2	1	2	2	3	1
Opacos	0	0	0	1	1	0	2	5	0	1	1	0
Serpentina	40	43	46	48	56	47	46	53	29	49	47	44
<b>Elementos Mayores (%)</b>												
SiO <sub>2</sub>	39,92	40,11	39,05	38,96	39,22	39,70	39,90	42,36	41,73	39,83	39,63	39,75
TiO <sub>2</sub>	.....	.....	.....	.....	.....	0,06	0,06	.....	0,22	0,10	0,10	.....
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,60	1,66	1,53	1,86	1,72	2,03	2,42	2,16	3,58	2,89	3,14	1,05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,42	7,51	7,38	7,58	7,45	7,93	8,01	7,88	8,55	8,17	8,13	7,40
MnO	0,11	0,11	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11	0,11	0,10
MgO	39,69	39,48	39,28	38,38	38,28	38,32	37,50	35,41	35,11	36,03	35,51	40,29
CaO	1,47	1,58	1,08	1,42	1,34	1,75	1,86	1,73	3,26	2,38	2,58	0,72
Na <sub>2</sub> O	0,08	0,08	0,05	0,09	0,09	0,11	0,12	0,11	0,28	0,16	0,21	.....
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	.....	0,08	0,07	0,06	0,05	0,06	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,07
LOI	9,12	9,07	11,44	10,67	11,55	8,64	9,50	9,48	6,95	9,70	9,92	10,26
Total	99,41	99,68	99,98	99,13	99,81	98,71	99,56	99,31	99,87	99,43	99,39	99,64
Mg#	0,914	0,912	0,913	0,909	0,911	0,905	0,903	0,899	0,89	0,897	0,896	0,915
CaO/MgO	0,037	0,040	0,027	0,037	0,035	0,046	0,050	0,049	0,093	0,066	0,073	0,018
<b>Metales de Transición</b>												
Cr	2477	2499	2578	2606	2292	2408	2442	3058	2414	2256	2359	2138
Co	99,14	99,75	98,48	98,22	97,12	98,78	100,4	98,09	91,32	93,95	94,71	99,26
Ni	2484	2477	2446	2434	2495	2361	2434	2637	2121	2284	2244	2544
Cu	14,49	20,3	25,34	24,01	17,22	20,79	27,21	18,74	29,29	28,06	40,33	.....
Zn	49,28	47,32	50,34	48,89	47,75	50,84	52,31	49,74	53,16	51,37	55,57	45,1
<b>Elementos Traza (ppm)</b>												
Sr	.....	.....	5,421	.....	.....	5,106	6,438	.....	11,77	8,242	9,343	.....
Y	1,008	0,904	0,824	1,286	0,868	1,455	1,563	1,395	4,294	2,565	2,912	0,278
Zr	1,276	1,334	0,904	2,003	0,839	2,863	2,558	0,805	7,379	4,807	5,138	.....
La	0,033	0,044	0,024	0,051	0,086	0,095	0,078	0,096	0,183	0,151	0,133	0,010
Ce	0,126	0,146	0,084	0,21	0,190	0,336	0,284	0,092	0,861	0,541	0,500	0,030
Pr	0,025	0,024	0,014	0,034	0,024	0,058	0,052	0,025	0,172	0,095	0,093	0,005
Nd	0,165	0,152	0,091	0,222	0,112	0,332	0,312	0,133	1,069	0,517	0,568	0,036
Sm	0,076	0,065	0,042	0,098	0,042	0,132	0,136	0,064	0,419	0,235	0,247	0,020
Eu	0,031	0,026	0,020	0,043	0,018	0,054	0,058	0,029	0,166	0,100	0,103	0,008
Gd	0,116	0,099	0,076	0,153	0,076	0,195	0,209	0,118	0,64	0,349	0,368	0,031
Tb	0,022	0,02	0,015	0,030	0,016	0,037	0,039	0,025	0,109	0,063	0,07	0,006
Dy	0,154	0,141	0,114	0,220	0,121	0,261	0,274	0,200	0,730	0,442	0,471	0,046
Ho	0,038	0,034	0,028	0,051	0,032	0,061	0,065	0,052	0,154	0,091	0,104	0,011
Er	0,108	0,103	0,086	0,149	0,103	0,176	0,184	0,158	0,459	0,266	0,296	0,033
Tm	0,017	0,016	0,014	0,023	0,017	0,028	0,03	0,026	0,068	0,042	0,049	0,006
Yb	0,123	0,117	0,098	0,160	0,122	0,194	0,209	0,189	0,453	0,286	0,327	0,041
Lu	0,020	0,020	0,016	0,027	0,020	0,033	0,034	0,030	0,069	0,046	0,052	0,007
Hf	0,049	0,044	.....	0,065	.....	0,090	0,082	.....	0,266	0,155	0,157	.....
Eu/Eu*	1,01	0,99	1,08	1,07	0,97	1,03	1,05	1,02	0,98	1,07	1,04	0,98
(La/Lu) <sub>n</sub>	0,18	0,24	0,16	0,2	0,46	0,31	0,25	0,34	0,28	0,35	0,27	0,15
(Ce/Sm) <sub>n</sub>	0,41	0,56	0,50	0,54	1,13	0,64	0,52	0,36	0,51	0,58	0,51	0,38
(Eu/Yb) <sub>n</sub>	0,74	0,65	0,6	0,79	0,43	0,82	0,81	0,45	1,07	1,02	0,92	0,57

Tabla I.- Composiciones modales y análisis químicos de los diferentes grupos microestructurales de peridotitas de la Sierra de Aguas (Por.: porfiroclásticas; Gra.: granulares primarias). LOI: Pérdida al fuego, Mg#: Índice de magnesio.

Table I.- Modal compositions and chemical analyses of the different microstructural groups of peridotites of the Sierra de Aguas (Por.: porphyroclastic; Gra.: primary granular) LOI: loss on ignition, Mg#: Magnesium number.

la limitada variación en algunas relaciones de las REE, por ejemplo (Ce/Yb)<sub>n</sub>, junto con la presencia de patrones en forma de "U" de las muestras Rt-5 y Rt-8, apuntan a la existencia de procesos aún más complejos.

La similitud de los valores (Ce/Yb)<sub>n</sub> implica un comportamiento idéntico para las HREE y LREE, lo cual es difícil de compaginar debido a sus diferencias en el grado de compatibilidad, en relación con las diferencias de radio iónico existente entre ellas. Por su parte, los patrones en forma de "U" suelen estar asociados a procesos tan diferentes como interacción roca-fundido rico en REE, fusión parcial o transporte magmático

(ej.: Frey *et al.*, 1985; Navon y Stolper, 1987; Bodinier, 1988; McDonough y Frey, 1989; van der Wal y Bodinier, 1996), sin excluir procesos de removilización catiónica durante la serpentinización (O'Hanley, 1996).

## Conclusiones

La utilización de los datos geoquímicos de roca total a partir de muestras de la Sierra de Aguas, caracterizadas petrográficamente y microestructuralmente como peridotitas granulares primarias y porfiroclásticas, nos ha permitido diferenciar, "grosso modo", ambos tipos de muestras atendiendo a criterios geoquímicos. No

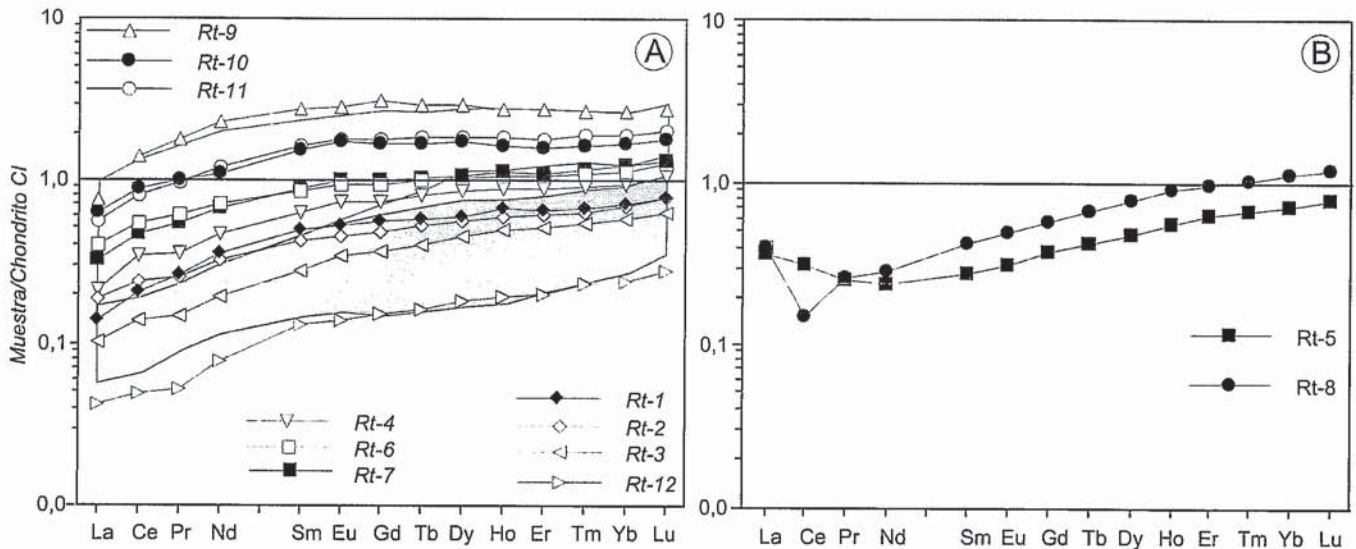


Fig. 3.- Diagramas normalizados (chondrito C1 de Sun y McDonough, 1989) para las tierras raras de las peridotitas de Sierra de Aguas. A) Comparados con los campos definidos para las peridotitas porfiroclásticas (gris claro) y granulares recrystalizadas (gris oscuro) de Lenoir *et al.* (2001). B) Detalle de las muestras Rt-8 y Rt-5.

Fig. 3.- Normalized-diagrams (chondrite C1 of Sun & McDonough, 1989) for the REE of the Sierra de Aguas peridotites. A) Compared to the defined field for the porphyroclastic (light gray) and granular recrystallized (dark gray) peridotites from Lenoir *et al.* (2001). B) Detail of the samples Rt-8 and Rt-5.

obstante, el solapamiento de los campos definidos por las peridotitas granulares primarias de Sierra de Aguas y por las granulares recrystalizadas de Sierra Bermeja, así como las pequeñas variaciones químicas existentes entre ellas, implican la necesidad de utilizar otros criterios (estructurales, petrográficos, geocronológicos...) para diferenciarlas con mayor precisión.

Respecto al origen de estas peridotitas, los datos geoquímicos indican que corresponden a peridotitas bastante agotadas, siendo las de tipo granular más residuales que las de tipo porfiroclástico, sin que sea posible establecer una relación genética entre ellas.

**Agradecimientos**

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación BTE 2001-0634 (Ministerio de Ciencia y Tecnología) y U.P.V. 00001.310-14478/2002.

**Referencias**

Allègre, C.J. y Turcotte, D.L. (1986): *Nature*, 323, 123-127.  
 Bodinier, J-L, (1988): *Tectonophysics*, 149, 67-88.  
 Dickey, J.S. (1970). *Mineral. Sp. Pub. Geol. Soc.*, 3, 33-49.  
 Esteban, J.J. (2003): *Tesis Doctoral*, Univ. del País Vasco, 322 p.  
 Frey, F.A., Suen, C.J. y Stockman, H.W. (1985): *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, 2469-2491.  
 Green, D.H. y Ringwood, A.E. (1964): *Nature*, 201, 1276-1279.  
 Green y Ringwood, (1967): *Earth Planet. Sci. Letters*, 3, 151-160.  
 Hofmann, A.W. (1988): *Earth Planet. Sci. Letters*, 90, 297-314.  
 Lenoir, X., Garrido, J.C., Bodinier, J.L., Dautria, J-M. y Gervilla, F. (2001): *Jour. Petrol.*, 42, 141-158.  
 McDonough, W.F. y Frey, F.A. (1989): *En: Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements* (Lipin, B.R. y McKay, G.A., Eds.), 99-145.  
 Navarro-Vilá, F. y Tubía, J.M. (1983): *C. R. Acad. Sci. Paris*, 296, 111-114.  
 Navon, O. y Stolper, E. (1987): *Jour. Geol.*, 95, 285-307.  
 O'Hanley, D.S. (1996): *Serpentinities. Records of Tectonic and Petrological History*. Oxford Monographs on Geology and Geophysics, 34, Oxford University Press, 277 p.  
 O'Hara, M.J. (1967): *En: Ultramafic and related rocks* (Wyllie P.J., Ed.), 393-401.  
 Obata, M. (1980): *Jour. Petrol.*, 21, 533-572.  
 Remaïdi, M. (1993): *Tesis Doctoral*. Univ. Montpellier II. 386 pp.  
 Sun, S.S., y McDonough, W.F. (1989): *Special Publication of the Geological Society*, 42, 313-345.  
 van der Wal, D. y Bodinier, J.L. (1996): *Contrib. Mineral. Petrol.*, 122, 387-405.  
 van der Wal, D. y Vissers, R.L.M (1993): *Geology*, 21, 1119-1122.