

SERPENTINIZACION DE LA PERIDOTITA DE RONDA (CORDILLERA BÉTICA) POR LA INTERACCION CON FLUIDOS RICOS EN VOLATILES: COMPORTAMIENTO DEL B

A. Acosta¹, M.D. Pereira², D.M. Shaw³, F. Bea¹

¹ *Departamento de Mineralogía y Petrología, Fuentenueva, Universidad de Granada, 18002 Granada, España.*

² *Departamento de Geología, Plaza de la Merced, Universidad de Salamanca, 37008 Salamanca, España.*

³ *Department of Geology, McMaster University, Hamilton, Ontario L8S 4M1, Canadá.*

Resumen: La peridotita de Ronda está cortada por una red de diques subverticales de leucogranito. En el contacto con los leucogranitos, la peridotita se encuentra serpentinizada por efecto de la alteración hidrotermal asociada a los fluidos liberados por el magma leucogranítico durante su ascenso. El contenido en B de los diferentes materiales implicados en el proceso de serpentización es muy diferente: la peridotita está completamente empobrecida en casi todos los casos, la serpentinita tiene valores bajos, y los diques intrusivos de leucogranito están fuertemente enriquecidos. La baja viscosidad del magma leucogranítico, debido en parte al alto contenido en B, hace que su ascenso sea rápido, de manera que la interacción química con la peridotita es mínima y, aunque la serpentinita siempre se encuentra enriquecida en B respecto a la peridotita, este enriquecimiento no puede compararse con el que se produce cuando la serpentización tiene lugar por efecto del agua de mar.

Palabras clave: Peridotita de Ronda, B, serpentización, Cordillera Bética.

Abstract: The Ronda peridotite is cut by a swarm of subvertical leucogranite dikes. The peridotite is serpentized in the contact with the leucogranites due to the hydrothermal alteration caused by the fluids evolved from the leucogranitic magma during its ascent. B content in all the rocks involved in the process is very different: the peridotite is barren in almost all cases, the serpentized peridotite has low concentrations, and the cutting leucogranites are highly enriched. The low viscosity of the leucogranitic magma, due in part to its high content of B, produced a quick ascent leading sometimes to a slight interaction with the country rock, and although a conspicuous enrichment of B is observed in serpentinite compared to the unaltered peridotite, the increase cannot be compared to the one produced when seawater-peridotite interaction takes place in the serpentization process.

Key words: Ronda peridotite, B, serpentization, Betic Cordillera, Spain.

Acosta, A., Pereira, M.D., Shaw, D.M. y Bea, F. (1997): Serpentización de la Peridotita de Ronda (Cordillera Bética) por la interacción con fluidos ricos en volátiles: comportamiento del B. *Rev. Soc. Geol. España*, 10 (3-4): 301-308.

La Peridotita de Ronda (Dickey y Obata, 1974; Obata, 1980) representa el mayor de los macizos ultramáficos aflorantes en el sector occidental de las zonas internas de la Cordillera Bética (Fig. 1). El conjunto de todos ellos ha sido denominado como «peridotitas de la Serranía de Ronda» (Tubía, 1985, 1988) o «macizos ultramáficos de la Serranía de Ronda» (Garrido, 1995). La composición de estos materiales es fundamentalmente lertzolítica y harzburgítica (Hernández Pacheco, 1967; Dickey, 1970; Tubía, 1985; 1988; Targuisti, 1994). Presenta grados variables de serpentización, especialmente en relación con fracturas localizadas dentro de los propios macizos o en los contactos con las rocas adyacentes.

Las características de la serpentización de una roca ultramáfica dependen de la composición de los

fluidos que la producen, incluyendo el contenido en volátiles de la roca alterada. Si los fluidos serpentizantes tienen origen oceánico, la serpentinita aumenta el contenido en volátiles (e.g. B) hasta valores muy elevados, comparados con la peridotita fresca. Pero cuando estos fluidos tienen un origen diferente, como por ejemplo la intrusión de un magma granítico enriquecido en volátiles, el contenido en B de la serpentinita dependerá directamente del contenido en B del magma que intruye. Intruidos en la peridotita de Ronda se encuentran diques de leucogranito caracterizados por altos contenidos en B. En muchos casos el contacto entre la peridotita y el leucogranito se produce a través de una banda decimétrica de serpentinita. La existencia de texturas aplíticas y pegmatíticas en los leucogranitos, así como de cavidades miarolíticas, in-

dica que durante la cristalización del magma se alcanzó la saturación en una fase fluida, hacia la cual se fraccionan fuertemente los elementos volátiles. La interacción entre esta fase fluida y la peridotita ha podido producir la serpentización de esta última en el contacto con los diques de leucogranito.

El estudio que aquí se presenta pretende determinar el comportamiento de un elemento volátil, el B, en un proceso de serpentización peculiar, donde la mayor intensidad de la alteración de la peridotita se produce de forma local, relacionada directamente con la intrusión de diques de leucogranito. Para ello se ha analizado mediante activación neutrónica el contenido en B de un amplio número de muestras, y específicamente en siete grupos formados cada uno por un leucogranito y la serpentinita y peridotita adyacentes.

Métodos analíticos

El análisis de B en roca total se realizó mediante activación neutrónica (Prompt Gamma Neutron Activation Analysis) en el reactor nuclear de la McMaster University. Se encapsularon 0,5 g de cada muestra en polvo en viales de teflón y se irradiaron en el reactor con un flujo de neutrones de $6 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. El periodo de irradiación fue de 10³ s. Simultáneamente se determinó la intensidad del pico producido en el detector correspondiente a la longitud de onda 478 keV (prompt gamma-ray peak), perteneciente al B, resultante a partir de las reacciones: $^{10}\text{B} + n = ^7\text{Li}^* + ^4\alpha$ y $^7\text{Li}^* = ^7\text{Li} + \gamma$ (Truscott y Shaw, 1984). El límite de detección es del orden de 0,3 ppm. Detalles sobre este método están descritos en Higgins *et al.* (1984) y Shaw y Smith (1991).

Para realizar los mapas de partículas radiactivas α (α -track images: ATI) se utilizó el reactor nuclear de la McMaster University, con un cañón de neutrones con un flujo de $10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, y un tiempo de irradiación de 12 minutos. El método está basado en el proceso que tiene lugar al producirse la reacción nuclear $^{10}\text{B} + n = ^7\text{Li} + ^4\alpha$. Más información sobre este método puede encontrarse en Shaw *et al.* (1988) y en Pereira y Shaw (1994, 1996).

Contexto geológico y materiales

La Peridotita de Ronda

La Peridotita de Ronda representa una porción de material del manto litosférico subcontinental, emplazada tectónicamente durante la orogenia Alpina sobre un conjunto de rocas metasedimentarias (Lundeen, 1978; Tubía, 1985, 1988) (Fig. 1). Tiene una extensión superficial de algo más de 300 km², lo que la convierte en uno de los afloramientos de material derivado del manto de mayor envergadura que se conoce sobre la Tierra. El espesor máximo del cuerpo peridotítico se ha estimado en unos 4,5 km (García Dueñas *et al.*, 1992).

La intrusión ultramáfica está situada entre dos conjuntos de rocas metasedimentarias: la Unidad de Casa-

res a techo y la Unidad de Blanca a muro (Hoeppener *et al.*, 1964) (Fig. 1). La Unidad de Blanca ha sido posteriormente dividida en dos nuevas unidades tectónicas: la Unidad de Guadaiza y la Unidad de Ojén (Navarro-Vila y Tubía, 1983; Tubía, 1985, 1988; Balanyá, 1991). Tanto la lámina peridotítica como las Unidades de Casares y de Blanca han sido asignadas al Complejo Alpujarride (zonas internas de la cadena) (Hoeppener *et al.*, 1964; Torres-Roldán, 1979; Tubía, 1988; Balanyá, 1991). Los contactos más antiguos aflorantes entre la peridotita y las rocas metasedimentarias corresponden a zonas de cizalla dúctil sinmetamórficas, con cinemática similar y espesor de unos 400 a 800 m (Tubía, 1985; Tubía y Cuevas, 1986; Tubía, 1988; Balanyá, 1991).

En la Unidad de Blanca la intensidad del metamorfismo aumenta hacia el contacto con la peridotita, desde facies anfibolita a facies granulita (Tubía, 1988; Sánchez-Gómez, 1997). En estas rocas se registra además un fenómeno de anatexia asociado a un evento metamórfico de bajas presiones y alta temperatura, pasándose desde migmatitas metatexiticas en las partes más alejadas de la peridotita a diatexitas nebulíticas y diatexitas homogéneas cerca del contacto (Torres-Roldán, 1983; Tubía, 1985, 1988). Composicionalmente se han distinguido dos tipos de migmatitas: pelíticas y cuarzo-feldespáticas. Las primeras tienen una composición típica de rocas pelíticas, y las segundas de granitos. Los valores medios del índice de saturación en aluminio ($\text{ISA} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$) son de 2,41 para las diatexitas pelíticas y de 1,24 para las diatexitas cuarzo-feldespáticas.

Los diques de leucogranito

La peridotita de Ronda está atravesada por numerosos diques de composición esencialmente leucogranítica (Figs. 1 y 2), con espesores que varían desde unos pocos centímetros a unos 10 m. Uno de estos leucogranitos ha sido datado mediante el método Rb-Sr, obteniéndose una edad de $22 \pm 4 \text{ Ma}$ y una relación inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7219$ (Priem *et al.*, 1979).

Los leucogranitos están formados por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, turmalina, cordierita y biotita. De forma accesoria pueden presentar moscovita, sillimanita, andalucita, apatito, circón, monacita, xenotima, ilmenita, uraninita, brannerita, uranospherita, ortosilicato de Th (posible huttonita), columbo-tantalita, rutilo, titanita, piritita, arsenopirita, galena y barita (Acosta y Menéndez, 1995). Las zonas de borde y apófisis de algunos diques de leucogranito, así como ciertos diques leucocráticos de espesor centimétrico a decimétrico, están formados esencialmente por plagioclasa y en menor medida anfíbol. Estas rocas no tienen una textura típica de rocas ígneas; las hemos denominado leucodioritas.

Los leucogranitos de Ronda se caracterizan por tener altos contenidos en SiO₂ (media=75,8%), bajos en FeO_{total} + MgO + TiO₂ (media=0,9%) y ΣREE (media=44,4 ppm). En la mayor parte de los casos son lige-

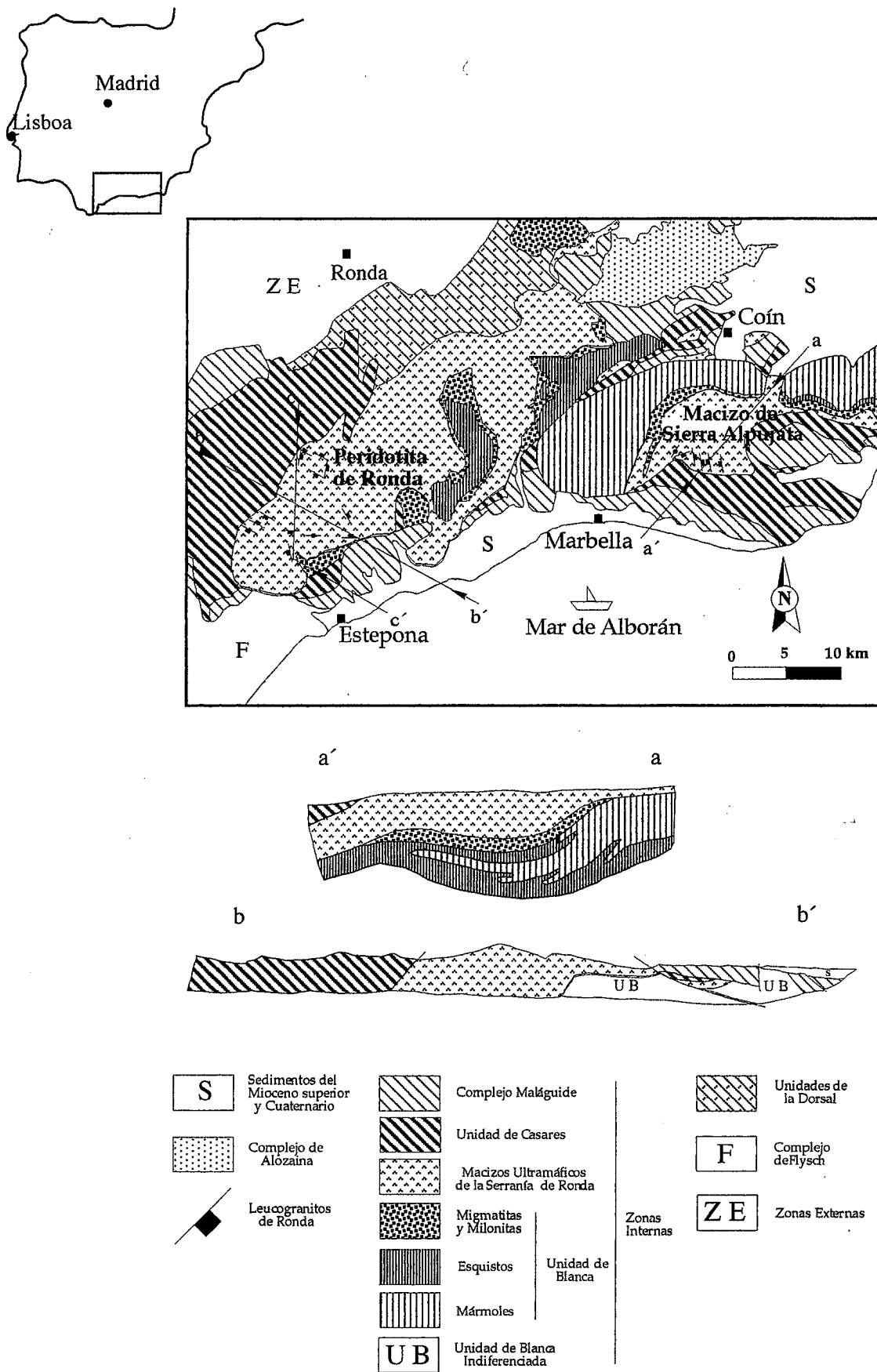


Figura 1.- Localización de los macizos ultramáficos de la Serranía de Ronda en la Cordillera Bética. En los cortes a-a' y b-b' se visualiza la posición de la peridotita con respecto al resto de los materiales (modificado de Tubía (1985) y Balanyá y García-Dueñas (1991))

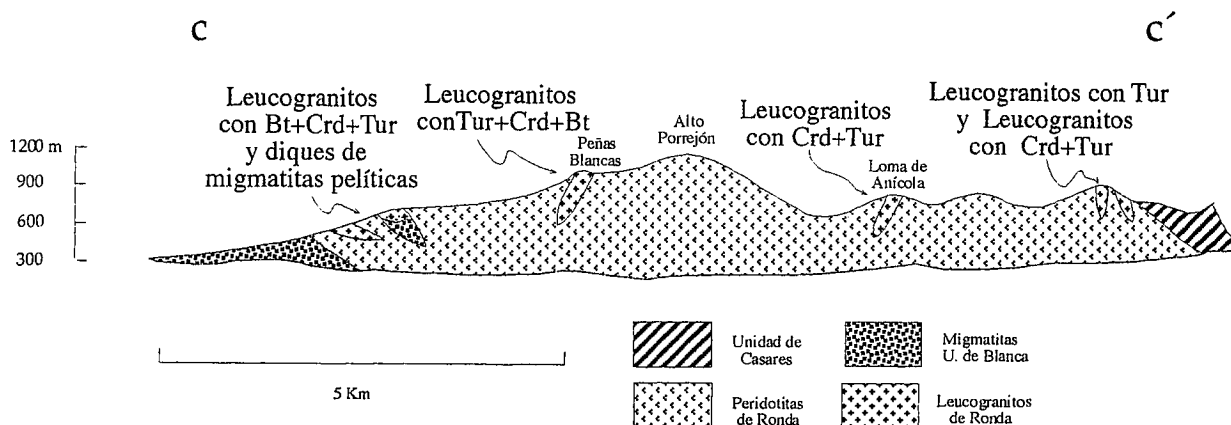


Figura 2.- Esquema ideal de un corte a través de la Peridotita de Ronda. El cuerpo ultramáfico está cortado por infinidad de diques subverticales de leucogranito. Obsérvese la relación entre la mineralogía de los leucogranitos y la altura de su emplazamiento dentro de la lámina de peridotita (sección c-c' de la figura 1)

ra o moderadamente peraluminicos ($ISA=1,25-0,89$, media 1,06). Las concentraciones en B, aunque variables, llegan a ser muy altas (hasta 1257 ppm, media 421 ppm).

Las leucodioritas se caracterizan por tener bajos contenidos en SiO_2 , FeO y K_2O (medias de 59,4%, 0,8% y 0,5% respectivamente) y altas concentraciones en Al_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , Sr , Cr y Ni . El valor $ISA=0,69-0,98$. Presentan anomalía positiva de Eu (media=1,3).

En la Peridotita de Ronda (Fig. 1) se ha observado una clara relación entre mineralogía y textura de los leucogranitos, y la altura topográfica a la que se encuentran intruidos dentro del cuerpo de peridotita (Fig. 2). Cerca de la base de la peridotita se han encontrado diques compuestos, formados por migmatitas diatexiticas de composición pelítica, similares a las que afloran bajo la peridotita, y por leucogranito con cordierita±biotita. El leucogranito ocupa la parte superior o central de los diques. El contacto entre ambos es gradual. También en la parte inferior de la lámina afloran diques de leucogranito con biotita y cordierita, que contienen turmalina reemplazando a los minerales anteriores. Incluyen abundantes nódulos oscuros con tamaño variable desde algunos milímetros hasta un centímetro, formados por un agregado de biotita+sillimanita+cordierita, con mineralogía y textura similar a agregados presentes en las migmatitas infrayacentes.

Hacia la parte media de la intrusión peridotítica, los leucogranitos contienen cordierita y turmalina. La biotita es muy escasa y está a veces reemplazada por turmalina. Tanto estos leucogranitos como los intruidos hacia la base de la lámina ultramáfica tienen texturas hipidiomórficas equigranulares o porfídicas, y pueden estar afectados por una foliación subparalela a los bordes del dique.

Los leucogranitos que intruyen cerca del techo de la intrusión de peridotita contienen turmalina±cordierita. La turmalina puede presentarse como idiomórfica o

xenomórfica. La textura de estas rocas es frecuentemente aplítica y pegmatítica, y abundan las cavidades miarolíticas. Ocasionalmente también presentan texturas luxulianíticas.

Los leucogranitos de Ronda representan fundidos generados por la anatexia de los metasedimentos (Unidad de Blanca) situados bajo la peridotita. Esta anatexia está probablemente asociada a la alta temperatura de emplazamiento del cuerpo ultramáfico ($900\pm 100^\circ C$, Tubía, 1985; Tubía y Cuevas, 1986; Tubía, 1988). La alta concentración en B en los leucogranitos indica una zona fuente enriquecida en este elemento. Así, los metasedimentos de la Unidad de Blanca podrían haber contenido una notable proporción modal de turmalina, que reaccionó con el fundido durante el proceso de fusión parcial. Por otra parte, Torres-Roldán (1978) describe bandas de silicatos cálcicos con escapolita en la Unidad de Blanca, y las interpreta como niveles de material evaporítico (usualmente rico en B) en la secuencia sedimentaria original. Así, fluidos enriquecidos en B, generados durante el calentamiento de la Unidad de Blanca, han podido ascender y concentrarse próximos a la zona de contacto con la peridotita, y junto a las altas temperaturas habrían favorecido la anatexia de los metasedimentos. La movilización del B cuando un gran complejo ultramáfico intruye desde el manto ha sido descrita en otros estudios, aunque en un contexto diferente, donde está presente una clara interacción con el agua del mar (i.e., complejo ultramáfico de Bolívar, al SW de Colombia; Nivia, 1996).

Los fundidos intruyeron a la peridotita en forma de diques, provocando la serpentización local de la misma. Los fundidos inyectados en la parte basal de la porción ultramáfica arrastraron proporciones variables de restitas, encontrándose en algunos casos a la propia migmatita intruida en la peridotita. La baja viscosidad de los fundidos enriquecidos en volátiles, del mismo modo que la alta temperatura generada por el emplazamiento del cuerpo de peridotita, favoreció procesos ta-

Tabla I.- Distribución de boro en una secuencia granito-serpentinita-peridotita en el macizo de Ronda

	B-146-P	B-146-S	AC-146	B-34-P	B-34-S	AC-92	B-65-P	B-65-S	AC-65	B-72-P	B-72-S	AC-102
SiO ₂	37.05	41.75	75.51	41.21	45.06	76.79	38.64	39.82	78.22	39.89	40.59	77.88
TiO ₂	0.01	0.02	0.06	0.14	0.36	0.08	0.06	0.15	0.03	0.09	0.07	0.02
Al ₂ O ₃	0.97	1.78	13.41	2.01	4.43	12.75	0.89	2.98	12.36	2.02	2.14	12.53
FeO _t	7.71	7.73	0.56	7.84	7.88	0.54	7.37	7.68	0.32	7.64	7.98	0.25
MgO	39.74	34.32	0.19	40.73	30.23	0.23	41.89	35.61	0.18	39.12	35.63	0.13
MnO	0.15	0.14	0.02	0.14	0.13	0.02	0.13	0.14	0.01	0.14	0.16	0.01
CaO	0.93	0.08	0.61	1.69	1.91	0.69	0.66	0.95	0.61	1.69	0.71	0.57
Na ₂ O	0.00	0.00	3.90	0.07	0.13	3.85	0.00	0.12	4.06	0.23	0.26	3.91
K ₂ O	0.00	0.00	4.62	0.00	0.02	4.66	0.00	0.01	3.73	0.00	0.01	4.48
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.12	0.00	0.01	0.07	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.03
LOI	12.81	13.36	0.20	5.67	9.07	0.3	9.97	12.05	0.33	8.79	11.73	0.31
B	u.d.l.	16	619	u.d.l.	16	211	u.d.l.	47	537	u.d.l.	36	132

B-#-P y B-#-S son peridotitas y serpentinitas, respectivamente.

AC-# son leucogranitos de grano fino y medio con turmalina.

Los análisis se expresan en % en peso para los óxidos y en ppm para el B.

u.d.l. = por debajo del límite de detección

Tabla I.- (cont.)

	B-116-P	B-116-S	AC-116	B-71-P	B-71-S	AC-100	B-72-3P	B-72-3S	AC-104
SiO ₂	40.59	58.70	76.51	41.35	40.87	75.94	41.21	41.11	76.11
TiO ₂	0.15	0.09	0.03	0.14	0.12	0.03	0.19	0.08	0.02
Al ₂ O ₃	2.73	2.13	13.07	2.71	3.26	13.36	3.61	2.70	12.96
FeO _t	7.95	4.36	0.31	8.12	8.37	0.14	8.28	8.16	0.14
MgO	37.82	29.09	0.17	38.63	33.08	0.24	34.95	34.65	0.20
MnO	0.14	0.04	0.01	0.14	0.15	0.00	0.14	0.12	0.00
CaO	2.25	0.03	0.69	2.25	1.06	0.64	2.99	0.85	0.55
Na ₂ O	0.25	0.00	3.43	0.16	0.95	5.38	0.23	0.04	4.21
K ₂ O	0.00	0.00	5.30	0.00	0.05	3.51	0.00	0.00	4.32
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.08	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00	0.03
LOI	8.17	5.46	0.45	6.19	11.85	0.29	7.78	11.42	0.32
B	u.d.l.	u.d.l.	13	u.d.l.	42	14	3	35	61

les como desmezcla de restitas, diferenciación y la contaminación del fundido leucogranítico con material procedente de las peridotitas. El B presente en el líquido en el momento de la saturación en la fase fluida se particionaría hacia ésta, de manera que el contenido en B actual en parte de los leucogranitos es menor al que existía inicialmente y que enriqueció los fluidos que dieron lugar a la serpentización local visible en el contacto entre la peridotita y los leucogranitos.

Geoquímica del B en las litologías de Ronda

Se ha determinado el contenido de B en muestras de diferentes litologías del macizo de Ronda. En general, los valores de este elemento en las leucodioritas son bajos (media \approx 5 ppm). La concentración de B en la peridotita casi siempre está por debajo del límite de detección (media \approx 0,5 ppm), lo que concuerda con el comportamiento incompatible de este elemento, mientras que en la serpentinita puede alcanzar valores de 50 ppm (media \approx 27 ppm). Las migmatitas tienen un contenido de B relativamente alto (media \approx 30 ppm) comparado con la media obtenida para otras migmatitas de edad hercínica (e.g. migmatitas de la Peña Negra: media \approx 20 ppm; Pereira y Shaw, 1997). La influencia de

un protolito enriquecido en B para las migmatitas de Ronda es factor definitivo en el proceso de segregación de leucogranitos con altos contenidos en este elemento.

Los leucogranitos con turmalina están altamente enriquecidos en B (Fig. 3), de la misma manera que los leucogranitos cordieríticos con turmalina. Está claro que en estas rocas el contenido en B está directamente asociado al contenido en turmalina y no a otras fases minerales (Pereira y Shaw, 1994, 1996, 1997). El análisis de radiación alpha en muestras seleccionadas de leucogranito confirman esta observación (Fig. 4).

Se han seleccionado un grupo de muestras que definen una secuencia de alteración hidrotermal (leucogranito, serpentinita y peridotita) para estudiar el comportamiento del B en el proceso de serpentización asociado espacialmente a los leucogranitos. La tabla I muestra que la concentración de este elemento es muy elevada en casi todos los granitos analizados. Sólo una muestra de leucogranito cordierítico muestra un valor relativamente bajo (13 ppm). En este caso el contenido en B en la serpentinita, y por supuesto la peridotita, están por debajo del límite de detección. Sin embargo, en otros casos donde el contenido en B del granito llega a varios cientos de ppm, la serpentinita

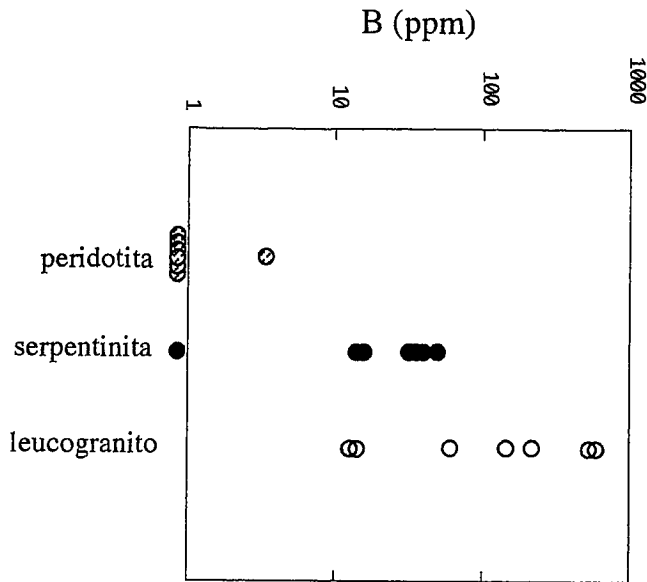


Figura 3.- Distribución de boro (ppm) en una secuencia de serpen-tinización: leucogranito-serpentinita-peridotita (estudio a partir de 7 trófos)

está relativamente enriquecida e incluso en un caso (la aplita AC-104) la peridotita sin apenas alteración contiene unas pocas ppm de B. Esta aplita contiene escasa turmalina y parece que todo el posible B que estuviera contenido en el magma leucocrático haya escapado junto con el fluido exuelto, antes de que se produjera una cristalización notable de turmalina a partir del líquido. Este B podría haber ido a parar totalmente al proceso de serpen-tinización. El contraste en la distribución de B en la secuencia de serpen-tinización puede observarse en la figura 3.

De la comparación de los valores de B en leucogranitos y su serpentinita asociada, se observa, en general, una ligera correlación negativa entre ambos. Así, los leucogranitos AC-100, AC-104 y AC-102, con contenidos menores en B, están asociados a serpentinitas con los valores más altos de este elemento. Estos leucogranitos presentan además texturas aplítico-pegmatíticas y abundantes cavidades miarolíticas, indicativas de saturación en una fase fluida. En cambio, los leucogranitos AC-92 y AC-146, con los mayores contenidos en B, están asociados a serpentinitas con los valores más bajos en este elemento. En este caso son leucogranitos con textura hipidiomórfica.

Discusión y conclusiones

La serpen-tinización se produce por la interacción de una peridotita con fluidos enriquecidos en volátiles (e.g. B, Thompson y Melson, 1970). Sin embargo, el comportamiento del B en el proceso de serpen-tinización de una peridotita dependerá de la naturaleza de los fluidos. Cuando estos fluidos están relacionados con el

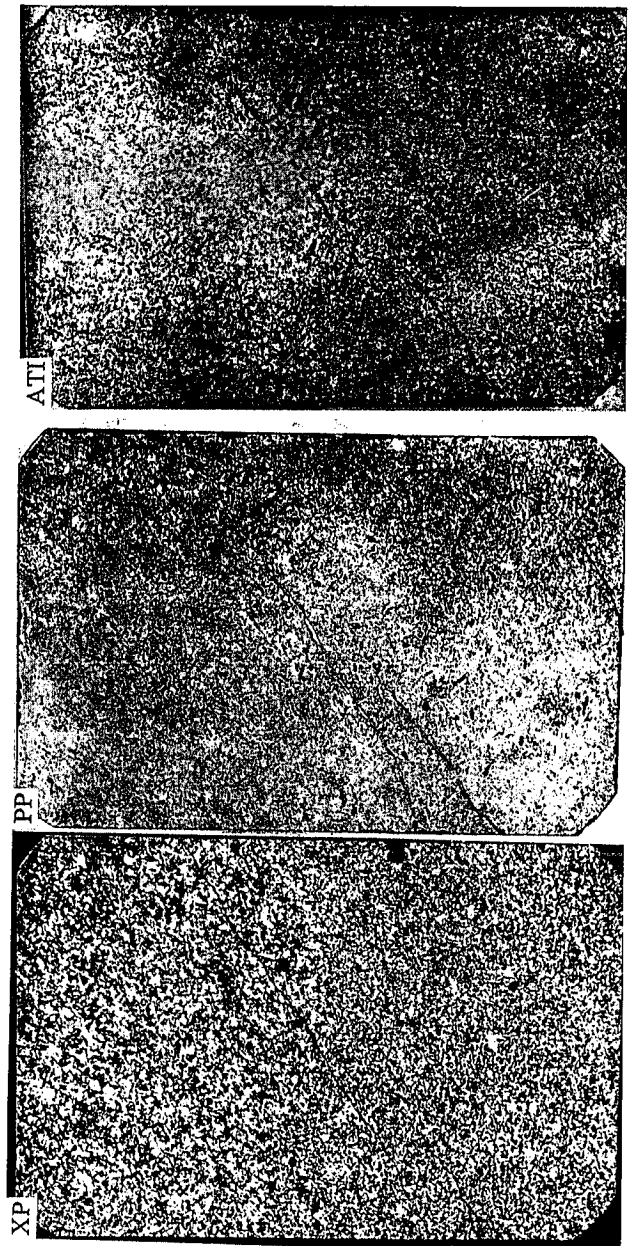


Figura 4.- Vista de una sección delgada de un leucogranito con turmalina (nicoles cruzados XP; nicoles paralelos PP; imagen de partículas alpha ATI). Los prismas oscuros en PP son turmalina, que forma del 2 al 5% de la roca (en ATI se ven gris oscuro). La línea transversal negra en ATI corresponde a una vena de serpentinita, con alto contenido en B. El contenido en B de la muestra es 537 ppm. Escala 3 = 0,5 cm.

agua del mar, la serpen-tinización producida se deriva en un aumento en el contenido de B hasta valores superiores a 10 veces los contenidos en la peridotita sin alterar. Pero si estos fluidos tienen un origen diferente, como por ejemplo la intrusión de diques graníticos enriquecidos en volátiles y por tanto de baja viscosidad, parece que el contenido de B de la serpentinita depende directamente del contenido de B en el granito que intruye: si el granito tiene un valor alto de este elemento, valores altos serán detectados en la serpentinita,

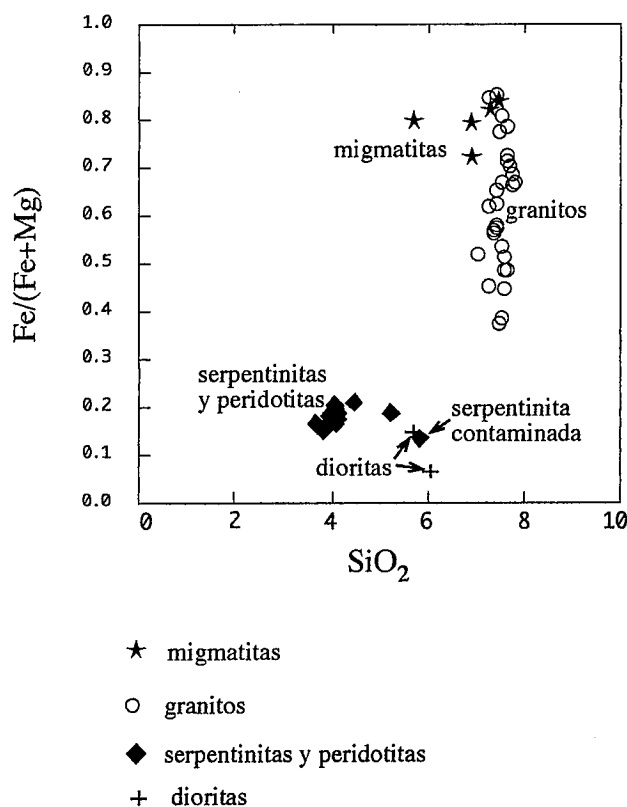


Figura 5.- SiO₂ frente a la relación Fe/(Fe+Mg) (ambos en %) para las principales litologías descritas en el macizo ultramáfico de Ronda. La situación de los leucogranitos en el diagrama evidencia su origen a partir de la fusión parcial de las migmatitas. Las rocas ultramáficas (peridotitas y serpentinitas) apenas tienen intercambio químico con las anteriores en cuanto a estos elementos.

aunque nunca alcanza los niveles producidos en la serpentinitización por contacto con el agua de mar (hasta 100 ppm, Seyfried and Dibble, 1980; Seyfried *et al.*, 1984; Bergeron, 1989).

En Ronda, el emplazamiento de una lámina de peridotita durante la orogenia Alpina causó la fusión parcial de los materiales corticales subyacentes. La intrusión de estos fundidos graníticos en las peridotitas provocó la serpentinitización local de éstas, pero debido a su baja viscosidad, y por tanto su rápido ascenso (Petford *et al.*, 1994), el intercambio químico entre las litologías fue escaso (Fig. 5) y la concentración de B en la serpentinita es relativamente baja. De la comparación de los análisis de B realizados en una secuencia leucogranito-serpentinita-peridotita, se observa la baja interacción en cuanto a B se refiere entre la peridotita alterada hidrotermalmente y el leucogranito que intruye, aunque si el contenido en B del leucogranito es excepcionalmente alto, la serpentinita producida está de algún modo enriquecida en este elemento. La magnitud de este enriquecimiento parece estar controlada además por la capacidad del propio magma granítico en conservar el B. Si el contenido en volátiles del fundido es tal que la saturación en una fase fluida se produce temprana en la historia de cristalización, el B es-

capará del fundido y se particionará hacia el fluido (Pichavant, 1981; London *et al.*, 1988) antes de que se produzca una cristalización notable de turmalina.

Por tanto, podemos concluir que el enriquecimiento en B de una peridotita alterada (serpentinita) está en proporción directa con la composición de los fluidos que producen la alteración, cuando estos fluidos no tienen su origen en el agua oceánica. El bajo contenido en B que se ha observado en la ligera serpentinitización generalizada de la peridotita de Ronda está en consonancia con las hipótesis de emplazamiento de este material ultramáfico, según las cuales la peridotita nunca estuvo expuesta directamente a la interacción con las aguas oceánicas (Bonatti *et al.*, 1984; Houseman, 1996; Seber *et al.*, 1996).

Los análisis de B por activación neutrónica fueron realizados en el reactor nuclear de la McMaster University, en Canadá. Los autores agradecen el trabajo de revisión del manuscrito a J.P. Calvo Sorando, J.L. López Ruiz y un revisor anónimo. Este trabajo ha sido financiado por los proyectos NSERC de D.M. Shaw y CICYT-PB-95-1266 del gobierno español.

Bibliografía

- Acosta, A. y Menéndez, L.G. (1995): Melting and generation of leucogranites associated with the emplacement of Ronda peridotites. En: *The Origin of Granites and Related Rocks* (M.Brown y P.M.Piccoli, Eds.), *United States Geological Survey Circular* 1129, p.7-8.
- Balanyá, J.C. (1991): *Estructura del dominio de Alborán en la parte norte del Arco de Gibraltar*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, pp. 210.
- Balanyá, J.C. y García Dueñas, V. (1991): Estructura de los Mantos Alpujarrides al W de Málaga (Béticas, Andalucía). *Geogaceta*, 9: 30-33.
- Bergeron, M. (1989): Distribution et comportement du bore dans la croûte océanique. *Can. J. Earth Sci.*, 26: 782-790.
- Bonatti, E., Lawrence, J.R. y Morandi, N. (1984): Serpentinization of oceanic peridotites: temperature dependence of mineralogy and boron content. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 70: 88-94.
- Dickey, J.S. (1970): Partial fusion products in Alpine-type peridotites: Serranía de Ronda and other examples. *Mineral. Soc. Am., Spec. Paper*, 3: 33-49.
- Dickey, J.S. y Obata, M. (1974): Graphitic hornfels dikes in the Ronda high-temperature Peridotite Massif. *Am. Mineral.*, 59: 1183-1189.
- García Dueñas, V., Balanyá, J.C. y Martínez Martínez, J.M. (1992): Miocene extensional detachments in the outcropping basement of the northern Alborán Basin (Betics) and their tectonic implications. *Geo-marine Letters*, 12: 88-95.
- Garrido, C.J. (1995): Estudio geoquímico de las capas máficas del macizo ultramáfico de Ronda (Cordillera Bética, España). Tesis Doctoral, Universidad de Granada, pp. 273.
- Hernández-Pacheco, A. (1967): Estudio petrográfico y geoquímico del macizo ultramáfico de Ojén (Málaga). *Estud. Geol.*, 23: 85-143.
- Higgins, M.D., Truscott, M.G., Shaw, D.M., Bergeron, M., Buffet, G.H., Copley, J.R.D., y Prestwick, W.V. (1984): Prompt-Gamma Neutron Activation Analysis at McMaster Nuclear Reactor. *Atomkern-energie Kerntechnik*, 44: 690-

- 697.
- Hoepfner, R., Hoppe, P. Mollat, H., Muchow, S. y Kockel, F. (1964): Über den westlichen Abschnitt der Betschen Kordilleren und seine Beziehungen zum Gesamtrogen. *Geologische Rundschau*, 53: 269-296.
- Houseman, G. (1996): From mountains to basin. *Nature*, 379: 771-772
- London, D., Hervig, R.L. y Morgan, G.B. (1988): Melt-vapor solubilities and element partitioning in peraluminous granite-pegmatite systems: Experimental results with Macusani glass at 200 MPa. *Contrib.Mineral. Petrol.*, 99: 360-373.
- Lundeen, M.T. (1978): Emplacement of the Ronda peridotite, Sierra Bermeja, Spain. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 89: 172-180.
- Navarro-Vila, F. y Tubía, J.M. (1983): Essai d'une nouvelle différenciation des Nappes Alpujarrides dans le secteur occidental des Cordillères Bétiques (Andalousie, Espagne). *C. R. Acad. Sc. Paris*, 296 (II): 111-114.
- Nivia, A. (1996): The Bolivar mafic-ultramafic complex, SW Colombia: the base of an obducted oceanic plateau. *J. South Am. Earth Sci.*, 9: 59-68.
- Obata, M. (1980): The Ronda peridotite: garnet-, spinel- and plagioclase-lherzolite facies and the P-T trajectories of a high-temperature mantle intrusion. *J. Petrol.*, 21: 533-572.
- Pereira, M.D. y Shaw, D.M. (1994): Imágenes de partículas á en el análisis de la microdistribución de boro y litio en los materiales de un complejo anatético: La Peña Negra (Batolito de Avila). *Rev. Soc. Geol. España*, 7: 311-319.
- Pereira, M.D. y Shaw, D.M. (1996): Distribution of boron and lithium using alpha-track images in samples from an anatectic complex. *Am.Mineral.*, 81: 141-145.
- Pereira, M.D. y Shaw, D. M. (1997): Behaviour of boron in the generation of an anatectic complex: the Peña Negra complex, central Spain. *Lithos*, 40: 179-188.
- Petford, N., Lister, J.R. y Kerr, R.C. (1994): The ascent of felsic magmas in dykes. *Lithos*, 32: 161-168
- Pichavant, M. (1981): An experimental study of the effect of boron on a water saturated haplogranite at 1 Kbar vapour pressure. geological applications. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 76: 430-439.
- Priem, H.N.A.K., Boelrijk, N.A.I.M., Hebeda, E.H., Oen, I.S., Verdurmen, T.E.A. y Verschure, R.H. (1979): Isotopic dating of the emplacement of the ultramafic masses in the Serranía de Ronda, southern Spain. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 70: 103-109.
- Sánchez-Gómez, M. (1997): *Emplazamiento intracortical y desmembramiento extensional de los cuerpos peridotíticos de Ronda y del Rif (Arco de Gibraltar)*. Tesis doctoral, Universidad de Granada, pp. 226.
- Seber, D., Barazangi, M., Ibenbrahim, A. y Demnati, A. (1996): Geophysical evidence for lithospheric delamination beneath the Alboran Sea and Rif-Betic mountains. *Nature*, 379: 785-790
- Seyfried, Jr. W.E. y Dibble, Jr. W.E. (1980): Seawater-peridotite interaction at 300° C and 500 bars: implications for the origin of oceanic serpentinites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44: 309-321
- Seyfried, Jr. W.E., Janecky, D. R. y Mottl, M.J. (1984): Alteration of the oceanic crust: Implications for geochemical cycles of lithium and boron. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48: 557-569.
- Shaw, D.M y Smith, P.L.C. (1991): Concentrations of B, Sm, Gd and H in 24 reference materials. *Geostandards Newsletter*, 15-1: 59-66
- Shaw, D.M., Truscott, M.G., Gray, E.A. y Middleton, T.A. (1988): Boron and lithium in high-grade rocks and minerals from the Wawa-Kapuskasing region, Ontario. *Can. J. Earth Sci.*, 25: 1485-1502
- Targuisti, K. (1994): *Petrología y geoquímica de los macizos ultramáficos de Ojén (Andalucía) y de Beni-Bouzerar (Rif Septentrional, Marruecos)*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, pp. 226.
- Thompson, G. y Melson, W.G. (1970): Boron contents of serpentinites and metabasalts in the oceanic crust: implications for the boron cycle in the oceans. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 8: 61-65.
- Torres-Roldán, R. (1978): Scapolite-bearing and related calc-silicate layers from the Alpujarride Series (Betic Cordilleras of Southern Spain). A discussion on their origin and some comments. *Geol. Rundsch.*, 67: 342-355.
- Torres-Roldán, R.L. (1979): *La evolución tectonometamórfica del macizo de Los Reales*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, pp. 230.
- Torres-Roldán, R.L. (1983): Fractionated melting of metapelite and further crystal-melt equilibria. The example of the Blanca Unit migmatite complex, North of Estepona (Southern Spain). *Tectonophysics*, 96: 95-123.
- Truscott, M.G. y Shaw, D.M. (1984): Boron in chert and Precambrian siliceous iron formations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48: 2313-2320
- Tubía, J. M. (1985): *Sucesiones metamórficas asociadas a rocas ultramáficas en los Alpujarrides occidentales (Cordilleras Béticas, Málaga)*. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco, pp. 263.
- Tubía, J.M. (1988): Estructura de los Alpujarrides occidentales: cinemática y condiciones de emplazamiento de las peridotitas de Ronda. *Bol. Geol. Min.*, 99: 1-124.
- Tubía J.M. y Cuevas, J. (1986): High-temperature emplacement of Los Reales peridotite nappe (Betic cordillera, Spain). *J. Struct. Geol.*, 8: 473-482.

Manuscrito recibido el 22 de Mayo de 1997

Aceptado el manuscrito revisado el 3 de Noviembre de 1997