

# Rutilos ricos en Zr incluidos en granates de xenolitos granulíticos de la corteza inferior del Sistema Central Español: implicaciones geodinámicas

*Zr-rich rutile included in garnet from lower crustal granulite xenoliths of the Spanish Central System: geodynamic implications*

C. Villaseca y D. Orejana

Departamento Petrología y Geoquímica, Centro mixto UCM-CSIC, Fac. CC. Geológicas, 28040 Madrid.  
granito@geo.ucm.es, dorejana@geo.ucm.es

## ABSTRACT

Two petrographic types of rutile are observed in the peraluminous felsic meta-igneous granulites, the most common type of the lower crustal xenolith suite of the Spanish Central System (SCS). Rutile-1 (Rt-1) corresponds to small crystals (mainly < 80 μm) only preserved as micro-inclusions within garnet, whereas rutile-2 (Rt-2) is commonly found as big idiomorphic crystals forming the granulite granoblastic matrix. Chemical analyses by EMP show a higher Zr content in Rt-1 (up to 7800 ppm) than in Rt-2 (up to 5200 ppm) of the same granulite. Applying Zr-in-rutile thermometry, Rt-1 gives 50-60 °C higher for rutile crystallization (950-1015 °C) when compared to Rt-2 thermometry (940-955 °C). These ultra-high temperatures (UHT) are likely attained at Moho depths without external heat sources (e.g. mantle input) as supported by the high heat production estimated for the crustal section of the SCS. The granulite-granite petrogenetic link suggests that these HT-UHT granulites were generated by intra-crustal reworking during Hercynian continental thickening.

**Key words:** granulite xenoliths, Zr-in rutile, geothermometry, Iberian Hercynian Belt

Geogaceta, 44 (2008), 31-34  
ISSN: 0213683X

## Introducción

La formación de granulitas de alta a ultra-alta temperatura (750 °C a >1000 °C), a presiones moderadas, plantea problemas petrogeénicos muy atractivos pero controvertidos (p.e. Kemp *et al.*, 2007). El Sistema Central Español (SCE) es el único sector de la Península Ibérica donde aparece una suite de xenolitos granulíticos que provienen de la corteza profunda, cerca de su límite con el manto (Moho) (Villaseca *et al.*, 1999; Villaseca *et al.*, 2007a). Los datos geotermobarométricos publicados indican condiciones granulíticas en un rango amplio de condiciones *P-T*: 850 °C a 1000 °C y de 7 a 11 kbar, dependiendo de la litología, aparentemente más extrema para los más escasos xenolitos charnockíticos (Villaseca *et al.*, 2007a).

Los xenolitos félsicos son el tipo de enclave más común, aproximadamente el 95% en volumen de la suite granulítica. Su composición es peraluminica y presentan siempre granate, a veces como único máfico. Los granates de estas granulitas pueden llegar a tamaños próxi-

mos al centímetro y están variablemente sustituidos por coronas quelífticas, debidas a la fuerte despresurización sufrida al ascender en el magma subvolcánico. Los cristales de granate suelen presentar numerosas micro-inclusiones, a veces de minerales fundamentales, tal vez productos reactantes en exceso, en la reacción metamórfica que le formó: cuarzo, sillimanita, Al-flogopita ó plagioclasa (Villaseca *et al.*, 1999). Otras inclusiones más pequeñas son las de accesorios: opacos, circón (hasta el 77% del circón de la granulita está atrapado en el granate, Villaseca *et al.*, 2007b), monacita, rutilo e ilmenita (por transformación del rutilo).

En este estudio hemos analizado el contenido de Zr en los escasos rutilos preservados como inclusiones en los granates de un par de xenolitos peraluminicos félsicos del Sistema Central Español. Hemos aplicado la geotermometría del Zr en el rutilo (Zack *et al.*, 2004; Watson *et al.*, 2006) comparándolo con los datos obtenidos de los rutilos de la matriz. Se comenta la pauta resultante de enfriamiento casi isobárico de las granulitas, a la luz de diferentes modelos tectónicos.

## Situación geológica

Las granulitas estudiadas aparecen como xenolitos en los lamprófidos alcalinos del Pérmico superior (252 a 264 Ma, Perini *et al.*, 2004; Fernández Suárez *et al.*, 2006). Este magmatismo alcalino intruye en el batolito Hercínico del SCE formando varios enjambres de diques. Los lamprófidos transportan diversos tipos de xenolitos profundos: i) piroxenitas, ii) granulitas máficas e intermedias (charnockitas), iii) granulitas metapelíticas, y iv) granulitas félsicas (Villaseca *et al.*, 1999; Orejana *et al.*, 2006; Villaseca *et al.*, 2007a).

Los xenolitos de granulitas félsicas peraluminicas han sido interpretados como el residuo de fusión dejado por la segregación de magmas ácidos peraluminicos similares a los que forman el batolito granítico Hercínico del SCE. Esta ligazón granulita-granito se basa en geoquímica de elementos mayoritarios y trazas, así como en datos isotópicos (Sr-Nd-O-Pb) (Villaseca *et al.*, 1999; Villaseca y Herreros, 2000; Villaseca *et al.*, 2007a). La sincronidad encontrada

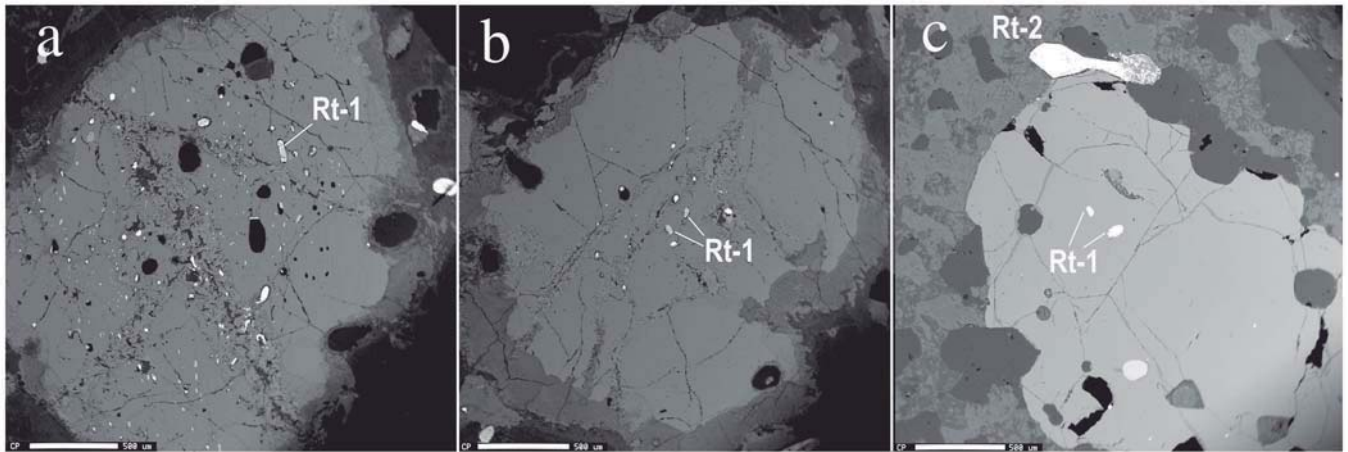


Fig. 1.- Fotografías electrónicas (BSE) de granates con micro-inclusiones de rutilo (Rt-1), de xenolitos granulíticos félsicos del SCE. a) las micro-inclusiones diversas definen una cierta foliación relict (granulita 108885); b) pareja de rutilos incluidos en granate (granulita 108885); c) rutilos incluidos (Rt-1) y rutilo mayor, de la matriz granoblástica (Rt-2) (granulita 95143). Barra de escala de 500 µm.

Fig. 1.- BSE images of rutile micro-inclusions (Rt-1) within garnet of SCS felsic granulite xenoliths. a) Micro-inclusions defining a crude relict foliation (granulite 108885); b) a pair of Rt-1 rutiles within garnet (granulite 108885); c) rutile inclusions (Rt-1) and a major rutile crystal around garnet (Rt-2) (granulite 95143). Scale bar of 500 µm.

entre la cristalización del circón granulítico y la estimada para la construcción del batolito granítico del SCE es una de las mejores evidencias de este cogenetismo (Fernández Suárez *et al.*, 2006). Las granulitas parecen haberse formado como consecuencia de un reciclaje intra-cortical durante la orogenia Hercínica, más que estar ligadas a la generación de nueva corteza.

### Química mineral

Aunque los xenolitos félsicos del SCE pueden mostrar diversas paragénesis minerales debido a su heterogeneidad litológica, lo más frecuente es que presenten cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico junto a los omnipresentes granate y rutilo (Villaseca *et al.*, 1999). El granate de los xenolitos es de la serie almandino-piropero. Tiene unos contenidos moderados de REE (entre 50 y 150 ppm) y su diagrama de REE presenta un bajo grado de fraccionamiento de las tierras raras pesadas así como una marcada anomalía negativa de Eu (Villaseca y Orejana, 2006). Los granates de los xenolitos granulíticos tienen cantidades significativas de Zr (de 40 a 130 ppm). Los datos bibliográficos apuntan a que el contenido en Zr de granates de rocas peraluminicas aumenta con el incremento del grado metamórfico (Villaseca *et al.*, 2007b).

El rutilo es la fase titanada principal de los xenolitos granulíticos del SCE pues la flogopita rica en Al-Ti es muy escasa en ellos (Villaseca *et al.*, 1999). En las granulitas hay dos tipos texturales de rutilo:

i) rutilo-1 (Rt-1), como cristales muy pequeños (normalmente de < 80 µm), incluidos en los cristales grandes de granate, a veces definiendo como una foliación relict (Figs. 1a-b); ii) rutilo-2 (Rt-2), mucho más abundante (hasta 2% en vol. de la roca) y de mayor tamaño (hasta 3000 µm), que forma parte de la matriz granoblástica de grano medio-grueso de la granulita (Fig. 1c). En este trabajo se han analizado, por primera vez, los contenidos de Zr del rutilo que aparece como microcristales Rt-1 incluidos en granate, en dos muestras granulíticas donde coexisten con el tipo Rt-2. El estudio del contenido en Zr del rutilo está siendo usado como un geotermómetro robusto en granulitas félsicas (véase p.e. Watson *et al.*, 2006), y es fácilmente analizable en las rutinas de la microsonda electrónica (p.e. Villaseca y Orejana, 2006). En la muestra 95143 el rutilo-1 tiene hasta 5350 ppm respecto de 4680 ppm de Zr en el rutilo de la matriz; mientras que en la muestra 108885 el rutilo-1 llega a 7800 ppm con respecto a 5200 ppm del rutilo-2 de la matriz. Hay diferencias de hasta un 25% en el contenido de Zr, siempre mayor en los rutilos más antiguos, atrapados como inclusiones en el granate. Por otra parte, el contenido de Zr de estos rutilos-1 supera el rango previamente establecido por Villaseca y Orejana (2006), obtenido en rutilos tipo-2 de diversas muestras de granulitas félsicas (3340 - 6850 ppm).

### Geotermometría de Zr en rutilo

Zack *et al.* (2004) desarrollaron un geotermómetro empírico, basado en el

contenido en Zr del rutilo, en rocas granulíticas félsicas, con cuarzo modal y circón accesorio, parecidas a las granulitas félsicas del SCE. El geotermómetro que obtuvieron responde a la ecuación:

$$T (^{\circ}\text{C}) = 127.8 * \ln (\text{Zr}^{\text{Rt}} \text{ en ppm}) - 10$$

Más recientemente, Watson *et al.* (2006) han re-evaluado experimentalmente este geotermómetro de Zr en rutilo y han obtenido una nueva ecuación que reduce sensiblemente los valores de alta temperatura del termómetro anterior (Fig. 2):

$$T (^{\circ}\text{C}) = 4470 / (7.36 - \log \text{Zr}^{\text{Rt}} \text{ en ppm})$$

El termómetro del Zr-en-rutilo es dependiente de la presión cuando supera ampliamente los 10 kbar, pero se ajusta muy bien a los datos experimentales de Watson *et al.* (2006) para presiones bajas o intermedias (Tomkins *et al.*, 2007). Así pues, serán los valores obtenidos con la termometría de Watson *et al.* (2006) los utilizados en este trabajo.

Teniendo en cuenta las concentraciones de Zr de los rutilos-1 se obtendría un rango de temperaturas que variaría entre los 950 °C (xenolito 95143 con 5350 ppm promedio de Zr) y los 1015 °C (xenolito 108885 con rutilos de 7800 ppm de Zr). Los rutilos tipo-2, de la matriz, dan valores promedio de 940 °C y 955 °C, respectivamente (Fig. 2). Es decir, que los rutilos-1 se han debido formar a temperaturas de hasta 60 °C

superiores que la segunda generación, que define las condiciones de equilibrio

de la paragénesis principal de la granulita.

**Discusión**

Los rangos principales de temperatura obtenidos mediante las estimaciones termométricas de Zr-en-rutilo tipo-2 de los xenolitos granulíticos félsicos del SCE (940 °C a 960 °C) (Watson *et al.*, 2006) son similares a los obtenidos por métodos convencionales de equilibrio mineral. Así, las temperaturas estimadas para estos xenolitos peraluminicos según la geotermometría de Grt-Opx varía entre 870 °C y 910 °C, mientras que la geotermometría de Grt-Flog o de dos feldespatos calcula un rango de valores entre 800 y 950 °C (Villaseca *et al.*, 1999). Los rutilos-1 relictos, incluidos en granate, muestran temperaturas superiores, que superan en 50-60 °C el rango anterior (Fig. 3). Estos valores mayores de temperatura no implican necesariamente presiones mayores, pues la sillimanita suele ser una micro-inclusión común en estos granates granulíticos. Así pues, parece establecerse una pauta fundamentalmente de enfriamiento, entre la etapa granulítica de mayor temperatura (G1) y la del re-equilibrio principal (G2), siempre en niveles de corteza profunda (Fig. 3).

El hecho de que las granulitas de la corteza inferior estén enfriándose en etapas tardi-Hercínicas puede plantear algunas controversias. En principio, este enfriamiento casi isobárico parece in-

Fig. 3.- Diagrama P-T con la pauta propuesta de evolución de las granulitas de la corteza inferior del SCE. Las condiciones de G1 y G2 están extrapoladas de los datos termométricos de rutilos-1 y rutilos-2. La edad de la recristalización granulítica se extrapola del rango principal de edades U-Pb en circones de Fernández Suárez *et al.* (2006). Las condiciones del Moho actual (G3) son las estimadas por datos geofísicos de Tejero y Ruiz (2002). Se muestra para comparación la pauta del sector central de la Sierra de Guadarrama, basada en Barbero y Villaseca (2000). Parrilla petrogenética NaKFMASH de Spear *et al.* (1999). Ver texto para más aclaraciones.

Fig. 3.- P-T diagram showing the proposed path for SCS lower crustal granulites. G1 and G2 conditions are extrapolated from rutile thermometry. Ages for granulite crystallizations are extrapolated from the main U-Pb zircon age range of Fernández Suárez *et al.* (2006). Moho conditions at present estimated from geophysical data of Tejero and Ruiz (2002). Metamorphic path of the central sector of the Sierra de Guadarrama (Barbero and Villaseca, 2000) is plotted for comparison. NaKFMASH petrogenetic grid after Spear *et al.* (1999). See text for further explanation.

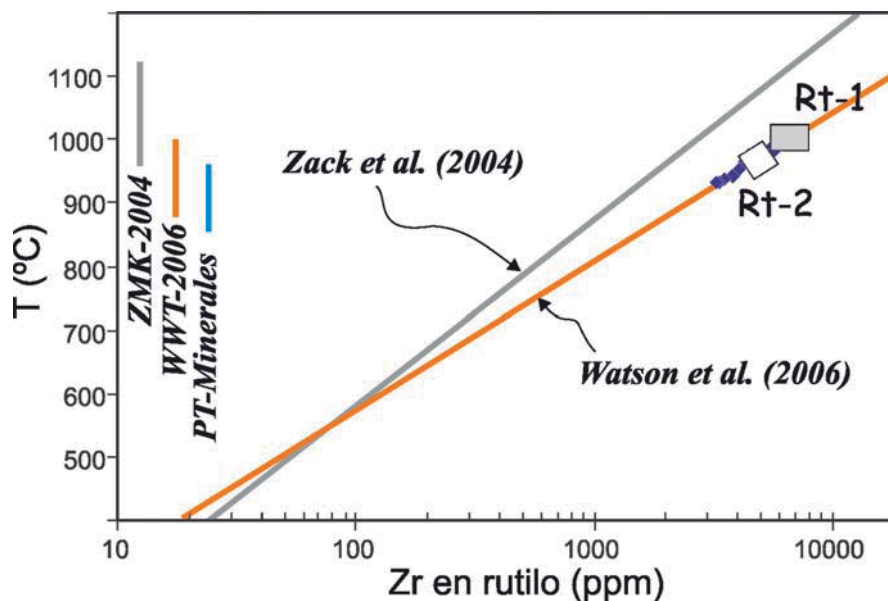
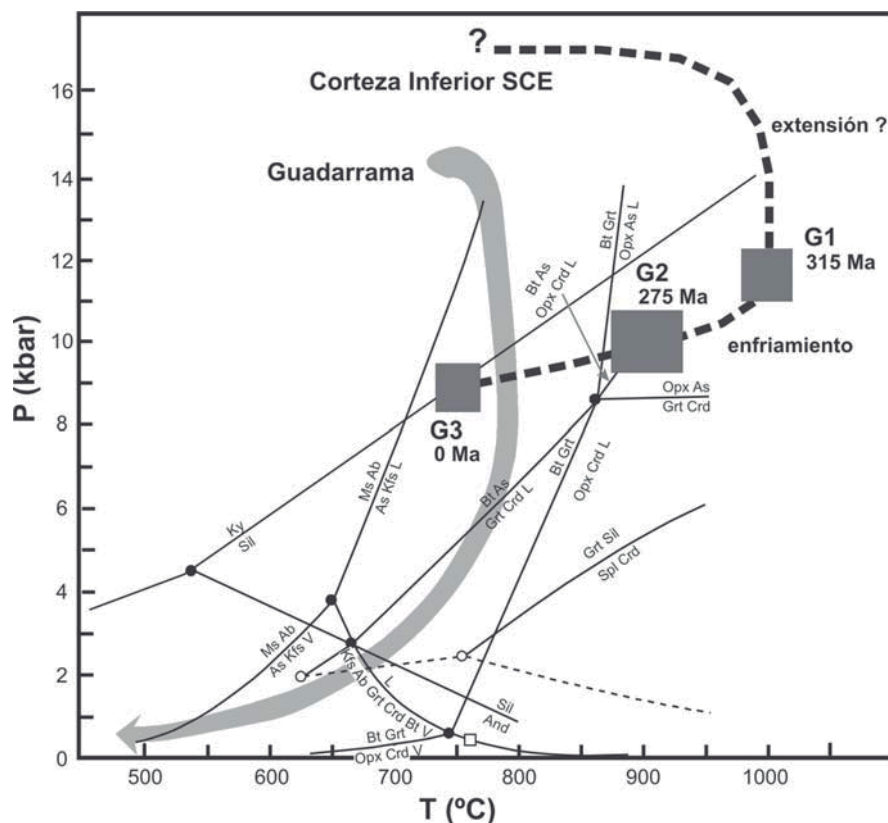


Fig. 2.- Variación del contenido en Zr del rutilo con la temperatura y rectas de regresión del termómetro empírico de Zack *et al.* (2004) y del termómetro experimental de Watson *et al.* (2006). Los datos de los rutilos-1 y rutilos-2 de este trabajo (Rt-1 y Rt-2) sólo se han proyectado sobre el termómetro de Watson *et al.* (2006). Los rombos sobre esta recta son datos previos de rutilos-2 de Villaseca y Orejana (2006). A la izquierda del diagrama se muestran los rangos de valores distintos según la geotermometría empleada. Ver texto para más aclaraciones.

Fig. 2.- Rutile Zr contents vs. estimated temperature showing regression lines of the empirical thermometer of Zack *et al.* (2004) and that of the experimental thermometer of Watson *et al.* (2006). Rutile-1 and rutile-2 data (Rt-1 and Rt-2) are only plotted on Watson *et al.* (2006) thermometer. Other rutile data taken from Villaseca and Orejana (2006). Inset bars at left show T ranges obtained after different thermometer estimates. See text for further explanation.



compatible con modelos de calentamiento de la base de la corteza en etapas tardías de la orogenia. Así, hipótesis de delaminación cortical o de ascenso de diapiros mantélicos hacia el Moho, durante las etapas finales de la orogenia Hercínica, es decir, hacia los 280-315 Ma (etapa fundamental de cristalización granulítica de los circones de estos xenolitos, Fernández Suárez *et al.*, 2006) parecen poco apropiadas para el ámbito del SCE, con estos nuevos datos de evolución térmica de las granulitas. Por otra parte, la intrusión del escaso magmatismo alcalino del Pérmico superior sólo hace crecer ligeramente algunos de estos circones granulíticos (aprox. 256 Ma, según Fernández Suárez *et al.*, 2006) y supone la irrupción de volúmenes muy minoritarios de líquidos de derivación mantélica más profunda, astenosférica (Villaseca *et al.*, 2004), sin impacto térmico significativo en la granulita, incluso en xenolitos de tamaño milimétrico.

Por otra parte, ¿es posible alcanzar estas altas temperaturas, de casi 1000 °C en la base de la corteza, sin involucrar fuentes térmicas externas (mantélicas)? Los modelos térmicos de apilamiento cortical varían mucho dependiendo de los valores usados en el modelo, sobre todo según sea el flujo térmico en superficie, la producción de calor que se consideren para los distintos sectores de corteza, el valor de temperatura de equilibrio que se estime para la base de la corteza, etc... (England y Thompson, 1986). La mayor parte de modelos térmicos de zonas de colisión con marcado engrosamiento cortical indican que pueden alcanzarse temperaturas en el Moho de 900 a 950 °C (England y Thompson, 1986; Patiño Douce *et al.*, 1990; Gerdes *et al.*, 2000). Sin embargo, muchos de estos modelos aclaran que para altos valores de flujo térmico ( $> 70 \text{ mW/m}^2$ ) las temperaturas del Moho superarían los 1000 °C durante varios Ma (p.e. Patiño Douce *et al.*, 1990). El SCE es un sector orogénico que en la actualidad presenta tanto muy elevados flujos de calor superficial (probablemente superiores a  $80 \text{ mW/m}^2$ , Fernández *et al.*, 1998), como temperaturas altas en la base de la corteza (alrededor de 750 °C, Tejero y Ruiz, 2002). La alta productividad de calor de los materiales del SCE, incluso los de la corteza inferior (Villaseca *et al.*, 2005), sugiere que

granulitas de ultra-alta temperatura podrían generarse en la base de la corteza sin necesidad de involucrar la intrusión de volúmenes significativos de magmas básicos en el Moho (fenómenos de «mafic underplating»). No obstante, volúmenes minoritarios de magmas básicos calco-alcalinos son agregados a la base de la corteza, como testimonian los escasos xenolitos de piroxenitas y granulitas máficas cumuliformes, encontrados en los diques alcalinos Pérmicos (Villaseca *et al.*, 2007a).

Las granulitas de la base de la corteza del SCE parecen enfriarse durante, al menos, 40 Ma (de 315 a 275 Ma), alcanzando condiciones *P-T* muy próximas a las de retrogradar las reacciones de fusión que involucran biotita (Fig. 3). Esta retrogradación inhibiría al conjunto granulítico de nuevos fenómenos de fusión parcial, finalizando el magmatismo granítico del sector. La intrusión de los magmas lamprofídicos alcalinos hacia el Pérmico superior (aprox. 260 Ma) se realiza en una corteza inferior granulítica muy anhidra y estable, que hace tiempo dejó de fundir parcialmente, y que se enfría sin cambios bruscos de velocidad (al menos se enfría más de 200 °C en los siguientes 250 Ma), hasta los 750 °C que se estima tiene en la actualidad. Con estos datos parece definirse una marcada estabilidad de la corteza inferior granulítica del SCE desde tiempos tardi-Hercínicos.

#### Agradecimientos

El estudio se incluye dentro de los objetivos del proyecto CGL2004-02515, que ha financiado los diversos gastos necesarios para su consecución. Agradecemos a Alfredo Larios y José González del Tánago (CAI de Microscopía Electrónica, UCM, Madrid) la ayuda prestada en la obtención de los datos de microsonda electrónica.

#### Referencias

Barbero, L. y Villaseca, C. (2000). *Mineralogical Magazine*, 64, 815-836.  
 England, P.C. y Thompson, A. (1986). En: *Collision Tectonics* (M.P. Coward y A.C. Ries, Eds.). Geological Society Special Publication, 19, 83-94.  
 Fernández, M., Marzán, I., Correia, A. y Ramalho, E. (1998). *Tectonophysics*, 291, 29-53

Fernández Suárez, J., Arenas, R., Jeffries, T.E., Whitehouse, M.J. y Villaseca, C. (2006). *Journal of Geology*, 114, 471-483.  
 Gerdes, A., Wörner, G. y Henk, A. (2000). *Journal of the Geological Society, London*, 157, 577-587.  
 Kemp, A.I.S., Shimura, T., Hawkesworth, C.J. y EIMF (2007). *Geology*, 35, 807-810.  
 Orejana, D., Villaseca, C. y Paterson, B.A. (2006). *Lithos*, 86, 167-196.  
 Patiño Douce, A.E., Humphreys, E.D. y Dana Johnston, A. (1990). *Earth and Planetary Science Letters*, 97, 290-315.  
 Perini, G., Cebriá, J.M., López-Ruiz, J.M. y Doblas, M. (2004). En: *Permo-Carboniferous magmatism and rifting in Europe* (M. Wilson, E.R. Neumann, G.R. Davies, M.J. Timmerman, M. Heeremans y B.T. Larsen, Eds.). Geological Society of London, Special Publication, 223, 415-438.  
 Spear, F.S., Kohn, M.J. y Cheney, J.T. (1999). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134, 17-32.  
 Tejero, R. y Ruiz, J. (2002). *Tectonophysics*, 350, 49-62.  
 Tomkins, H.S., Powell, R. y Ellis, D.J. (2007). *Journal of metamorphic Geology*, 25, 703-713.  
 Villaseca, C., Downes, H., Pin, C. y Barbero, L. (1999). *Journal of Petrology*, 40, 1465-1496.  
 Villaseca, C. y Herreros, V. (2000). *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 91, 207-219.  
 Villaseca, C., Orejana, D., Pin, C., López-García, J.A. y Andonaegui, P. (2004). *Comptes Rendus Geosciences*, 336, 877-888.  
 Villaseca, C., Orejana, D., Pérez-Soba, C. y Reyes, J. (2005). *Geogaceta*, 38, 215-218.  
 Villaseca, C. y Orejana, D. (2006). *Geogaceta*, 40, 99-102.  
 Villaseca, C., Orejana, D., Paterson, B.A., Billström, K. y Pérez-Soba, C. (2007a). *European Journal of Mineralogy*, 19, 463-477.  
 Villaseca, C., Orejana, D. y Paterson, B.A. (2007b). *Lithos*, 96, 375-386.  
 Watson, E.B., Wark, D.A. y Thomas, J.B. (2006). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151, 413-433.  
 Zack, T., Moraes, R. y Kronz, A. (2004). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148, 471-488.