

# Petrología y geoquímica de las tonalitas de Villarejo de Montalbán (Toledo)

*Petrology and geochemistry of tonalites from Villarejo de Montalbán (Toledo)*

Jon Errandonea<sup>1</sup>, David Orejana<sup>2</sup> y Carlos Villaseca<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Mineralogía y Petrología. Facultad de Ciencia y Tecnología, UPV/EHU. 48940 Leioa, Vizcaya, España. jerrandonea001@ikasle.ehu.es

<sup>2</sup> Departamento de Petrología y geoquímica. Facultad Ciencias Geológicas, UCM. 28040 Madrid, España. dorejana@ucm.es

<sup>3</sup> Departamento de Petrología y geoquímica. Facultad Ciencias Geológicas, UCM. Instituto de Geociencias IGEO (UCM, CSIC), Madrid, España. granito@ucm.es

## ABSTRACT

The tonalites of Villarejo de Montalbán are biotite-rich rocks showing felsic segregates with abundant titanite. Whole-rock geochemical and isotopic data ( $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{300} = 0.7084\text{-}0.7089$ ;  $\epsilon\text{Nd} = -4.79, -4.80$ ) suggest that the tonalitic magma was formed by melting of metaigneous rocks of basic/intermediate composition (amphibolites or granulites). At the same time, the felsic segregates seem to have formed through the accumulation of a differentiated residual magma after crystal fractionation of plagioclase and biotite. Crystallization conditions estimated according to amphibole geothermobarometry indicate temperatures between 890 and 920°C, and pressures in the range 1.3-2.4 kbar, which is in accordance with an approximate emplacement level close to 5-10 km deep.

**Key-words:** Metaluminous tonalite, titanite-rich segregates, Sr-Nd isotopes, amphibole geothermobarometry, Variscan Iberian belt.

## RESUMEN

Las tonalitas de Villarejo de Montalbán son rocas ricas en biotita en las que se observan segregados más félsicos con abundante titanita. Los datos geoquímicos e isotópicos de roca total ( $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{300} = 0,7084\text{-}0,7089$ ;  $\epsilon\text{Nd} = -4,79, -4,80$ ) sugieren que el magma tonalítico se formó por fusión de rocas metaígneas de composición básica/intermedia (anfíbolitas o granulitas). A su vez, los segregados félsicos parecen haberse formado por acumulación del magma residual diferenciado a partir de una matriz formada sobre todo por plagioclasa y biotita. Las condiciones de cristalización estimadas por geotermobarometría del anfíbol indican temperaturas de 890-920°C, y presiones de 1,3-2,4 kbar, las cuales implican niveles aproximados de emplazamiento cercanos a los 5-10 km de profundidad.

**Palabras clave:** Tonalitas metalumínicas, segregados ricos en titanita, isótopos de Sr-Nd, geotermobarometría de anfíbol, Macizo Ibérico Varisco.

Geogaceta, 56 (2014), 71-74.  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 31 de enero de 2014  
Fecha de revisión: 29 de abril de 2014  
Fecha de aceptación: 30 de mayo de 2014

## Introducción

Son raras las intrusiones de tonalitas metalumínicas en los batolitos graníticos de la Zona Centro-Ibérica (ZCI). Esta es una diferencia fundamental con los batolitos continentales de zonas de subducción, donde las tonalitas metalumínicas son dominantes. Por esa razón no se consideran calcoalcalinos s.s. a los batolitos variscos (ej., Bea *et al.*, 1999) y se ha buscado una nomenclatura distinta para los mismos (ej. Tipos-I caledónicos: Pitcher, 1993).

Las tonalitas anfibólicas variscas aparecen en la ZCI en dos tipos de afloramientos: (1) como facies ligadas a los pequeños macizos básicos, variablemente hibridados con los granitoides coetáneos (ej., Bea *et al.*, 1999; Molina *et al.*, 2012); (2) como pluto-

nes aislados dentro del batolito granítico.

Dentro del segundo grupo algunos plutones tonalíticos pueden aparecer zonados (de tonalita a granodiorita), como es el caso de la Ventosilla en el Sistema Central Español (SCE) (ej., Villaseca *et al.*, 1998a). La mayoría de tonalitas-2 son pequeños macizos incluidos en las masas graníticas y con variable grado de hibridación con las mismas. Así es el caso de la mayor parte de los macizos tonalíticos de la zona sur de la ZCI: San Martín de Montalbán y Nisa. Las tonalitas estudiadas en este trabajo pertenecen a este segundo tipo y forman un pequeño macizo incluido en un plutón granítico coetáneo, pero con escasa hibridación.

Este trabajo está centrado en la caracterización petrográfica de las tonalitas de Villarejo de Montalbán, la química de roca

total, y la composición química de los minerales, para establecer relaciones precisas entre la unidad tonalítica y los segregados presentes en ella, y estudiar el origen, evolución y las condiciones de cristalización del magma tonalítico.

La rareza de estas intrusiones contribuye a animar la discusión sobre su génesis, pues sólo las tonalitas del batolito de Nisa-Alburquerque han sido estudiadas en detalle y se interpretan por fusión de protolitos corticales máficos profundos (González-Menéndez, 2002; Solá *et al.*, 2009).

## Contexto geológico

Las tonalitas estudiadas en este trabajo afloran en la localidad de Villarejo de Montalbán (Toledo), formando parte del Bato-

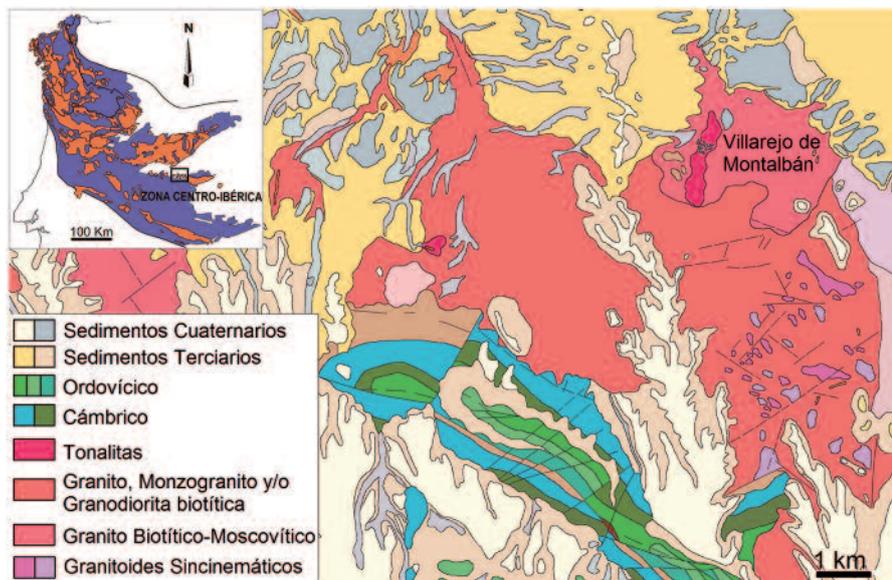


Fig. 1.- Mapa geológico de la zona en donde aparecen los dos macizos graníticos más orientales al oeste del Complejo Plutónico de Moras-Las Ventas (CPMV, rectángulo del cuadro superior izquierdo): Arroyo de Navalmorales y Río Cedula, de oeste a este respectivamente. Cartografía tomada de Iglesias *et al.* (1990).

Fig. 1.- Geological map of the study area showing the two eastern granitic massifs to the West of the Moras-Las Ventas Plutonio Complex (CPMV, rectangle of the top-left box): Arroyo de Navalmorales and Río Cedula, from West to East, respectively. Cartography taken from Iglesias *et al.* (1990).

lito de los Montes de Toledo (BMT) (Villaseca *et al.*, 2008). En el BMT, una alineación en dirección O-E de unos veinte plutones graníticos desde Belvís de Monroy (Cáceres) hasta Madridejos (Toledo), los granitoides muestran una clara afinidad S, pues son marcadamente peraluminados. En este batolito se han diferenciado dos pulsos intrusivos, uno a los 314 Ma, y otro entre 303-298 Ma (Orejana *et al.*, 2012).

Estas tonalitas aparecen en la zona centro-oriental del BMT, al oeste del Complejo Plutónico de Moras-Las Ventas (CPMV). Se presentan a modo de megaenclave en la intrusión granítica del Río Cedula, la cual intruye en materiales del Paleozoico inferior y se encuentra parcialmente cubierta por sedimentos cenozoicos (Fig. 1).

**Petrografía**

Las tonalitas son rocas melanocráticas de grano fino-medio, con un índice de color entre 30 y 45 (Fig. 2A). El contacto con la roca de caja, que consiste en un monzogranito biotítico-moscovítico, es neto y lobulado, y la fábrica planar que presenta la roca, producida por flujo ígneo, es más notoria cerca del contacto, lo cual indica que el cuerpo tonalítico es ligeramente intrusivo en el granítico. También cerca del contacto con el granito aparecen segregados centi-

métricos más félsicos en la tonalita, con contactos graduales y difusos con ésta última (Fig. 2A).

Las principales fases minerales de la tonalita son plagioclasa (43-46%), cuarzo (20-27%), biotita (23-26%), y hornblenda (3-11%), y como accesorios titanita (0.5-2%), circón, apatito, ilmenita, allanita y, a veces, feldespato potásico y clinopiroxeno. Las plagioclasas presentan inclusiones de titanita, biotita y hornblenda, y la biotita, que es el máfico principal, puede aparecer en forma de agregados (como las hornblendas) o como cristales aislados.

La titanita, que es el accesorio más abundante, puede aparecer relacionada con ilmenita y biotita, o de forma aislada (Fig. 2B).

Los segregados félsicos se distinguen de la tonalita por variaciones en la abundancia de algunas fases (la biotita casi está ausente), y del tamaño de los cristales. Las fases minerales principales son cuarzo (34-35%), plagioclasa (29-38%), hornblenda (8-16%), titanita (8-11%) y clinopiroxeno (7-9%), apareciendo como accesorios apatito, circón, ilmenita y biotita. En estos segregados félsicos se diferencian las zonas marginales de tamaño fino y las zonas internas con cristales de gran tamaño (hasta 6 mm en el caso de la titanita, que a veces presenta textura poiquilítica (Fig. 2C). Los

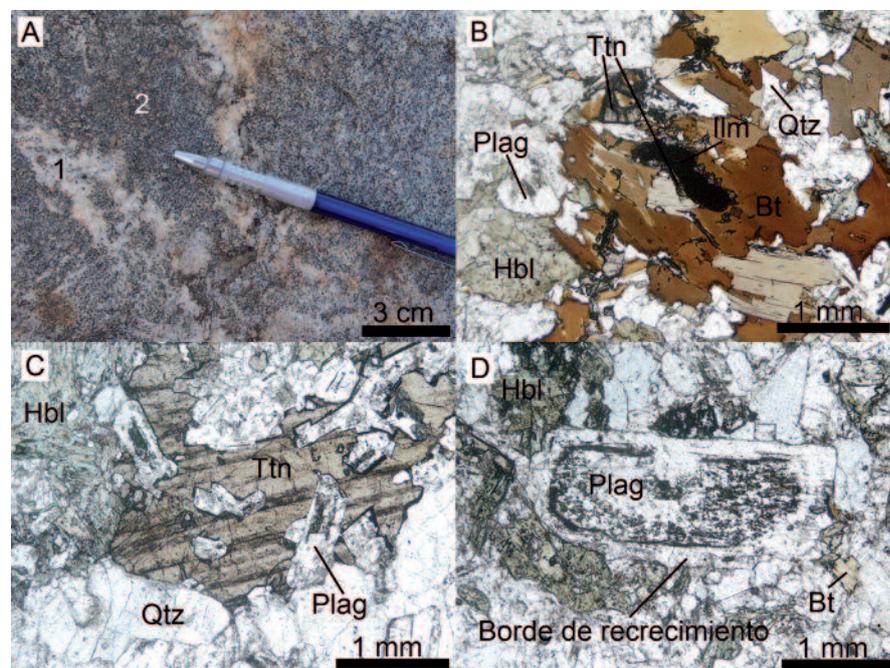


Fig. 2.- A) Fotografía de afloramiento mostrando los segregados félsicos (1) dentro de las tonalitas (2). B) Fotografía de microscopio de las tonalitas. C) y D) Fotografías de microscopio de los segregados félsicos. Las fotografías B, C y D fueron sacadas con nicolas paralelos. Ttn (titanita); Plag (plagioclasa); Qtz (cuarzo); Hbl (hornblenda); Bt (biotita); Ilm (ilmenita).

Fig. 2.- A) Field picture showing the felsic segregates (1) within the tonalities (2). B) Photomicrograph of the tonalites. C) and D) Photomicrographs of the felsic segregates. The photomicrographs B, C and D were taken with plane-polarised transmitted light. Ttn (titanite); Plag (plagioclase); Qtz (quartz); Hbl (hornblende); Bt (biotite); Ilm (illmenite).

granos de plagioclasa de mayor tamaño muestran núcleos alterados, a veces golfos de corrosión, y bordes de recrecimiento (Fig. 2D).

### Química mineral

La gran mayoría de los feldespatos son plagioclasa que varía entre labradorita y andesina ( $An_{68}-An_{34}$ ), aunque también hay feldespato alcalino de tipo ortosa ( $Or_{91}-Or_{92}$ ). Las plagioclasas contienen menores proporciones de anortita en los segregados, siendo más diferenciadas (Fig. 3A). Además, los cristales de mayor tamaño muestran zonaciones oscilatorias con ligeras variaciones en el contenido de Ca y Na.

Las biotitas tienen valores muy homogéneos en  $Fe/(Fe+Mg)$  cercanos a 0,5. Los clinopiroxenos muestran muy poca variabilidad al igual que las biotitas, clasificándose como diópsido ( $Wo_{48-51}-En_{31-32}-Fs_{16-22}$ ). Los anfíboles son principalmente de tipo magnesiohornblenda y actinolita.

Finalmente, las titanitas, abundantes en estas rocas, presentan ligeras variaciones entre las tonalitas y los segregados, y al igual que las plagioclasas, son más diferenciadas en los segregados, llegando a tener mayores contenidos en Mn (Fig. 3B).

### Termobarometría

Los cálculos termobarométricos se han basado en el contenido de Ti (geotermómetro de Otten, 1984), y Al (geobarómetro de Hammarstrom y Zen, 1986) en hornblenda (0,54 a 1,29% y 5,77 a 7,09% en peso de óxidos, respectivamente). Los resultados obtenidos muestran un rango de temperaturas entre 890 y 920°C, y de presiones entre 1,3 y 2,6 kbar tanto en el caso de las tonalitas como en los segregados félsicos ricos en titanita, en un rango típico de magmas tonalíticos (Johannes y Holtz, 1996).

### Geoquímica de roca total y geoquímica isotópica

Las tonalitas de Villarejo de Montalbán son rocas metalumínicas, con índices de peraluminicidad ("A/CNK") entre 0,923 y 0,924. Su composición es similar a las tonalitas de Ventosilla en el SCE (Villaseca *et al.*, 1998a), aunque tienen mayores contenidos en P y Ti. Su composición química no parece seguir las pautas de variación marcadas tanto por las rocas básicas como por

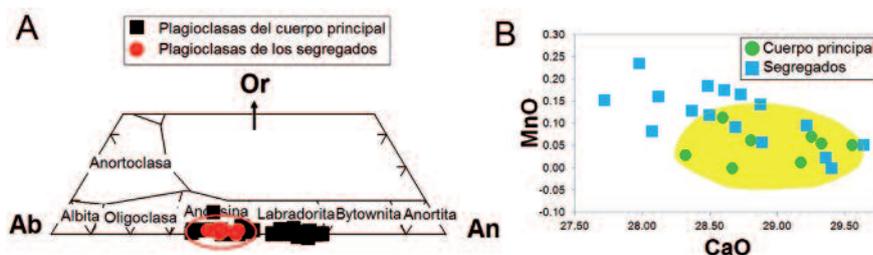


Fig. 3.- A) Diagrama de clasificación de los feldespatos para las tonalitas y los segregados. B) Diagrama CaO frente a MnO para las titanitas de tonalitas y de los segregados.

Fig. 3.- A) Classification of feldspar from the tonalities and the segregates. B) CaO vs MnO in titanites from the tonalities and segregates.

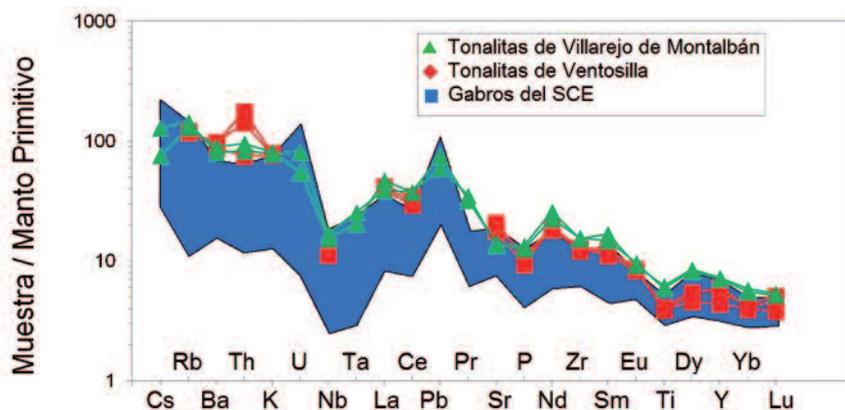


Fig. 4.- Diagramas multielementales de elementos traza normalizados respecto al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989). Gabros del SCE (rocas con  $SiO_2 < 58\%$ ; Villaseca *et al.*, 1998b; Orejana *et al.*, 2009; Molina *et al.*, 2012). Tonalitas de Ventosilla (Villaseca *et al.*, 1998a).

Fig. 4.- Trace-element patterns normalized to the primitive mantle (Sun and McDonough, 1989). Gabros from the SCE (rocks with  $SiO_2 < 58\text{ wt.}\%$ ; Villaseca *et al.*, 1998b; Orejana *et al.*, 2009; Molina *et al.*, 2012). Tonalites of Ventosilla (Villaseca *et al.*, 1998a).

los granitos del SCE y del Oeste del BMT (Villaseca *et al.*, 1998b; Villaseca *et al.*, 2008).

Los diagramas multielementales normalizados al manto primitivo muestran espectros con geometrías aserradas típicas de la corteza continental, producidas por las anomalías positivas en Pb y Rb, y negativas como en el caso del Nb y Ti (Fig. 4). Los diagramas de Tierras Raras normalizados al condrito muestran ligero enriquecimiento en LREE y una anomalía negativa en Eu más acentuada que en el caso de las tonalitas de Ventosilla, lo que implica cierta fracciónación de la plagioclasa.

Los datos isotópicos de Sr y Nd han sido recalculados a una edad Varisca de 300 Ma. Las tonalitas de Villarejo, comparadas con los gabros del SCE y del Complejo Anatóctico de Toledo, presentan valores más negativos de  $\epsilon Nd$ , y mayores de  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_{300}$ . Además, se solapan con los granitos del SCE y O-BMT, y las tonalitas de Ventosilla (Fig. 5), lo que apunta a protolitos de origen cortical.

### Discusión y conclusiones

En cuanto a procesos de diferenciación, los datos de química mineral muestran que la cristalización fraccionada debe haber sido el proceso que más ha influido en la evolución del magma (con plagioclasa y biotita como principales fases fraccionadas), aunque haya evidencias de recarga de fundidos cogenéticos ligeramente más primitivos, que originan oscilaciones en el zonado de las plagioclasas. El origen de los segregados parece estar ligado directamente con el magma que da lugar a las tonalitas, ya que la composición mineralógica es muy parecida, con fases algo más diferenciadas en los segregados. Por lo tanto, estos segregados parecen haberse formado por medio de la migración y acumulación de un magma residual diferenciado desde una matriz formada sobre todo por plagioclasa y biotita.

Por otro lado, los datos isotópicos de Sr-Nd de las tonalitas de Villarejo de Montalbán

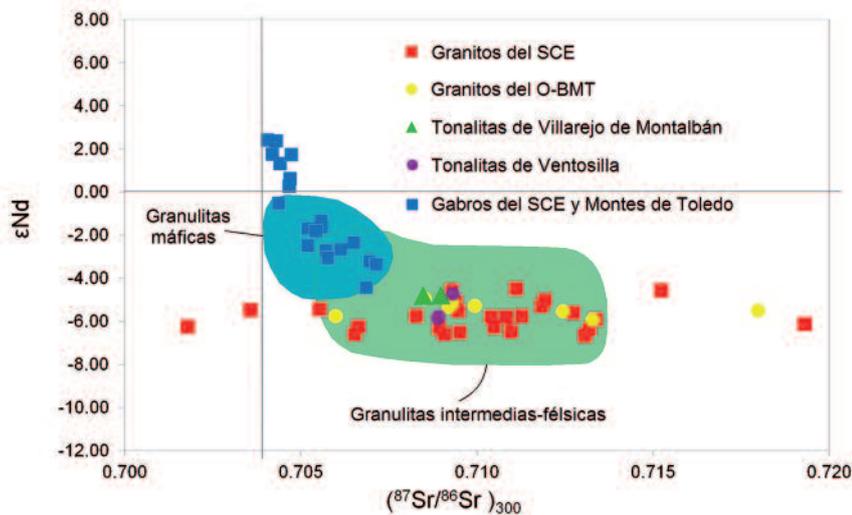


Fig. 5.- Relaciones Sr-Nd calculadas a 300 Ma de las Tonalitas de Villarejo de Montalbán y otras rocas relacionadas, indicando campos de las granulitas máficas y granulitas intermedias-félsicas (Villaseca *et al.*, 1999; Villaseca *et al.*, 2007). Granitos y gabros (rocas con SiO<sub>2</sub> < 58%) del SCE y Complejo Anatóctico de Toledo (Villaseca *et al.*, 1998b; Bea *et al.*, 2006; Orejana *et al.*, 2009; Molina *et al.*, 2012). Tonalitas de Ventosilla (Villaseca *et al.*, 1998a).

Fig. 5.- Sr-Nd isotopic ratios at 300 Ma for the tonalites from Villarejo de Montalbán and related rocks, indicating fields of mafic granulites and intermediate-felsic granulites (Villaseca *et al.*, 1999; Villaseca *et al.*, 2007). Granites and gabros (rocks with SiO<sub>2</sub> < 58 wt.%) from the SCE and the Anatectic Complex of Toledo (Villaseca *et al.*, 1998b; Bea *et al.*, 2006; Orejana *et al.*, 2009; Molina *et al.*, 2012). Tonalites of Ventosilla (Villaseca *et al.*, 1998a).

bán sugieren una participación poco importante de material de derivación mantélica, por lo que la posibilidad de que el magma tonalítico se formara por procesos de mezcla entre un componente mantélico (no aflorante en áreas próximas) y otro cortical es poco probable (Fig. 5). Además, en el Batolito de los Montes de Toledo no se han encontrado evidencias de intrusiones básicas, sólo hay en el Complejo Anatóctico de Toledo (Bea *et al.*, 2006), más al NE, donde representan un volumen muy bajo. Por lo tanto, pensamos que el origen del magma tonalítico sería por la fusión en la corteza inferior de rocas metaígneas de composición básica-intermedia (anfíbolitas o granulitas). De hecho, existen rocas de este tipo (charnockitas) en la base de la corteza, en el Sistema Central Español (Villaseca *et al.*, 2007) (Fig. 5).

Finalmente, en cuanto a las condiciones de emplazamiento del magma, el rango de

temperaturas (890-920°C) coincide con temperaturas de cristalización para magmas tonalíticos, y las presiones (1,3-2,4 kbar), que implican niveles de emplazamiento de entre 5 y 10 km de profundidad, concuerdan con la geología de la zona y con niveles de emplazamiento de granitos coetáneos del BMT (Villaseca *et al.*, 2008; Merino *et al.*, 2013).

### Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el proyecto CGL2012-32822 del Ministerio de Economía y Competitividad de España. Agradecemos las revisiones de T. Sánchez García, J.F. Molina y el editor.

### Referencias

Bea, F., Montero, P. y Molina, J.F. (1999). *Journal of Geology* 107, 399-419.

- Bea, F., Montero, P.G., González-Lodeiro, F., Talavera, C., Molina, J.F., Scarrow, J.H., Whitehouse, M.J. y Zinger, T. (2006). *Journal of the Geological Society* 163, 847-855.
- González-Menéndez, L. (2002). *Revista de la Sociedad Geológica de España* 15, 233-246.
- Hammarstrom, J.M. y Zen, E.A. (1986). *American Mineralogist* 71, 1297-1313.
- Iglesias, A., Martín, A., Jorquero, A. y García-Prieto, J. (1990). *Mapa Geológico de España 1:50.000, Hoja nº 655 (Los Navalmorales) y memoria*. IGME, Madrid, 104 p.
- Johannes, W. y Holtz, F. (1996). *Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks*. Springer-Verlag, Berlin, 335 p.
- Merino, E., Villaseca, C. y Orejana, D. (2013). *Lithos* 179, 137-156.
- Molina, J.F., Montero, P., Bea, F. y Scarrow, J.H. (2012). *Lithos* 153, 224-242.
- Orejana, D., Villaseca, C., Pérez-Soba, C., López-García J.A. y Billström, K. (2009). *Lithos* 110, 262-276.
- Orejana, D., Merino, E., Villaseca, C., Pérez-Soba, C. y Cuesta, A. (2012). *Geological Journal* 47, 41-58.
- Otten, M.T. (1984). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 86, 189-199.
- Pitcher, W.S. (1993). *The nature and origin of granite*. Blackie Academic and Professional, Glasgow and London, 321 p.
- Solá, A.R., Williams, I.S., Neiva, A.M.M.R. y Ribeiro, M.L. (2009). *Lithos* 111, 156-167.
- Sun, S.S. y McDonough, W.F. (1989). *Geological Society of London Special Publication* 42, 313-345.
- Villaseca, C., Barbero, L., Reyes, J. y Santos Zalduendi, J.F. (1998a). *Geogaceta* 23, 169-172.
- Villaseca, C., Barbero, L. y Rogers, G. (1998b). *Lithos* 43, 55-79.
- Villaseca, C., Downes, H., Pin, C. y Barbero, L. (1999). *Journal of Petrology* 40, 1465-1496.
- Villaseca, C., Orejana, D., Paterson, B.A., Billstrom, K. y Pérez-Soba, C. (2007). *European Journal of Mineralogy* 19, 463-477.
- Villaseca, C., Pérez-Soba, C., Merino, E., Orejana, D., López-García, J.A. y Billstrom, K. (2008). *Journal of Geosciences* 53, 263-280.