

Los anfíboles de los volcanes de las islas Columbretes (Mediterráneo occidental)

The amphiboles of the volcanoes of the Columbretes Islands (Western Mediterranean)

Eumenio Ancochea Soto y María José Huertas Coronel

Departamento de Mineralogía y Petrología. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid;

eancochea@ucm.es, huertas@ucm.es

ABSTRACT

In all the Columbretes islands there are rocks with amphiboles, in many cases in accidental fragments within the tuffs. All of them are magnesium-hastingsites, more or less zoned and reabsorbed. The amphiboles of the central islands of the main N-S alignment have formed at lower temperature and pressure than the rest. The calculated formation depths are approximately the Moho depth for the area.

Key-words: Columbretes Islands, western Mediterranean volcanoes, amphiboles, geothermobarometry.

Geogaceta, 70 (2021), 23-26
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Introducción y antecedentes

Las islas Columbretes están situadas en el margen continental oriental de la Península Ibérica, 50 km al este de la costa de Castellón (Fig.1). Se trata de islas de origen volcánico, que forman parte de un campo volcánico más amplio, el Campo volcánico de Las Columbretes que, en su mayor parte, está sumergido (Pautot *et al.*, 1973; Mauffret, 1977; Mauffret *et al.*, 1978; Muñoz *et al.*, 2005).

La mineralogía, petrología y geoquímica de estas islas han sido estudiadas por distintos autores, destacando los trabajos de Vidal (1972), Vidal *et al.* (1974), Alonso Matilla (1982, 1987a, b), Martí *et al.* (1992), Aparicio *et al.* (1991 y 1994) y Aparicio y García (1995) y, más recientemente los de Ancochea y Huertas (2020) y en prensa) y Huertas y Ancochea (2020) sobre los aspectos vulcanológicos y geocronológicos.

El objetivo de este trabajo es estudiar la composición de los anfíboles, analizar su variabilidad y sus condiciones de formación. Se han utilizado las muestras que emplearon Vidal (1972) y Vidal *et al.* (1974) para caracterizar composicionalmente estas islas y que están depositadas en la Litoteca de Petrología de la Universidad Complutense.

Las islas Columbretes están constituidas por una isla de mayor tamaño que conserva la morfología volcánica (Columbrete Grande) y por islotes distribuidos en una franja de dirección norte-sur que son los restos subaéreos de volcanes independientes (Fig. 1; Ancochea y Huertas, 2020; Huertas y Ancochea, 2020).

Están formadas por rocas fuertemente alcalinas, desde basanitas, hasta fonolitas. En la alineación principal se sitúan los volcanes de Ferrera, Navarrete, Piedra Joaquín, Horadada (con el islote de Lobos) y Bergantín – Churruca (Fig. 1). La mayoría de ellos son de composición fonolítica. Ferrera además de fonolitas tiene rocas de composición intermedia: tefritas fonolíticas y fonolitas tefríticas. Navarrete y Columbrete Grande son totalmente diferentes, pues están formadas por basanitas y tefritas y forman una alineación NE-SO transversal a la principal.

Los anfíboles

La mayor parte de los materiales que constituyen estas islas son depósitos piroclásticos hidromagmáticos, formados esencialmente por cenizas con fragmentos de rocas accidentales arrastrados por la erupción y que se han formado en

RESUMEN

En todas las islas Columbretes aparecen rocas con anfíboles, en muchos casos en fragmentos accidentales dentro de las tobas. Todos ellos son magnesio-hastingsitas, más o menos zonadas y reabsorbidas. Los anfíboles de las islas centrales de la alineación principal N-S, se han formado a menor temperatura y presión que el resto. Las profundidades de formación calculadas son aproximadamente las de la profundidad del Moho para la zona.

Palabras clave: Islas Columbretes, volcanes del Mediterráneo occidental, anfíboles, geothermobarometría.

Fecha de recepción: 30/01/2021
Fecha de revisión: 23/04/2021
Fecha de aceptación: 28/05/2021

momentos eruptivos anteriores. Sólo en Columbrete Grande aparecen piroclastos estrombolianos formados mayoritariamente por bombas y lapilli de carácter juvenil (Aparicio *et al.*, 1991; Ancochea y Huertas, 2020).

Los anfíboles aparecen en todos los

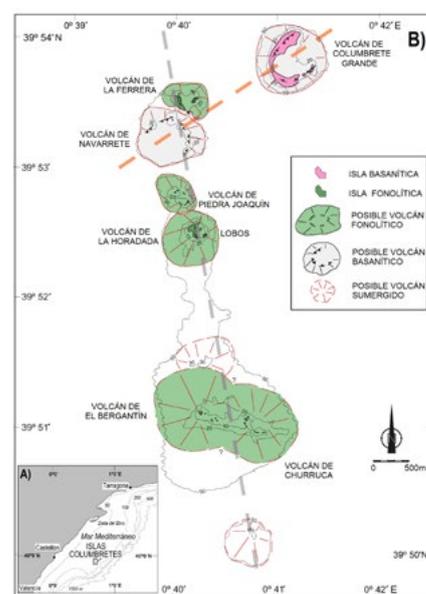


Fig. 1. A) Situación de las islas Columbretes. B) Volcanes de las Islas Columbretes (modificado de Huertas y Ancochea, 2020).

Fig. 1. A) Situation of the Columbretes Islands. B) Volcanoes of the Columbretes Islands (modified from Huertas and Ancochea, 2020).

tipos de rocas, desde basanitas a fonolitas y en todas las islas, aunque no con la misma abundancia, ni en todas las rocas de una isla. Como la mayor parte de las rocas en los que aparecen son fragmentos de origen accidental, no se pueden establecer relaciones entre la composición del anfíbol y la composición del volcán. En muchos casos, por ejemplo, se trata de anfíboles en rocas básicas, que son fragmentos accidentales dentro de una toba fonolítica.

En las rocas del volcán de Horadada (islotos de Horadada y Lobos) los anfíboles tienen tamaños habituales de 0,3 a 0,5 mm, aunque ocasionalmente puede ser más grandes. Son idiomorfos o subidiomorfos, zonados esporádicamente, sin borde de reacción o con borde pequeño (20-30 micras).

En el volcán de Ferrera los anfíboles son en general subidiomorfos, de 0,5 a 3 mm, suelen estar zonados y tienen aureolas bien desarrolladas de hasta 100 micras. De tamaño similar son los anfíboles de Bergantín, pero en este caso sólo quedan pequeños restos.

En el volcán de Navarrete los anfíboles son alotriomorfos, zonados y con borde de reacción, con tamaños de 0,4 a 2 mm y bordes de 20 a 100 micras. En Columbrete Grande aparecen como fragmentos rotos en los piroclastos hidromagmáticos, a veces de varios milímetros de tamaño y con importante borde de reacción y, en otras ocasiones, más pequeños y sin borde.

Se han realizado más de 200 análisis de anfíboles mediante microsonda electrónica. Todos son de composición muy similar, ricos en CaO (10-12%), MgO (9-13%), TiO₂ (5-7%), FeO (8-14%) y Al₂O₃ (12-14%). Cuando están zonados el bor-

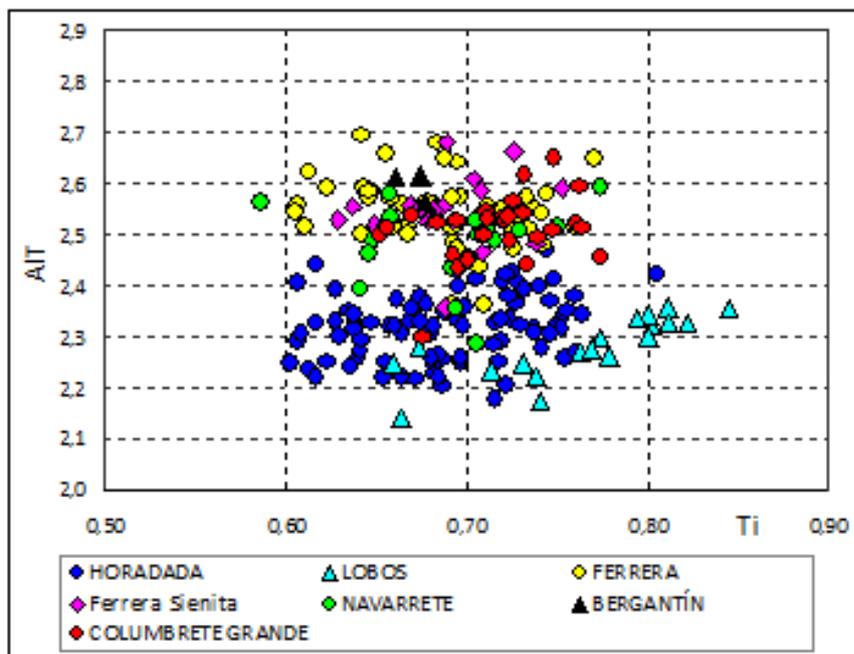


Fig. 2. Contenido en Ti y AIT (apfu) de los anfíboles de cada isla.
 Fig. 2. Content in Ti and AIT (apfu) of the amphiboles of each island.

de suele ser más rico en FeO y más pobre en MgO, Al₂O₃ y TiO₂. Se trata siempre de magnesio-hastingsitas (Leake *et al.* 2004). En la Tabla I se presentan las medias de sus composiciones, por islas.

Por su contenido en AIT (apfu) pueden diferenciarse claramente dos grupos de anfíboles: los de las islas de Horadada y Lobos, que forman parte del mismo volcán (el volcán de Horadada, Huertas y Ancochea, 2020) y que son más pobres en AIT (2,2-2,4 apfu) y los del resto de las islas, más ricos (2,4-2,7 apfu) (Tabla I y Fig. 2).

Termobarometría

La composición de los anfíboles ha sido utilizada con frecuencia para deducir las condiciones de presión y temperatura a las que se han formado (p.e. Hammarstrom y Zen 1986; Hollister *et al.* 1987; Johnson y Rutherford 1989; Schmidt 1992; Ridolfi y Renzulli, 2012).

Hammarstrom y Zen (1986) indican que existe una relación empírica entre la presión de cristalización de rocas plutónicas calcoalcalinas y el contenido de Al total de las hornblendas. Hollister *et al.* (1987), Johnson y Rutherford (1989) y Schmidt (1992) precisan esa relación, y proponen diferentes barómetros. Todos ellos son esencialmente función del contenido en Al del anfíbol. Las ecuaciones que proponen son muy similares y, aunque no han sido calculadas para rocas

alcalinas, han sido utilizadas, con las debidas precauciones, en este tipo de rocas. Hammarstrom y Zen (1986) proponen también un geotermómetro, basado en el contenido en Ti de los anfíboles.

De acuerdo con ellos, la notable diferencia en el contenido en AIT entre los anfíboles de las islas, reflejarían diferentes profundidades de formación (Fig. 2 y Tabla I) y, por otra parte, los bordes de los anfíboles, más pobres en Ti y Al que los núcleos, se habrían formado a menor temperatura y presión.

Ridolfi y Renzulli (2012) propusieron un termobarómetro, más complejo, válido también para anfíboles ricos en Mg y Ca en magmas alcalinos, como los de las Columbretes. Sin embargo, sus resultados han sido cuestionados por diferentes autores (p.e. Erdman *et al.*, 2014 y Molina *et al.*, 2015), que concluyen que las temperaturas obtenidas son razonables ($\pm 32^\circ\text{C}$ a $\pm 36^\circ\text{C}$), pero no así las presiones ($\pm 2,4$ a $\pm 3,5$ Kb), que serían inutilizables.

Los resultados obtenidos con todos los termobarómetros son homogéneos para cada isla y diferentes entre grupos de islas (Tabla II) y confirman las diferencias entre los dos grupos de islas antes mencionados.

Los anfíboles de las islas de Horadada y Lobos (con un menor contenido en Al) se habrían formado a menor presión/profundidad que los del resto de las islas.

Según Ridolfi y Renzulli (2012) tam-

	Horadada	Lobos	Ferrera	Ferrera (sienita)	Navarrete	Columbrete Grande	Bergantín
nº análisis	91	19	53	19	17	27	4
SiO ₂	39,34	39,61	38,16	38,25	38,60	38,80	38,18
TiO ₂	6,05	6,77	6,07	6,03	6,09	6,40	6,01
Al ₂ O ₃	13,07	12,90	14,41	14,15	14,04	14,28	14,69
Cr ₂ O ₃	0,06	0,02	0,07	0,02	0,02	0,04	0,04
FeO	13,41	11,36	11,03	12,29	11,36	9,37	10,31
MnO	0,18	0,18	0,09	0,24	0,15	0,08	0,11
MgO	10,38	11,51	11,89	10,41	11,60	12,64	12,42
CaO	11,57	11,66	11,87	11,82	12,01	12,05	12,04
Na ₂ O	2,56	2,69	2,62	2,72	2,50	2,36	2,35
K ₂ O	1,16	1,22	1,29	1,40	1,34	1,37	1,59
F	0,15	0,32	0,44	0,47	0,22	0,10	0,11
Cl	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03

Tabla I. Composición media de los anfíboles de cada isla.

Table I. Average composition of the amphiboles of each island.

bién se habrían formado a menor temperatura: a menos de 1060°C, frente a los de las otras islas que se habrían formado a más de 1060°C (Fig. 3).

Los anfíboles de las sienitas que aparecen como xenolitos en las rocas de la isla de Ferrera, tienen similar composición a los de las otras rocas de la isla y se habrían formado en condiciones de P y T muy parecidas. Por otra parte, los anfíboles de las rocas de los volcanes de composición más básica (como Navarrete y Columbrete Grande) se habrían formado en condiciones parecidas a las del volcán fonolítico y tefrítico-fonolítico de Ferrera (Tablas I y II y Fig. 3).

Las mayores diferencias en la presión calculada entre el barómetro de Ridolfi y Renzulli (2012) y el resto de geobarómetros corresponden a las de La Horadada y Lobos; de 1 a 3 kb menos que los obtenidos por otros geobarómetros (Tabla II). Las diferencias en las otras islas también son elevadas, excepto para el barómetro de Johnson y Rutherford (1989) que obtiene presiones parecidas.

Discusión y conclusiones

Los anfíboles de las rocas de las islas Columbretes, son todos magnesio-hastingsitas, con pequeñas diferencias en sus contenidos en Al y Ti, que reflejan sus diferentes condiciones de formación. Estas diferencias composicionales no están en relación con la composición de los volcanes en los que aparecen, sino, fundamentalmente, con la posición de los volcanes dentro del campo volcánico.

Aunque los datos geobarométricos difieren en valor absoluto (Tabla II), las diferencias entre islas con cualquiera de ellos son similares. Una distribución de las diferencias en las profundidades de formación puede observarse en la figura 4. En ella se ha usado aleatoriamente el geobarómetro de Schmid (1992), pero figuras análogas se obtienen con los demás geobarómetros.

Todos los geobarómetros (Tabla II) indican que los anfíboles que se han formado en niveles más superficiales (y según Ridolfi y Renzulli, 2012, también a menor temperatura) son los del volcán de Horadada, que ocupa la posición central dentro de la alineación principal de volcanes (Fig. 1) y que es de composición fonolítica. Los del volcán de Ferrera, situado en el extremo norte de la alineación y también fonolítico, se formaron a

profundidades superiores, lo mismo que los de Bergantín, en el extremo sur de la alineación.

Los anfíboles de los volcanes basálticos (Navarrete y Columbrete Grande), que forman una alineación diferente (Fig. 1B), se originaron a profundidades similares a los analizados en el volcán fonolítico próximo (Ferrera).

La distribución general de las profundidades de formación parece indicar que existió una zona central dentro de la alineación de volcanes, donde los anfíboles, y por lo tanto los magmas de los volcanes, se generaron a menor profundidad. Por el contrario, hacia el norte y el sur del archipiélago, la zona de formación de los magmas fue bastante más profunda.

Las profundidades de generación de los anfíboles son aproximadamente las calculadas por distintos autores (Dañobeitia *et al.*, 1992; Torné *et al.*, 1992) para el límite del Moho en este sector. Posiblemente sería la zona en la que los magmas se quedarían retenidos y donde tendrían lugar los procesos de evolución magmática que dieron lugar a las rocas evolucionadas de estas islas (tefritas fonolíticas, fonolitas tefríticas y fonolitas).

Agradecimientos

Este trabajo no hubiera podido realizarse sin contar con las muestras que

	Referencia	Horadada	Lobos	Ferrera	Ferrera (sienita)	Navarrete	Columbrete Grande	Bergantín	
T (°C)	1	1065	1085	1064	1070	1064	1073	1061	
	5	1028	1048	1084	1073	1076	1084	1091	
p (kb)	1	7,7	7,5	8,9	8,8	8,7	8,7	9,1	
	2	8,3	8,1	9,6	9,5	9,4	9,4	9,8	
	3	6,3	6,2	7,3	7,3	7,1	7,2	7,5	
	4	8,0	7,8	9,1	9,0	8,9	8,9	9,3	
	5	5,4	5,1	7,5	7,4	7,1	7,1	7,9	
	Media	7,2	7,0	8,5	8,4	8,2	8,3	8,7	
1: Hammarstrom y Zen (1986)		2: Hollister <i>et al.</i> (1987)		3: Johnson y Rutherford (1989)		4: Schmid (1992)		5: Ridolfi y Renzulli (2012)	

Tabla II. Temperatura y presión medias de formación según diferentes termobarómetros.

Table II. Average formation temperature and pressure according to different thermobarometers.

el Prof. J.M. Fúster recogió en la Expedición científica a Las Columbretes que organizó el CSIC en mayo de 1.964 y que están en la Litoteca de Petrología de la UCM. Para la realización del trabajo se ha contado con fondos del Grupo de Investigación UCM 910469 y del Proyecto CGL2017-86241-R. Los datos de química mineral se han obtenido en el Centro Nacional de Microscopía Luis Bru de la Universidad Complutense de Madrid.

Nuestro especial agradecimiento a J.F. Molina y a un revisor anónimo que han contribuido a mejorar notablemente el contenido del artículo.

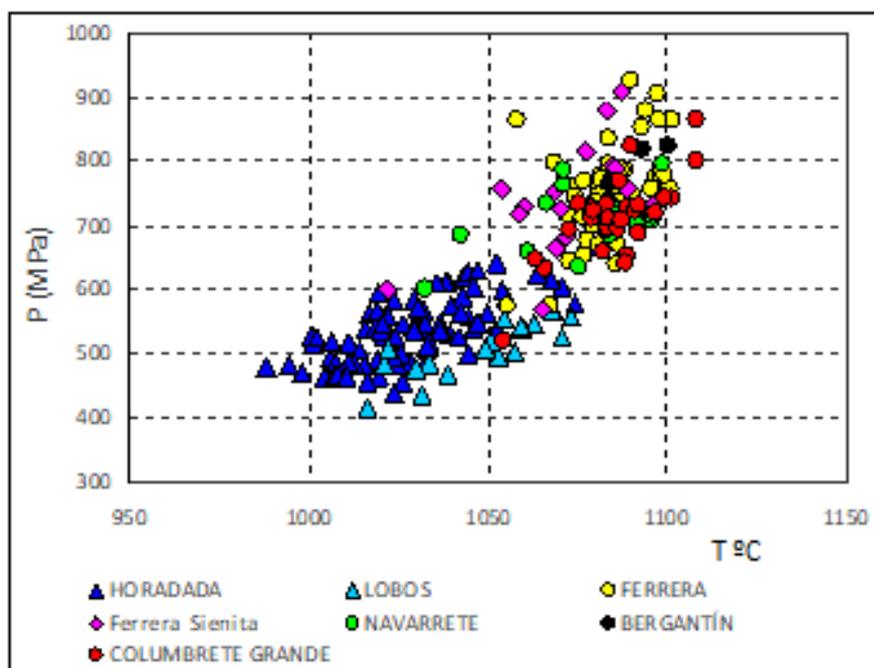


Fig. 3. Temperatura y profundidad de formación de los anfíboles, según el termobarómetro de Ridolfi y Renzulli, 2012.

Fig. 3. Temperature and depth of formation of amphiboles, according to the Ridolfi and Renzulli (2012) thermobarometer.

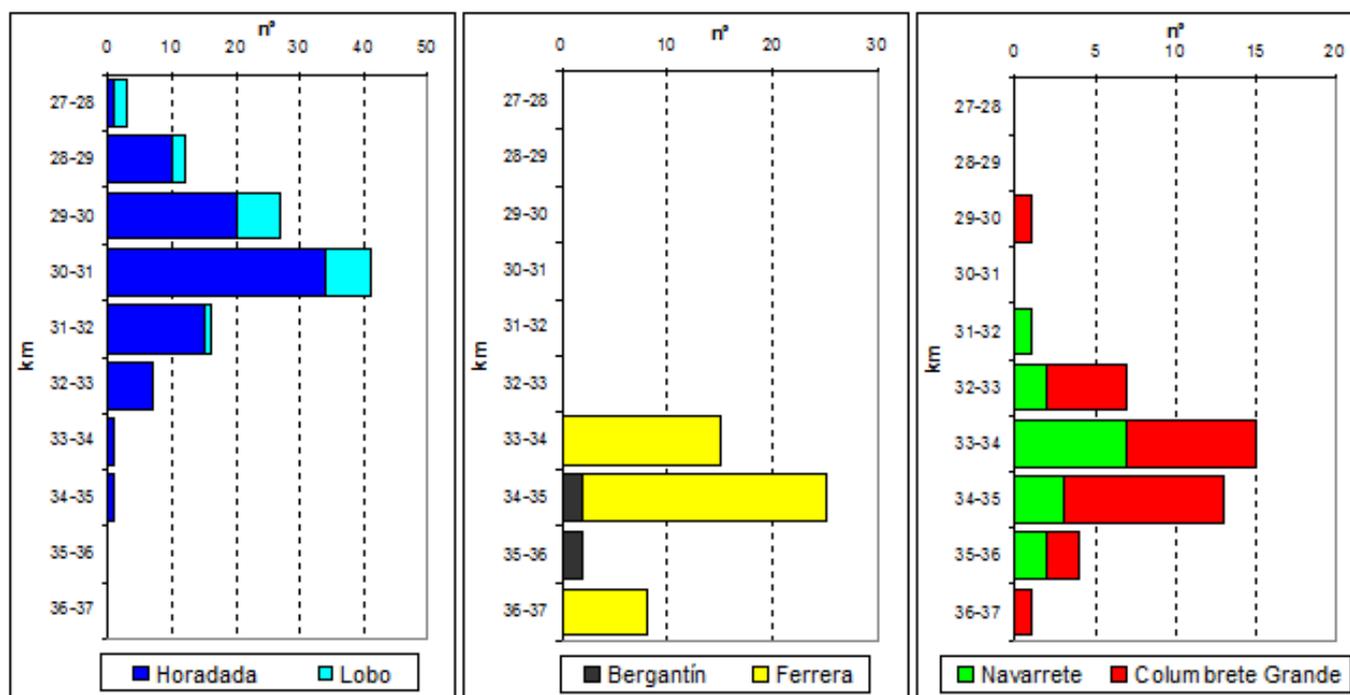


Fig. 4. Distribución de las profundidades de formación de los anfíboles de las diferentes islas/volcanes a partir del geobarómetro de Schmid (1992).
Fig. 4. Distribution of the formation depths of the amphiboles of the different island/volcanoes, from the Schmid (1992) geobarometer.

Referencias

- Alonso Matilla, L.A. (1982). *Estudio de las rocas ígneas de Castellón, Valencia y Alicante*. Tesis Doctoral, Univ. de Salamanca. 183 p.
- Alonso Matilla, L.A. (1987a). En: *Islas Columbretes. Contribución al estudio de su Medio Natural*. (L.A. Alonso Matilla, J.L. Carretero y A.M. García Carrascosa, Eds.) Generalitat Valenciana, 27-54.
- Alonso Matilla, L.A. (1987b). En: *Islas Columbretes. Contribución al estudio de su Medio Natural*. (L.A. Alonso Matilla, J.L. Carretero y A.M. García Carrascosa, Eds.), Generalitat Valenciana, 55-94.
- Ancochea, E. y Huertas, M.J. (2020). *Geogaceta* 67, 51-54.
- Ancochea, E. y Huertas, M.J. (2021). *Journal of Iberian Geology* 47, <https://doi.org/10.1007/s41513-021-00166-z>
- Aparicio, A., Mitjavila, J.M., Araña, V. y Villa, I.M. (1991). *Boletín Geológico y Minero* 102 (4), 562-570.
- Aparicio, A., Araña, V., García, R. y Grachev, I.M. (1994). *Mineralogical Magazine* 58A, 21-22.
- Aparicio, A. y García, R. (1995). *Boletín Geológico y Minero* 106 (5), 468-488.
- Dañobeitia, J.J., Arguedas, M., Gallart, J., Banda, E. y Makris, J. (1992). *Tectonophysics* 203, 37-55.
- Erdmann, S., Martel, C., Pichavan, M. y Kushnir, A. (2014). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 167, 1016.
- Hammarstrom, J.M. y Zen, E.A. (1986). *America Mineralogy Journal* 71, 1297-1313.
- Hollister, L.S., Grissom, G.C., Peters, E.K., Stowell, H.H. y Sisson, V.B. (1987). *America Mineralogy Journal* 72, 231-239.
- Huertas, M.J. y Ancochea, E. (2020). *Geogaceta* 67, 55-58.
- Johnson, M.C. y Rutherford, M.J., (1989). *Geology* 17, 837-841.
- Leake, B. E., Woolley, A.R., Birch, W.D., Burke, E.A., Ferraris, G., Grice, J.D., Hawthorne, F.C., Kisch, H.J., Krivovichev, V.G., Schumacher, J.C., Stephenson, C.N. y Whittaker, E. (2004). *European Journal of Mineralogy* 16, 191-196.
- Martí, J., Mitjavila, J.M., Roca, E. y Aparicio, A. (1992). *Tectonophysics* 203, 145-165.
- Mauffret, A. (1977). *Mémoires Service Géologique de la Société de France* 66, 1-96.
- Mauffret, A., Boillot, G., Auxiètre, J.L. y Dunad, J.P. (1978). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7 (4), 375-387.
- Molina, J.F., Moreno, J.A., Castro, A., Rodríguez, C. y Fershtater, J.B. (2015). *Lithos* 232, 286-305.
- Muñoz, A., Lastras, G., Ballesteros, M., Canals, M., Acosta, J. y Uchupi, E. (2005). *Geomorphology* 72, 1-18.
- Pautot, G., Auzende, J.M., Olivet, J.L. y Mauffret, A. (1973). En: *Initial Report Deep Sea Drilling Project*. 13 (2), 1430-1441.
- Ridolfi, F., y Renzulli, A., (2012). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 163, 877-895.
- Schmidt, M.W. (1992). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 110, 304-310.
- Torné, M., Pascal, G., Buhl, P., Watts, A.B. y Mauffret, A. (1992). *Tectonophysics* 203, 1-20.
- Vidal, J.R. (1972). *Petrología y Geoquímica de las Islas Columbretes (Castellón)*. Tesis de Licenciatura, Univ. Complutense de Madrid, 94 p.
- Vidal, J.R., Campos Juliá, C. y Fúster, J.M. (1974). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 641-642 (Castellón de la Plana. Islas Columbretes) y memoria*. IGME, Madrid, 26 p.