

Equilibrios mineral-fundido en las lavas de la Isla Graciosa (Azores, Portugal): inferencias sobre la etapa proto-isla

Mineral-liquid equilibria in lavas from Graciosa Island (Azores, Portugal): insights into the proto-island stage

Patricia Larrea¹, Marceliano Lago¹, Zilda França², Elisabeth Widom³, Carlos Galé¹, Teresa Ubide¹, Pablo Tierz¹ y Tomás Sanz¹

¹ Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, España. plarrea@unizar.es, mlago@unizar.es, carlosga@unizar.es, tubide@unizar.es, pablo.tierz.lopez@gmail.com

² Observatório Vulcanológico e Geotérmico dos Açores. Avenida Vulcanológica 3, 9560 Alhada, São Miguel, Portugal. zfranca.volcanologist@gmail.com

³ Department of Geology & Environmental Earth Science, Miami University, 207 Shideler Hall, 45056 Oxford, Ohio, USA. widome@muohio.edu

ABSTRACT

This study concerns the petrology and mineral chemistry of selected lava flows from the volcanostratigraphic sequence of Graciosa Island (Azores). These lavas are classified as basalts to trachytes. They show microcrystalline and porphyritic textures characterized by a mineral assemblage mainly composed of olivine, clinopyroxene and plagioclase with minor amphibole and opaque minerals. The application of mineral-melt equilibrium equations made it possible to identify different crystal types within the studied lavas: phenocrysts, microcrysts and antecrysts. The antecrysts in the oldest volcanic complexes suggest a basaltic composition for the proto-island volcanism.

Key-words: Lava, mineral-melt equilibrium, antecryst, Azores.

RESUMEN

En este trabajo se ha realizado el estudio petrológico y de química mineral de una selección de lavas representativas, distribuidas a lo largo de la secuencia vulcanoestratigráfica de la isla Graciosa (Azores). Estas lavas comprenden términos basálticos-traquíticos caracterizados por presentar texturas porfídicas y microcristalinas, cuyas fases minerales principales son olivino, clinopiroxeno, plagioclasa, con menor proporción de anfíbol y minerales opacos. El estudio de los equilibrios mineral-líquido en los diferentes tipos de cristales existentes en los productos volcánicos de la isla ha permitido diferenciar la existencia de fenocristales, microcristales y antecristales. La existencia de antecristales en las rocas de los complejos volcánicos más antiguos de la isla ha permitido inferir la naturaleza basáltica del vulcanismo proto-isla.

Palabras clave: Lava, equilibrio mineral-fundido, antecristal, Azores.

Geogaceta, 53 (2013), 77-80.
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 12 de julio de 2012
Fecha de revisión: 25 de octubre de 2012
Fecha de aceptación: 30 de noviembre de 2012

Introducción

El archipiélago de las Azores comprende nueve islas y varios islotes de naturaleza volcánica que emergen de la Plataforma de las Azores, un alto topográfico que se extiende a ambos lados de la Dorsal Mesoaatlántica, entre las latitudes 37° - 40° N y las longitudes 25° - 31° W (Fig. 1A). La isla Graciosa es la más septentrional del grupo Central, situada entre las latitudes 39° - 39° 06' N y las longitudes 27° 56' - 28° 05' W. Posee una forma elongada en dirección WNW-ESE (Fig. 1B), con un máximo de 13 km de longitud y 7 km de anchura (62 km²), como consecuencia de las principales estructuras regionales existentes.

En este trabajo se presenta, por pri-

mera vez, un minucioso estudio de la petrología y química mineral de una selección representativa de coladas lávicas pertenecientes a las diferentes unidades definidas a lo largo de la secuencia vulcanoestratigráfica de la isla Graciosa.

Geología de la Isla Graciosa

Estudios previos de diferentes autores (Zbyszewski *et al.*, 1972; Forjaz y Pereira, 1976; Maund, 1985; Gaspar y Queiroz, 1995; Gaspar, 1996; Almeida, 2001; Hipólito, 2009; Larrea *et al.*, 2011) han abordado el estudio de la geología, la vulcanoestratigrafía y la geoquímica de las rocas que constituyen la isla. Gaspar y Queiroz (1995), en base a la disposición espacio-

temporal de los centros eruptivos y sus depósitos volcánicos asociados, definieron tres complejos volcánicos principales (Fig. 1B):

1. El Complejo Volcánico de Serra das Fontes constituye la parte subaérea más antigua de la isla (620 ± 120 ky, Féraud *et al.*, 1980) y está compuesto principalmente por productos efusivos de naturaleza hawaítica.

2. El Complejo Volcánico de Serra Branca constituido por productos traquíticos y sus depósitos piroclásticos asociados (350 ± 40 ky, Féraud *et al.*, 1980).

3. El Complejo Volcánico de Vitória-Vulcão Central (< 31 ± 0,28 ky, Féraud *et al.*, 1980) comprende dos unidades contemporáneas, la Unidad de Vitória y la Unidad del Vulcão Central. Estas unidades están formadas por coladas de lava y depósitos pi-

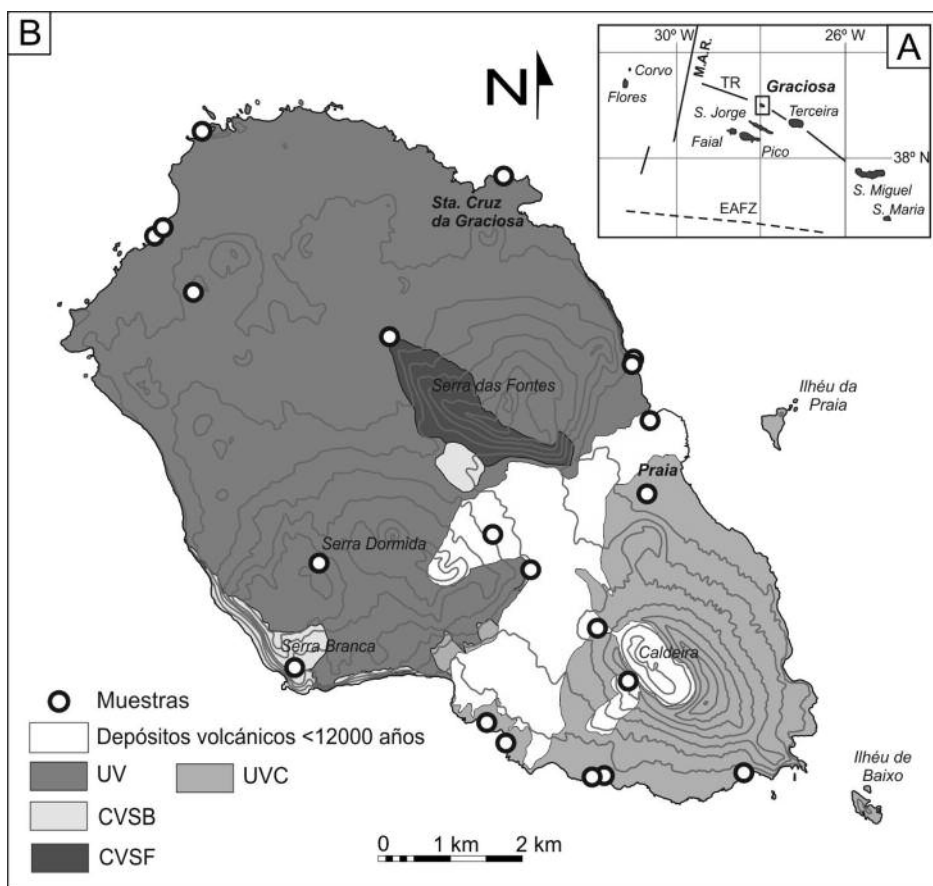


Fig. 1.- A) Localización de la isla Graciosa en el Archipiélago de Azores (M.A.R.: Dorsal Mesoatlántica; T.R.: Rift de Terceira; EAFZ: Zona de fractura este de las Azores); B) Mapa vulcanológico de Graciosa con la posición de las muestras estudiadas. (UV: Unidad de Vitória; UVC: Unidad del Vulcão Central; CVSB: Complejo Volcánico de Serra Branca; CVSF: Complejo Volcánico de Serra das Fontes; Figura modificada de Gaspar, 1996).

Fig. 1.- A) Location of Graciosa Island within the Azores Archipelago (M.A.R.: Middle Atlantic Ridge; T.R.: Terceira Rift; EAFZ: East Azores Fracture Zone); B) Sample locations within the volcanological map of Graciosa. (UV: Vitória Unit; UVC: Vulcão Central Unit; CVSB: Serra Branca Volcanic Complex; CVSF: Serra das Fontes Volcanic Complex; modified from Gaspar, 1996).

roclásticos que abarcan todo el rango composicional de basaltos a traquitas.

En la Fig. 1B se muestra la localización de las 26 coladas lávicas objeto de estudio, de las que 1 muestra pertenece al Complejo Volcánico de Serra das Fontes, 2 al Complejo Volcánico de Serra Branca, 15 a la Unidad de Vitória y 8 a la Unidad del Vulcão Central.

Petrología

Desde el punto de vista petrográfico las coladas lávicas (basaltos a traquitas) de la isla Graciosa son rocas holocristalinas de texturas porfídicas, microporfídicas y microcristalinas.

Las lavas con textura porfídica y microporfídica se caracterizan por presentar cristales grandes aislados (megacristales y macrocristales de hasta 1,5 cm) de olivino (Ol), clinopiroxeno (Cpx), anfíbol (Amp) y plagioclasa (Pl), distribuidos en una matriz micro-

cristalina. Algunos de estos cristales presentan bordes corroídos y coronas de recristalización. La mesostasia está compuesta principalmente por cristales de Pl, Ol, Cpx y una menor proporción de minerales opacos (Opq).

Las rocas con textura microlítica están formadas fundamentalmente por microcristales de Pl, Ol, Cpx y Opq. En las rocas de composiciones más evolucionadas (benmoreitas - traquitas) también se han identificado microcristales de Amp.

Química Mineral

Todas las fases minerales presentes y sus distintas variedades texturales fueron analizadas mediante sonda electrónica JEOL JXA-8900M en el ICTS Centro Nacional de Microscopía Electrónica de la Universidad Complutense de Madrid. Las fórmulas minerales se calcularon en base a 3, 4, 6, 8 y 29 oxígenos para los minerales Opq, el Ol, el

Cpx (Morimoto *et al.*, 1988), la Pl y el Amp (Leake *et al.*, 1997) respectivamente, siguiendo las recomendaciones de la International Mineralogical Association. Los contenidos en Fe⁺³ de los minerales anhidros fueron estimados mediante la aplicación del algoritmo de Droop (1987). El Ol presenta un amplio rango de composición (Fo₈₉₋₅₅) con contenidos bajos de NiO (< 0,36%) y CaO (0,13-0,75%). El Cpx se clasifica como agita-diópsido y posee un rango de composición de Fs₇₋₃₆, con contenidos en Cr₂O₃ < 1,13% y TiO₂ de hasta 3,63 %. La Pl tiene composiciones de An₈₂-An₁, con contenidos en K₂O que alcanzan hasta el 6,17%, en los términos más albiticos, lo que indica su pauta típicamente alcalina. El Amp se clasifica como kaersutita y está caracterizado por contenidos en TiO₂ de 4,73-6,24% y un rango de valores de Mg* [Mg/(Mg + Fe²⁺ + Fe³⁺ + Mn)] de 70,35-57,20. Los Opq pertenecen a la serie ilmenita-maghemita de acuerdo con su contenido en FeO, Fe₂O₃ y TiO₂.

Equilibrio mineral-fundido

La existencia de mega- y macrocristales ha sido previamente descrita en otras islas del Archipiélago de las Azores (e.g., Larrea *et al.*, 2012). En el caso de la isla de Graciosa, todos los cristales estudiados se encuentran dentro de una pauta evolutiva de fraccionación común. No obstante, en función de si los mega- y macrocristales están en equilibrio o no con la roca que los alberga, éstos pueden ser clasificados como fenocristales (existe equilibrio) o antecristales (no existe equilibrio; p.e., Jerram y Martin, 2008). Para discernir la procedencia de los mega- y macrocristales se ha utilizado la relación MgO/FeO de cada una de las lavas estudiadas y los coeficientes de reparto mineral-líquido ($K_{d_{liq-min}}^{Mg-Fe}$) existentes en la literatura: $0,3 \pm 0,03$ para Ol (Roeder y Emsley, 1970), $0,26 \pm 0,05$ para Cpx (Akinin *et al.*, 2005) y $0,38$ para Amp (LaTourrette *et al.*, 1995). Con ello, se ha aplicado la ecuación de equilibrio:

$$K_d = \frac{[MgO_{liq} \cdot FeO_{min}]}{[MgO_{min} \cdot FeO_{liq}]}$$

lo que ha permitido conocer la relación MgO/FeO de los minerales ferromagnesianos que estarían en equilibrio con cada una de las coladas lávicas objeto de estudio y construir así rectas de equilibrio para cada mineral ferromagnesiano (Fig. 2).

Discusión

La comparación de los valores MgO/FeO de equilibrio obtenidos (rectas de equilibrio en Fig. 2) con la relación MgO/FeO de los minerales ferromagnesianos analizados en cada colada (mega-, macro- y microcristales) refleja que la mayor parte de los cristales analizados se encuentran sobre la línea de equilibrio o bajo ella. La mayoría de los mega- y macrocristales (círculos negros) se encuentran en equilibrio con la roca que los alberga, y por tanto deben ser considerados como fenocristales. Los bordes de los fenocristales, así como los microcristales de la mesostasia (círculos blancos), estarían relacionados con los anteriores mediante un proceso de fraccionación.

Por el contrario, se reconoce una serie de macrocristales (triángulos grises) que presentan bordes corroídos y coronas de recristalización y se encuentran en desequilibrio químico con la roca que los alberga (Fig. 2). Estos macrocristales tienen una composición más primitiva que la roca, y por lo tanto, deben ser considerados como an-

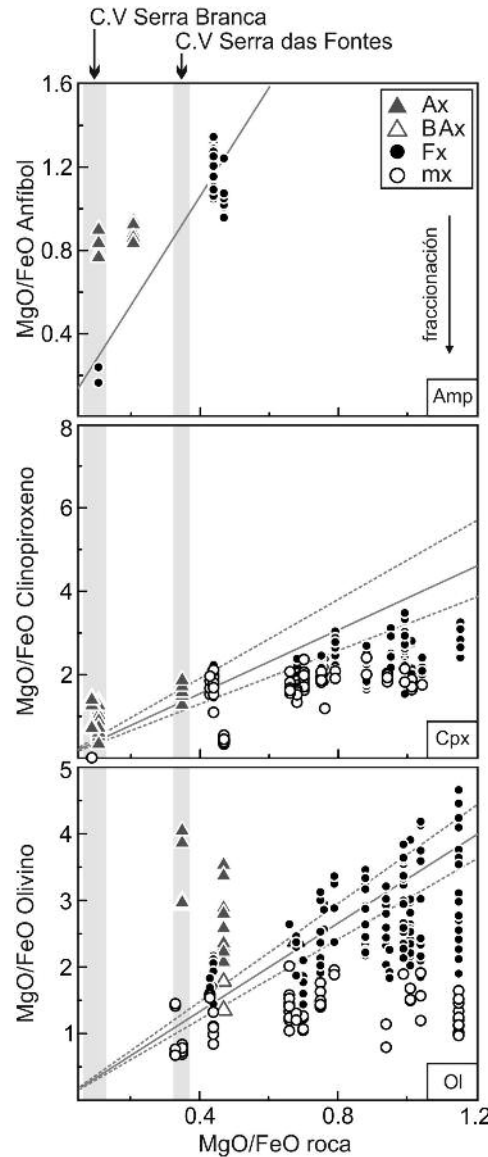


Fig. 2.- Relación MgO/FeO de la roca vs. MgO/FeO del mineral. Se muestran análisis de antecristales (Ax, triángulos grises), bordes de antecristal (BAx, triángulos blancos), fenocristales (Fx, círculos negros) y microcristales y bordes de fenocristal (mx, círculos blancos). Las rectas de equilibrio han sido calculadas de acuerdo a los coeficientes de reparto Fe-Mg de Roeder y Emsley (1970) para Ol, Akinin *et al.* (2005) para Cpx y LaTourrette *et al.* (1995) para Amp.

Fig. 2.- MgO/FeO ratio in the mineral vs. MgO/FeO content in the host rock, showing analyses of antecrystals (Ax, grey triangles), antecrystal rims (BAx, white triangles), phenocrysts (Fx, black circles) and microcrystals and phenocrysts rims (mx, white circles). The equilibrium lines have been calculated according to the Fe-Mg distribution coefficients by Roeder and Emsley (1970) for Ol, Akinin *et al.* (2005) for Cpx and LaTourrette *et al.* (1995) for Amp.

tecrystal. Cabe destacar que los bordes de recrimiento de estos cristales (triángulos blancos) están en equilibrio, y por tanto, cristalizaron a partir del magma que los alberga.

Los antecristales de la isla de Graciosa se localizan en rocas de composición evolucionada (hawaíta, benmoreíta y traquita), pertenecientes al Complejo Volcánico de Serra das Fontes, al Complejo Volcánico de Serra Branca y a la Unidad del Vulcão Central. La composición de estos antecristales es similar a la de los fenocristales de las rocas basálticas del Complejo Volcánico Vitória-Vulcão Central. Así, si se tienen en consideración las relaciones MgO/FeO (Fig. 2), estos antecristales se formaron a partir de fundidos más primitivos que la roca que los alberga. Posteriormente, al ser arrastrados por un fundido de composición más

evolucionada, desarrollaron bordes de reequilibrio.

Los antecristales que se encuentran en las rocas de composición benmoreítica y traquítica de la Unidad del Vulcão Central son equivalentes a los fenocristales de las coladas basálticas previas existentes en esa misma unidad. De esta manera, los antecristales que se encuentran asociados a las coladas lávicas de los complejos volcánicos más antiguos de la isla (Complejo Volcánico de Serra das Fontes y Serra Branca) nos permiten inferir, por primera vez, la composición del vulcanismo previo a esos complejos, es decir, del vulcanismo proto-isla.

Teniendo en cuenta lo anterior, el vulcanismo proto-isla probablemente estuvo caracterizado por fundidos de naturaleza basáltica, que dieron lugar a la formación de fenocristales de composiciones primitivas.

vas. Los fenocristales de los fundidos basálticos del vulcanismo proto-isla posteriormente serían incluidos en los primeros estadios de vulcanismo subaéreo como antecristales.

Conclusiones

Las lavas (basálticas a traquíticas; Larrea *et al.*, 2011) de la isla Graciosa presentan texturas microcristalinas y porfídicas, siendo sus fases minerales mayoritarias Ol, Cpx y Pl, con menor proporción de Amp y Opx.

Las rocas porfídicas están caracterizadas por la existencia de mega- y macrocristales de Ol, Cpx, Pl y Amp. El estudio de las relaciones de equilibrio mineral-fundido ha permitido conocer el origen de estos cristales de gran tamaño; así, han sido interpretados mayoritariamente como fenocristales. Sin embargo, en las rocas evolucionadas representan fases heredadas de tipo antecristal.

Los antecristales se localizan en las rocas evolucionadas de Complejo Volcánico de Serra das Fontes, Complejo Volcánico de Serra Branca y en la Unidad del Vulcão Central. En esta última unidad, los antecristales procederían de coladas previas de composición más primitiva. En el caso de los Complejo Volcánico de Serra das Fontes y Serra Branca, al tratarse de los primeros depósitos subaéreos, los antecristales permiten inferir la composición del vulcanismo proto-isla, que tuvo que estar caracterizado por productos de naturaleza basáltica similares a los que se reconocen en el Complejo Volcánico de Vitória-Vulcão Central.

Agradecimientos

Este trabajo está incluido en los objetivos de la beca predoctoral B023/10 de la Diputación General de Aragón (Patricia Larrea Márquez) y ha sido financiado mediante las ayudas de la Fundação Luso Americana – FLAD [Identificação dos perigos vulcânicos do arquipélago dos Açores através da caracterização geoquímica das lavas emitidas pelos respectivos vulcões] y el Proyecto de Investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación [CGL2011-27477]. Los autores agradecen la ayuda y asistencia técnica de D. Alfredo Fernández Larios durante la realización de los análisis de microsonda electrónica, así como las revisiones del Dr. Manuel Carracedo Sánchez y un revisor anónimo que han permitido mejorar el presente trabajo.

Referencias

- Akinin, V., Sobolev, A., Ntaflou, T. y Richter, W. (2005). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150, 85-101.
- Almeida, M.H. (2001). *A fonte mantélica na região dos Açores: constrangimentos impostos pelas características geoquímicas de rochas vulcânicas e de xenólitos ultramáficos*. Tesis Doctoral, Univ. dos Açores, 184 p.
- Droop, G.T.R. (1987). *Mineralogical Magazine*, 57, 431-435.
- Féraud, G., Kaneoaka, I. y Allegre, C.J. (1980). *Earth and Planetary Science Letters*, 46, 275-286.
- Forjaz, V.H. y Pereira, V. (1976). *Carta vulcanológica Preliminar da Ilha Graciosa 1:25.000*, Instituto de Geociências dos Açores.
- Gaspar, J.L. (1996). *Ilha Graciosa (Açores): História Vulcanológica e Avaliação do Hazard*. Tesis Doctoral, Univ. dos Açores, 361 p.
- Gaspar, J.L. y Queiroz, G. (1995). *Carta vulcanológica dos Açores, ilha Graciosa 1: 10.000, folhas A e B*. UAÇ, Centro de Vulcanologia UAÇ y Câmara Municipal de Santa Cruz da Graciosa.
- Hipólito, A.R. (2009). *Geologia estrutural da ilha Graciosa: enquadramento no âmbito da junção tripla dos Açores*. Tesis Doctoral, Univ. dos Açores, 155 p.
- Jerram, D.A. y Martin, V.M. (2008). En: *Dynamics of crustal Magma Transfer, Storage and Differentiation* (C. Annen y G.F. Zellmer, Eds.). London Geological Society Special Publications, 304, 133-148.
- Larrea, P., França, Z., Lago, M., Widom, E., Galé, C., Ubide, T., Arranz, E., Forjaz, V.H., Ribeiro, L. y Pueyo, O. (2011). En: *IUGG XXV General Meeting*. Proceedings, #1971, 173.
- Larrea, P., França, Z., Lago, M., Widom, E., Galé, C. y Ubide, T. (2012). *Journal of Petrology* first published online December 1, 2012 doi: 10.1093/petrology/egs084
- LaTourrette, T., Hervig, R. y Holloway, J. (1995). *Earth and Planetary Sciences Letters*, 135, 13-30.
- Leake, B.E., Wooley, A.R., Arps, C.E.S., Birch, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D., Hawthorne, F.C., Kato, A., Kisch, H.J., Krivovichev, V.G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J.A., Maresch, W.V., Nickel, E.H., Rock, N.M.S., Schumacher, J.C., Smith, D.C., Stephenson, N.C.N., Ungaretti, L., Whittaker, E.J.W. y Youzhi, G. (1997). *The Canadian Mineralogist*, 35, 219-246.
- Maud, J. (1985). *The Volcanic Geology, Petrology and Geochemistry of Caldeira Volcano, Graciosa, Azores, and its bearing on contemporaneous felsic-mafic oceanic island volcanism*. Tesis Doctoral, Univ. of Reading, 333 p.
- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A.K., Ginzburg, I.V., Ross, M., Seifert, F.A., Zussman, J., Aoki, K. y Gottardi, G. (1988). *Bulletin de Minéralogie*, 111, 535-550.
- Roeder, P.L. y Emslie, R.F. (1970). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 29, 275-289.
- Zbyszewski, G., Medeiros, A. y Ferreira, O. (1972). *Carta Geológica de Portugal 1:25.000, folha ilha Graciosa (Açores)*. Ser. Geol. Portugal.