

# El sistema magmático bajo la Zona Volcánica de la Garrotxa: el caso del volcán Montsacopa

## *The magmatic feeding system under the Garrotxa Volcanic Field: the case of the Montsacopa volcano*

M. Aulinas<sup>1</sup>, J. Taverna<sup>1</sup>, G. Gisbert<sup>1</sup>, D. Gimeno<sup>1</sup>, D. Gasperini<sup>2</sup> y A. Hernández<sup>1</sup>

1. Dpt. Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona 08028 Barcelona. meritxellaulinas@ub.edu, ggisbertp@ub.edu, domingo.gimeno@ub.edu, agushernandez@ub.edu
2. Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa, 56126 Pisa (Italia). d.gasperini@dst.unipi.it

**Resumen:** En este trabajo se presentan datos de petrografía, química mineral, geoquímica y termobarometría del volcán Montsacopa (Zona Volcánica de la Garrotxa) con el fin de realizar una primera incursión en el estudio de la geometría del sistema magmático bajo esta zona volcánica del NE Peninsular. El estudio petrográfico ha evidenciado la presencia de clinopiroxenos inversamente zonados, con núcleos verdes rodeados de un manto beige y/o un borde marrón. Las características petrográficas y químicas de estos núcleos permiten interpretarlos como xenocristales representando, probablemente, productos de la cristalización de un magma más evolucionado que el magma básico que da lugar a los piroclastos básicos del volcán Montsacopa. El estudio termobarométrico llevado a cabo para las muestras de este volcán evidencia que los clinopiroxenos cristalizaron en gran parte a profundidades mantélicas (entre 40 y 50 km), si bien muchos de los bordes de estos cristales se formaron a profundidades corticales evidenciando una cristalización polibárica. La correlación lineal entre P y T observada es indicativa de un ascenso directo a través del manto y la corteza, y sin claras evidencias de estancamientos de los magmas que formaron el volcán Montsacopa.

**Palabras clave:** Zona Volcánica de la Garrotxa, volcán Montsacopa, termobarometría clinopiroxeno-líquido.

**Abstract:** *This paper provides new petrographic, mineral chemistry, geochemical and thermobarometric data of the Montsacopa volcano (Garrotxa Volcanic Field) in order to study the geometry of the magmatic plumbing system beneath this volcanic region located at the NE of the Iberian Peninsula. The petrographic study has revealed the presence of reverse zoned clinopyroxenes with green cores surrounded by beige mantles and brown rims. The petrographic and chemical characteristics of such clinopyroxenes allow interpreting such cores as xenocrysts, probably representing the crystallization products of a more evolved magma compared to the basic magmas of Montsacopa volcano. The thermobarometric study of such samples indicates that most of the analysed clinopyroxenes crystallized at mantle depths (between 40 and 50 km). However, rims of such crystals were formed at crustal depths evidencing polybaric crystallisation. The lineal correlation between P and T evidences a direct ascend through the mantle and crust of the Montsacopa's magmas without significant stagnation.*

**Key words:** *Garrotxa Volcanic Field, Montsacopa volcano, clinopyroxene-liquid thermobarometry.*

## INTRODUCCIÓN

En la mayoría de campos volcánicos basálticos monogenéticos se asume que el mecanismo de transporte y ascenso de magmas es simple. En general se considera que los edificios monogenéticos y las coladas de lava asociadas se forman por el ascenso directo de pequeñas bolsas de magma originadas por fusión parcial del manto. El rápido ascenso de este magma hacia la superficie produce erupciones de corta duración y de bajo volumen. Esta aparente simplicidad dinámica ha implicado que durante mucho tiempo no se hayan llevado a cabo estudios termobarométricos

que ayuden a mejorar el entendimiento sobre la geometría de los sistemas magmáticos así como los mecanismos de ascenso de los magmas en estos campos volcánicos.

En este trabajo se presenta un primer estudio sobre el sistema magmático y los mecanismos de transporte de los magmas cuaternarios de la Zona Volcánica de la Garrotxa (ZVG) focalizados en el volcán Montsacopa.

## MARCO GEOLÓGICO

La ZVG es un campo volcánico monogenético basáltico/basanítico que forma parte de la provincia

volcánica alcalina del NE Peninsular. La actividad volcánica de intraplaca en toda esta región se relaciona con la tectónica extensional de tipo rift que afecta al Mediterráneo occidental desde el Oligoceno y que implicó la apertura del Golfo de Valencia (Anadón, 1979). La actividad volcánica en esta provincia empezó en la zona de Cadaqués (hace más de 12 millones de años) y migró a través de la región hasta que finalmente tuvo lugar la formación de la ZVG entre 300.000 y 10.000 años, con un periodo de retorno estadístico entre erupciones de aproximadamente 15.000-20.000 años (C. Lewis, comunicación personal a D. Gimeno, 1999). La actividad volcánica en la ZVG se caracterizó por la formación de pequeños conos estrombolianos, algunos freatomagmáticos, y otros generados por ambos tipos de actividad alternando en el tiempo. Estos edificios volcánicos y las lavas asociadas se forman por erupciones monogenéticas muy cortas (de días a semanas). En toda la zona se reconocen unos 40 conos volcánicos cuya localización está controlada por fallas de dimensiones crustales que delimitan la estructura en bloques y depresiones que caracteriza la ZVG (Gisbert et al., 2009 y referencias).

## EL VOLCÁN MONTSACOPA

El volcán Montsacopa se localiza en la ciudad de Olot (Garrotxa, provincia de Girona). Este edificio volcánico junto a los volcanes Garrinada y Montolivet muestra un alineamiento de conos con orientación NE-SW (Fig. 1).



FIGURA 1. Localización del volcán Montsacopa en la ciudad de Olot (Girona, Garrotxa). Los volcanes Garrinada-Montsacopa-Montolivet (este último no aparece en la figura) están alineados en dirección NE-SW.

Este edificio volcánico se construyó en el curso de una única erupción, con distintas pulsaciones que incluyen migración gradual del foco eruptivo (X. Bolós 2010, comunicación personal). La primera fase de apertura del sistema es puramente magmática, marcada por la presencia de depósitos de spatter hawaianos. Aun así, los depósitos principales son producto de una

actividad estromboliana. La presencia de depósitos freatomagmáticos en la parte superior de la secuencia eruptiva es indicativa de una interacción agua/magma en los estadios finales de crecimiento de este volcán monogenético (Taverna, 2011).

## RESULTADOS

### Petrografía y química mineral

Se ha realizado el estudio petrográfico y de química mineral de 12 muestras piroclásticas representativas de los productos que forman el volcán Montsacopa. Todos los productos piroclásticos analizados presentan una textura afanítica, porfídica, con presencia de fenocristales (< 15% modal) incluidos en una matriz microlítica hialopilítica. Las fases minerales principales son fenocristales de olivino ( $Fo_{67-83}$ ) y clinopiroxeno zonado. La plagioclasa ( $An_{50-70}$ ) ocurre principalmente en forma de microlitos en la matriz. La principal característica de los clinopiroxenos del volcán Montsacopa es la presencia de zonaciones normales e inversas. Aquellos cristales con zonación normal se caracterizan por presentar un núcleo beige rodeado por un borde marrón variable en grosor. Los análisis de química mineral de estos cristales los clasifican como diópsidos ( $Wo_{42-50}$ ,  $En_{33-34}$ ,  $Fs_{11-20}$ ) si bien existen ligeras diferencias composicionales entre bordes y núcleos siendo los primeros más ricos en FeO. Los clinopiroxenos inversamente zonados se caracterizan por presentar un núcleo verde alotriomorfo rodeado por un manto beige y, en la mayoría de casos, por un borde externo marrón (Fig. 2). La química mineral de estos cristales revela que los núcleos ( $Wo_{45-48}$ ,  $En_{33-38}$ ,  $Fs_{14-19}$ ) presentan composiciones más ricas en FeO,  $Na_2O$  y  $Cr_2O_3$  y valores de Mg# marcadamente inferiores a los mantos y bordes ( $Wo_{44-50}$ ,  $En_{36-49}$ ,  $Fs_{11-13}$ ).

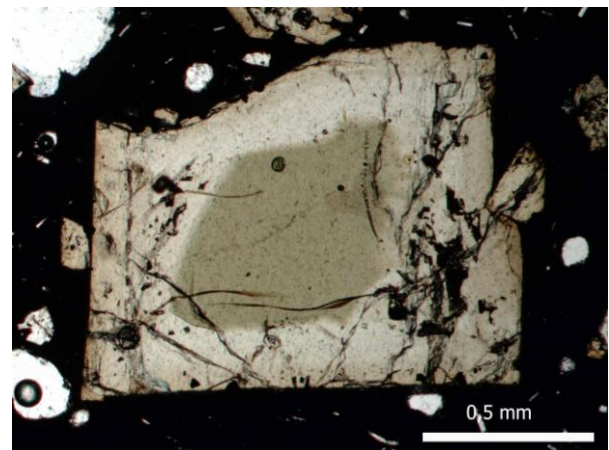


FIGURA 2. Detalle de un clinopiroxeno inversamente zonado con un núcleo anhedral verde rodeado de un manto beige y un borde marrón.

### Geoquímica elemental

Todas las muestras analizadas son alcalinas, subsaturadas en  $SiO_2$  y tienen nefelina normativa. Los

bajos valores de LOI (inferiores al 2,5% en todos los casos) indican que se trata de muestras frescas. El diagrama *Total Alkali Silica* (TAS) de Le Bas et al. (1986) se ha utilizado para la clasificación de las muestras del volcán Montsacopa (Fig. 3). Previamente, los análisis han sido recalculados al 100% en base anhidra y el ratio  $Fe_2O_3/FeO$  ratio se ha ajustado teniendo en cuenta las indicaciones de Middlemost (1989).. De acuerdo con el diagrama TAS, la mayoría de las muestras se clasifican como basanitas ( $ol_{CIPW} > 10\%$ ). Únicamente dos muestras se clasifican como basaltos alcalinos y otras dos como traquibasaltos. En general se trata de una serie de muestras composicionalmente muy homogéneas, sin variaciones químicas destacables.

### Termobarometría clinopiroxeno-líquido

La composición química de clinopiroxenos se ha utilizado clásicamente para estimar las condiciones de P y T de evolución de los magmas. El termobarómetro de Putirka et al. (2003) ha sido calibrado para líquidos básicos, líquidos hidratados y líquidos relativamente evolucionados. El error estándar (SEE) es de 1,7 kbar y 33° K. Idealmente, este modelo combina la composición química de los fenocristales de clinopiroxeno y del vidrio de la matriz, el cual representa el líquido en equilibrio.

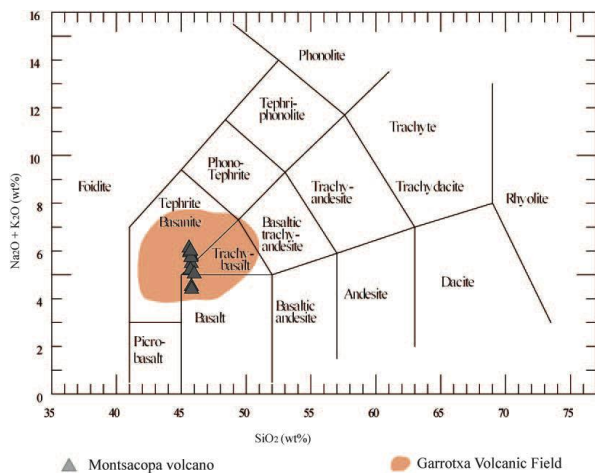


FIGURA 3. Clasificación TAS de las muestras del volcán Montsacopa.

En los casos en los que no se disponga de análisis del vidrio se puede utilizar la composición de la roca total como líquido nominal. Ahora bien, un problema que suele surgir en la utilización de la composición de la roca total es que en muchas ocasiones ésta no representa el líquido a partir del cual han cristalizado los clinopiroxenos (líquido en equilibrio), tal como sucede en el presente estudio. Además, la presencia de clinopiroxenos zonados u otros fenocristales puede representar fuentes de error en lo que se refiere al equilibrio. En estos casos, el restablecimiento del equilibrio entre el líquido nominal y el clinopiroxeno consiste en la substracción o adición de los

componentes minerales a partir de la composición de la roca total inicial hasta conseguir un líquido nominal apropiado (Putirka et al., 2003). Para comprobar que en todo momento existe un equilibrio entre el líquido y el fenocristal se asume un  $K_D(Fe-Mg)^{cpx/liq} = 0.27$ , en el que  $K_D(Fe-Mg)^{cpx/liq} = [X_{MgO}^{liq} X_{FeO}^{cpx}] / [X_{MgO}^{cpx} X_{FeO}^{liq}]$ , y  $X_{MgO}$  and  $X_{FeO}$  son las fracciones molares de MgO y FeO en la fase clinopiroxeno (cpx) o líquido (liq). Además se asume un  $K_D(Fe-Mg)^{ol/liq} = 0.3$  (Putirka y Condit, 2003). La composición de la roca total se ha ajustado a un  $K_D(Fe-Mg)^{cpx/liq} = 0.27$  mediante el fraccionamiento de olivino y clinopiroxeno. La estimación de las composiciones de los líquidos en equilibrio para las muestras del volcán Montsacopa (previo al cálculo mediante el modelo de Putirka et al., 2003) se ha llevado a cabo a partir de un algoritmo desarrollado por Armienti et al. (2010) en el que se representa el trazado del cotéctico del sistema usando coeficientes de distribución mineral-líquido y estequiometría mineral, todo ello adaptado a sistemas basálticos que evolucionan a lo largo de un cotéctico ol + cpx. Los resultados de termobarometría obtenidos se presentan en la figura 4. En ella se puede observar una distribución bastante lineal de las presiones y temperaturas calculadas a través del manto y de la corteza. La mayoría de clinopiroxenos cristalizan a presiones entre 11 y 16 kbar y temperaturas que varían entre 1150°C y 1250°C. Un número menor de clinopiroxenos (correspondientes en gran parte a bordes de éstos) cristalizan a presiones de entre 3 y 8 kbar y a temperaturas entre 1050°C y 1130°C. Las condiciones P-T de cristalización de los mantos y bordes de los clinopiroxenos inversamente zonados son muy similares a las de los núcleos y bordes de los clinopiroxenos con zonación normal. Los cálculos termobarométricos sobre análisis de perfiles de clinopiroxenos muestran como existe una disminución progresiva de la P y la T obtenidas hacia los bordes de estos cristales.

### DISCUSIÓN

Los fenocristales de clinopiroxeno inversamente zonados (con núcleos verdes y mantos/bordes beige/marrones) presentes en rocas máficas alcalinas han sido interpretados como 1) xenocristales accidentales, 2) productos de mezcla de magmas con distinto grado de evolución, 3) fases cognatas debido a un cambio en la actividad del oxígeno o del agua en el fundido. Las características petrográficas y composicionales de las muestras del volcán Montsacopa (morfología redondeada de los núcleos verdes, cambio óptico y químico brusco entre los núcleos verdes y mantos beige, Fe/Mg altos, así como la coexistencia de todo tipo de clinopiroxenos en una misma muestra) indican que el origen más probable de estos núcleos verdes sea el de xenocristales cognatos, análogamente a lo deducido recientemente para clinopiroxenos inversamente zonados con núcleo verde de Gran Canaria (Aulinas et al., 2010). Estos núcleos

verdes podrían representar productos de cristalización de un magma más evolucionado. Un proceso de *mingling* podría explicar la presencia de estos cristales en los magmas básicos del volcán Montsacopa. El estudio de termobarometría ha revelado que la cristalización principal de los clinopiroxenos se produjo a profundidades mantélicas (entorno a 40-50 km de profundidad). Aun así, muchos de los bordes de estos cristales cristalizaron a profundidades corticales (entre 10 y 25 km). La distribución lineal P-T de estos clinopiroxenos indica que el ascenso de los magmas hacia la superficie se produjo sin evidentes estancamientos en el manto o en la corteza. Además, la tendencia lineal observada en los análisis de perfiles de clinopiroxenos reafirma una cristalización polibárica de los magmas del volcán Montsacopa.

## CONCLUSIONES

El estudio de petrografía y química mineral ha evidenciado la presencia de clinopiroxenos inversamente zonados cuyos núcleos han sido interpretados como xenocristales cognatos. El estudio termobarométrico de clinopiroxenos-líquido constata que la cristalización de los clinopiroxenos se inicia a profundidades mantélicas, y que el ascenso de los magmas fue directo, sin estacionamientos remarcables. Además se han detectado posibles procesos de magma mingling durante el ascenso de estos magmas básicos.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha realizado en el marco del Grupo de Investigación Consolidado SGR2009-972 PEGEFA (Petrología y Geoquímica Fundamental y Aplicada) y ha sido financiado por los proyectos CGL2007-63727/BTE y CGL2011-28022 del Ministerio de Ciencia y Innovación

## REFERENCIAS

Anadón, P., Colombo, F., Esteban, M., Marzo, M., Robles, S., Santanach, P., Solé Sugrañes, Ll.

(1979): Evolución tectonoestratigráfica de los Catalánides. *Acta Geológica Hispánica*, 14, 242-270.

Armienti, P., Gasperini, D., Perinelli, C. y Putirka, K.D. (2010): A new model for estimating deep-level magma ascent rates from thermobarometry: an example from Mt. Etna and implications for deep seated magma dehydration. *Acta Vulcanologica*, Special Issue: 145-157

Aulinas, M., Gimeno, D., Pérez-Torrado F.J., Fernandez-Turiel, J.L., Rodriguez-Gonzalez, A. y Gasperini, D. (2010): The Plio-Quaternary magmatic feeding system beneath Gran Canaria (Canary Islands, Spain): constraints from thermobarometric studies. *Journal of the Geological Society of London*, 167: 785-801.

Gisbert, G., Gimeno, D. y Fernandez-Turiel, J.L. (2009): Eruptive mechanisms of the Puig de la Garrinada volcano (Olot, Garrotxa Volcanic Field, NE Spain): a methodological study based on proximal pyroclastic deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 180: 259-276.

Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. y Zanettin, B. (1986): A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica diagram. *Journal of Petrology*, 27: 745-750.

Middlemost, E.A.K. (1989): Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chemical Geology*, 77: 19-26

Putirka, K.D. y Condit, C.D. (2003): Cross section of a magma conduit system at the margin of the Colorado Plateau. *Geology*, 31: 701-704.

Putirka, K.D., Mikaelian, H., Ruerson, F. y Shaw, H. (2003): New cpx-liquid thermobarometers for mafic, evolved and volatile bearing lava compositions, with application to lavas from Tibet and Snake River Plane, Idaho. *American Mineralogist*, 88: 1542-1554.

Taverna, J. (2011): *Estudi Petrològic, Geoquímic i Termobaromètric del volcà Montsacopa*. Treball de Fi de Carrera (Llicenciatura), Univ. de Barcelona, 59p.

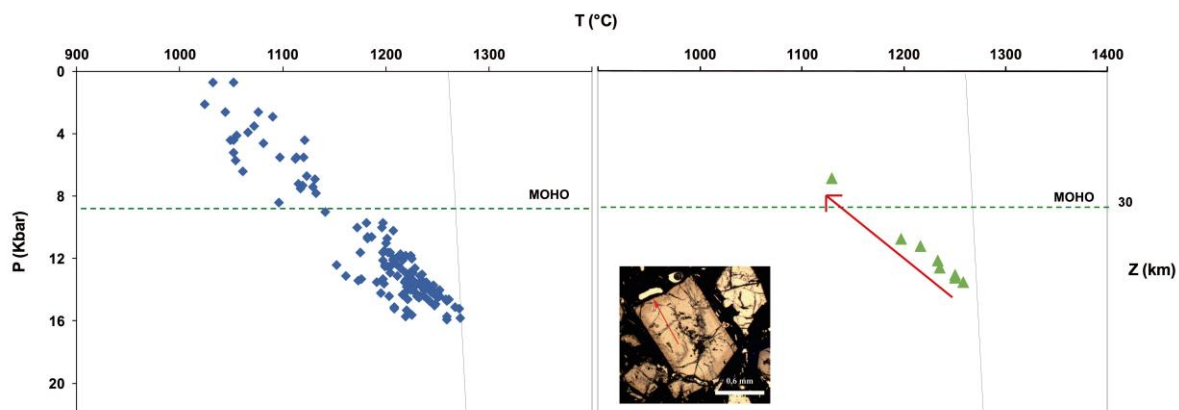


FIGURA 4. Correlación entre la P y T de cristalización de los clinopiroxenos. En el primer diagrama se representan todos los datos obtenidos para un total de 6 muestras. El segundo diagrama es un ejemplo de las variaciones P-T a lo largo del análisis de un perfil de clinopiroxeno con zonación normal.