

El sistema magmático-hidrotermal asociado al Volcán Tupungatito, Región Metropolitana, Chile

Oscar Benavente^{1,2*}, Francisco Gutiérrez^{1,2}, Felipe Aguilera^{2,3}, Martin Reich^{1,2}, Franco Tassi⁴ y Orlando Vaselli⁴.

¹ Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

² Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Universidad de Chile, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

³ Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad de Atacama, Copayapu 485, Copiapó, Chile.

⁴ Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Florencia, Via La Pira 4, 50121, Florencia, Italia.

* E-mail: oscar.benavente.zolezzi@gmail.com

Resumen. El Volcán Tupungatito es una caldera con ocho cráteres activos pertenecientes a la parte norte de la Zona Volcánica Sur, 70 km al Este de la ciudad de Santiago (33.4°S, 69.8°W; 5682 m.s.n.m). La fuente de los fluidos presentes es principalmente hidrotermal, con una componente magmática importante. El sistema volcánico esta dominado por un dominio profundo de gas y líquido en equilibrio a 330°C y uno vapor condensado más somero con una temperatura de equilibrio de 230°C.

Palabras Claves: Volcán Tupungatito, Geoquímica de Fluidos volcánicos.

1. Introducción

El volcán Tupungatito (33.4°S, 69.8°W; 5682 m.s.n.m) corresponde a una caldera volcánica localizada en la Región Metropolitana de Chile, 70 km al Este de la ciudad de Santiago (Fig. 1a). Actualmente, el Tupungatito es el volcán más al norte de la Zona Volcánica Sur (ZVS) en presentar actividad solfatárica permanente, incluida la existencia de tres lagunas cratéricas en su interior (Fig. 1b). Éste volcán es uno de los tres centros eruptivos (Tupungatito, San José y Maipo) de la ZVS norte en presentar actividad histórica, y cuya última erupción data del año 1987 (Stern et al., 2007). Producto de la altura de su cráter, el volcán Tupungatito está cubierto de nieve y hielo, actuando como un importante alimentador de los sistemas de drenajes de la alta cordillera. Éstos, en última instancia desembocan en el río Maipo, el cual cruza la ciudad de Santiago (Stern et al., 2007). A pesar de los potenciales riesgos geológicos existentes en una eventual erupción del volcán Tupungatito (e.j. flujo de ceniza, lahares y caída de ceniza), poco se sabe acerca de las características petrológicas de los productos volcánicos del Tupungatito (Hildreth and Moorbarth, 1988; Stern et al., 2007). Adicionalmente, no existen datos monitoreo sísmológico del volcán, y tampoco un catastro geoquímico e isotópico de las numerosas manifestaciones termales dentro del cráter.

Este trabajo presenta los primeros resultados de la composición química e isotópica de los gases y aguas recolectadas durante dos campañas de terreno, realizadas durante el mes de Febrero 2011 y Febrero 2012. Junto con el análisis de datos, se discute las principales

características geoquímicas de los fluidos emitidos en el volcán Tupungatito, y se formula un modelo conceptual del sistema magmático e hidrotermal.

2. Marco geológico

El volcán Tupungatito se localiza en la Cordillera Principal de la Cordillera de los Andes, donde la geología consiste principalmente en secuencias marinas y volcanoclásticas Meso-Cenozoicas, de Este a Oeste respectivamente (Farías et al., 2010). Estructuralmente esta zona destaca por fallas inversas de alto ángulo asociadas a la inversión de la cuenca de Abanico en la parte Oeste, y fallas inversas asociadas a la faja plegada y corrida de Aconcagua en la porción Este (Farías et al., 2010). Ambos dominios litológicos y estructurales se encuentran en contacto a través del sistema de falla El Diablo (Farías et al., 2010). Depositado disconformemente sobre las deformadas secuencias Mesozoicas se encuentran los más de 6 km³ de lavas pertenecientes al edificio del Volcán Tupungatito (Hildreth and Moorbarth, 1988), que corresponde a una caldera volcánica compuesta con 8 cráteres activos anidados en su interior (González-Ferrán, 1995). La caldera tiene 5 km de diámetro y una edad Pleistocena reciente (González-Ferrán, 1995). Los productos volcánicos del Tupungatito tienen una composición andesítica a basalto andesítica (Hildreth and Moorbarth, 1988).

La actividad histórica del Tupungatito registra 19 erupciones desde 1829, donde la mayor parte de éstas no superan el índice de explosividad 2 (González-Ferrán, 1995). Por otro lado, los registros históricos muestran que la mayoría de las erupciones del Tupungatito se encuentran temporalmente relacionadas con los grandes eventos tectónicos de Chile central (González-Ferrán, 1995).

3. Resultados

Las temperaturas de las fumarolas varían entre 82.5 y 117°C. El contenido de vapor de agua varía entre 72.4 a 75.69 % del volumen total. La composición de la fracción seca del gas se caracteriza por la presencia de CO₂ como el gas más abundante ($\leq 973.556 \mu\text{mol/mol}$), y la presencia

de gases ácidos como HCl ($\leq 0.307 \mu\text{mol/mol}$), HF ($\leq 0.026 \mu\text{mol/mol}$) y SO₂ ($\leq 0.215 \mu\text{mol/mol}$). Otras especies importantes corresponden a H₂S ($\leq 22.217 \mu\text{mol/mol}$), N₂ ($\leq 4.893 \mu\text{mol/mol}$), S ($\leq 0.001 \mu\text{mol/mol}$), CH₄ ($\leq 0.439 \mu\text{mol/mol}$), Ar ($\leq 0.005 \mu\text{mol/mol}$), O₂ ($\leq 0.029 \mu\text{mol/mol}$), H₂ ($\leq 2.415 \mu\text{mol/mol}$), He ($\leq 0.094 \mu\text{mol/mol}$) y CO ($\leq 0.0019 \mu\text{mol/mol}$). Las concentraciones de los hidrocarburos livianos ($\Sigma\text{C}_2\text{-C}_7$) varían entre 0.0017 y 0.0027 $\mu\text{mol/mol}$. El contenido de $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ varía entre -2.92 y -6.84‰ V-PDB. La composición isotópica varía para δD entre -55 y -72‰ V-SMOW, mientras que para $\delta^{18}\text{O}$ lo hace entre -3.3 y 0.8‰ V-SMOW. La composición isotópica expresada en R/Ra varía entre 5.19 y 5.45.

La temperatura del agua de la laguna cratérica alcanza los 32.2°C. El pH del agua es de 0.34, el total de sólidos disueltos es de 40 gr/lit y la composición química se caracteriza por la presencia de SO₄ (12589 mg/lit), Cl (12504 mg/lit), Ca (1097 mg/lit), Na (589 mg/lit), K (355 mg/lit) y Mg (305 mg/lit).

4. Discusiones

Las descargas fumarólicas del volcán Tupungatito pueden ser consideradas como el resultado de la mezcla entre dos miembros, uno relacionados a una fuente magmática y el otro a una fuente hidrotermal muy desarrollada.

La fuente magmática está representada por las altas concentraciones de SO₂ y N₂, y la razón N₂/He-800, ambas relacionadas a la deshidratación del slab (Figura 2). Por otro lado, la fuente hidrotermal está representada por la presencia de las altas concentraciones de H₂S y CH₄, y por el desarrollo de lagunas cratéricas dentro del cráter, las cuales son las representaciones más someras del sistema hidrotermal (Varekamp et al., 2000). De acuerdo a la composición química de la laguna cratérica, ésta puede ser clasificada como una del tipo activa producto de la alta concentración de SO₄ y Cl y su bajo pH, sugiriendo un importante input de gases ácidos de origen magmático en la génesis laguna.

La composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ and δD de las fumarolas sugiere que el origen de los fluidos se debe al resultado de la mezcla entre aguas andesíticas y aguas meteóricas, mientras que la composición isotópica de He sugiere una mezcla entre un componente mantélico (R/Ra~8) y cortical (R/Ra~0.1).

La composición isotópica de $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ indica que la principal fuente de carbón es la deshidratación de los sedimentos del slab, con un escaso input mantélico (MORB).

De acuerdo a los cálculos geotermométricos, el volcán Tupungatito es un sistema vapor-líquido en equilibrio, donde el vapor es separado de un acuífero en ebullición a una temperatura de ~330°C. Estos fluidos hacen y son condensados en el sistema hidrotermal sobreyacente (*scrubbing*), haciendo que los fluidos estén controlados por el buffer hidrotermal (FeO-FeO_{1.5}) a una temperatura entre

200 y 250°C.

Este sencillo modelo geoquímico de la evolución de los fluidos, además de explicar bastante bien los datos químicos e isotópicos de los fluidos, entrega información acerca del estado eruptivo del volcán. Producto del abundante agua en la zona, existirá un balance entre el input de energía y masa desde la cámara magmática y el *scrubbing* de esta masa en el cuerpo de agua del sistema hidrotermal (Symonds et al., 2001). De esta manera las condiciones hidrotermales serán siempre una constante encima del volcán, hasta que exista un aumento importante del input energético y másico desde la cámara magmática (e.g. en periodos eruptivos). Muy diferente a lo que acontece en zonas áridas (norte de Chile), donde los volcánes por lo general tienen un sistema volcánico bien desarrollado encima del volcán y el sistema hidrotermal está supeditado a los bordes del volcán, por lo que durante periodos de actividad volcánica y entre éstos, el *buffer* volcánico siempre estará presente (Aguilera et al., 2011; Capaccioni et al., 2011).

Agradecimientos

Los autores agradecen a las siguientes fuentes de financiamiento: (i) MECESUP UCH-0708 por el financiamiento de la beca de doctorado del autor principal, (ii) FONDAP-Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), por el financiamiento de los equipos de terreno, el trabajo de campo y la asistencia a congresos y (iii) PBCT-PDA07 por financiar equipo de trabajo y trabajo de campo.

Referencias

- Aguilera, F., Tassi, F., Darrah, T., Moune, S., Vaselli, O. 2011. Geochemical model of a magmatic hydrothermal system at the Lastarria volcano, northern Chile. *Bulletin of Volcanology*.
- Capaccioni B. et al. 2011. Geochemical and isotopic evidences of magmatic inputs in the hydrothermal reservoir feeding the fumarolic discharges of Tacora volcano (northern Chile). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 208 (2011) 77–85.
- Chiodini G. and Marini L. 1998. Hydrothermal gas equilibria; the H₂O-H₂ -CO₂ -CO-CH₄ system *Geochim. Cosmochim. Acta* 62(15), 2673-2687.
- Farias, M., D. Comte, et al. 2010. "Crustal-scale structural architecture in central Chile based on seismicity and surface geology: Implications for Andean mountain building." *Tectonics* 29: 22
- Giggenbach W.F. and Gougel R.L. (1989). Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges. *Inst. Geol. Nucl. Sci. New Zealand, Report n. CD2401*, 36-53..
- Giggenbach, W.F., 1997. The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems. In: Barnes, H.L. (Ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 3rd ed. JohnWiley and Sons, New York, NY, USA, p. 972
- González-Ferrán, O. 1995. *Volcanes de Chile*. Instituto Geográfico Militar, 639 p. Santiago

Hildreth, W. and S. Moorbath. 1988. "Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile." *Contributions to Mineralogy and Petrology* 98(4): 455-489.

Stern, C., Moreno, H., López-Escobar, L., Clavero, J., Lara, L., Naranjo, J., Parada, M., Skewes, A. 2007. *Chilean Volcanoes. In Geology of Chile*, Moreno, T., Gibbons, W. (ed.). Geological Society of London. P. 289-308

Symonds, R.B., Gerlach, T.M. and Reed, M.H., 2001, Magmatic gas scrubbing: implications for volcano monitoring, *J. Volcanol.*

Geotherm. Res. 108, 303-341.

Tassi, F., Aguilera, F., Darrah, T., Vaselli, O., Capaccioni, B., Poreda, R J., Huertas, A Delgado. 2010. Fluid geochemistry of hydrothermal systems in the Arica-Parinacota , Tarapacá and Antofagasta regions (northern Chile). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol 192. 1-15.

Varekamp, J.C., G.B. Pasternack, and G.L. Rowe Jr. 2000. Volcanic lake systematics II. Chemical constraints, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 97:161-179.

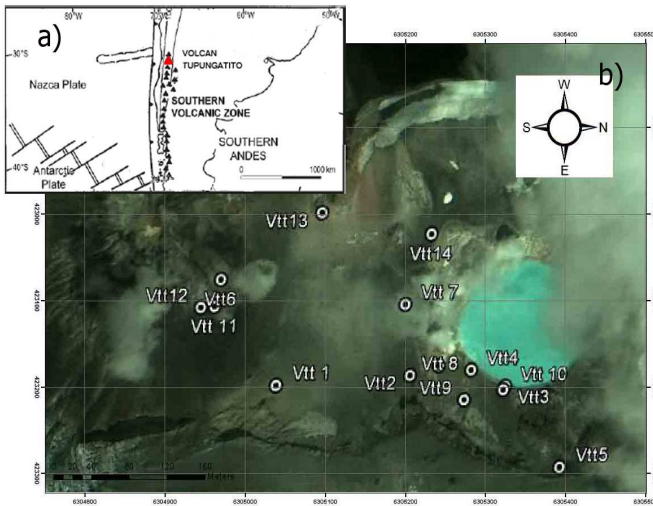


Figura 1. a) Mapa ubicación del volcán Tupungatito en la Zona Volcánica. b) Mapa de los cráteres del volcán Tupungatito y los puntos de muestreo.

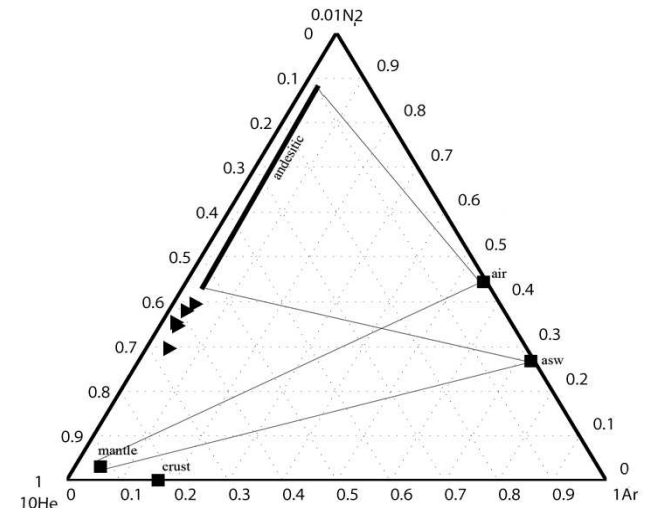


Figura 2. Diagrama triangular de $N_2/100-Ar-He*10$ de las descargas fumarólicas del volcán Tupungatito (Giggenbach et al., 1997).

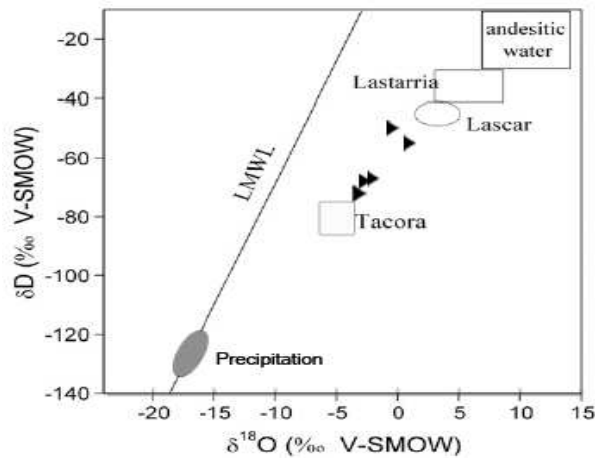


Figura 3. Diagrama binario de $\delta^{18}O$ vs δD para las descargas fumarólicas del volcán Tupungatito. Con fines de comparación se ponen los campos del volcán Lastarrias, Lascar y Tacora (Capaccioni et al., 2011), además de las precipitación de la zona de estudio y el campo de aguas andesíticas (Giggenbach et al., 1997).

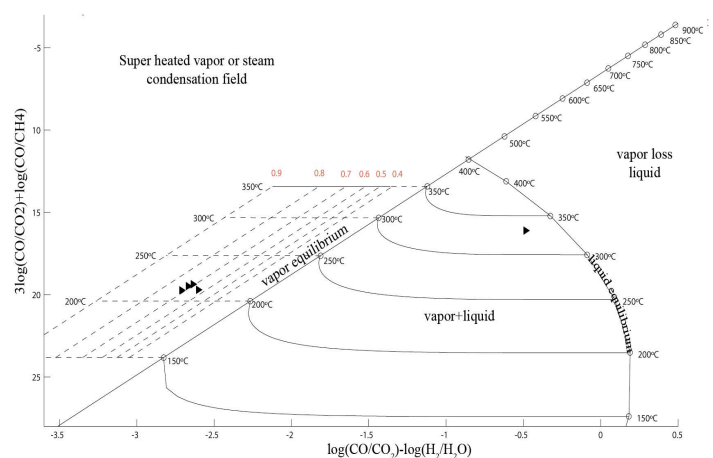


Figura 4. Diagrama binario de de la suma de las razones $CO/CO_2-H_2/CO+CH_4$ v/s $CO/CO_2+CO/CH_4$ para las descargas fumarólicas del volcán Tupungatito..