

# Análisis de Inclusiones Fundidas de la Cadena Volcánica San Pedro – Linzor, Andes Centrales.

**Benigno Godoy\*, Gerhard Wörner y Shoji Kojima**

*Doctorado en Ciencias, Mención Geología, Universidad Católica del Norte. Av. Angamos 0610. Antofagasta. Chile*

*Abteilung Geochemie, GZG, Universidad de Göttingen. Goldschmidtstraße 1, 37077, Göttingen, Alemania*

*Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte. Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile*

\*E-mail: [bgn001@alumnos.ucn.cl](mailto:bgn001@alumnos.ucn.cl)

**Resumen.** El estudio de inclusiones fundidas es una metodología útil para determinar la evolución de magmas que han dado origen a un conjunto de rocas ígneas. Esto es aún más útil en zonas de arco donde magmas primitivos son modificados durante el ascenso a través de la corteza. En este trabajo se presentan resultados de análisis de elementos mayores para inclusiones fundidas de lavas de la cadena volcánica San Pedro-Linzor (Andes Centrales). Estas inclusiones tienen formas que van de redondeadas a subredondeadas, con tamaños menores a 50  $\mu\text{m}$ . Se encuentran alojadas en iroxeños y plagioclasas, presentando un contenido en  $\text{SiO}_2$  entre 66-78%. El alto contenido en sílice, la disminución de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$  durante la diferenciación magmática y la profundidad (16 – 21 km) a la cual han cristalizado los minerales que han entrampado estas inclusiones, sugieren que los magmas de los cuales provienen éstas se encuentran en niveles someros de la corteza y se asocian a líquidos anatéticos relacionados con el Cuerpo Magmático del Altiplano-Puna. Además, los resultados sugieren que procesos posteriores al entrampamiento de estas inclusiones pueden haber modificado su contenido, en especial de Mg y Fe.

**Palabras claves:** Andes Centrales, San Pedro – Linzor, Inclusiones Fundidas, Magmas Anatéticos

## Introducción

El arco magmático actual de Los Andes Centrales ha sido generado sobre una corteza continental cuyo espesor alcanza los 70 km (Beck et al., 1997). Los magmas primitivos generados en el manto son posteriormente modificados por procesos de cristalización de fases minerales y, principalmente, contaminación durante su ascenso a través de la gruesa corteza continental (e.g. Davison, 1996). De esta manera, estos procesos dificultan la determinación de la composición primaria de los magmas primitivos en los productos volcánicos finales. Considerando esto, el estudio de inclusiones fundidas alojadas en minerales que cristalizan durante las primeras fases de diferenciación magmática permiten establecer de mejor manera la evolución de los magmas que han sido eruptados a lo largo de este arco volcánico.

En este trabajo se presentan resultados de análisis de inclusiones fundidas presentes en piroxeños y plagioclasas de lavas eruptadas a lo largo de la Cadena Volcánica San Pedro-Linzor (CVSPL). Estudios de este tipo ya han sido

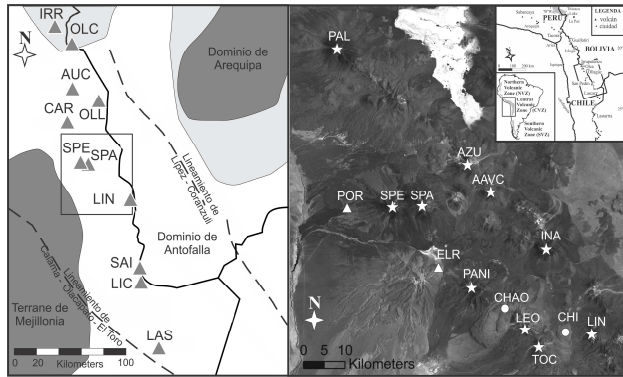
desarrollados en los Andes Centrales, enfocándose en inclusiones fundidas contenidas en cuarzos de ignimbritas (e.g. Schmitt et al., 2002) y depósitos metalíferos (e.g. Dietrich y Lehmann, 2000). No obstante, no hay datos publicados de estudios en lavas eruptadas a lo largo del arco volcánico actual presente en los Andes Centrales.

Los análisis de inclusiones fundidas, y de minerales en los cuales se alojan éstas, fueron realizados mediante microsonda electrónica en la Universidad de Göttingen, Alemania. Análisis de roca total de las lavas fueron realizados mediante fluorescencia de rayos X en la misma universidad.

## Marco Geológico

CVSPL tiene una longitud de ~65 km (Fig. 1), encontrándose orientada en dirección NW-SE, paralela a los lineamientos de Lipez-Coranzulí y Calama-Olacapato-El Toro y transversal a la cadena principal (Fig. 1). Esta cadena incluye el complejo volcánico San Pedro-San Pablo y los volcanes Paniri, Cerro del León, Toconce y Linzor. Además, aquí se encuentra el cono de escoria La Poruña y los domos dacíticos Chao y Chillahuita (Fig. 1). Los edificios volcánicos que pertenecen a esta cadena están constituidos por flujos de lavas y piroclásticos que varían de andesita-basáltica a dacítica y sobreyacen un las rocas sedimentarias de la Formación San Pedro y a ignimbritas miocénicas (Ramírez y Huete, 1980; Marinovic y Lahsen, 1986; O'Callaghan y Francis, 1986; Salisbury et al., 2011). Estas ignimbritas son de composiciones riódacíticas a dacíticas y su formación se ha relacionado con la construcción del Complejo Volcánico del Altiplano-Puna (APVC, *sensu* de Silva, 1989), desarrollado en los últimos 12 Ma (de Silva, 1989; Salisbury et al., 2011).

CVSPL se localiza inmediatamente encima de lo que se ha denominado Cuerpo Magmático del Altiplano-Puna (CMAP, *sensu* Zandt et al., 2003). Este cuerpo corresponde a fundidos anatéticos localizados dentro de la corteza, entre 15 y 25 km de profundidad. Estos fundidos se han generado por la intrusión de cuerpos magmáticos derivados de zonas más profundas, encontrándose relacionado con la erupción de ignimbritas y domos de composiciones dacíticas a riolíticas presentes en los Andes Centrales (de Silva, 1989; Zandt et al., 2003).



**Figura 1.** Mapa de ubicación y distribución de la cadena volcánica San Pedro – Linzor. IRR: Irruputuncu; OLC: Olca; AUC: Aucanquilcha; CAR: Carcote; OLL: Ollagüe; SPE: San Pedro; SPA: San Pablo; LIN: Linzor; SAI: Sairecabur; LIC: Licancabur; LAS: Lascar; PAL: Palpana; AZU: Azufre; AAVC: Aguilucho-Apacheta; INA: Inacaliri; POR: La Poruña; ELR: El Rojo III; PANI: Paniri; CHAO: Dacita Chao; LEO: Cerro del León; CHI: Domo Chillahuíta; TOC: Toconce; LIN: Linzor.

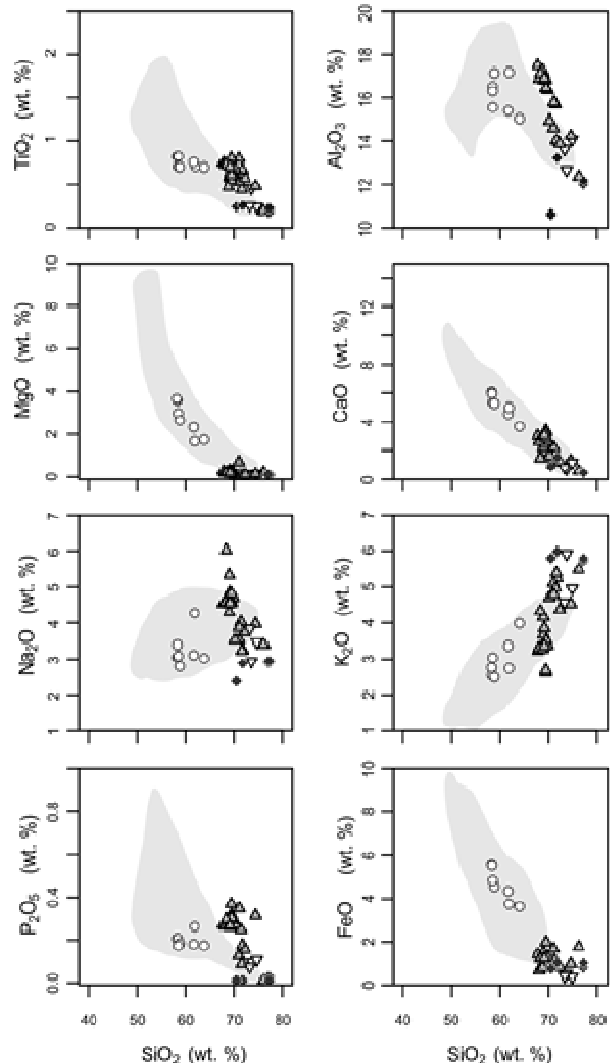
## Resultados

Las inclusiones fundidas analizadas se encuentran alojadas en rocas cuyas composiciones varían de andesítica a dacítica. El mineral principal en que se encuentran alojadas estas inclusiones es enstatita, encontrándose inclusiones alojadas en augita rica en Mg y labradorita. La forma de las inclusiones varía de redondeada a subredondeada, siendo principalmente elípticas, con tamaños que no superan las 50  $\mu\text{m}$ . Inclusiones fundidas con minerales hijos (minerales cristalizados dentro de la inclusión posterior a su entrapamiento) se observan en las muestras analizadas, sin embargo, los análisis se realizaron en inclusiones que no presentan estos minerales. Además, burbujas de encogimiento (*shrinkage bubbles*) se observan en algunas de las inclusiones analizadas.

Las inclusiones fundidas analizadas muestran una tendencia calcoalcalina con un alto contenido en sílice, el que varía de 68 a 78% en peso (Fig. 2). Esta concentración es mayor que la observada en las rocas en que se alojan estas inclusiones (Fig. 2), siendo a la vez mayor que el de todas las lavas presentes en la cadena volcánica (47-68%  $\text{SiO}_2$ ), y gran parte de las lavas eruptadas en los Andes Centrales (Fig. 2). Además, estas inclusiones presentan concentraciones de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que varían de 10 a 18%,  $\text{Na}_2\text{O}$  de 2 a 6%,  $\text{K}_2\text{O}$  de 2 a 6%,  $\text{CaO}$  <4% wt,  $\text{FeO}$  <2%,  $\text{MgO}$  <1% y  $\text{TiO}_2$  <1%. Los datos obtenidos muestran una disminución de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , y  $\text{TiO}_2$  a medida que aumenta el contenido de  $\text{SiO}_2$  en las inclusiones (Fig. 2). También se observa un incremento de  $\text{K}_2\text{O}$  con el aumento de  $\text{SiO}_2$ , mientras que no se observa una relación entre  $\text{SiO}_2$  con  $\text{FeO}$  o  $\text{MgO}$  (Fig. 2).

Utilizando fórmulas de geotermobarometría de dos piroxenos (Putirka, 2008) en muestras de SPL que

muestran enstatita en conjunto con augita rica en Mg, se han obtenido valores de temperatura y presión que varían entre 940 y 1030°C, y entre 4.5 y 5.7 kbar, respectivamente. Esto último se traduce en profundidades de cristalización de entre 16 y 21 km.



**Figura 2.** Diagramas de variación de óxidos mayores respecto a  $\text{SiO}_2$  (% en peso) para las inclusiones fundidas analizadas. El campo gris corresponde a lavas de los Andes Centrales (datos de Mamani et al., 2010). Círculos indican composición de lavas en las cuales se encuentran estas inclusiones. Triángulos grises, corresponden a composiciones de inclusiones contenidas en enstatita, triángulos blancos invertidos de inclusiones en augita rica en Mg, y rombos de inclusiones contenidas en labradoritas.

## Discusión

Considerando que las inclusiones fundidas representarían la composición de material involucrado en el origen a una secuencia de rocas ígneas, el alto contenido en sílice (66-78%) de las inclusiones analizadas no representarían la composición de material derivado del manto debajo del actual arco volcánico de los Andes Centrales, como ha sido propuesto al iniciar este trabajo. Sin embargo, los

resultados obtenidos son útiles para determinar procesos que afectan la evolución de los magmas eruptados en esta zona.

La composición de las diferentes muestras son homogéneas en los diferentes minerales analizados. Además, aún cuando pertenecen a diferentes muestras, las inclusiones analizadas presentan correlaciones entre sus elementos mayores y SiO<sub>2</sub> (Fig. 2). Esto sugiere que las inclusiones tienen como origen un magma común. Así, la disminución de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO y Na<sub>2</sub>O con el aumento de SiO<sub>2</sub>, indicaría un fraccionamiento de plagioclasa durante la evolución de este magma. De esta manera, resultados de geotermobarometría y de análisis de inclusiones fundidas obtenidas para lavas de esta cadena, indican que la cristalización de los minerales que contienen las inclusiones ha ocurrido a profundidades donde la plagioclasa es estable.

Los contenidos de FeO y MgO de las muestras analizadas no muestran una correlación significativa con el SiO<sub>2</sub> (Fig. 2) ni con otros de los elementos analizados. Esto estaría relacionado con el desequilibrio existente entre las inclusiones fundidas y los piroxenos que las contienen. Reubi y Blundy (2009) han establecido que el desequilibrio observado entre fases minerales e inclusiones fundidas contenidas en ellas no necesariamente significa que la composición de las inclusiones no representan al magma que les dió origen, sino que indica mecanismos asociados a la formación de la inclusión y a procesos de entrapamiento o posterior a éste.

De esta manera, las características morfológicas de las inclusiones fundidas (ausencia de minerales hijos y presencia de burbujas de encogimiento) indican que éstas son primarias. Por otra parte, los contenido anómalos de FeO y MgO, y el consiguiente desequilibrio observado, se deberían procesos post-entrapamiento que habrían ocurrido. Esto se relacionaría con una difusión de estos elementos entre las inclusiones y el mineral huésped. Además, considerando el comportamiento de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O y CaO, en conjunto con las presiones de cristalización estimadas para los minerales que contienen las inclusiones, y el alto contenido en sílice de las inclusiones, se propone que los magmas que han generado estas inclusiones y minerales es un magma que se encontraría localizado a profundidades someras dentro de la corteza. Este estaría relacionado con la presencia del CMAP el cual contamina los magmas en esta zona durante su ascenso a la superficie.

Así, aún cuando no representen la composición del material primitivo que ha dado origen a CVSPL, los resultados de inclusiones fundidas presentados en este trabajo han permitido establecer características importantes de la evolución magmática de las lavas eruptadas a lo largo de esta cadena.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Dr. A. Kronz, Dr. G. Hartmann y Dr.(c) M. Banazack por su ayuda en el laboratorio. También agradecen a Dr. A. Menzies por su colaboración. Este trabajo ha sido llevado a cabo gracias a los proyectos DGIP-UCN No. 10301265 y CONICYT No. 24100002. B.G. es un candidato a Doctor beneficiado por CONICYT y BecasChile-DAAD con becas para llevar cabo sus estudios.

## Referencias

- Beck, S.L., Zandt, G., Myers, S.C., Wallace, T.C., Silver, P.G., Drake, L., 1996. Crustal-thickness variations in the central Andes. *Geology*, v. 24, n° 5, p. 407-410.
- Davidson, J.P., 1996. *Deciphering Mantle and Crustal Signatures in Subduction Zone Magmatism* In Bebout, G.E., Scholl, D., Kirby, S., and Platt, J.P. (Eds.), *Subduction Top to Bottom*, American Geophysical Union Monograph, 96, 384 pp.
- de Silva, S.L., 1989. Altiplano-Puna volcanic complex of the central Andes. *Geology*, v. 17, p. 1102-1106.
- Dietrich, A., Lehmann, B., 2000. Bulk rock and melt inclusion geochemistry of Bolivian Tin porphyry systems. *Economic Geology*, v. 95, n. 2, p. 313-326.
- Marinovic, N., Lahsen, A., 1984. Carta geológica de Chile, Hoja Calama, Escala 1:250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta n° 58, Santiago, Chile.
- O'Callaghan, L.J., Francis, P.W., 1986. Volcanological and petrological evolution of San Pedro volcano, Provincia El Loa, North Chile. *Journal of the Geological Society, London*, v. 143, p. 275-286.
- Putirka, K.D., 2008. Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, v. 69, p. 61-120.
- Ramírez, C., Huete, C., 1981. Carta geológica de Chile, Hoja Ollagüe. Escala 1:250.000. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta n° 40, Santiago, Chile.
- Reubi, O., Blundy, J., 2009. A dearth of intermediate melts at subduction zone volcanoes and the petrogenesis of arc andesites. *Nature*, v. 461, p. 1269-1273.
- Salisbury, M.J., Jicha, B.R., de Silva, S.L., Singer, B.S., Jiménez, N.C., Ort, M.H., 2011. 40Ar/39Ar chronostratigraphy of Altiplano-Puna volcanic complex ignimbrites reveals the development of a major magmatic province. *Geological Society American Bulletin*, v.123, n° 5-6, p. 821-840.
- Schmitt, A.K., Kasemann, S., Meixner, A., Rhede, D., 2002. Boron in central Andean ignimbrites: implications for crustal boron cycles in an active continental margin. *Chemical Geology*, v. 183, p. 333-347.
- Zandt, G., Leidig, M., Chmielowski, J., Baumont, D., y Yuan, X., 2003. Seismic detection and characterization of the Altiplano-Puna magma body, Central Andes. *Pure and Applied Geophysics*, v. 160, p.789-807.