

## Correlación entre cambios geoquímicos y deformación en el volcán Copahue (Argentina) durante el ciclo eruptivo 2012-2017.

Mariano Augusto<sup>1,2</sup>, María Laura Velez<sup>1,2</sup>, Pablo Euillades<sup>3</sup>, Franco Tassi<sup>4</sup>, Alberto Caselli<sup>5</sup>, María Clara Lamberti<sup>1,2</sup>, Juliana Szentiványi<sup>1</sup>, Joaquín Llano<sup>1,2</sup>, Victoria Nogués<sup>1</sup>, Alcira Trinelli<sup>6</sup>

<sup>1</sup> GESVA, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad de Buenos Aires, Argentina. [magusto@gl.fcen.uba.ar](mailto:magusto@gl.fcen.uba.ar)

<sup>2</sup> Instituto de Estudios Andinos "Don Pablo Groeber" UBA-CONICET, Buenos Aires, Argentina.

<sup>3</sup> CONICET & Instituto CEDIAC, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.

<sup>4</sup> Dipartimento Scienze della Terra, Università di Firenze, Firenze, Italia

<sup>5</sup> LESVA, IIPG, Universidad Nacional de Río Negro, CONICET, Argentina.

<sup>6</sup> IGEBA, Universidad de Buenos Aires, CONICET, Argentina.

**Palabras clave:** fluidos volcánicos, DInSAR, series temporales.

El estudio y monitoreo de volcanes activos ha presentado grandes avances en las últimas décadas, tanto por la aplicación conjunta de múltiples disciplinas (geofísicas y geoquímicas) como por la incorporación de sistemas de adquisición de datos remotos y/o automatizados. En relación con esto, los avances tecnológicos han permitido aumentar las capacidades de procesamiento, reducir los tiempos de análisis y obtener resultados con mayor precisión. Entre las disciplinas más utilizadas en la actualidad en el seguimiento de volcanes activos se encuentran el estudio de la geoquímica de fluidos volcánicos (gases y aguas termales) y de la deformación cortical. Ambas metodologías registran datos de superficie que son utilizados para inferir los procesos que actúan en el sistema profundo, siendo este uno de los desafíos más complejos. Por esta razón, el análisis integral de señales registradas a través de diferentes técnicas es fundamental para interpretar los procesos actuantes y el estado general del sistema volcánico.



Fig. 1 – Ubicación del volcán Copahue (37°51'S-71°09'O) en el límite entre Argentina y Chile.

En general, los volcanes muestran señales geoquímicas y/o geofísicas antes, durante y después

de los eventos eruptivos. Estas señales ayudan a comprender los procesos que ocurren en profundidad en distintos sectores del sistema, pudiendo estar relacionados a la cámara magmática, los conductos o el sistema hidrotermal asociado. En este trabajo se presentan los cambios registrados en el volcán Copahue durante ciclo eruptivo 2012-2017 a partir de los trabajos de geoquímica de fluidos y deformación realizados.



Fig.2 – Erupción del volcán Copahue el 22 de diciembre del 2012. Se observa la ciudad de Caviahue a orillas del lago del mismo nombre.

El volcán Copahue (37°51'S-71°09'O, 2977 msnm) se encuentra ubicado en el límite entre Argentina y Chile, y es uno de los centros eruptivos más estudiados de la Argentina (fig. 1) dada su frecuente actividad eruptiva en las últimas décadas. La actividad volcano tectónica en esta zona comenzó durante el Plioceno y mantiene actualmente una frecuente actividad eruptiva. El volcán Copahue es un estratovolcán basáltico-andesítico activo, emplazado en el sector occidental de la caldera de Caviahue. En la cima presenta 9 cráteres orientados en dirección

NE, de los cuales el ubicado en el extremo Este es el más activo en la actualidad. La historia eruptiva reciente da cuenta de al menos 13 episodios freáticos y freatomagmáticos de baja magnitud (Varekamp et al. 2001, Caselli et al. 2016 y sus referencias). La atención a este centro eruptivo se debe a la cercanía a centros poblados con gran afluencia de turismo: 6 km de la localidad de Copahue y 9 km de la localidad de Caviahue (fig. 2). Durante los periodos de calma, el cráter activo aloja una laguna ácida con pH menor a 1 y temperaturas de hasta 60° C (Agusto et al., 2012). Desde el flanco este del cráter activo emanan vertientes ácidas y calientes (hasta 80° C) que confluyen para formar las nacientes del Río Agrio, cuya composición química afecta al sistema hidrológico de la región hasta 80 km aguas abajo (Varekamp et al. 2009). En los alrededores del edificio volcánico se producen manifestaciones termales con emisiones de gases fumarólicos de hasta 16° C y aguas ácidas con altas temperaturas (Agusto et al., 2013).

Durante el año 2011, luego de 10 años de calma, el volcán Copahue comenzó a mostrar signos de reactivación. Sin embargo, el ciclo eruptivo actualmente en curso, comenzó a mediados del año 2012 con explosiones inicialmente freáticas y posteriormente freatomagmáticas de baja magnitud (Daga et al. 2017). En diciembre del 2012 un segundo pulso dio lugar a una erupción mayor de características freatomagmáticas (fig. 2) que evoluciona a estromboliana, con evaporación del sistema hidrotermal somero presente en el cráter (Petrinovic et al. 2014, Caselli et al. 2016).



Fig. 3 – Cono anidado en el cráter del volcán Copahue con actividad estromboliana débil durante el 2016 y 2017.

Durante el mes de octubre del 2014 un tercer pulso fue registrado con una nueva erupción freatomagmática – magmática con emisión de cenizas y bombas volcánicas. La laguna cratérica que había desaparecido con el inicio del ciclo eruptivo, a principios del año 2015 se regenera indicando la disminución de la actividad. Un cuarto pulso se desarrolla hacia finales del 2015 ocasionando la

desaparición del sistema hidrotermal somero. Este periodo se caracterizó por una actividad hidromagmática y magmática débil (Caselli y Barion 2016), donde la emisión de cenizas y bombas volcánicas dieron lugar a la formación de un cono piroclástico anidado. Durante el año 2016 y 2017 continúa con actividad estromboliana débil (fig. 3) y pequeñas explosiones esporádicas (<http://www.sernageomin.gov.cl/volcanes.php>).

La deformación del edificio del volcán Copahue se viene analizando desde varios años antes de este último ciclo eruptivo (Vélez et al. 2011). La deformación en superficie fue analizada a partir del procesamiento interferométrico diferencial de apertura sintética (DInSAR) de imágenes Envisat, Cosmo SkyMed (Fig. 4) y ALOS. Esta técnica ha demostrado ser de gran aplicación a la deformación volcánica y, particularmente para el caso del volcán Copahue, nos ha permitido registrar un evento deflacionario en este centro eruptivo en el periodo 2004-2007 (Vélez et al. 2011). Con un set de datos de imágenes Envisat (13 imágenes), de la última fase de funcionamiento del satélite Envisat E3, se construyeron 66 interferogramas del periodo Abril 2011 a Abril 2012. Esto permitió identificar un periodo inflacionario que comenzó entre Agosto y Octubre 2011, con un desplazamiento acumulado en línea de vista (LOS) de 5 cm en los 6 meses de datos de este satélite (fig. 5). Posteriormente, con un interferograma realizado entre diciembre 2011 y enero 2013 mediante imágenes Cosmo SkyMed, se observó una deformación acumulada cercana a 17 cm (Vélez et al. 2016).

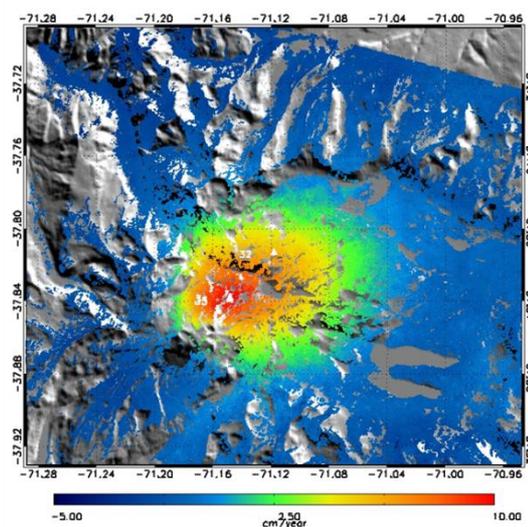


Fig. 4 – Interferograma realizado a partir de imágenes Cosmo SkyMed (2011-2013) muestra deformación centrada en el sector noreste del volcán Copahue.

Entre 2011 y 2014 un set de imágenes COSMO-SKymed (149 escenas) permitieron generar una cantidad de interferogramas en los que se observa una

clara deformación. En estas se reconoce un proceso inflacionario a una tasa promedio de inflación cercana a 6.5 cm/año en la zona de máxima deformación sobre el edificio volcánico. La vinculación de esta deformación con la alimentación del sistema volcánico se expresa en la disminución en la magnitud del proceso inflacionario a medida que nos alejamos del centro eruptivo.



Fig. 5 – Patrón de deformación inflacionario (2011-2012) previo al inicio del ciclo eruptivo.

Mediante imágenes ALOS-2/PALSAR obtenidas entre 2015 – 2016 (12 escenas) no es posible identificar un patrón claro de deformación aparente.

Con respecto a la geoquímica de fluidos, mediante el trabajo de seguimiento realizado por el grupo sobre las manifestaciones termales del volcán Copahue se ha identificado que las aguas ácidas de la laguna del cráter, vertientes del volcán y río Agrio resultan ser buenas indicadores de perturbaciones del sistema volcánico-hidrotermal alojado en el interior del edificio volcánico (Agusto et al. 2012). De la misma forma que se había observado durante la erupción del año 2000 y la anomalía térmica del 2004 (NTA), a partir de ciclo eruptivo iniciado en el año 2012 algunas relaciones geoquímicas han mostrado efectivamente el incremento de la componente magmática en el sistema (Agusto y Varekamp 2016). Como se observa en la figura 6, las relaciones Mg/Cl y Mg/SO<sub>4</sub> en las aguas ácidas de las vertientes desarrollan picos positivos en correlación con los distintos eventos que se han producido en los últimos 20 años. Particularmente, en las aguas ácidas del río Agrio las relaciones SO<sub>4</sub>/Cl y Mg/Cl mostraron picos positivos durante los eventos eruptivos 2012 y 2015-2016. Los picos positivos registrados están asociados a un importante incremento de la especie SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y de los elementos formadores de roca (Na, K, Ca, Mg, Fe y Al), habitualmente enriquecidos en fluidos de origen magmático. Esta tendencia se pudo observar parcialmente en las aguas de las vertientes termales del flanco del volcán y en la laguna cratérica. Es importante considerar que esta parte del sistema es mucho más inestable, ya que ha sido afectada y modificada en cada evento explosivo. En las aguas de las vertientes se observó un incremento sostenido de cationes mayoritarios desde el inicio de la actividad eruptiva. Las concentraciones de estas especies mostraron un aumento desde valores cercanos a 500 ppm hasta valores por encima de los 2000 ppm.

Durante el año 2013, con posterioridad al segundo pulso explosivo de diciembre del 2012, la ausencia de

Asociado a esto se reconocieron picos positivos de la relación Mg/Cl en forma previa a las erupciones del 2012 y del 2015-2016, y un incremento sostenido de la relación Mg/SO<sub>4</sub> desde el inicio del ciclo eruptivo en el 2012 (fig. 6).

Desde la laguna cratérica, durante el 2012 se observa un marcado aumento en la tasa de emisión gaseosa del cráter y un progresivo descenso en el nivel de la laguna. Asociado a esto, desde el punto de vista composicional también se reconoce un marcado aumento en las concentraciones de todas las especies mayoritarias. Los aniones mayoritarios son los que presentan las mayores concentraciones, con valores que superaron los 400000 ppm de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y 150000 ppm de Cl<sup>-</sup>. Mientras que los elementos formadores de roca mostraron un aumento de las concentraciones desde valores en torno a los 500 ppm hasta superar los 4000 ppm. Es importante destacar que la ocurrencia de la laguna del cráter ha sido inestable durante el ciclo eruptivo, condicionada por el alto flujo de emisión y los eventos explosivos. En los casos en los cuales el aporte de origen meteórico supera la tasa de evaporación y la laguna logra establecerse, los parámetros de campo indican temperaturas por encima de los 80°C y valores de pH inferiores a 0.

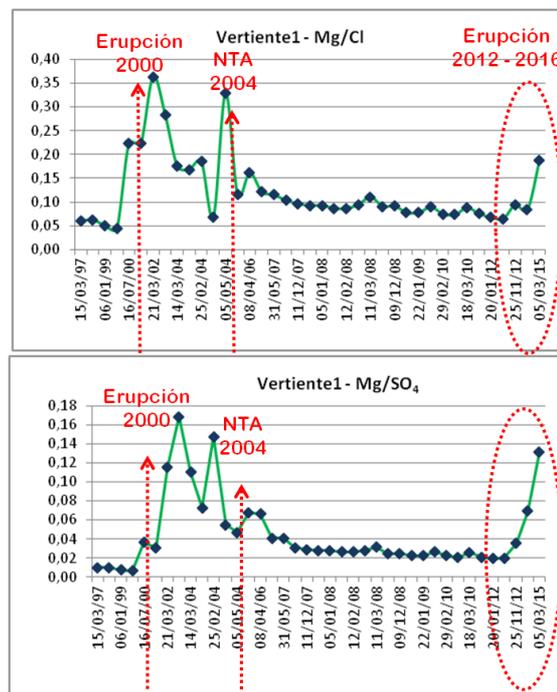


Fig. 6 –Incremento de la relación Mg/Cl y Mg/SO<sub>4</sub> en las aguas de las vertientes ácidas del volcán Copahue durante el ciclo eruptivo 2012-2016. Se indica también las variaciones durante la erupción del año 2000 y la anomalía térmica del 2004.

la laguna cratérica permitió medir por primera vez la composición de los gases fumarólicos del cráter por

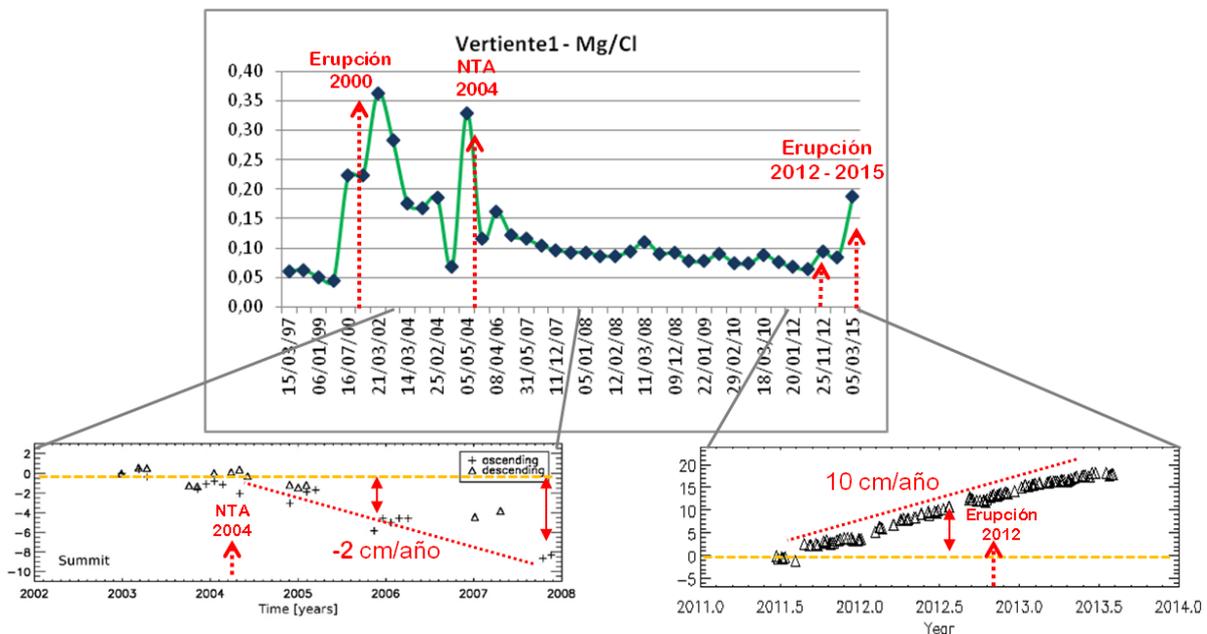
muestreo directo. Las emisiones gaseosas medidas en el interior del cráter presentaban temperaturas por encima de los 400°C. La composición química estaba caracterizada por altas proporciones de vapor de agua (valores de hasta 94 %), mientras que la fracción de gas seco presentaba una composición dominada por CO<sub>2</sub> (valores de hasta 7,06% molar) y concentraciones relativamente altas de compuestos ácidos, tales como SO<sub>2</sub> (hasta 1,57% molar), HCl (hasta 0,05% molar), H<sub>2</sub>S (hasta 0,08% molar), HF (0,03% molar).

Sin embargo, las fumarolas del cráter fueron nuevamente cubiertas por una incipiente laguna cratérica a principios del 2014, evitando la continuidad del muestreo directo. De esta manera, las emisiones gaseosas del cráter se realizaron a partir de un medidor Multi-GAS portátil y una cámara UV. Con el medidor Multi-GAS se determinó la composición del gas/vapor que emana de la superficie de la laguna, mientras que con la cámara UV se identificaron columnas de SO<sub>2</sub> de muy alta densidad que escapaban del cráter. El procesamiento de la información conjunta obtenida por ambas técnicas permitió determinar la concentración de las emisiones gaseosas y el flujo para las principales especies ácidas de origen volcánico. Se determinó para la pluma del cráter del Copahue una tasa de emisión de 12000 toneladas/día (t/d) (Tamburello et al. 2015), dominado por vapor de agua y muy altos valores de SO<sub>2</sub> (hasta 1300 t/d), CO<sub>2</sub> (>600 t/d) y HCl (>60 t/d).

Mediante el muestreo directo realizado en las fumarolas cratéricas se obtuvieron datos que se consideran como valor referencia magmático para poder evaluar las emisiones gaseosas de las áreas hidrotermales aledañas. Las fumarolas de las áreas hidrotermales son de carácter permanente y por tal motivo poseen una mayor frecuencia de muestreo (Agusto et al. 2013). Durante el periodo eruptivo 2012, y posteriormente a partir de los eventos eruptivos del 2014-2015, se reconoce un marcado incremento de H<sub>2</sub> y CO en la composición de los gases fumarólicos. Por su parte, la composición isotópica del He (R/Ra) y el δ<sup>13</sup>C-CO<sub>2</sub> los gases muestran un incremento de la componente magmática respecto a la hidrotermal a partir de los eventos eruptivos 2015-2016 (Tassi et al. 2017). A partir del 2016 y durante el 2017, el cráter presenta un cono de escoria anidado con una emisión de tipo conducto abierto. A finales del 2017 y principios del 2018 el cono de escoria comienza a colapsar y una incipiente laguna cratérica comienza a restablecerse.

A modo de consideraciones finales, se resalta que durante el ciclo eruptivo 2012-2017 del volcán Copahue se identificaron señales precursoras mediante el reconocimiento de deformación superficial y variaciones en la composición geoquímica de fluidos. El proceso de inflación superficial inició entre agosto y octubre del 2011, se acentúa durante el periodo eruptivo 2012- 2013 y tendió a estabilizarse durante 2015-2016.

Fig. 7 – Correlación entre variaciones en la relación Mg/Cl en las vertientes ácidas del volcán Copahue y los periodos de deflación (2004-2008) e inflación (2011-2015). Se indica la erupción del año 2000, la anomalía térmica del 2004 (NTA) y las explosiones



2012 y 2015 durante el ciclo eruptivo 2012-2017.

Las señales precursoras de deformación se correlacionan con las variaciones geoquímicas

precursoras del ciclo eruptivo (fig. 7). En forma simultánea con el inicio de la inflación, se reconoció

un incremento en las concentraciones de especies de origen magmático. Para las señales geoquímicas se destacan los picos positivos en las relaciones  $SO_4/Cl$  y  $Mg/Cl$  durante los eventos explosivos del 2012 y las explosiones 2014-2015. Las señales geoquímicas e inflacionarias identificadas durante este periodo estarían asociadas al input magmático disparador de los eventos explosivos que iniciaron este ciclo eruptivo 2012-2017. Mientras que las variaciones observadas con posterioridad corresponderían a la inestabilidad del sistema, cuyos cambios en el estado de actividad estarían controlados por la interacción entre la componente magmática e hidrotermal a lo largo del ciclo 2012-2017.

Por último, teniendo en cuenta la ocurrencia de otros procesos eruptivos en volcanes de la región en forma contemporánea (volcán Planchón-Peteroa 2010-2012, volcán Cordón Caulle junio 2011, volcán Hudson octubre 2011), y la correlación hallada entre erupciones andesíticas y terremotos de elevada magnitud (Linde y Sacks 1998, Watt et al. 2009, entre otros), es posible considerar al gran terremoto ocurrido en Maule (Chile) el 27/2/10 (Mw8.8) como el evento disparador del ciclo eruptivo del Copahue.

### Agradecimientos

Los trabajos de los autores fueron realizados con el aporte de los subsidios de la Universidad de Buenos Aires UBACyT 20020120300077BA, UBACyT 20020150200230BA y PICT 2015-3110, conjunto con investigadores de las instituciones mencionadas al inicio.

### Referencias

- Agusto, M., Tassi, F., Caselli, A.T., Vaselli, O., Rouwet, D., Capaccioni, B., Caliro, S., Chiodini, G., Darrah, T. 2013. Gas geochemistry of the magmatic-hydrothermal fluid reservoir in the Copahue-Caviahue Volcanic Complex (Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 257: 44 – 56.
- Agusto, M., Tassi, F., Caselli, A.T., dos Santos Afonso, M., Vaselli, O. 2012. Seguimiento geoquímico de las aguas ácidas del sistema volcán Copahue –Río Agrio: posible aplicación para la identificación de precursores eruptivos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69, 481–495.
- Agusto, M. y Varekamp, J. 2016. The Copahue Volcanic-Hydrothermal System and applications for volcanic surveillance. En: Tassi F., Vaselli O. y Caselli A. (eds.) *Copahue Volcano*, Springer, Heidelberg, 199-238.
- Caselli, A.T., Agusto, M., Velez, M.L., Forte, P., Bengoa, C., Daga, R., Albite, J.M. y Capaccioni, B. 2016. The 2012 eruption. En: *Copahue Volcano*. Tassi, F., Vaselli, O. y Caselli, A.T.(eds). *Copahue Volcano*. Springer, Heidelberg, 61-77.4
- Caselli, A.T. y Barion G. 2016. Formación de cono cinerítico en el cráter del volcán Copahue, Argentina. *E-ICIES 11*, p.24. Malargüe, Argentina.
- Daga, R., Caselli, A., Ribeiro Guevara, S., Agosto, M. 2017. Tefras emitidas durante la fase inicial hidromagmática (julio de 2012) del ciclo eruptivo 2012 - actual (2016) del volcán Copahue (andes del sur). *Revista Asociación Geológica Argentina* 74 (2), 52-67
- Linde A.T., Sacks L.S., 1998. Triggering of volcanic eruptions. *Nature* 395, 888-890.
- Petrinovic, I.A., Villarosa, G., Délia, L., Guzmán, S.P., Páez, G.N., Oues, V., Manzoni, C., Delménico, A., Balbis, C., Carniel, R. y Hernando, I.R. 2014. La erupción del 22 de diciembre de 2012 del volcán Copahue, Neuquén, Argentina: caracterización del ciclo eruptivo y sus productos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 71, 161-173.
- Tamburello, G., Agosto, M., Caselli, A., Tassi, F., Vaselli, O., Calabrese, S., Rouwet, D., Capaccioni, B., Cardellini, C., Chiodini, G., Di Napoli, R., Liccioli, C., Bitetto, M., Brusca, L., Bellomo, S. y Aiuppa, A. 2015. Intense magmatic degassing through the lake of Copahue volcano, 2013–2014. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 6071-6084
- Tassi, F., Agosto, M., Lamberti, M.C., Caselli, A.T., Pecoraino, G., Caponi, C., Szentiványi, J., Venturi, S., Vaselli, O. 2017. The 2012–2016 eruptive cycle at Copahue volcano (Argentina) versus the peripheral gas manifestations: hints from the chemical and isotopic features of fumarolic fluids. *Bulletin of Volcanology*, 79:69
- Varekamp, J.C., Ouimette, A. Hermann, S.W., Flynn, K.S., Bermúdez, A. y Delpino, D. 2001. Hydrothermal element fluxes from Copahue, Argentina: a ‘beehive’ volcano in turmoil. *Geology*, 29, 1059–1062.
- Varekamp, J.C., Ouimette, A.P., Hermann, S.W., Flynn, K.S., Bermúdez, A. y Delpino, D. 2009. Naturally acid waters from Copahue volcano, Argentina. *Applied Geochemistry*, 24, 208–220.
- Vélez, M.L., Euillades P., Caselli A., Blanco M., Martínez Díaz J., 2011. Deformation of Copahue volcano: inversion of InSAR data using a genetic algorithm. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 202, 117–126.
- Vélez, M.L., Euillades, P., Blanco, M. y Euillades, L. 2016. Ground deformation between 2002 and 2013 from InSAR observations. In: Tassi, F., Vaselli, O. & Caselli, A. (eds). *Springer, Heidelberg*, 175–198.
- Watt, S.F., Pyle, D.M., Mather, T.A. 2009. The influence of great earthquakes on volcanic eruption rate along the Chilean subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 277 (3): 399-407.