



## XVIII Congreso Peruano de Geología

# EVIDENCIAS DE ACTIVIDAD ENDÓGENA RECIENTE EN EL COMPLEJO VOLCÁNICO NEVADO COROPUNA (REGIÓN AREQUIPA, PERÚ)

Pablo Masías<sup>1</sup>, José Úbeda<sup>1</sup>, Fredy Apaza<sup>1</sup> y Kenji Yoshikawa<sup>2</sup>

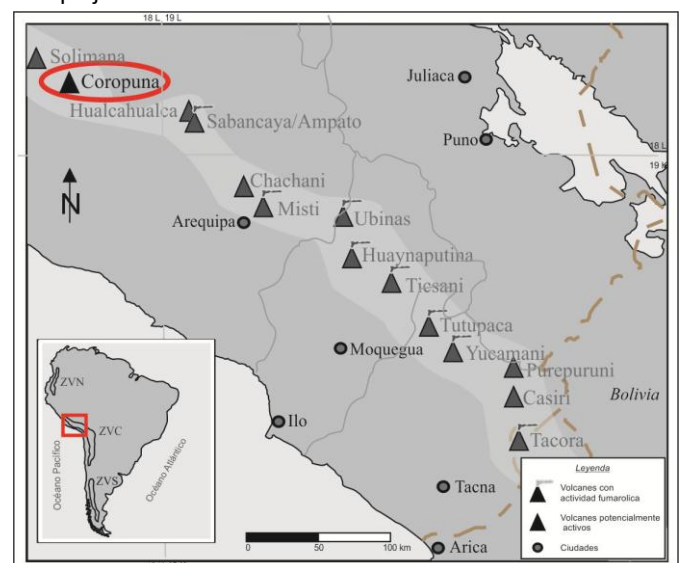
<sup>1</sup> Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Av. Canadá N° 1470 San Borja, Lima, Perú (pmasias@ingemmet.gob.pe)

<sup>2</sup> Universidad de Alaska Fairbanks, Fairbanks, EEUU

### 1. Introducción

El Nevado Coropuna (16°S, 73°O, 6377 msnm) está en el límite septentrional de la Zona Volcánica Central de los Andes, 110 km al norte del Océano Pacífico y 150 km al noroeste de la ciudad de Arequipa (Figura 1). Es un conjunto de estratovolcanes adyacentes construidos encima del borde meridional del altiplano, donde comienza la empinada rampa que enlaza topográficamente con la costa del Pacífico. Las estructuras volcánicas más viejas empezaron a desarrollarse a finales del Mioceno (~5 Ma) y hace ~2 Ma una erupción catastrófica depositó gruesas capas de ignimbritas que hoy en día afloran al oeste del complejo volcánico (Venturelli et al., 1978). Durante el Cuaternario la actividad eruptiva ha sido menos explosiva (dacítica/andesítica) y se (Úbeda, 2011) ha prolongado hasta el Holoceno (Weibel and Fejer, 1977). La mayor parte de las coladas de lava que forman las montañas del Nevado Coropuna están completamente erosionadas por los glaciares o han sido disectadas por los valles excavados por las masas de hielo. Sin embargo hay tres coladas de lava con aspecto más reciente, que se distinguen por su color más oscuro en los sectores oeste, noreste y sureste del complejo volcánico. Como los últimos avances glaciares sólo erosionaron las cabeceras de esas coladas de lava, anteriores trabajos consideraron que debieron ser emitidas por erupciones ocurridas durante el Holoceno (Úbeda, 2011). Sin embargo, hasta ahora no había dataciones absolutas que confirmaran esa hipótesis. El área de cumbres del Nevado Coropuna está completamente cubierta por el sistema de glaciares más grande de la zona tropical de la Tierra (~46 km<sup>2</sup> en 2010) y en sus vertientes hay morrenas que reflejan que sus dimensiones fueron mucho mayores en el pasado (>500 km<sup>2</sup>; Úbeda, 2011). Por

ese motivo, la mayor parte de las investigaciones anteriores se centraron en el registro glacial del cambio climático, en escalas de miles a decenas de miles de años y hasta ahora no se han efectuado estudios sobre la evolución volcánica. Sin embargo se han obtenido datos preliminares que indican que el Nevado Coropuna es un volcán activo, incluyendo dataciones absolutas de las coladas de lava atribuidas al Holoceno y monitoreo de las temperaturas del aire y el suelo y las fuentes hidrotermales. En el presente trabajo se presentan esas evidencias, con el objetivo de proporcionar una línea de base para los trabajos que deberán emprenderse para determinar el riesgo hidrovulcánico que afecta a la población que habita en las vertientes del complejo volcánico.



**Figura 1.-** Mapa de la ubicación del complejo volcánico Coropuna.

## 2. Metodología

### 2.1. Dataciones absolutas

El método para conocer la edad de las erupciones atribuidas al Holoceno consistió en estimar la edad de exposición a la radiación cósmica de superficies de bloques situados encima de las coladas de lava, midiendo la concentración de átomos de  $^{36}\text{Cl}$ . Dicho isótopo cosmogénico inestable fue seleccionado porque la ausencia de cuarzo impide emplear otros isótopos cosmogénicos inestables (p.e.  $^{10}\text{Be}$ ). Para realizar las dataciones se recogieron tres muestras, en las coladas de lava que se encuentran en los sectores noroeste (muestra NCNW28), noreste (muestra NCNE03) y sureste del complejo volcánico (muestra NCSE29). En el laboratorio se aplicaron los métodos descritos en diversas publicaciones (Phillips, 2003). Cada muestra fue triturada en un molino de rodillos y disuelta en una mezcla caliente de ácidos fluorhídrico y nítrico, para precipitar el Cl como AgCl. Durante el proceso la disolución se enriqueció isotópicamente con  $^{35}\text{Cl}$ . El recuento de átomos de las muestras de AgCl se realizó en el acelerador de partículas del laboratorio PRIME (Universidad de Purdue, Estados Unidos), donde se determinaron las relaciones isotópicas  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  y  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$  y el contenido total de átomos de Cl en cada muestra de roca. Los elementos traza se midieron en el laboratorio Activation (Ancaster, Canadá). Las edades de exposición se calcularon introduciendo los resultados indicados por los laboratorios en la versión 3 de la hoja de cálculo CHLOE (Phillips and Plummer, 1996), que calcula las tasas de producción de  $^{36}\text{Cl}$  con ecuaciones de (Phillips et al., 2001), para neutrones térmicos y epitérmicos, y (Stone et al., 1998) para muones, ponderando los resultados con modelos de latitud y elevación (Lal, 1991).

### 2.2. Monitoreo de las temperaturas del aire y suelo

La observación de las temperaturas del aire y el suelo se realiza para investigar el impacto del cambio climático en la criosfera del Coropuna, no sólo el sistema de glaciares que cubre el área de cumbres, sino también la presencia de permafrost en algunos sectores del complejo volcánico (Úbeda et al., 2015). No obstante ambos parámetros térmicos también pueden ser indicadores de la actividad volcánica, especialmente la temperatura del suelo. El monitoreo de las temperaturas es efectuado mediante termómetros instalados en el valle Queñua Ranra desde 2007, en cuatro estaciones localizadas a 4886 m (CORNE1), 5564 m (CORNE2), 5694 m (CORNE3) y 5822 m de altitud

(CORNE4). En cada estación hay un sensor que mide la temperatura del aire a 0.5 m de altura y otro sensor que miden la temperatura del suelo, enterrado a 0.3 m de profundidad. En las estaciones CORNE1 y CORNE3 también hay termómetros a 1 m de profundidad y la estación CORNE4 sólo cuenta con termómetro del aire. Los dispositivos están sincronizados para registrar datos con una frecuencia de 30 minutos, realizando anualmente 17280 mediciones. Los sensores están en un ambiente hostil y la serie de 8 años de registros (2007-2015) tiene algunas interrupciones por agotamiento de baterías. También periodos que deben descartarse porque las condiciones idóneas de instalación fueron alteradas por procesos naturales. En la actualidad se están realizando las tareas necesarias para homogeneizar y sistematizar la serie de datos. Para el presente trabajo se ha analizado como muestra un periodo de un año que no presenta interrupciones en ningún sensor, entre los días 12-09-2007 y 11-09-2008.

### 2.3. Características de las aguas termales

Para la caracterización hidroquímica se realizaron muestreos en las 7 fuentes termales actualmente conocidas en el complejo volcánico Nevado Coropuna. Están localizadas en un radio de 18 km alrededor de la cumbre oriental, foco de emisión de dos de las coladas de lava atribuidas al Holoceno. Los trabajos se realizaron en cinco campañas de trabajo de campo desarrolladas entre 2010 y 2015, sumando 30 muestras en total. Cada muestreo se realizó en el punto de afloramiento del agua termal, por inmersión simple, llenando 2 botellas de polipropileno de alta densidad. La primera muestra ( $v=1.0$  l.) para analizar los aniones y la segunda ( $v=0.5$  l.) para analizar los metales disueltos, filtrándola con un tamiz de  $0.45\ \mu\text{m}$  y preservándola con ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$  1:1). En cada muestreo se midieron los siguientes parámetros físicos y químicos del agua termal: temperatura ( $T^\circ$ ), conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (TDS) y potencial de hidrógeno (pH). En los laboratorios del INGEMMET se aplicaron los siguientes procedimientos: 1) Cromatografía Iónica, para análisis de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ;  $\text{F}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ . 2) Análisis Titrimétrico para el  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ . 3) Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) para análisis de Na, Mg, K, Ca, Sr, Li,  $\text{SiO}_2$ , B, Fe y S. 4) Espectrometría de Masa por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) para análisis de Ag, Al, As, B, Be, Bi, Sr, Li, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y y Zn.

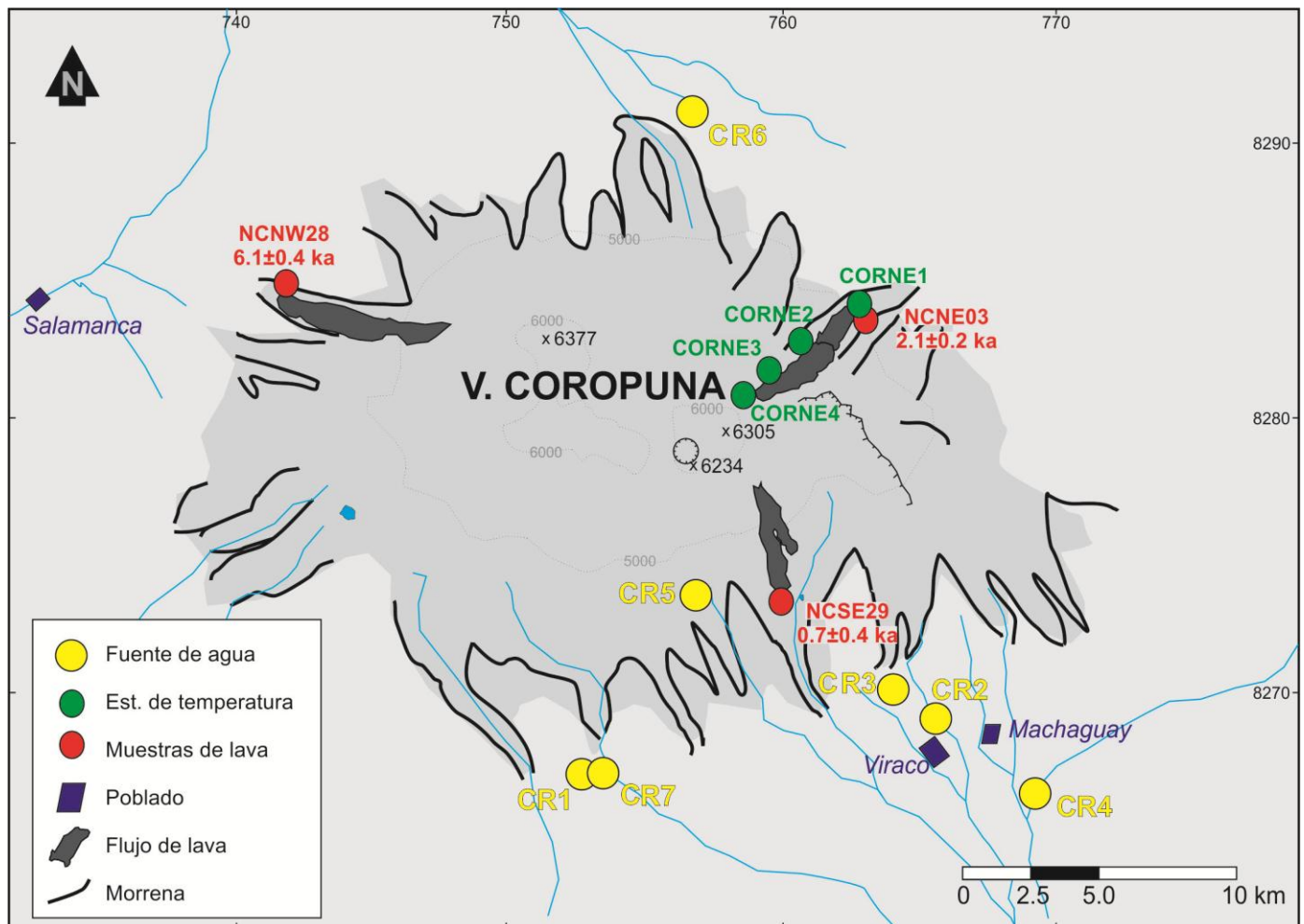


Figura 2.- Mapa del Coropuna donde se observa los puntos de muestreo de aguas, lavas y estaciones de temperatura.

### 3. Análisis y discusión de los resultados

#### 3.1. Cronología de las erupciones volcánicas

Las edades de exposición de los bloques indican que las erupciones que emitieron las coladas de lava pudieron suceder hace  $6.1 \pm 0.4$  ka (sector noroeste, muestra NCNW28);  $2.1 \pm 0.2$  ka (sector noreste, muestra NCNE03) y  $0.7 \pm 0.4$  ka (sector sureste, muestra NCSE29). Las edades son todavía demasiado escasas y convendría realizar nuevas dataciones para poder alcanzar conclusiones definitivas, especialmente en el sector noreste, donde la muestra procede de una colada de lava inferior sobre la que hay otra unidad superior. La segunda colada de lava pudo ser emitida durante la misma erupción que la primera, o tal vez durante una erupción posterior, probablemente la que emitió la colada de lava del sector sureste. Sin embargo las edades pueden considerarse bastante fiables, porque el hecho de tratarse de lava consolidada *in situ* y la nula erosión de las superficies muestreadas permiten descartar dos de los principales problemas que pueden afectar a las edades de exposición: la sobre-estimación de las dataciones por acumulación de átomos, durante periodos de exposición previos a la deposición de las rocas, o su infra-estimación, como consecuencia de la sustracción de átomos por procesos erosivos que hayan afectado a las superficies muestreadas.

#### 3.2. Régimen de las temperaturas del aire y el suelo

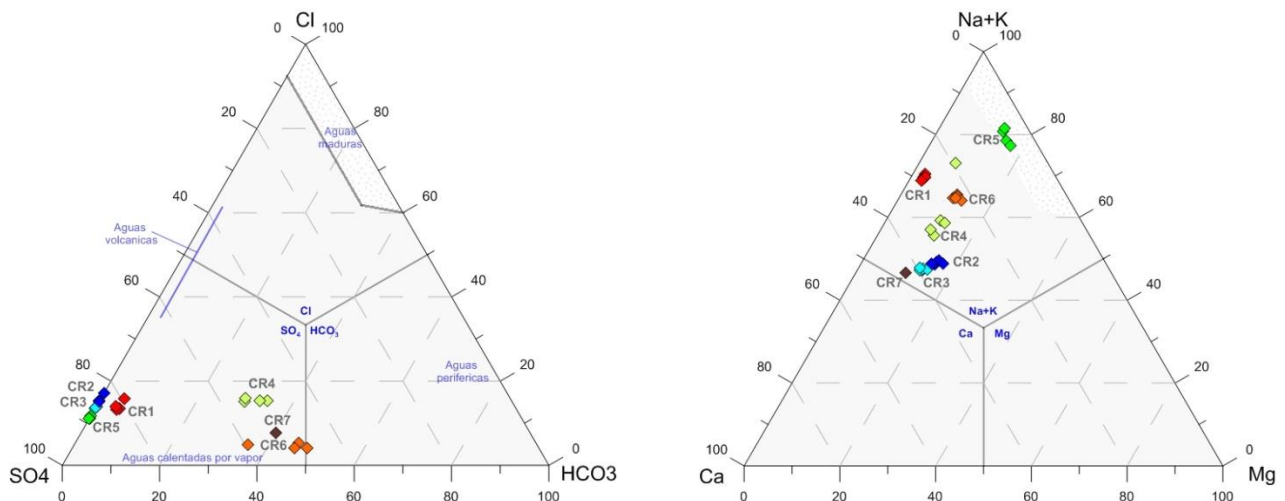
La evolución de la temperatura del suelo presenta algunas anomalías que pueden interpretarse como señales de la influencia del calor geotérmico. La más clara es la ausencia de fenómenos de congelación en todas las estaciones, donde los registros siempre estuvieron por encima del umbral de  $0^{\circ}\text{C}$ , incluso en los sensores instalados a mayor altitud 5694 m (estación CORNE3). Tomando como referencia el promedio diario de los registros, el comportamiento de la temperatura del suelo ( $T_s$ ) contrasta con el de la temperatura del aire ( $T_a$ ), que si presentó largos periodos de congelación. Aunque en la estación más baja (CORNE1), no se detectaron episodios con  $T_a < 0^{\circ}\text{C}$ , en la estación CORNE2 (5564 m) fueron bastante frecuentes y en los termómetros del suelo instalados a mayor altitud (CORNE3, 5694 m)  $T_a$  fue siempre  $> 0^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, de las 17280 mediciones anuales realizadas por cada termómetro sólo 3 registros de la estación 3 fueron  $> 0^{\circ}\text{C}$ , alcanzando un escaso valor  $T_s = 0.1^{\circ}\text{C}$ . Otro hecho muy llamativo es la existencia de oscilaciones de varias semanas de duración en el régimen de las temperaturas diarias, que podrían estar relacionados con la actividad endógena. Desafortunadamente no existe una red mixta que mida las temperaturas del suelo y las fuentes termales. Si ambos parámetros fuesen registrados de manera sincronizada y con la misma resolución que la red actual (con una frecuencia de 30 minutos), podría

comprobarse si existe una correlación que pueda interpretarse como un indicador de la existencia de ciclos geotérmicos, vinculados con la actividad endógena del volcán.

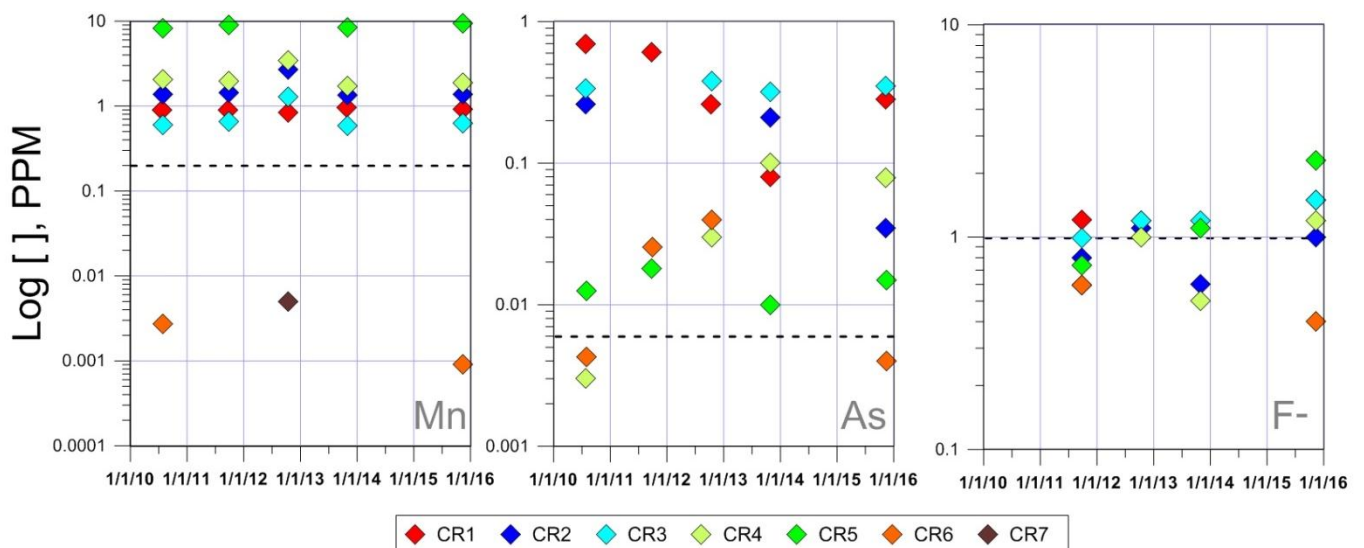
**3.3. Observaciones hidroquímicas**

Como se acaba de señalar, la medición de los parámetros fisicoquímicos tiene un carácter puntual, y sería deseable contar con una red de medición continua y de alta resolución. No obstante, los datos disponibles proporcionan información de interés. Demostrando la existencia de un sistema hidrotermal-volcánico, cuyas fuentes de agua muestreadas alrededor del complejo volcánico Coropuna (CR1-CR7) son aguas sulfatadas alcalinas. Las fuentes CR1, CR2, CR3, CR5 tienen un posible origen volcánico, mientras que las fuentes CR4, CR6 y CR7 podrían estar mezcladas con aguas periféricas, posiblemente calentadas por vapor (Figura 3). Las temperaturas presentan ligeras oscilaciones entre los episodios de muestreo, con los siguientes rangos de variación: CR1=49.8-52.0°C; CR2=29,3-30,6°C; CR3=25.0-27.0°C; CR4=46.5-50.8 °C; CR5=49.0-50.8 °C; CR6=18,9-

19,9°C y CR7= 23.2- 24,2 °C. En todos los casos se trata de aguas termales, teniendo en cuenta que la fuente más fría (CR6) se encuentra a ~4600 m de altitud y se consideran termales las fuentes con temperatura >20°C (Catalán, 1968). Si se realiza la evaluación simultánea de las condiciones de equilibrio roca-agua del sistema Na-K-Mg (Giggenbach, 1988), puede deducirse que para CR7, CR6, CR3, CR2, CR4 y CR5 la temperatura en el acuífero se encontrarían por debajo de los 100°C, mientras que para CR1 podría estar ligeramente por encima de este valor. Esta es una observación coherente, porque se trata de la fuente más caliente en superficie. Además se ha realizado una evaluación de los elementos presentes en las aguas muestreadas, que ha indicado que excepto en dos casos (CR6 y CR7), el resto de las fuentes (CR1-CR5) presentan concentraciones elevadas de Manganeseo (Mn), Arsénico (As) y fluoruros (F-) (Figura 4). Es importante señalar que dichas concentraciones no son aptas para el consumo de personas, animales o riego, a pesar de que se les da ese uso en algunos sectores de los distritos de Pampa Colca, Viraco y Machaguay.



**Figura 3.-** Diagramas ternarios donde se puede observar graficados los resultados para los aniones mayoritarios (Izquierda), con su posible origen. También se encuentra (derecha) los cationes mayoritarios.



**Figura 4.-** Concentración de Mn, As y F- en las fuentes de agua muestreadas alrededor del complejo volcánico Coropuna entre los años 2010 al 2015.

## 5. Conclusiones

Las edades de exposición sugieren que en el Nevado Coropuna pueden haber ocurrido al menos tres erupciones durante los últimos 6 ka, con una migración de la actividad volcánica desde el noroeste hacia el este. Por otra parte, termómetros instalados a diferentes altitudes muestran la posibilidad de la existencia de una vinculación entre la temperatura del suelo y el calor geotérmico. Esas evidencias, conjuntamente con la existencia de una importante actividad termal, indican la posibilidad de que el Nevado Coropuna sea un volcán activo. Ese hecho recomienda la necesidad de emprender investigaciones que permitan evaluar el riesgo hidrovolcánico que afecta a la población que habita en las vertientes del complejo volcánico, teniendo en cuenta que a las evidencias de actividad volcánica se añaden la presencia de un sistema glaciar de ~45 km<sup>2</sup> cubriendo completamente el área de cumbres y el fuerte desnivel con respecto a la red de drenaje.

## Agradecimientos

Investigaciones realizadas en el marco del proyecto CIENCIACTIVA 144-2015 (<http://cryoperu.pe/>).

## Referencias

Catalán, J., 1968, Química del agua, Barcelona (España).  
 Giggenbach, W. F., 1988, Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 52, no. 12, p. 2749-2765.

Lal, D., 1991, Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 104, p. 424-439.  
 Phillips, F. M., 2003, Cosmogenic <sup>36</sup>Cl ages of Quaternary basalt flows in the Mojave Desert, California, USA: *Geomorphology*, v. 53, p. 199-208.  
 Phillips, F. M., and Plummer, M. A., 1996, CHLOE: A program for interpreting in-situ cosmogenic nuclide dating and erosion studies (abs): *Radiocarbon*, v. 38, p. 98.  
 Phillips, F. M., Stone, W. D., and Fabryka-Martin, J. T., 2001, An improved approach to calculating low-energy cosmic-ray neutron fluxes near the land/atmosphere interface: *Chemical Geology*, v. 175(3-4), p. 689-701.  
 Stone, J. O., Evans, J. M., Fifield, L. K., Allan, G. L., and Cresswell, R. G., 1998, Cosmogenic chlorine-36 production in calcite by muons: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 62, p. 433-454.  
 Úbeda, J., 2011, El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (cordillera occidental de los Andes, Sur del Perú): Universidad Complutense de Madrid, 558 p.  
 Úbeda, J., Yoshikawa, K., Pari, W., Palacios, D., Masias, P., Apaza, F., Ccallata, B., Miranda, R., Concha, R., Vásquez, P., and Cruz, R., 2015, Geophysical surveys on permafrost in Coropuna and Chachani volcanoes (southern Peru): *Geophysical Research Abstracts*, v. 17, p. EGU2015-12592-12592.  
 Venturelli, G., Fragipane, M., Weibel, M., and Antiga, D., 1978, Trace element distribution in the Cenozoic lavas of Nevado Coropuna and Andagua Valley, Central Andes of southern Peru: *Bulletin of Volcanology*, v. 41, no. 1, p. 213-228.  
 Weibel, M., and Fejer, Z., 1977, El Nevado Coropuna, Departamento de Arequipa: *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, v. 57-58, p. 87-98.