

## MEDICIÓN DEL SO<sub>2</sub> USANDO EL ESPECTRÓMETRO DE CORRELACIÓN UV “FLYSPEC” Y MONITOREO GEOQUÍMICO DE FUENTES TERMALES EN EL VOLCÁN UBINAS (MOQUEGUA)

Vicentina Cruz<sup>1</sup> & Steven Clegg<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INGEMMET, Av. Canadá 1470, San Borja Lima, vcruz@ingemmet.gob.pe  
Dirección anterior: Instituto Geofísico del Perú, Urb. La Marina B-19 Cayma, Arequipa, Perú.  
<sup>2</sup>Department of Geology, University of Hawaii at Hilo, USA. (steven@hawaii.edu)

El volcán Ubinas, ubicado entre las coordenadas 16°22' sur y 70°54' oeste, con 5672 msnm es conocido como el volcán más activo en el sur del Perú durante tiempos históricos, con 23 pequeñas erupciones o intensas crisis fumarólicas que datan desde 1550. Debido a su recurrencia explosiva y a su proximidad a los poblados (5000 habitantes) ubicados en el valle adyacente a 6 km del cráter, el volcán Ubinas surge como una de las prioridades más altas en el monitoreo volcánico en el sur del Perú.

Los objetivos del presente trabajo son:

- 1) Obtener mediciones de línea de base de emisiones de dióxido de azufre volcánico (SO<sub>2</sub>) en la caldera del volcán Ubinas usando el espectrómetro de correlación UV “FLYSPEC”.
- 2) Realizar un sistema continuo de monitoreo geoquímico de dos fuentes termales situadas hacia la base del volcán activo Ubinas.

Desde 1971, el COSPEC (espectrómetro de correlación UV) ha sido el instrumento más usado en el monitoreo del flujo de gas SO<sub>2</sub> volcánico (Moffat y Millan., 1971). Este instrumento se ha caracterizado por ser un equipo muy costoso y voluminoso, por esta razón, el Institute of Geophysics and Planetology, University of Hawaii at Manoa, USA, ha desarrollado un nuevo espectrómetro de correlación ultravioleta “FLYSPEC”, instrumento pequeño, liviano y económico, diseñado para la detección de emisiones de SO<sub>2</sub> volcánico, como alternativa al COSPEC. El FLYSPEC ha sido empleado en diversos sistemas volcánicos como el de Masaya (Nicaragua), Po'as (Costa Rica), Stromboli, Etna y Vulcano (Italia), Villarrica (Chile) y Kilauea (EE.UU.) (Horton et al., 2006).

En enero del 2006, se hizo la medición de dióxido de azufre en la caldera del volcán Ubinas usando el FLYSPEC instrumento configurado con ocean optics USB2000 con receptor de GPS integrado, dos células de calibración y una computadora portátil (Horton et al., 2006).

**La medición de SO<sub>2</sub> en el Ubinas**, se realizó empleando dos métodos: 1) Móvil, que consistió en realizar una serie de medidas transversales a lo largo de la dirección perpendicular de la pluma de gas, llevando en mano el FLYSPEC en forma vertical (Clegg, 2004); 2) Estacionario, medidas con el FLYSPEC desde un punto fijo del suelo, instalado debajo de la pluma de gas para realizar mediciones en posición vertical (Horton et al., 2006; Williams-Jones et al., 2006).

Durante el trabajo de campo también fueron medidos los parámetros de temperatura y velocidad de viento con un anemómetro portátil Brunton ADC, registrando temperaturas entre 5 °C y 13 °C. La velocidad del viento presentó variaciones desde 1ms<sup>-1</sup> hasta más de 7ms<sup>-1</sup>, en el anillo de la caldera presentó un promedio 4 ms<sup>-1</sup> con dirección sur a suroeste. Se ha percibido actividad sísmica de baja intensidad, que puede estar asociado a la existencia de un sistema hidrotermal sobrepresurizado. (Metaxian et al., 1999). También se ha observado desprendimiento constante de rocas de la pared hidrotermalizada del flanco sur de la caldera y presencia de actividad fumarólica en el fondo del cráter.

Los resultados de la medición de SO<sub>2</sub> volcánico en la caldera del volcán Ubinas, han presentado una concentración promedio del trayecto de 993 ppm-m, la concentración máxima alcanzada de SO<sub>2</sub> fue de

1500 pmm-m (Fig. 1). La medición de  $\text{SO}_2$  sobre el volcán Ubinas, proporcionó información importante para estudios futuros sobre la caldera de este volcán. También mostró que se puede desarrollar un programa de monitoreo de  $\text{SO}_2$  volcánico usando el FLYSPEC aplicando los métodos estacionario y móvil. Además, se ha obtenido información de línea de base de la concentración  $\text{SO}_2$  volcánico que puede servir para ser comparado con mediciones futuras en el volcán Ubinas.

**Monitoreo geoquímico de aguas termales** provenientes de dos fuentes localizadas ("Ubinas Termal" y "Ubinas Fría") entre las coordenadas  $16^{\circ}22'$  sur y  $70^{\circ}51'$  oeste con 3329 msnm y a 6 km al sureste del cráter del volcán Ubinas (Fig. 2). Estas fuentes se caracterizan por su composición química (Tabla 1) y su ubicación, ambas se encuentran en el flanco SE, sobre el cono volcánico.

Según la clasificación de aguas por el diagrama ternario  $\text{Cl} - \text{SO}_4 - \text{HCO}_3$  (Giggenbach, 1988; Nicholson, 1993) las aguas muestreadas ("Ubinas Termal y Ubinas Fría") se ubican dentro del rango de aguas sulfatadas del grupo de aguas con componentes de fluidos volcánicos (Fig. 3). Los análisis obtenidos en este estudio concuerdan con los resultados encontrados por Fournier (1999). Lo que indica que las fuentes "Ubinas Termal y Ubinas Fría" originalmente son aguas muy concentradas por fluidos volcánicos, pero se mezclan con aguas frescas sufriendo una dilución sin modificar las proporciones de los elementos químicos (Fournier, 1999).

El edificio volcánico Ubinas es completamente permeable sobre los 3000 msnm, la única desgasificación que observamos se localiza dentro del último cráter somital. Esto significa que fuera de este profundo cráter no hay fumarolas, incluso en la cumbre o sobre el flanco externo, indicativo de que el componente volcánico tiene un origen más o menos profundo que encuentra a su paso reservorios de agua fresca que salen a la superficie por medio de fracturas al sureste del volcán, justamente donde se encuentran localizadas las fuentes "Ubinas Termal y Ubinas Fría". De ahí que estas aguas se encuentren dentro del grupo de aguas con componente volcánico (Fournier, 1999).

En enero de 1999 se ha iniciado un programa de monitoreo geoquímico continuo, con el objetivo de obtener datos a través del tiempo para su correlación con la actividad del sistema volcánico. Durante el período enero de 1999 a enero de 2006 se han observado cambios en la composición geoquímica (Figs. 4 y 5) de las fuentes "Ubinas Termal" y "Ubinas Fría". Estas variaciones son claras en el caso de los iones sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), mientras que son menos evidentes, pero presentes, en los iones cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), especialmente a partir de junio de 2001. Estos dos iones provienen principalmente de la oxidación, condensación y dilución de los gases ácidos magmáticos ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{HCl}$ ) en el sistema hidrotermal.

El mayor cambio observado a partir de junio de 2001 puede estar relacionado con el terremoto del 23 de junio de 2001 (8,2 Mw) en el sur del Perú (Dewey et al., 2003). Es posible que el sismo haya aumentado la permeabilidad de las fracturas, en particular el fallamiento  $\text{N}40\text{-}50^{\circ}\text{O}$  donde se encuentran las 2 fuentes, favoreciendo una mayor subida de fluidos volcánicos a través de estas fallas. Esto explica que después del sismo se observara: 1) Un incremento en las concentraciones de los iones cloruros y sulfatos, probablemente debido a la mayor subida de gases ácidos de origen volcánico por estas fallas para mezclarse con aguas superficiales. 2) La aparición de una nueva fuente termal (muy próxima a "Ubinas Fría") en la falla con dirección  $\text{N}40\text{-}50^{\circ}\text{O}$ , con temperatura de  $32^{\circ}\text{C}$ , que se pueden relacionar a procesos de fracturación de las rocas a lo largo de esta falla regional, creando nuevos caminos para el ascenso de fluidos. 3) Una notable disminución de la actividad fumarólica, que explicaría la subida de gases condensados en la parte baja del edificio volcánico.

La anomalía positiva del 2000 podría estar relacionado a: 1) Un cambio en la estructura interna del volcán, con un aumento del flujo de gases magmáticos durante este período. 2) Un menor ingreso de aguas frescas, aumentando la concentración de las especies magmáticas. 3) Distintos eventos sísmicos de baja magnitud, bastante superficiales y cerca del edificio volcánico, han podido generar mayor ascenso de gases magmáticos, hipotetizado en los cambios químicos registrados en relación con el sismo del 23 de junio de 2001. Desde el mes de setiembre de 2005 se ha observado incremento de la

actividad fumarólica en el volcán Ubinas (visible desde el pueblo de Ubinas), y disminución de los iones sulfatos  $\text{SO}_4^{2-}$  y cloruros  $\text{Cl}^-$  en las fuentes “Ubinas Termal” y “Ubinas Fría” (Figs. 4, 5 y 6).

Las variaciones podrían estar asociadas a la presencia del sistema de fallas NO-SE y a la falla local N30°O que cruza la caldera (Rivera, 1997). Posiblemente con el terremoto del 23 de junio de 2001 estas fallas han disminuido su permeabilidad. En la actualidad es probable que los distintos eventos sísmicos que se presentan cerca del volcán Ubinas estén generando un incremento de la permeabilidad de las fallas permitiendo mayor emisión de fumarolas en el interior del cráter. También el aumento térmico del domo por una importante introducción de agua meteórica en el sistema hidrotermal, liberándose en las partes altas del edificio bajo forma de vapor, lo que podría también explicar la disminución de los elementos magmáticos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) en las partes bajas donde se localizan las fuentes de agua.

El incremento de la actividad fumarólica podría estar asociado a la época de lluvias, sobre todo si las precipitaciones pluviales son intensas. Algunas veces se ha observado en el fondo del cráter acumulación de agua. Asimismo, en esta misma época se observa también que en las paredes del profundo cráter afloran aguas que discurren luego hacia el fondo del cráter. Esta acumulación de agua (laguna en el fondo del cráter) sugiere la presencia de horizontes impermeables como parte de las capas apiladas de material volcánico depositado dentro de la caldera. Una parte de esta agua y de acuíferos en la caldera, se infiltran a través de la falla N30°O (que está presente cruzando parcialmente la caldera). Posteriormente, ya en profundidad, las aguas se mezclan probablemente con los fluidos hidrotermales ascendentes, para luego aflorar y discurrir por las paredes del cráter activo. Esto podría explicar la presencia de afloramientos de agua en las paredes del cráter cuya notable característica es la de presentar fortísima acidez ( $\text{pH} < 2$ ) y la presencia de gases fumarólicos muy irritantes y visibles desde el valle Ubinas (a 6 km del cráter).

## REFERENCIAS

- Clegg, S. (2004).- Ground-Truth Measurements of Volcanic  $\text{SO}_2$  using the new UV Correlation Spectrometer “Flyspect,” Hawaii Space Grant Consortium (HSGC) Report Number 04-12, 2004.
- Dewey, J.; Silva, W. & Tavera, H. (2003).- Southern Peru earthquake of 23 June 2001 reconnaissance report: seismicity and tectonic. *Earthquake spectra*, V19, 1-10.
- Fournier, N. (1999).- Characterization of Fluids at Ubinas volcano, south Peru. Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand. Travail d'étude et de Recherche de Maîtrise, 27 pag.
- Giggenbach, W. (1988).- Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg- Ca geoindicators. *Geochim Cosmochim Acta* 52: 2749-2765.
- Horton K.; Willians-Jones, G.; Garbiel, H.; Mougini-Mark, P.; Porter, J.; Elias, T.; Sutton, A. & Clegg, S.G. (2006).- Real-time measurement of volcanic  $\text{SO}_2$  emissions: Validation of a new UV correlation spectrometer (FLYSPEC). *Bull. Volc.*, Vol.68, No.4 (February, 2006).
- Metaxian, J.; Ramos, D.; Macedo, L.; Finizola, A., & Inza, A. (1999).- Reporte sísmico preliminar de la misión a los volcanes Ubinas y Misti en el Sur del Perú (9 de Marzo – 10 de Abril de 1998). Inf. Int. IGP.
- Moffat, A.; Millan, M. (1971).- The applications of optical correlation techniques to the remote sensing of  $\text{SO}_2$  lumes using sky light. *Atmos Environ* 5:677–690
- Nicholson, K. (1993).- *Geothermal Fluids, Chemistry and Exploration Techniques*. Springer-Verlag edition, Germany.
- Rivera, P. (1997).- El volcán Ubinas (Sur del Perú): Geología, Historia eruptiva y Evaluación de las amenazas volcánicas actuales. Tesis profesional Universidad Nacional de San Marcos. Lima, Perú.
- Williams-Jones, G.; Horton, K.; Elias, T.; Garbeil, H.; Mougini-Mark, P.; Sutton, A. J. & Harris, A. (2006).- Accurately measuring volcanic plume velocity with multiple UV spectrometers. *Bull. Volc.*, Vol.68, No.4 (February, 2006).