



## DetECCIÓN DE ASCENSO DE MAGMA Y EVOLUCIÓN DEL PROCESO ERUPTIVO DEL VOLCÁN UBINAS DE 2014, OBSERVADAS CON DATOS SÍSMICOS

**R. Machacca<sup>1</sup>, P. Lesage<sup>2</sup>, R. Paxi<sup>1</sup>, M. Ortega<sup>1</sup>,  
M. Rivera<sup>1</sup>, B. Ccallata<sup>1</sup>, E. Taipei<sup>1</sup>, y D. Ramos<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), Sede Regional, Arequipa, Perú ([roger.machacca@gmail.com](mailto:roger.machacca@gmail.com))

<sup>2</sup> ISTERre, CNRS, Université Savoie Mont Blanc, 73376 Le Bourget-du-Lac, Francia ([lesage@univ-savoie.fr](mailto:lesage@univ-savoie.fr))

### 1. Introducción

El ascenso de magma es un episodio fundamental y característico en un proceso eruptivo como un signo inherente de inestabilidad del sistema magmático, lo cual puede ser detectado a varias escalas de tiempo (años, meses, y semanas). Este episodio es reflejado en la actividad sísmica, la cual se origina por una interacción dinámica entre gas, magma, y las rocas de un reservorio y/o conducto volcánico.

El volcán Ubinas es considerado el más activo del Perú (Rivera et al., 2014). Luego de cuatro años de inactividad, volvió a entrar en actividad eruptiva el día 1 de setiembre de 2013 con explosiones freáticas. Esta actividad se reinició durante los primeros días del mes de febrero de 2014, la cual continúa hasta la actualidad con una fase magmática explosiva. A diferencia de las erupciones anteriores, en este proceso eruptivo, el trabajo de monitoreo permanente realizado por el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI) permitió detectar con datos sísmicos, el día 17 de enero de 2014, el primer signo claro de ascenso de magma (presencia de sismos de tipo híbrido), es decir 3 meses antes de la fase explosiva mayor que se inició el día 13 de abril de 2014. Posteriormente y en base al estudio de los productos emitidos, correlacionados con datos de la actividad sísmica, ha sido posible estimar la profundidad de la cámara magmática y comprender el comportamiento del proceso eruptivo.

### 2. Red sísmica

El volcán Ubinas (16°22'S, 70°54'W) se ubica a ~65 km al este de la ciudad de Arequipa (Fig. 1a). Cuenta con un red sísmica de vigilancia permanente, que fue desplegada por el OVI durante el 2014. Esta red está constituida de siete estaciones sísmicas triaxiales de banda ancha, marca Guralp-6TD (Fig. 1b), con sensores de velocidad. La estación (UBN02) cuenta con transmisión telemétrica al OVI de datos en tiempo real. Los resultados presentados aquí corresponden al tratamiento de datos de todas esas estaciones.

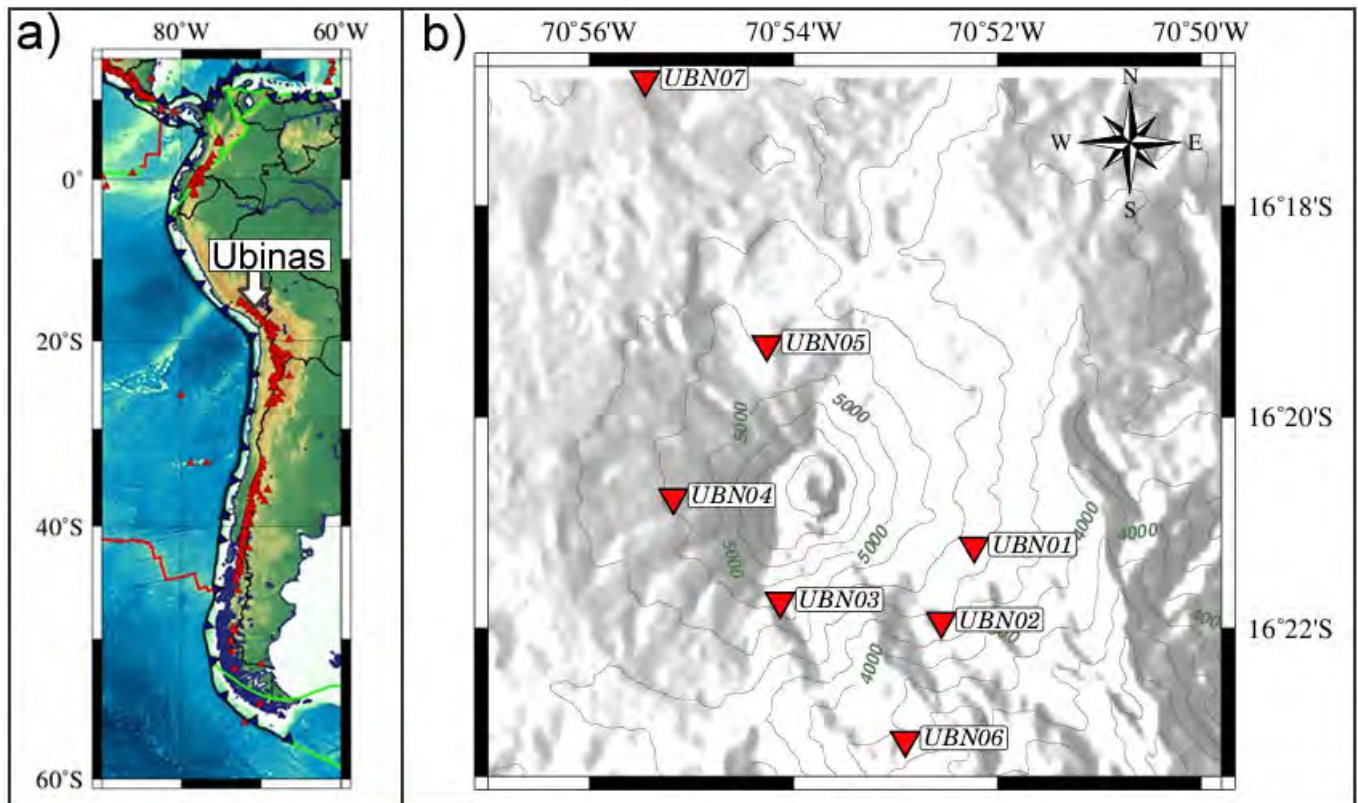
### 3. Actividad sísmica asociada al ascenso de magma

La actividad sísmica registrada durante el proceso eruptivo 2014 del volcán Ubinas ha estado caracterizada por una gran variedad de señales sísmicas que incluyen sismos de largo período (LP), volcano-tectónico (VT), híbridos, tremores, explosiones, enjambres, entre otros. Pero los eventos más representativos durante la fase de reactivación han sido los sismos de tipo híbrido y tremor armónico (Fig. 2), ya que ambas señales son claros signos de ascenso y desgasificación de magma (White et al., 1998; Lesage et al., 2006; Inza et al., 2014).

El 17 de enero de 2014, se registró el primer sismo de tipo híbrido, lo que ponía en evidencia un proceso de ascenso de magma a través del conducto del Ubinas. Posteriormente este tipo de señales se incrementó,

llegando a registrarse hasta 10 sismos por día. Así mismo, el 20 de febrero de 2014 se registró el primer sismo de tipo tremor armónico, que anunciaba la llegada de lava al fondo del cráter. Dicho suceso fue corroborado durante

una visita de inspección al cráter, realizada por personal del IGP el día 3 de marzo de 2014, en el que se divisó el cuerpo de lava.



**Figura 1. a)** Mapa de ubicación del volcán Ubinas dentro de la Zona Volcánica Central (CVZ) de los Andes. **b)** Mapa de ubicación de las estaciones sísmicas desplegadas por el OVI-INGEMMET durante el año 2014, representadas con triángulos invertidos de color rojo.

Por otra parte, el análisis de la energía sísmica liberada, ocurrencia de tremor, exhalaciones (emisiones de gases y ceniza), y explosiones, han permitido diferenciar el proceso eruptivo en tres etapas (Fig. 3):

- *Etapa I : fase de ascenso de magma.*

Esta etapa se inició en enero del 2014, cuando empezaron a registrarse sismos de tipo híbrido. Esta fase ha sido precedida y acompañada de actividad freática.

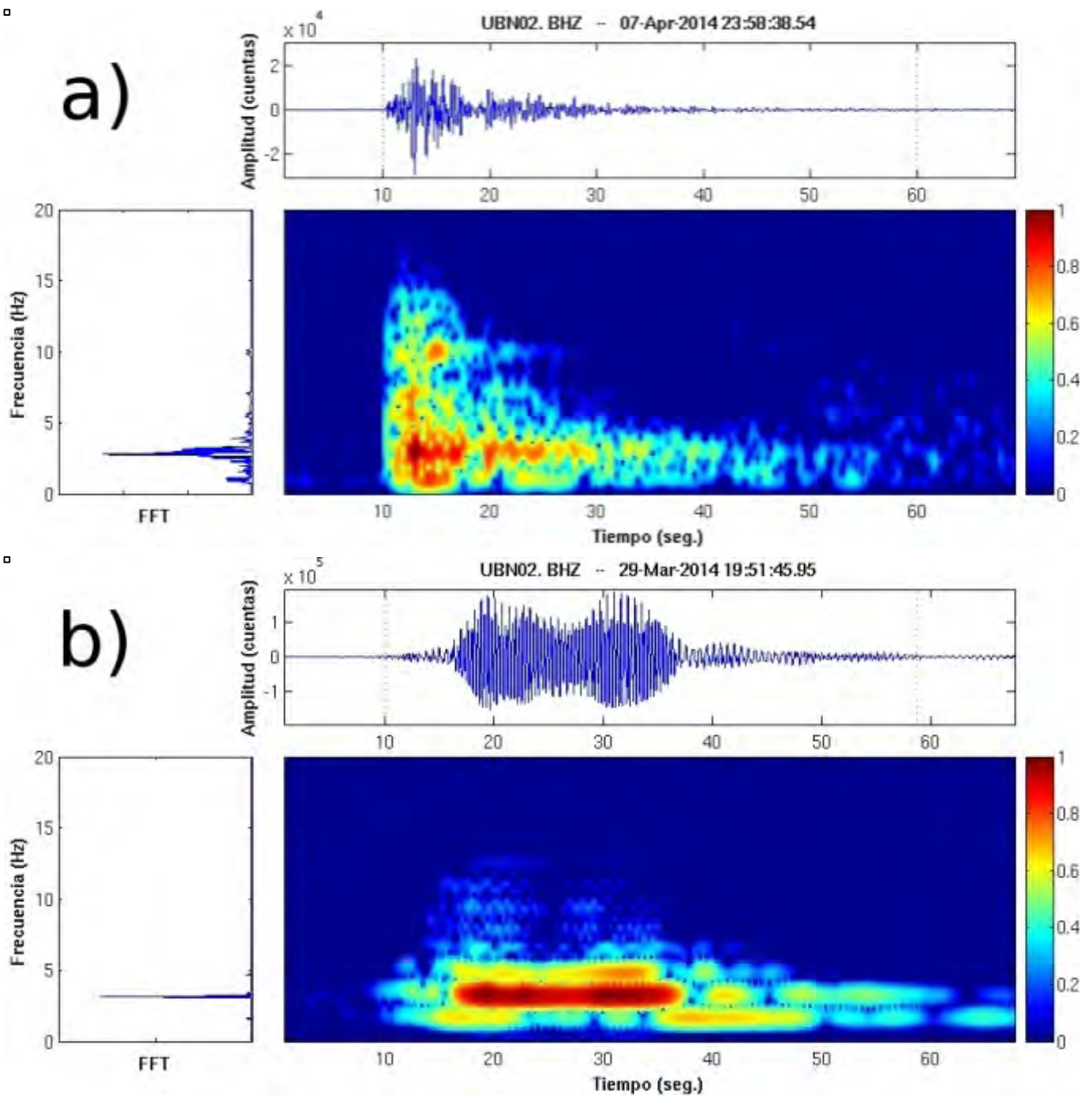
- *Etapa II : fase de sobre-presurización.*

Esta etapa se inició el día 29 de marzo de 2014, cuando la energía sísmica presentó un fuerte incremento en forma exponencial, debido a la presencia de sismos energéticos de tipo tremor armónico. En esta etapa, el

sistema del volcán se cerró, es decir que se formó un domo en el fondo del cráter, que dificultó el escape de los gases magmáticos. Esta actividad duró hasta el día 13 de abril de 2014, fecha en que ocurrió la primera explosión importante, la cual formó una columna eruptiva de hasta 4.5 km de altura.

- *Etapa III : fase explosiva.*

Esta etapa se inició el 13 de abril de 2014, día en que ocurrió una gran explosión que destruyó el domo previamente formado en la etapa II. La formación de nuevos domos y su eventual destrucción es el mecanismo que ha dado origen a las cuantiosas explosiones que se han presentado hasta la fecha, cuyas columnas eruptivas llegaron a superar hasta los 5 km de altura.



**Figura 2.** Características sísmicas (forma de onda, espectro y espectrograma) de señales precursoras de ascenso de magma registradas en la estación UBN02. **a)** Evento sísmico de tipo híbrido; **b)** evento sísmico de tipo tremor armónico. El color de codificación dado representa la densidad espectral de la amplitud normalizada de la onda sísmica.

#### 4. Discusión

La localización hipocentral de los sismos de tipo VT registrados durante este proceso eruptivo muestra una intensa actividad sísmica localizada debajo del volcán, con profundidades menores a 15 km. Así mismo, en los perfiles sísmicos verticales se observa una ausencia de sismos a profundidades mayores a 15 km debajo de la cumbre. Este vacío de sismos informa sobre la posible ubicación de la cámara magmática, ya que no es posible que se presente eventos sísmicos de ruptura (VT's) en un medio plástico (Fig. 4b).

Estos resultados, han sido correlacionados con el modelo del sistema magmático del volcán Ubinas propuesto por Rivera et al. (2014), quienes, en base a estudios petrológicos, estimaron la presencia de dos reservorios de magma: uno localizado entre 4 y 8 km de profundidad, y otro más profundo entre 16 y 19 km de profundidad. Este último coincide con la profundidad obtenida con las localizaciones sísmicas.

Otro modelo geológico que explica en gran medida la distribución sísmica superficial observada con los registros sísmicos es el propuesto por Fournier (1999), quien encontró que existe una zona de transición frágil-plástica cerca de la isoterma de 400°C debajo de los

volcanes activos (Fig. 5). En dicha zona de transición circunda un cuerpo magmático el cual forma un sello que separa una zona de presión hidrostática (arriba) y una zona de presión litostática (abajo). Cuando hay una

intrusión en la cámara magmática, esto genera presión en el sello, que a la vez transmite la presión hacia la zona de presión hidrostática, lo que hace que los sistemas de fallas cercanas al volcán se activen, produciendo sismos tipo VT.

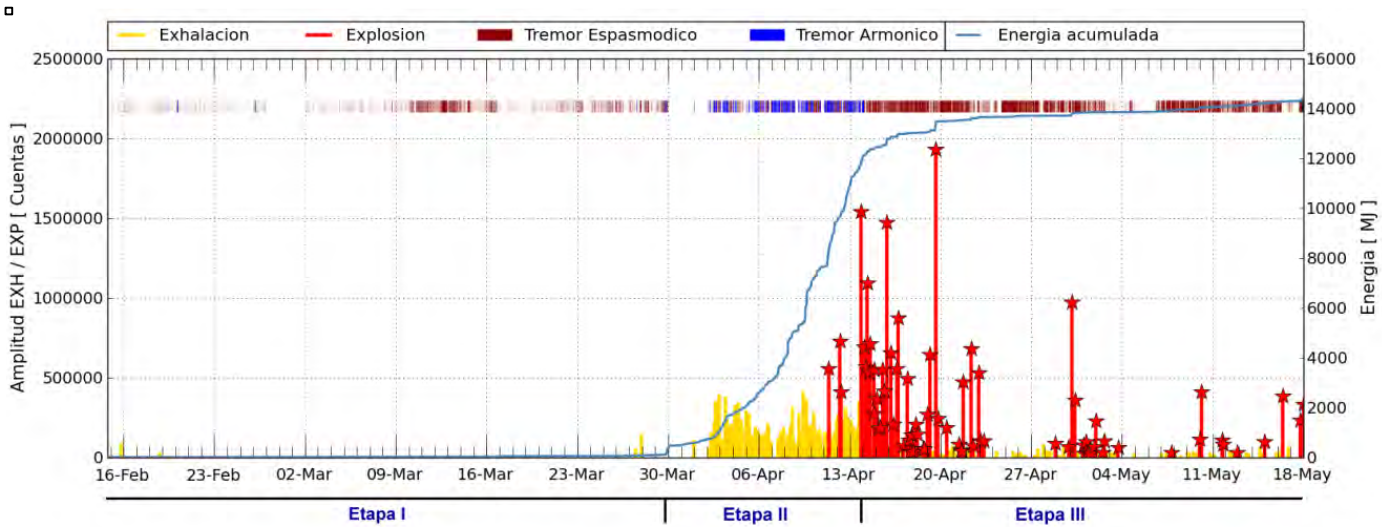


Figura 3. Evolución de la actividad sísmica del volcán Ubinas durante el proceso eruptivo de 2014.

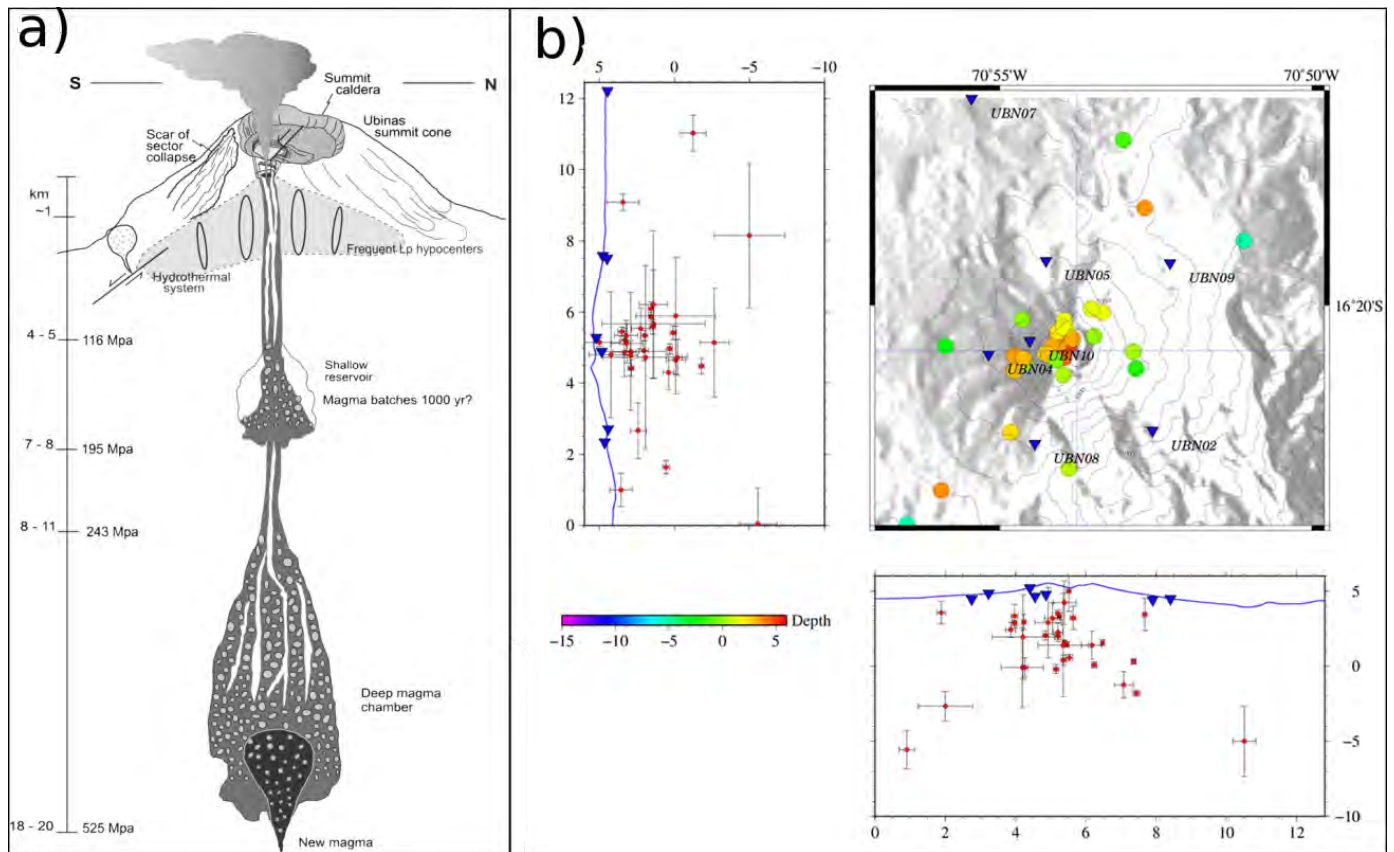
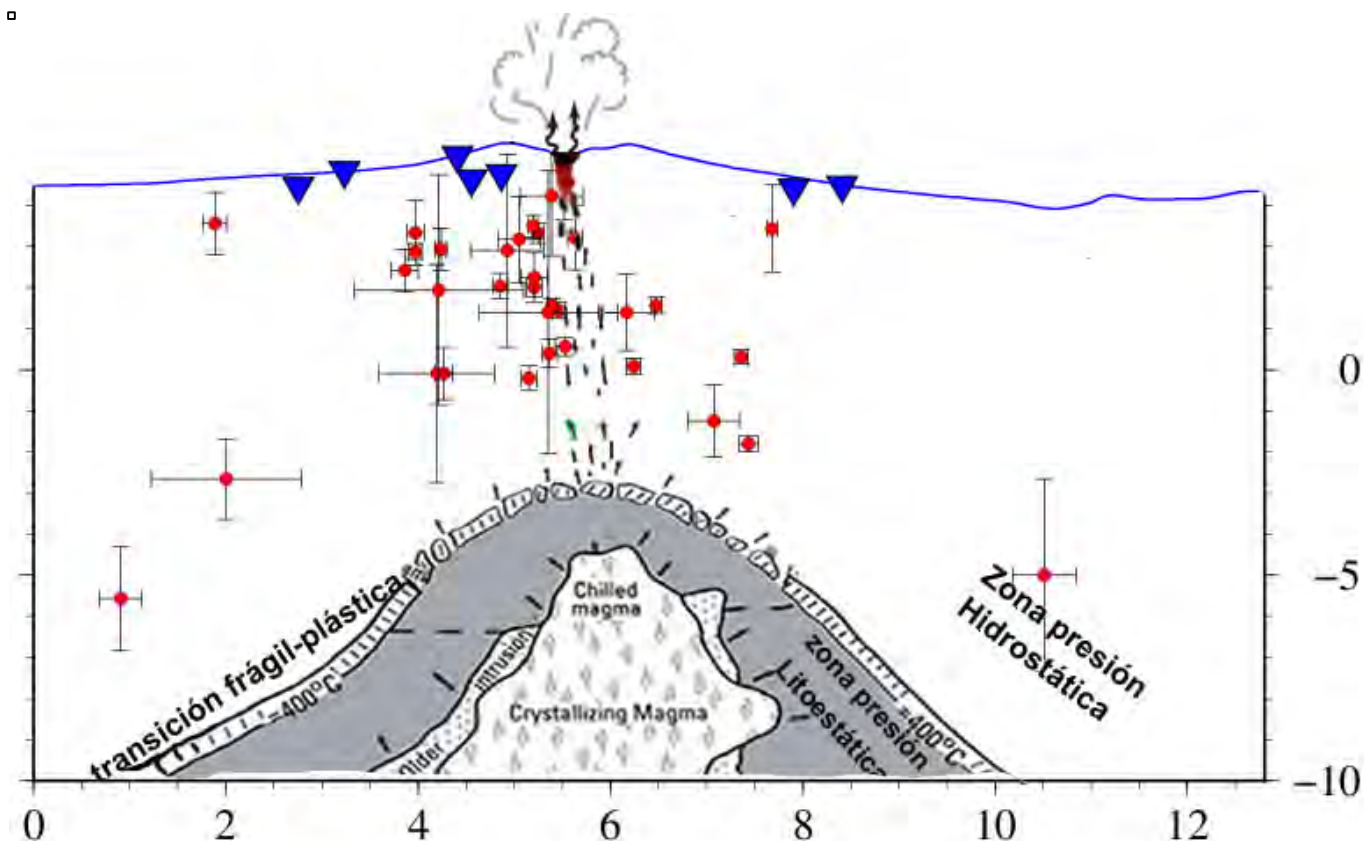


Figura 4. a) Sección transversal esquemática que ilustra el sistema magmático del volcán Ubinas (Rivera et al., 2014). b) Mapa de localización de sismos de tipo VT de fase presurización, y sus respectivos perfiles en profundidad (los triángulos azules representan la ubicación de las estaciones sísmicas, y los círculos la fuente sísmica).

El modelo de Fournier explica en gran medida la presencia de sismos VT superficiales en el volcán Ubinas. La zona de transición frágil-plástico se ubicaría a ~12 km de profundidad debajo del cráter. Por encima de esta zona circula agua meteórica a presión hidrostática en roca frágil, lo que genera que se activen las fallas circundantes

a este sello, cuando se produce un cambio de presión generado por una intrusión en la cámara magmática. Así mismo se producen sismos de tipo VT, por ruptura episódica y temporal de la zona de transición, que a la vez permite a los gases magmáticos escapar al sistema hidrotermal, produciendo sismos LP.



**Figura 5.** Modelo esquemático del sistema magmático del volcán Ubinas, interpretado a partir de datos sísmicos y estudios petrológicos. Los círculos rojos representan los sismos de tipo VT.

## 5. Conclusiones

La vigilancia sísmica permanente del volcán Ubinas permitió la detección temprana del ascenso de magma ocurrido el día 17 de enero de 2014, durante el cual se registró el primer sismo de tipo híbrido, que evidenció una fase de ascenso de magma.

Posteriormente, entre el 29 de marzo y el 13 de abril de 2014, se presentó una fase de sobre-presurización en el sistema del volcán, que terminó con la explosión ocurrida el 13 de abril de 2014, entrando en adelante a una fase magmática explosiva que persiste hasta la fecha (mayo de 2014).

La localización de los sismos de tipo volcano-tectónico (VT) muestra que la cámara magmática del volcán Ubinas se encuentra a una profundidad entre 15 y 20 km de profundidad. Este resultado es muy similar al obtenido por los estudios petrológicos de la erupción de 2006-2009, lo que evidencia que este proceso eruptivo es muy similar al anterior, ya que los productos magmáticos provienen de un mismo reservorio profundo.

## Referencias

- Fournier, R.O. 2006. Hydrothermal systems and volcano geochemistry. *Volcano Deformation*, chapter 10, Springer Praxis Books 2006, p. 323-341.
- Inza, L.A., Métaixian, J.P., Mars, J.I., Bean, C.J., O'Brien, G.S., Macedo, O., Zandomenighi, D. 2014. Analysis of dynamics of vulcanian activity of Ubinas volcano, using multicomponent seismic antennas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 270, p. 35-52.
- Lesage, P., Mora, M., Alvarado, G., Pacheco, J., Métaixian, J.-P. 2006. Complex behavior and source model of the tremor at Arenal volcano, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 157, p. 49-59.
- Rivera, M., Thouret, J.-C., Samaniego, P., Le Pennec, J.-L. 2014. The 2006-2009 activity of the Ubinas volcano (Peru): Petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge, and plumbing system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 270, p. 122-141.
- White, R., Miller, A., Lynch, L., Power, J. 1998. Observation of hybrid seismic events at Soufrier Hills Volcano, Montserrat: July 1995 to September 1996. *Geophysical Research Letters*, p. 3657-3660.