



## Actividad sismo-volcánica asociada a la intranquilidad del volcán Sabancaya observada entre febrero y julio de 2013

**Nino Puma<sup>1</sup>, José Luis Torres<sup>1</sup>, Jennifer Jay<sup>2</sup>,  
Francisco Delgado<sup>2</sup>, Matthew Pritchard<sup>2</sup>, Orlando Macedo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico de Arequipa (OVA), Instituto Geofísico del Perú (IGP), Arequipa, Perú ([npuma@igp.gob.pe](mailto:npuma@igp.gob.pe))

<sup>2</sup> Cornell University, Ithaca, New York, USA

### 1. Introducción

El volcán Sabancaya está ubicado a 80 km al NNO de la ciudad de Arequipa (15°47' S; 71°72'W; 5976 msnm), en el sur del Perú. Es un estrato-volcán andesítico de edad holocénica reciente y forma parte del complejo volcánico conformado por los volcanes Ampato, Sabancaya y Hualca-Hualca. Según los registros históricos, el Sabancaya erupción en 1750 y 1784-1785; entre 1990 y 1998 presentó una última erupción que alcanzó un VEI 2. Luego de 15 años de tranquilidad, este volcán está mostrando nuevos signos de actividad desde el 22/02/2013, con alta sismicidad y emisiones fumarólicas de colores blanquecinos y azulinos al nivel del cráter, muchas veces intensas y densas, que se elevan a alturas de hasta 3 km.

Atendiendo a esta situación, el OVA-IGP inmediatamente instaló una red de 6 estaciones portátiles (5 de GURALP-6TD, banda ancha, y 1 Lennartz 3DLite, periodo corto con digitalizador CMG-DM24). Adicionalmente, a partir del 24 de marzo de 2013, entró en operación la red telemétrica Sabancaya (RESSAB), la cual consta de 3 estaciones: SABA, CAJA, y PATA, equipadas con sensores de banda ancha GURALP 40T y digitalizadores Reftek130 (Figs. 1 y 2).

### 2. Eventos sismo-volcánicos y deformación en superficie

Entre febrero y julio se han registrado y clasificado un total de 15,253 sismos, de los cuales 13,485 (88.4 %) fueron eventos volcano-tectónicos (VT) y 1,328 (8.7 %) eventos de periodo largo (LP). Se registraron también 440 eventos de tipo híbrido (HIB), tremores (TREM), y

tornillos (TOR), representando sólo el 2.9 % del total. De estos eventos, se ha logrado localizar 1,655 eventos VT con magnitudes entre 1.0 y 5.7 ML, que se distribuyen preferencialmente hacia los sectores NE y NO, a distancias entre 7 y 15 km del cráter del volcán (Figs. 3 y 5).

Se ha calculado también los mecanismos focales de los eventos de mayor magnitud (>1.8 ML) y mejor registrados. En la Figura 3 se observa que los mecanismos de fallamiento normal se encuentran en el sector occidental, donde su distribución tiende a seguir un alineamiento NO-SE, y numerosos planos de falla presentan un rumbo ~N120, es decir en correspondencia con el sistema de fallas regionales de la región del Colca.

Las fallas de este sistema presentan escarpa visible en superficie, con movimientos recientes de tipo normal (Sévrier y Soler, 1991). En la misma Figura 3 se observa también sismos con mecanismo de falla inverso, que están situados preferencialmente hacia el sector oriental. Notar que el "lineamiento de Sepina" se ubica hacia el NE del cráter, extendiéndose por más de 30 km (Fig. 3).

Se usó el método InSAR para determinar deformaciones en superficie contemporáneas de la sismicidad observada. Interferogramas de los periodos 01/2012-05/2013 y 05/2013-07/2013 (Fig. 3) cubren las fechas en que se registraron los dos más fuertes sismos en la región, ocurridos el 22/02/2013 (5.2 ML) a 6 km al NE del cráter, y el 17/07/2013 (5.7 ML) a 15 km al NO del cráter. Sus focos, a <6 km de profundidad, provocaron fallamientos normales de rumbo N130 con buzamiento al SO (subsistencia de 6 cm) y N100 con buzamiento al NE (subsistencia de 17 cm), con deformaciones visibles en el terreno. Los interferogramas no muestran deformaciones importantes en el sector oriental, donde se ha observado mecanismos focales de fallamiento inverso.

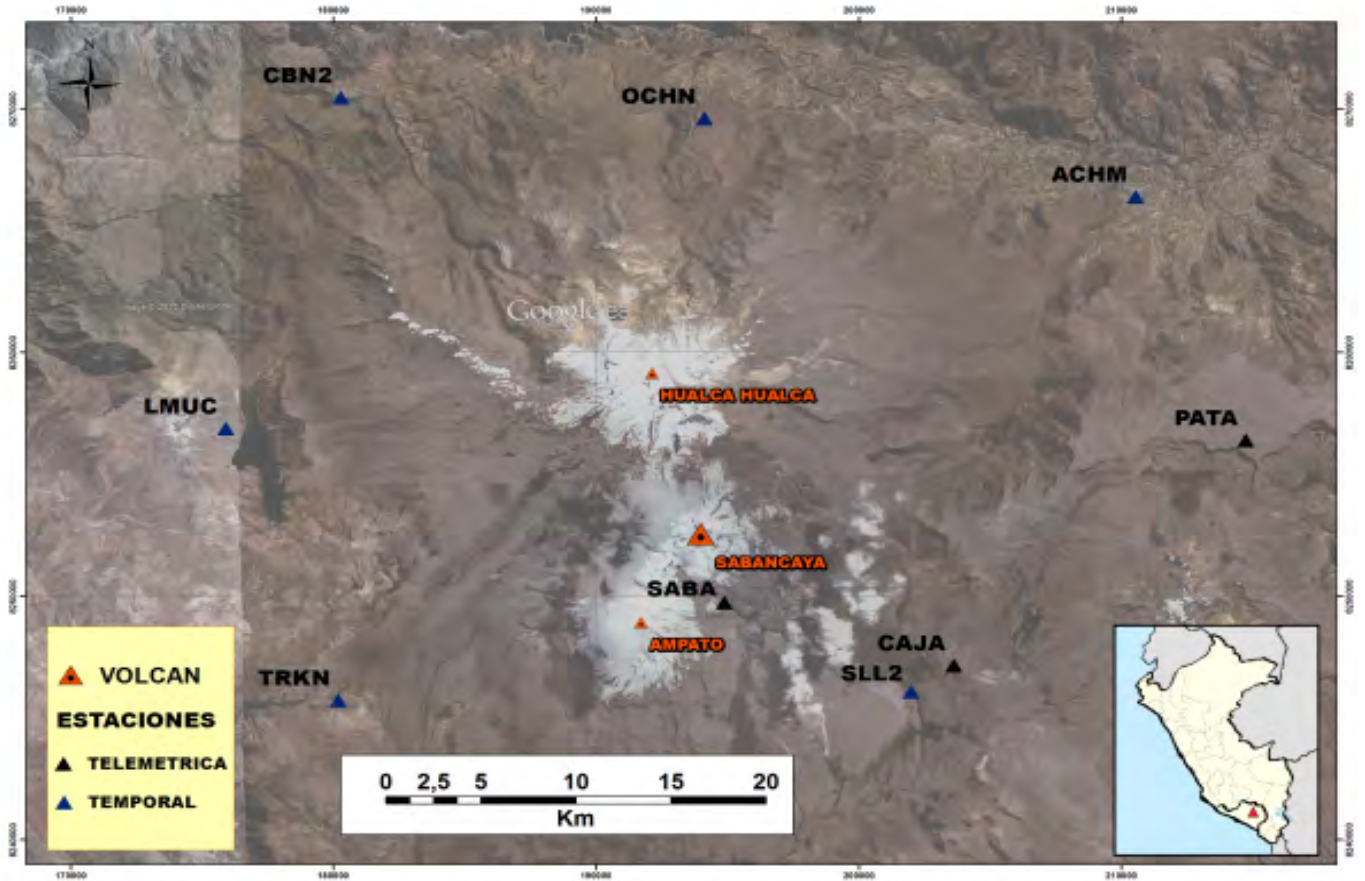


Figura 1. Mapa de la región del volcán Sabancaya, con la ubicación de las estaciones sísmicas.



Figura 2. Vista fotográfica aérea del volcán, donde se observa el cráter activo actual, y dos notables domos en la zona de cumbre.



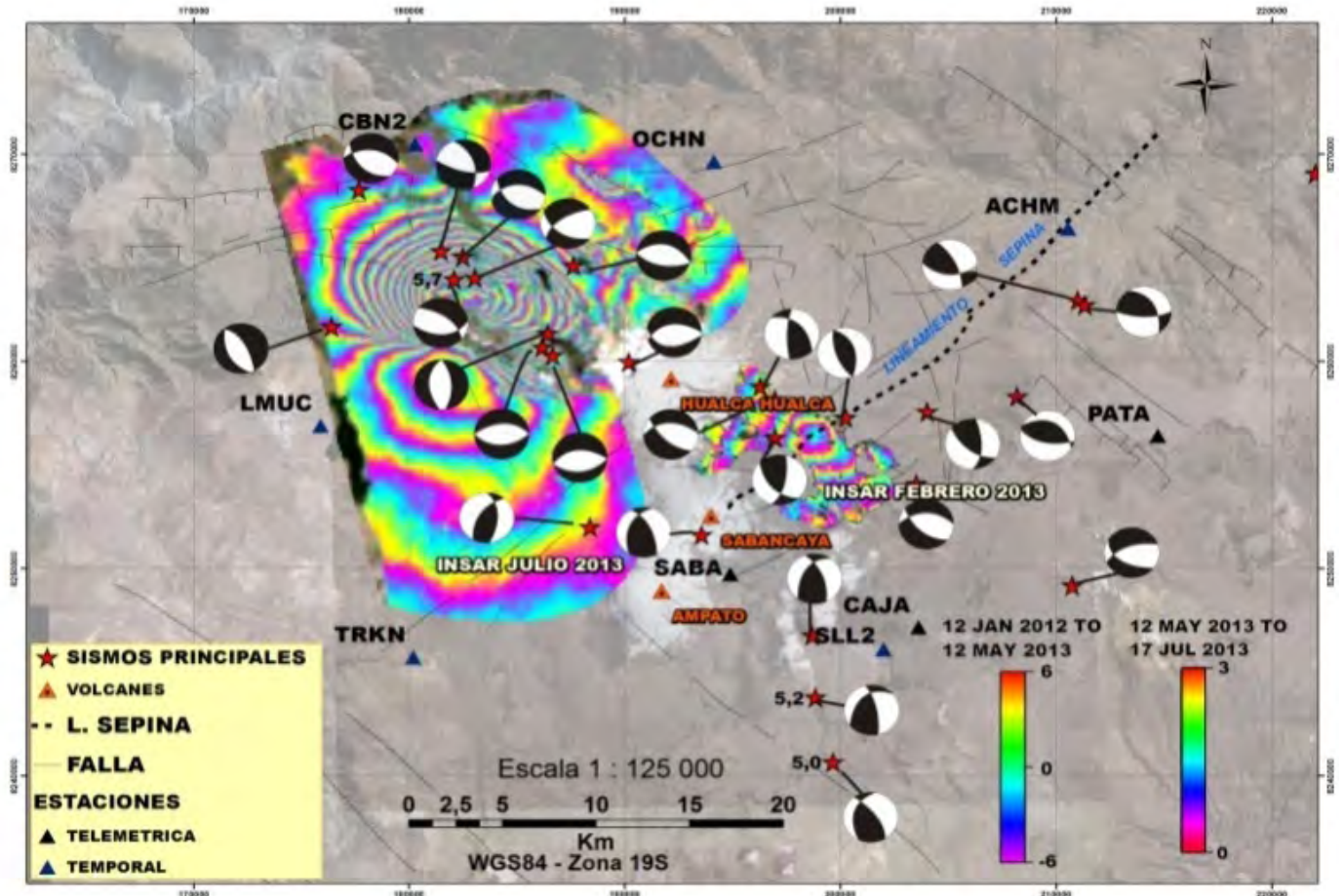


Figura 3. Mapa tectónico, sobre el cual se ha dibujado los mecanismos focales de los principales sismos observados durante el estudio. Adicionalmente se superpone la deformación del terreno evidenciada por InSAR.

### 3. Migración de eventos volcano-tectónicos en el tiempo y el espacio

Durante el estudio se ha observado que la sismicidad VT ha migrado tanto en el tiempo como en el espacio. La Figura 4 muestra la ubicación de tres zonas principales de focos sísmicos. Las zonas A, B, y C corresponden a sismicidad ocurrida en febrero-marzo, en marzo-julio, y en julio, respectivamente.

La Figura 5 muestra un histograma donde se observa la ocurrencia de tal sismicidad en el tiempo; desafortunadamente se ha tenido un lapso de falta de registro durante varios días en marzo (sismicidad en la Zona A), que no ha permitido hacer el seguimiento preciso de la sismicidad, aunque se ha podido observar que lo esencial de la sismicidad ocurrió al ENE del cráter a distancias entre 6 y 12 km (Fig. 4), lo cual coincide con las deformaciones evidenciadas por InSAR (Fig. 3). En cuanto a la sismicidad en la Zona B, que está también situada el NE pero alejada del cráter, ella ha ocurrido sobre todo durante el mes de junio, y no tiene asociada deformación alguna. Finalmente, en la Zona C situada a unos 15 km al NO del cráter, la intensa sismicidad ha deformado ampliamente el área (Fig. 3).

Una característica notable es que los eventos ocurridos

al inicio de la intranquilidad (22-23 de febrero de 2013) han sido del tipo *swarm* (enjambre) y no del tipo *mainshock- aftershock*. En efecto, los 22 y 23 de febrero de 2013 han ocurrido en enjambre 4 sismos, de 4.6, 5.2, 5.0 y 4.5 ML, en el lapso de 24 horas. Un comportamiento similar se observó también los 16 y 17 de julio con la ocurrencia de 3 sismos, de 4.9, 4.2 y 5.7 ML, en el lapso de 17 horas.

White (2011) ha mostrado que la ocurrencia de sismicidad en *swarm* en ambientes volcánicos es un importante signo de la inminencia de actividad eruptiva. Asimismo, este mismo autor ha mostrado que frecuentemente al inicio de la intranquilidad volcánica ocurre sismicidad de fractura (VT) que se sitúa lejos del cráter, a algunos kilómetros de distancia (pudiendo llegar hasta los 30 km), debido al ascenso del material magmático que induce la transmisión de presión de fluidos hasta distancias considerables. Los datos presentados en este trabajo, así como las observaciones de actividad fumarólica al nivel del cráter, muestran que en el volcán Sabancaya se está observando el patrón indicado por White (2011).

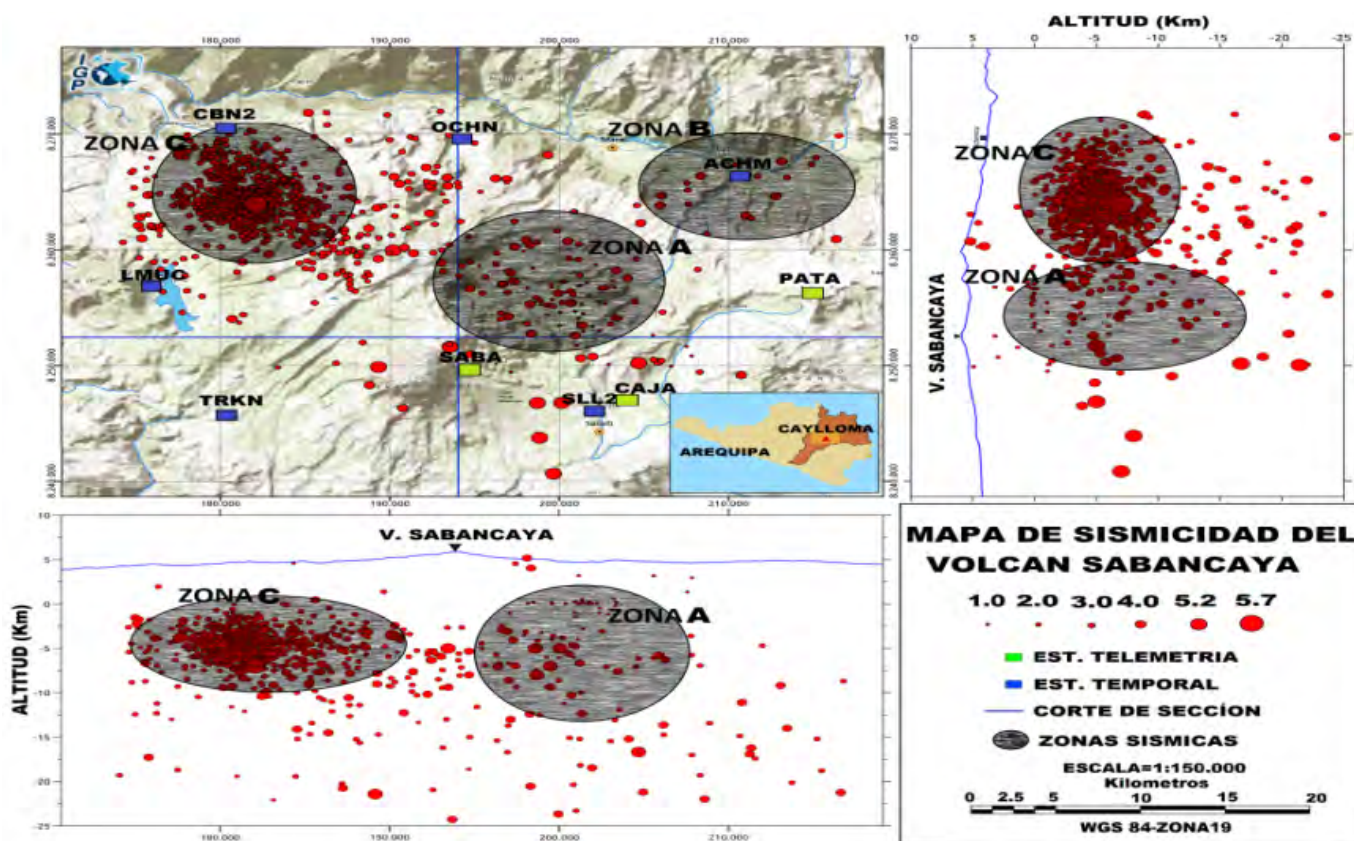


Figura 4. Distribución epicentral e hipocentral de los sismos en la zona del volcán Sabancaya.

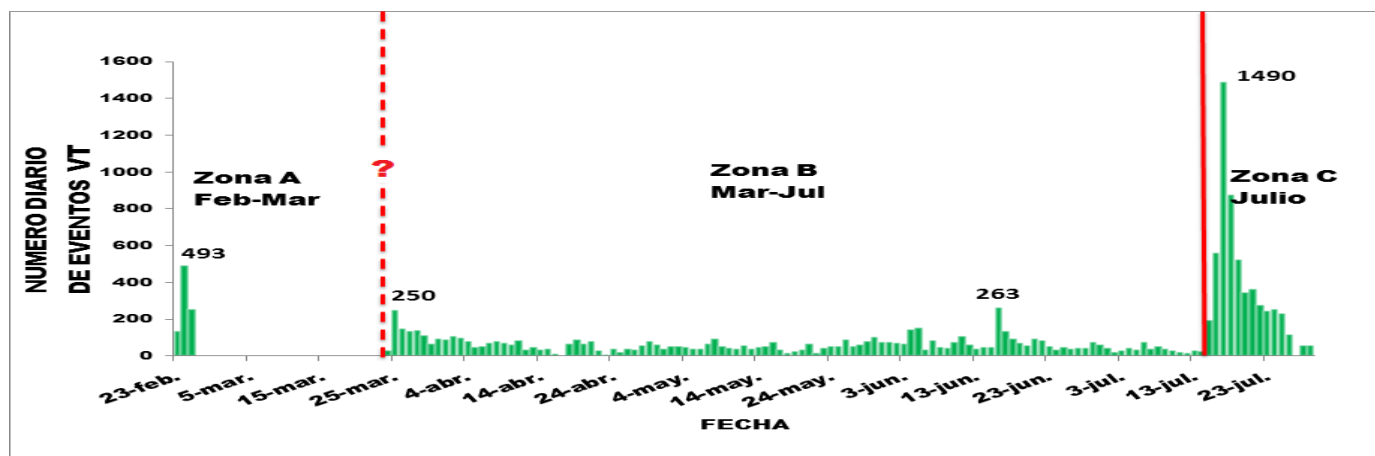


Figura 5. Número diario de eventos VT, y evolución en el tiempo.

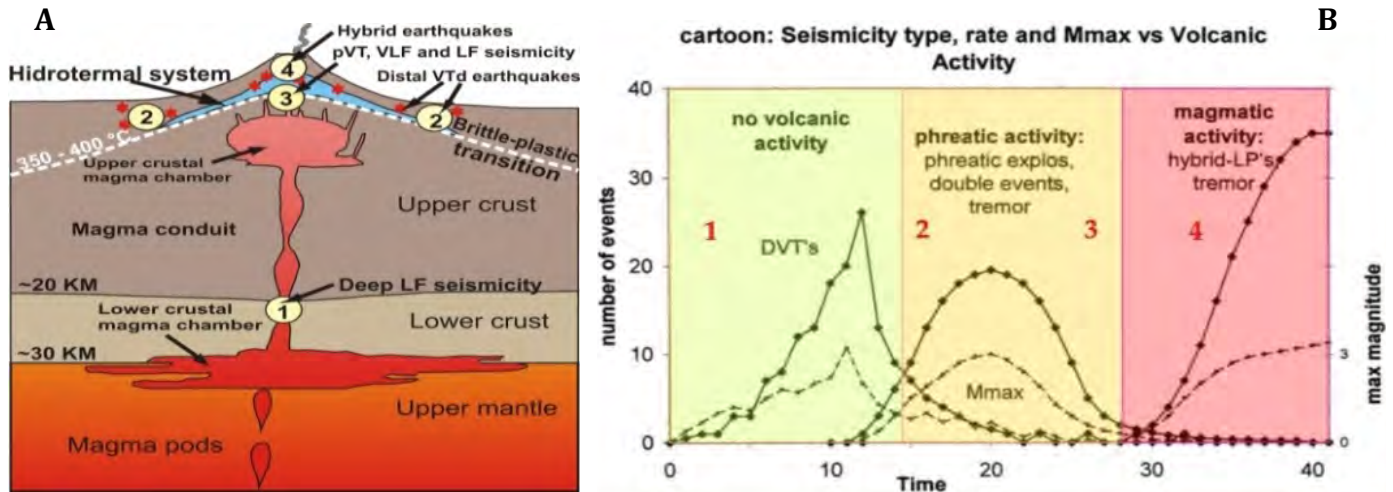
#### 4. Modelo de evolución de la sismicidad del volcán Sabancaya

Se ha realizado un modelo esquemático (Fig. 7) para explicar la evolución de la sismicidad VT y deformaciones observadas en el tiempo y el espacio. Aún cuando en el esquema se ha considerado los modelos de White (2011) y Fournier (1999) (Fig. 6), quizás se deba tener en cuenta el importante tectonismo que afecta permanentemente esta parte de los Andes, donde los esfuerzos extensionales NE-SO son predominantes (Sébrier & Soler, 1991).

Una intrusión magmática inició su manifestación en superficie, causando actividad en la Zona A (febrero-marzo). Considerando los 4 sismos consecutivos, de magnitudes 4.6, 5.2, 5.0, y 4.5 ML, es posible que la intrusión haya sido rápida pero de poco volumen; ella

habría inducido la transmisión de la presión de fluidos lateralmente, ocasionando reactivación de fallas situadas hacia el NE en febrero y marzo, y causando deformación en superficie. De marzo a julio, la intrusión se mantuvo muy moderada y sólo generó sismicidad leve, sin generar deformación en superficie (Zona B, así como sismos dispersos). Posteriormente, en julio ocurrió un nuevo ascenso de magma que ocasionó la amplia y enérgica sismicidad con epicentros al NO del cráter, causando fuerte deformación en superficie (Zona C). En este sector se encuentran fallas muy activas, las que muy posiblemente se reactivaron inmediatamente al recibir presiones provenientes de fluidos de origen magmático.





**Figura 6.** Modelo geológico, basado en Fournier (1999) y White (2011), ilustrando la sismicidad asociada a erupciones. El esquema (A) muestra la localización en etapas de la sismicidad dominante vs. la actividad volcánica que se observa en (B). Los números 1, 2, 3, y 4 indican la ubicación y el tipo de sismicidad durante la evolución hacia la erupción.

## 5. Conclusiones

Se identificaron 15,253 eventos sismo-volcánicos, de los cuales casi el 90 % se clasificó como señales VT (volcano-tectónicos). De éstos, 1655 eventos fueron localizados, observándose que se agrupan en 3 zonas (Zona A, Zona B, y Zona C) pero en tiempos diferentes, es decir que se trató de sismicidad migrante, ubicada entre 6 y 15 km del cráter. En esta sismicidad resaltan dos enjambres energéticos: (a) los 4 sismos del 22 y 23 de febrero con magnitudes entre 4.5 y 5.2 ML, y (b) los 3 sismos del 16 y 17 de julio con magnitudes entre 4.2 y 5.7 ML.

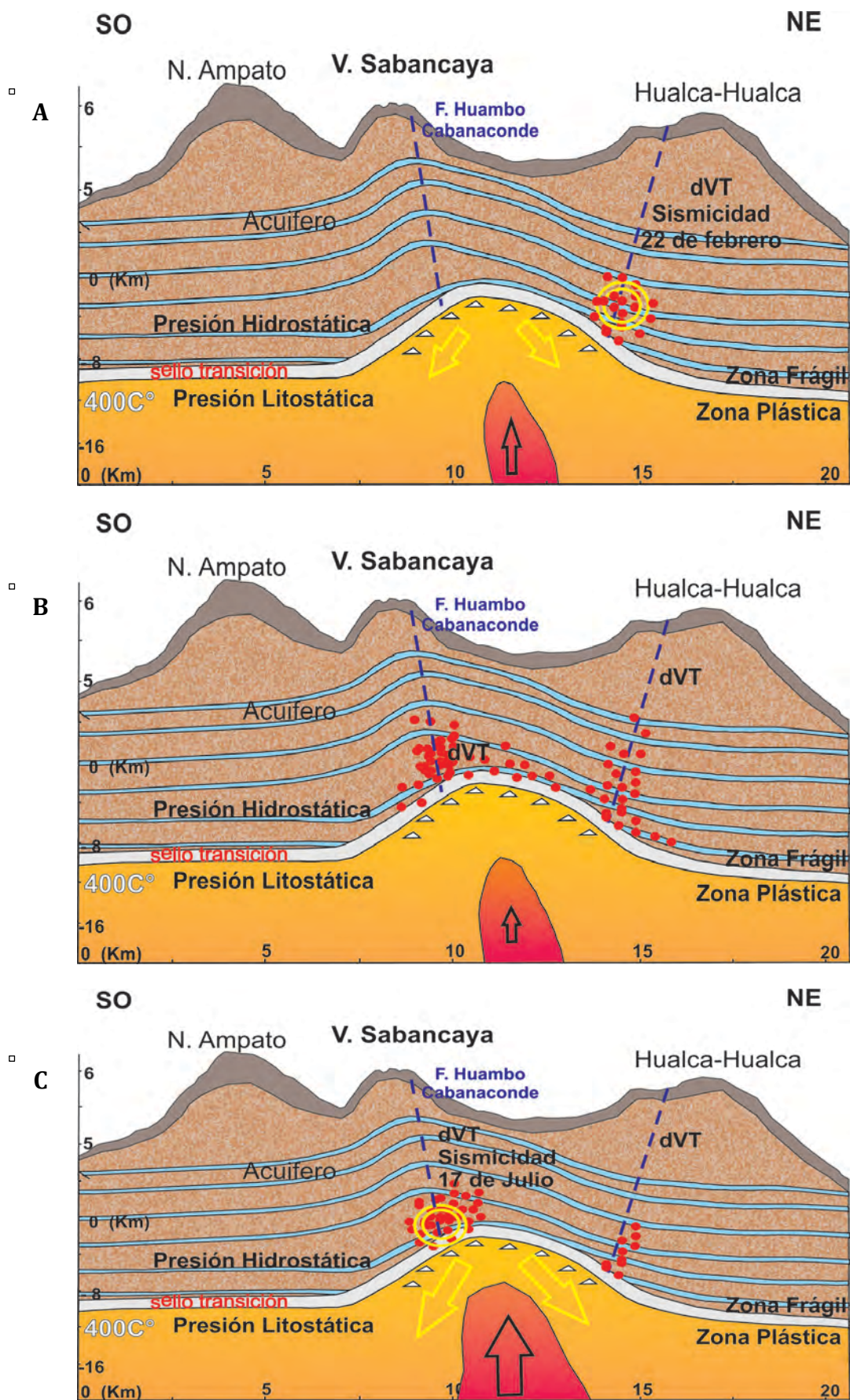
Los mecanismos focales de los sismos y la interferometría SAR del área de estudio muestran que los sismos corresponden esencialmente a fallamientos normales, acorde con la tectónica observada regionalmente. Existe, sin embargo, una zona situada al E y NE donde se observa fallamiento inverso (zona Sepina).

Todas estas características observadas en la ocurrencia y distribución de la sismicidad están acorde con el modelo propuesto por White (2011), que describe los patrones de sismicidad en ambientes volcánicos con inminente erupción.

En base a los datos sísmicos y de interferometría, así como de observaciones de las emisiones fumarólicas, se propone un modelo esquemático que explica la evolución de la sismicidad hasta ahora observada, y donde se ha considerado que el volcán Sabancaya presenta intranquilidad, con amplia sismicidad VT lejos del cráter, y que debería conducir a un proceso eruptivo en los meses siguientes. La siguiente etapa sería la aparición de sismicidad de baja frecuencia (LPs) e híbrida en tasas importantes, así como de explosiones freáticas.

## Referencias

- Fournier, R.O. 1999. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment. *Economic Geology*, v. 94, p. 1193-1211.
- Sébrier, M., Soler, P. 1991. Tectonics and magmatism in the Peruvian Andes from Late Oligocene time to the Present. *Geological Society of America Special Paper* 265, p. 259-278.
- White, R. 2011. Monitoring volcanoes and forecasting eruptions. *Volcano Observatory Best Practices Workshop: Eruption Forecasting*, 11-15 September 2011, Erice, Italy.



**Figura 7.** Modelo esquemático, basado en Fournier (1999) y White (2011), ilustrando la evolución de la sismicidad VT en la zona del volcán Sabancaya entre febrero y julio de 2013. **A)** Etapa de intrusión magmática relativamente rápida, y sismicidad al NE. **B)** Intrusión y sismicidad limitadas. **C)** Etapa de intrusión magmática y actividad sísmica mayores; epicentros a 15 km al NO del cráter. La sismicidad VT está principalmente asociada a la transmisión de presiones de fluidos.