



Avances en el estudio de la estructura interna del volcán Sabancaya

L. Cruz ⁽¹⁾, E. Taípe ⁽¹⁾, P. Masías ⁽¹⁾, R. Anccasi ⁽¹⁾, M. Ortega ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - INGEMMET, lcruzma@unsa.edu.pe

RESUMEN

El volcán Sabancaya, en erupción desde 2016, es el volcán más joven del Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya que limita por el norte con el volcán Hualca Hualca. Utilizando las manifestaciones de la actividad eruptiva del volcán: registros sismo-volcánicos de tipo volcano-tectónico, deformación del suelo y fuentes termales, se ha estimado la ubicación del reservorio magmático principal, la profundidad de la zona de transición entre la corteza frágil-dúctil, sistemas de conductos magmáticos de tipo sill y dique por donde se asume que el magma migraría hacia la superficie y las zonas de baja y alta temperatura en el sistema hidrotermal volcánico. En este trabajo se complementan los estudios realizados en la última década para ilustrar mediante un esquema interpretativo las estructuras internas inferidas y estimadas en los últimos trabajos de investigación.

PALABRAS CLAVE

Estructura interna, volcán Sabancaya, deformación, sismicidad, hidroquímica

KEYWORDS

Internal structures, Sabancaya volcano, deformation, seismicity, hydrochemistry

ABSTRACT

Sabancaya volcano, the youngest volcano in the Ampato-Sabancaya Volcanic Complex, is bordered to the north by the Hualca Hualca volcano and is in eruption since 2016. Using the manifestations of the volcano's eruptive activity: volcano-tectonic seismicity, soil deformation and hot

springs; we have estimated the location of the main magmatic reservoir, the depth of the transition zone between the brittle-ductile crust, sill and dike type magmatic conduit systems which it is assumed that the magma would migrate towards the surface and the areas of low and high temperature in the volcanic hydrothermal system. This work complements the studies carried out in the last decade to illustrate, through an interpretive scheme, the internal structures inferred and estimated in the latest research works.

LOCALIZACIÓN

El Volcán Sabancaya (5980 m.s.n.m.) se ubica en la provincia de Caylloma, departamento de Arequipa, al sur del Perú. Es un estratovolcán perteneciente a la Zona Volcánica Central (ZVC) de los Andes. Entre 10 y 25 km desde el cráter, se ubican más de veinte pueblos y caseríos de la provincia de Caylloma, cuya población actualmente se encuentra afectada por la actividad eruptiva del volcán. El volcán Sabancaya limita por el norte con el volcán Hualca Hualca y al sur por el volcán Ampato (ver Figura 1), con el cráter activo ubicado en las coordenadas geográficas 15°47' latitud sur y 71°50' longitud oeste.

METODOLOGÍA

El estudio de la estructura interna de un volcán puede realizarse de dos formas: (1) utilizando métodos prospectivos para conocer propiedades físicas del suelo a diferentes profundidades específicas y (2) aprovechando la actividad propia del volcán (sismicidad volcánica, deformación del suelo, manifestaciones de gases y fuentes termales, entre otros).

En este trabajo se ha recopilado los resultados de los estudios asociados a la ubicación del reservorio magmático, la profundidad de la zona de transición entre la corteza frágil-dúctil, sistemas de conductos magmáticos de tipo sill y dique, interpretados de los estudios sismo-volcánicos y de deformación del suelo volcánico realizados por Ortega et al. (2016), Cruz (2019), MacQueen et al. (2020), Boixart et al. (2020) y Cruz et al. (2020). Adicionalmente se complementa con los resultados del análisis hidroquímico de fuentes de agua termal, ríos y una laguna que describen zonas de baja y alta temperatura en el sistema hidrotermal volcánico. La integración de estos resultados se ilustra mediante un esquema interpretativo que ubica las estructuras internas inferidas y estimadas en los últimos trabajos de investigación que ha realizado y en los que ha participado el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) a través de su Observatorio Vulcanológico (OVI).

RESULTADOS

De los estudios realizados por Cruz (2019), MacQueen et al. (2020), Boixart et al. (2020) y Cruz et al. (2020) a través del procesamiento de datos satelitales del Sistema Global de Navegación Satelital (GNSS) y de la Interferometría Diferencial de imágenes de Radar de Apertura Sintética (DInSAR); se sabe que el suelo volcánico alrededor del Sabancaya evidencia un proceso inflacionario de 3.5 a 5.0 cm/año. El modelamiento de este proceso inflacionario hasta el año 2020, esti-

ma que la ubicación de la fuente de presión que genera la deformación del suelo se encuentra entre 12 y 15 km de profundidad por debajo del volcán Hualca Hualca. Esta fuente de presión estima la ubicación del reservorio magmático.

De MacQueen et al. (2020) sabemos que la transferencia de esfuerzos producidos por el incremento de volumen en esta fuente de presión es positiva en la zona de ocurrencia de actividad sismo-volcánica de tipo volcano-tectónica proximal y distal alrededor del volcán Sabancaya. La ubicación de estos sismos está principalmente entre 1 y 22 km al noreste, norte, noroeste y oeste del volcán Sabancaya, con magnitudes que varían entre 0.1 – 5.2 ML y una profundidad promedio de ~7 km y menores de 20 km (Anccasi et al., 2018; Cruz et al., 2020). De la distribución de la distancia de la actividad sismo-volcánica VT respecto al cráter del volcán Sabancaya, así como la profundidad de tales eventos, se infiere la posible distribución en profundidad de la zona de transición entre la corteza frágil-dúctil. En el caso del volcán Sabancaya, la profundidad aproximada de la zona de transición frágil-dúctil se estabiliza hasta ~7 km por debajo del nivel del mar (Cruz et al., 2020). MacQueen et al. (2020) también sugiere un extenso sistema vertical y lateral de estructuras de tipo dique y sill por debajo de los volcanes Hualca Hualca, Sabancaya y Ampato. Los resultados del análisis de la actividad sismo-volcánica VT realizado por Ortega et al. (2016) a través de la estimación preliminar del parámetro-b muestran

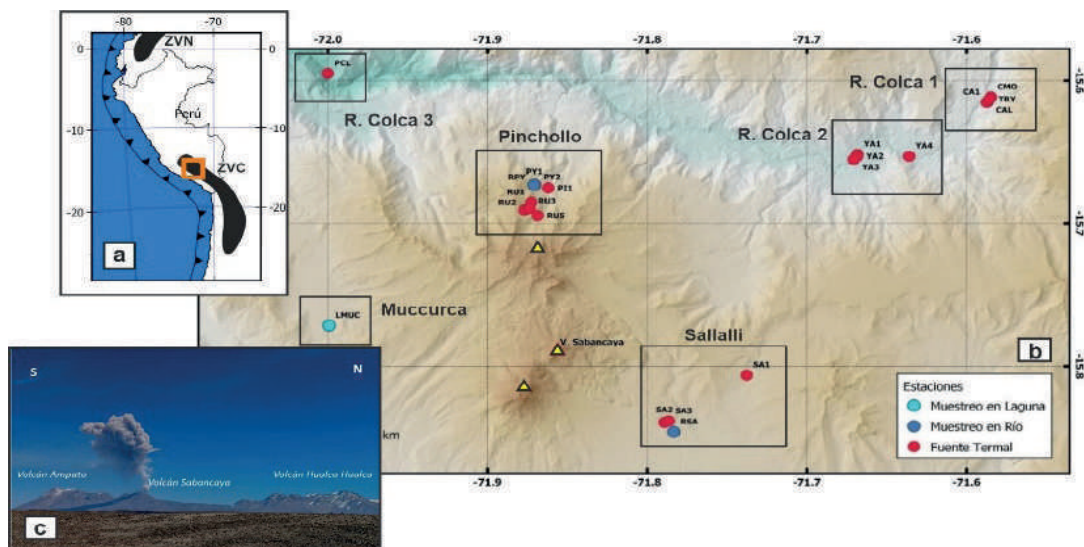


Figura 1. (a) Ubicación del volcán Sabancaya dentro de la Zona Volcánica Central de los Andes. (b) Distribución de las zonas de muestreo de fuentes de agua alrededor del Sabancaya. (c) Vista en dirección este-oeste del volcán Sabancaya, Ampato y Hualca Hualca.

dos zonas anómalas al noreste del volcán Hualca Hualca y al noreste del volcán Sabancaya con profundidades superficiales desde 1 a 8 km. De acuerdo a Chouet et al. (2005), este tipo de anomalías más superficiales identificadas con el parámetro-b, podrían asociarse a sistemas de conductos magmáticos, los cuales estarían compuestos por zonas de alto fracturamiento como estructuras de tipo sill y dique, por donde se asume que el magma migraría hacia la superficie.

Desde el 2013 se han identificado y muestreado 20 fuentes de agua con origen termal, en ríos y una laguna. Estas fuentes fueron divididas en cuatro zonas: tres de surgimiento de aguas y una ubicada en una laguna (Figura 1b).

El análisis hidroquímico utilizando el diagrama ternario $SO_4-Cl-HCO_3$ de Giggenbach (1988) evidencia que las fuentes de la zona de Sallalli SA2 y SA3 son aguas calentadas por vapor con tendencia en el tiempo a ser aguas sulfatadas de origen volcánico. La fuente SA1 tiene un origen meteórico, con una influencia volcánica nula. Las fuentes de la zona de Pinchollo PI1, PY1, PY2, RU1, RU2, RU3, RU4 y RU5 también son aguas calentadas por vapor con componente aniónico mayoritariamente sulfatado, con excepción de RU2 que es bicarbonatada. Todas estas fuentes presentan como característica principal que surgen como respiraderos de vapor, los cuales se condensan. La temperatura de los surgimientos por lo general supera el punto de ebullición a la altura a la que se encuentran. Otra característica es la ausencia de cloruros, que se podrían mantener en el sistema hidrotermal. Las fuentes de la zona del Río Colca 1 CAL, TRY y CMO se ubican en el cauce del río Colca. Éstas tratan de 2 tipos de agua: (1) TRY y CMO que son aguas de menor temperatura, sulfatadas y con un origen por calentamiento de vapor y (2) CAL que es mayoritariamente agua clorurada y muy cercana a las aguas maduras, lo que indica que podría estar asociado a fallas y surgir de zonas muy profundas. Las fuentes de la zona del Río Colca 2 YA1, YA2, YA3 y YA4 presentan temperaturas de 40 y 85 °C. YA3 y YA4 son aguas cloruradas al igual que YA2, la que eventualmente fue bicarbonatada. Las tres deben su posible origen asociado a fallas. La fuente YA3 tiene una composición diferente, principalmente bicarbonatada, con un posible origen en mezclas con aguas periféricas. La fuente de la zona del Río Colca 3 presenta temperaturas cercanas a 95 °C. El agua es mayoritariamente clorurada con un posible origen

volcánico. Asimismo, la fuente de agua en la zona de la Laguna de Muccurca es mayoritariamente bicarbonatada, algo esperado al tratarse de una laguna con origen en agua meteórica.

DISCUSIÓN

De los estudios mencionados, la fuente de presión modelada a partir de los datos de la deformación del suelo representa el campo de esfuerzos causado por el reservorio magmático principal. La ubicación lejana del reservorio magmático, al igual que en otros estratovolcanes, dan nuevas evidencias del dominio de extensos magmatismos en volcanes pequeños y jóvenes. Los volcanes con esta característica han sido interpretados como complejos sistemas de alimentación magmática lateralmente extensos (Cashman et al., 2017). Las anomalías superficiales con el parámetro-b infieren que estos sistemas de alimentación podrían corresponder a zonas de alto fracturamiento como estructuras de tipo sill y dique por donde asumimos que el magma migraría hacia la superficie.

El incremento de presión en el reservorio magmático y en los sistemas de alimentación magmática y la sobrepresurización de los acuíferos que se verían cruzados por los sistemas de fallas tectónicamente activos en la zona (Benavente et al., 2017), son una de las causas de la ocurrencia de la actividad sismo-volcánica VT. Del análisis de este tipo de sismicidad se ilustra la zona de transición entre la corteza frágil-dúctil que limita y valida la ubicación del reservorio magmático.

El análisis hidroquímico de las fuentes de agua circundantes a la zona de estudio da mayores luces de la interacción de los flujos locales provenientes de aguas meteóricas de las lluvias con el área de influencia magmática, ilustrando el comportamiento del sistema hidrotermal.

La Figura 2 ilustra un esquema interpretativo con la ubicación de las estructuras internas inferidas como mecanismos de transporte del magma desde la profundidad hacia la superficie.

CONCLUSIONES

- La ubicación y dimensión del reservorio magmático estimadas por Cruz (2019), MacQueen et al. (2020), Boixart et al. (2020) y Cruz et al. (2020) está entre 12 y 15 km de profundidad por debajo del volcán Hualca Hualca y un radio de 1.5 y 2 km, respectivamente.
- Del análisis de la actividad sismo-volcánica VT se estima que la zona de transición entre la cor-

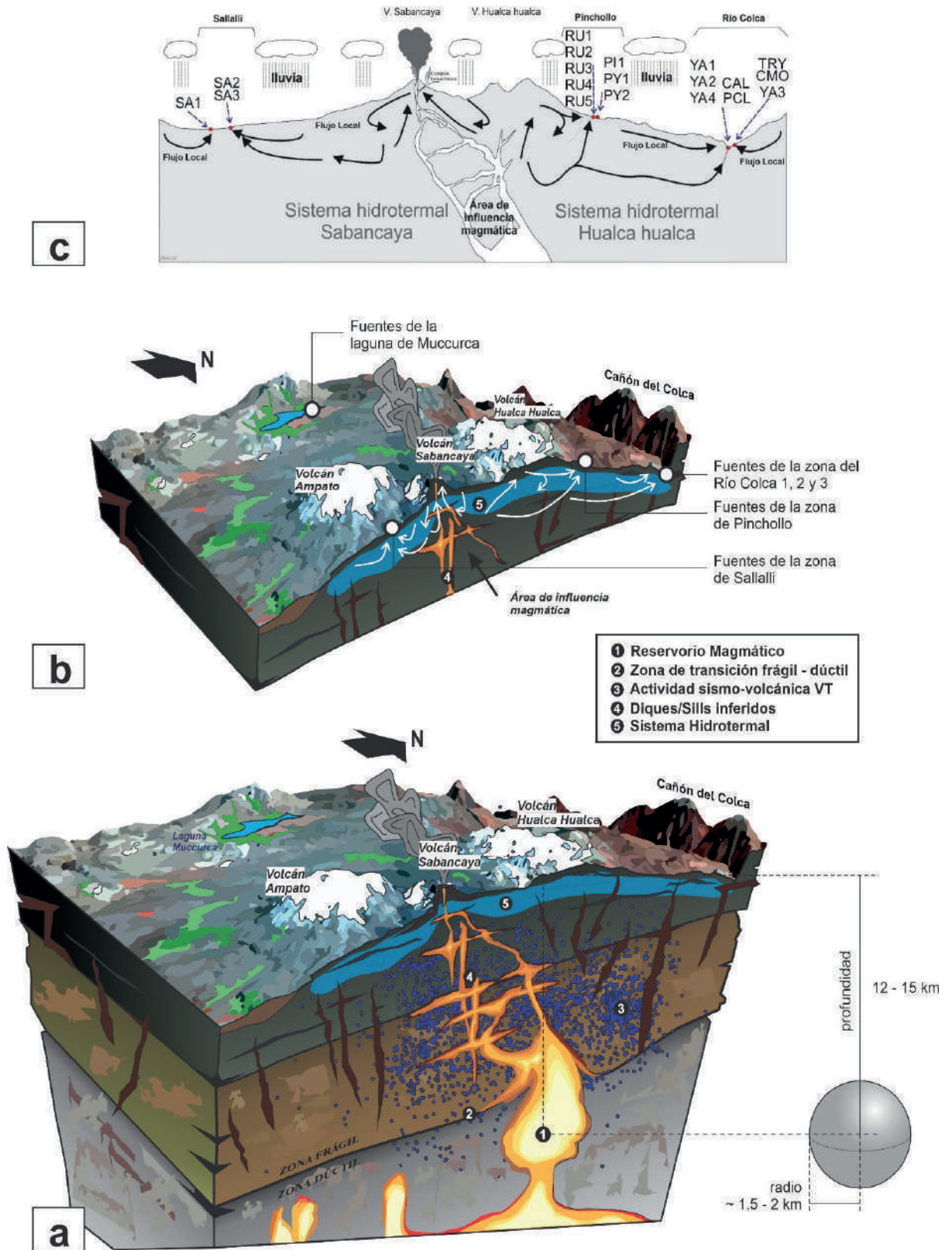


Figura 2. (a) Esquema interpretativo de las estructuras internas en el volcán Sabancaya. (b) y (c) Diagrama del sistema hidrotermal volcánico localizando las zonas de las fuentes de agua y la interacción de los flujos locales provenientes de aguas meteóricas de las lluvias con el área de influencia magmática (flechas de color blanco y negro).

teza frágil y dúctil se estabiliza 7 km por debajo del nivel del mar, validando los resultados del modelamiento de los datos de deformación del suelo volcánico.

- En base a las zonas de heterogeneidad más superficiales de parámetro-b identificadas por Ortega et al. (2016), se infiere que el magma acumulado en el reservorio bajo el volcán Hualca Hualca ascendería por medio de zonas de alto fracturamiento, como estructuras de tipo dique y sill.
- El análisis hidroquímico en las fuentes de agua circundantes a la zona da mayores luces de la interacción de los flujos locales provenientes de aguas meteóricas de las lluvias con el área de influencia magmática.

REFERENCIAS

- Ancasi Figueroa, R. M., Ortega Gonzáles, M. A., Ccallata Pacsi, B., & Machacca Puma, R., 2018. Actividad sísmica distal en el volcán Sabancaya (2015-2017). <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1467>
- Benavente, C., Delgado, G., García, B., Aguirre, E. & Audin, L., 2017. Neotectónica, evolución del relieve y peligro sísmico en la región Arequipa. Boletín INGEMMET, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 64, 370 p., Imapa. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1223>
- Boixart, G., Cruz, L. F., Miranda Cruz, R., Euillades, P. A., Euillades, L. D. & Battaglia, M., 2020. Source Model for Sabancaya Volcano Constrained by DInSAR and GNSS Surface Deformation Observation. Remote Sensing, 12(11), 1852. <https://doi.org/10.3390/rs12111852>
- Cashman, K. V., Sparks, R. S. J. & Blundy, J. D., 2017. Vertically extensive and unstable magmatic systems: a unified view of igneous processes. Science, 355(6331). <https://doi.org/10.1126/science.aag3055>
- Chouet, B., Dawson, P. & Arciniega-Ceballos, A., 2005. Source mechanism of Vulcanian degassing at Popocatepetl Volcano, Mexico, determined from moment-tensor inversion of very-long-period signals. Journal of Geophysical Research. 110, B07301. <https://doi.org/10.1029/2004JB003524>
- Cruz, L. F., 2019. Análisis de deformación del volcán Sabancaya como herramienta útil en el pronóstico de erupciones periodo 2012-2017. Tesis Título Profesional. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10016>
- Cruz, L. F., Ancasi, R., Ortega, M. & Gonzales, E., 2021. Deformación y Sismicidad Volcano-tectónica asociada a la acumulación de magma al norte del Volcán Sabancaya al sur del Perú. In: *asciences*, Vol. 1, 1 [en revisión].
- Giggenbach, W. F., 1988. Geothermal solute equilibria. derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochimica et cosmochimica acta*, 52(12), 2749-2765. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3)
- MacQueen, P., Delgado, F., Reath, K., Pritchard, M. E., Bagnardi, M., Milillo, P., Lundgren, P., Macedo, O., Aguilar, V., Ortega, M., Ancasi, R., Lazarte Zerpa, I. A. & Miranda, R., 2020. Volcano-tectonic interactions at Sabancaya volcano, Peru: eruptions, magmatic inflation, moderate earthquakes, and fault creep. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. <https://doi.org/10.1029/2019JB019281>
- Ortega, M., Antayhua, Y. & Taipe, E., 2016. Caracterización del parámetro “b” del complejo volcánico Ampato – Sabancaya – Hualca hualca (Periodo 2015). XVIII Congreso Peruano de Geología, Lima, PE, 16-19 octubre 2016, Resúmenes. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 4 p. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG18-214.pdf>