

DEFORMACIÓN Y SISMICIDAD VOLCANO-TECTÓNICA ASOCIADA A LA ACUMULACIÓN DE MAGMA AL NORTE DEL VOLCÁN SABANCAYA AL SUR DEL PERÚ.

VOLCANO-TECTONIC DEFORMATION AND SEISMICITY ASSOCIATED WITH THE ACCUMULATION OF MAGMA NORTH OF THE SABANCAYA VOLCANO IN SOUTHERN PERU.

Luis. F. Cruz^{1,2}  Rosa. M. Anccasi¹  Mayra. A. Ortega¹  Edgard Gonzales² 

¹Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Lima. Perú

²Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Escuela Profesional de Ingeniería Geofísica, Av. Independencia Arequipa, Perú.

Resumen

El Volcán Sabancaya, el volcán más joven del Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya, limita al norte con el Volcán Hualca Hualca y al sur con el Volcán Ampato. Su constante actividad explosiva desde hace cuatro años representa un aporte magmático voluminoso que induce a la deformación superficial. Tal deformación, medida entre 2014 y 2020 con datos del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y de Radar de Apertura Sintética (SAR) de órbita ascendente, muestra un área de inflación de 3 - 4.5 cm/año y el modelamiento único de ambos conjuntos de datos estima que la ubicación de la fuente de presión que genera la deformación superficial se encuentra aproximadamente 12.6 km de profundidad por debajo del Volcán Hualca Hualca. La presión producida por esta fuente ha producido significativa sismicidad volcano-tectónica (VT) a lo largo del periodo analizado. El análisis hipocentral de este tipo de sismicidad nos sugiere que la zona de transición frágil-dúctil en la corteza se ubica aproximadamente a 7 km bajo el nivel medio del mar, lo que valida la profundidad de la fuente de presión asociada al reservorio magmático involucrado en la erupción del Volcán Sabancaya. El análisis de los resultados del modelamiento de los datos de deformación y la sismicidad VT registrada, en relación con las zonas de heterogeneidad de parámetro-b identificadas por Ortega et al. (2016), ha permitido ilustrar un esquema con base en el modelo geológico de White & McCausland (2019). Este esquema ilustra la cámara magmática involucrada en la erupción del volcán Sabancaya, la zona de transición frágil-dúctil en la corteza y las posibles estructuras que permiten el ascenso del magma hacia la superficie, lo cual alimenta la actual y constante erupción del Volcán Sabancaya.

Palabras clave: *Volcán Sabancaya, deformación, sismicidad volcano-tectónica, parámetro-b*

Abstract

Sabancaya volcano, the youngest volcano in the Ampato-Sabancaya Volcanic Complex, is bordered to the north by the Hualca Hualca Volcano and to the south by the Ampato Volcano. Its constant eruption, over four years, represents a very important magmatic contribution that induces surface deformation. This deformation, measured between 2014 and 2020 with data from the Global Positioning System (GPS) and Synthetic Aperture Radar (SAR) from ascending orbit, shows an inflation area of 3 - 4.5 cm/year; the unique modeling of both data sets allows us to infer that the location of the pressure source that generates the surface deformation is approximately 12.6 km deep below the Hualca Hualca Volcano. The pressure produced by this source has produced significant volcano-tectonic seismicity (VT) throughout the period analyzed. The hypocentral analysis of this type of seismicity suggests that the fragile-ductile transition zone in the crust is located above 7 km below sea level, validating the depth of the pressure source associated with the offset magmatic reservoir involved in the eruption of the Sabancaya Volcano. The analysis of the results of the modeling of the deformation data and the recorded VT seismicity, in relation to the b-parameter heterogeneity areas identified by Ortega et al. (2016), has allowed to illustrate a scheme based on the geological model of White & McCausland (2019). This diagram illustrates the magma chamber involved in the eruption of the Sabancaya Volcano, the fragile-ductile transition zone in the crust and the possible structures that allow the magma to rise to the surface, feeding the current and constant eruption of the Sabancaya Volcano.

Keywords: *Sabancaya volcano, deformation, volcano-tectonic seismicity, b-parameter*



INTRODUCCIÓN

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 y es el edificio volcánico más joven del Complejo Volcánico Ampato – Sabancaya, ubicado al sur del volcán Hualca Hualca, al norte del Volcán Ampato y rodeado por un extenso sistema de fallas y lineamientos sísmicamente activos (Figura 1).

El Volcán Sabancaya ha producido cinco erupciones históricas desde 1750, siendo la última de éstas entre 1990 y 1998 (Samaniego *et al.*, 2016).

La deformación superficial asociada a esta última erupción fue caracterizada por Pritchard & Simons (2004) mediante el procesamiento de interferogramas.

Estos datos mostraron un área de inflación de 2 cm/año alrededor del Volcán Hualca Hualca. Sísmicamente, esta erupción se dividió en dos fases: (i) eruptiva (entre 1990 y 1995) y (ii) explosiva (entre 1992 y 1993).

La primera fase estuvo caracterizada por la ocurrencia de sismicidad VT distal localizada principalmente al norte, noreste y este del Volcán Sabancaya a profundidades menores a 20 km (Antayhua *et al.*, 2013).

La segunda fase estuvo caracterizada también por el registro de sismicidad VT y la ocurrencia de sismos de baja frecuencia (LP) acompañados de tremor volcánico.

En noviembre de 2016, el volcán Sabancaya inició un nuevo proceso eruptivo marcado por un incremento en sismicidad VT distal y proximal (desde el año 2013).

Esta actividad estuvo acompañada por sismicidad de baja frecuencia, principalmente LP, sismos tornillos y en menor cantidad sismos híbridos (Ramos *et al.*, 2016).

Estudios previos de deformación con datos GPS hasta el año 2015, mostraron inflación al norte del Volcán Sabancaya (Taipe *et al.*, 2015).

Estudios posteriores utilizando datos GPS hasta 2018 e interferometría SAR hasta 2019, estiman una fuente de presión ubicada bajo el Volcán Hualca Hualca (Cruz, 2019; MacQueen *et al.*, 2020; Boixart *et al.*, 2020).

En este trabajo, a diferencia de los anteriores, se ha implementado el análisis hipocentral de datos sísmicos para delinear la zona frágil - dúctil en la corteza, que limite la fuente de deformación resultante del modelamiento único de datos de deformación actualizados entre el año 2014 y mayo del año 2020.

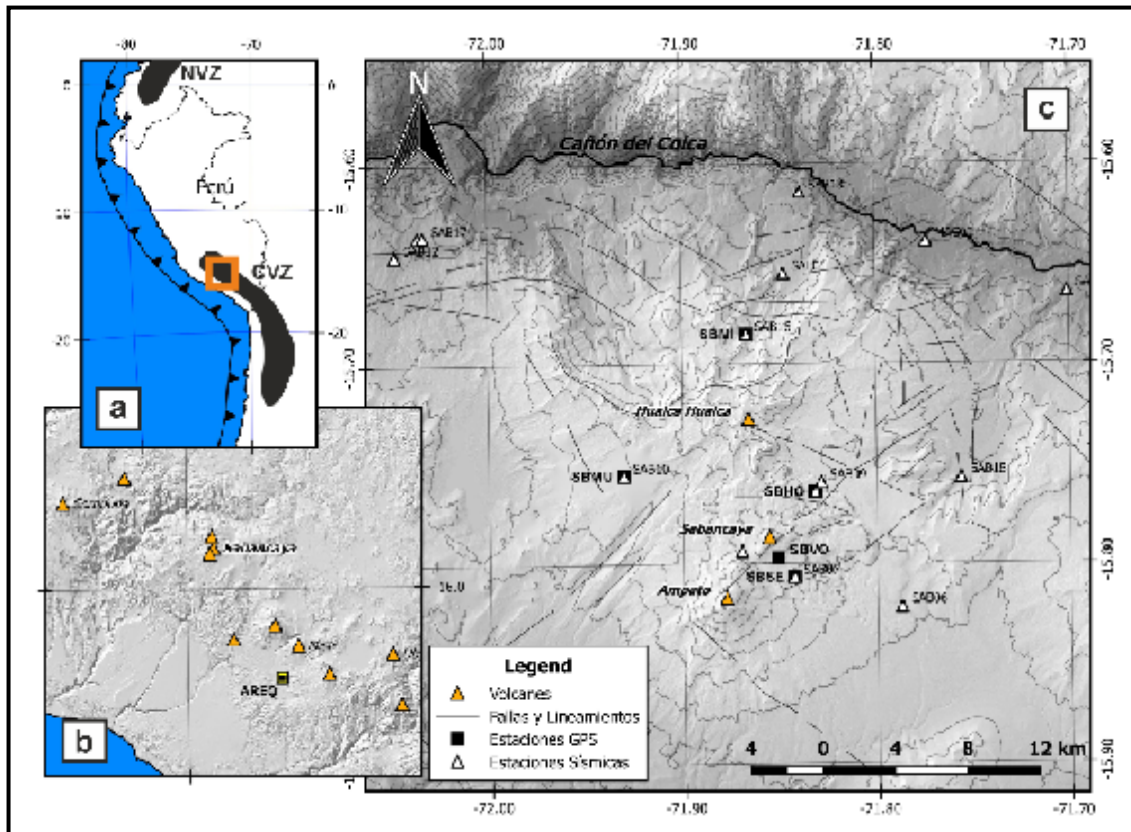
Adicionalmente, a partir de la relación espacial que existe entre la fuente de deformación, la sismicidad VT registrada y estudios previos de parámetro-b (Ortega *et al.*, 2016); presentamos un esquema con base en el modelo conceptual de White & McCausland (2019), ilustrando la cámara magmática involucrada en la erupción del volcán Sabancaya y las posibles estructuras que permiten su ascenso a la superficie.

Figura 1

(a) Mapa de ubicación del Volcán Sabancaya (cuadro naranja) en relación a la ZVC.

(b) Mapa de los volcanes activos en el sur del Perú (triángulos naranjas) y la estación GPS AREQ instalada por el IGS (cuadrado amarillo).

(c) Área de estudio donde se ubican los volcanes Sabancaya, Ampato y Hualca Hualca (triángulo naranjas), ubicación de las estaciones GPS y sísmicas (cuadrados negros y triángulos blancos). También se ilustra las principales fallas y lineamientos geológicos (líneas delgadas negras).

**METODOLOGÍA****Deformación con datos GPS e InSAR****Datos GPS**

Los datos GPS en el presente estudio, corresponden al periodo de registro entre octubre de 2014 hasta mayo de 2020 por una red de hasta cinco estaciones GPS de operación permanente (ver Figura 1c).

Esta red ha sido progresivamente instalada por el Observatorio Vulcanológico del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET)

en cooperación con el Programa de Asistencia de Desastres Volcánicos (VDAP por sus siglas en inglés) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

El procesamiento de los datos se realizó en el software GAMIT/GLOBK v.10.70 (Herring et al., 2010), utilizando una metodología similar a la descrita por Boixart *et al.* (2020).

Ante la ausencia de un marco de referencia local que elimine la influencia tectónica causada por

la subducción de placas en la zona de estudio, se ha utilizado el principio de relatividad Galileana, descrita por Galileo Galilei en 1638.

Las series temporales y velocidades modeladas se ajustaron a la estación IGS instalada en Arequipa (AREQ), ~75 km al sureste del Volcán Sabancaya (ver Figura 1b).

En este estudio, las velocidades se estimaron para todo el periodo registrado entre el año 2014 y 2020.

Datos de Radar de Apertura Sintética (SAR)

Los datos SAR provistos en el presente estudio, corresponden a una matriz de celdas con valores de velocidad de deformación en la zona de estudio.

El cálculo de esta matriz fue realizado por el Laboratorio de Teledetección del INGEMMET, utilizando el algoritmo *Small BAseline Subsets* (SBAS-InSAR), propuesto por Berardino *et al.* (2002).

El cálculo se realizó con 66 interferogramas de órbitas ascendentes tomadas entre febrero de 2015 y noviembre de 2019.

La técnica SBAS está basada en realizar una serie de combinaciones de pares de imágenes SAR que se caracterizan por tener la menor separación orbital posible (línea base espacial), con el fin de generar una serie de interferogramas con una decorrelación baja.

Sismicidad volcano-tectónica (VT)

La base de datos de sismicidad VT, asociados al fracturamiento interno, corresponde a los registros obtenidos entre julio de 2014 y diciembre de 2019 por alrededor de 20 sensores sísmicos ubicados alrededor del Volcán Sabancaya y Hualca Hualca (ver

Figura 1c), instalados desde 2013 por el OVI.

La sismicidad VT se caracteriza por poseer fases claras de ondas sísmicas P y S; para su análisis se empleó el programa *Seismic Analysis Code* (SAC, Goldstein & Snoke, 2005) que requiere la confección de códigos que permitan administrar la información sísmica a criterio del analista.

El modelo de velocidades utilizado (INGEMMET, 2019), se estimó a partir de sismicidad VT y sismos locales registrados entre 2014 y 2018 con el programa *VELEST* (Kissling *et al.*, 1995), programa que optimiza de manera iterativa el modelo geométrico en 1D (espesores de capa) de ondas P y S, resolviendo el problema de velocidades e hipocentros.

Para el cálculo de los parámetros hipocentrales (*i.e.* latitud, longitud y profundidad), se empleó el programa *Hypoellipse* (Lahr, 1999) utilizando el método Geiger (Geiger, 1912).

En complemento, se utilizó los resultados de Ortega *et al.* (2016) sobre el análisis de parámetro-b, también conocido como “valor b”, quienes usando la sismicidad VT registrada durante el año 2015, determinaron zonas de heterogeneidad alrededor del Volcán Sabancaya y Hualca Hualca.

Ellos aplicaron la Ley de Gutenberg-Richter (establecido por Ishimoto & Iida, 1939), una relación entre la distribución de la frecuencia y la magnitud, cuya estimación depende básicamente de la Magnitud de Completitud (Mc).

RESULTADOS

Deformación volcánica

La deformación horizontal ilustrada por los vectores de velocidad en la Figura 2a, muestran una deformación radial divergente con origen en el Volcán Hualca Hualca.

La deformación vertical ilustrada en las series temporales de la Figura 2b, tienen pendiente positiva, representando un proceso inflacionario desde 2014 con valores que varían entre 2.5 y 3.5 cm/año.

Cabe mencionar que la estación GPS SBVO fue desinstalada en 2015.

Hasta esta fecha, el comportamiento de la deformación registrada en este punto fue similar a la estación GPS SBSE, posteriormente instalada el mismo año.

La estación GPS SBMI registró el 30 de abril de 2017 el desplazamiento co-sísmico producido por dos sismos (3.8 y 3.4 MW), con un epicentro ubicado muy cerca de la estación. La Figura 2 ilustra las velocidades de deformación media anual estimadas de los datos GPS en la Tabla 1.

Figura 2

(a) Mapa general con los vectores de desplazamiento de la velocidad media anual calculada para las estaciones GPS (cuadrados negros) de la Tabla 1.

(b) Series temporales de la componente vertical de cada estación GPS. La línea punteada representa dos sismos ocurridos en abril de 2017 cerca de la estación GPS SBMI.

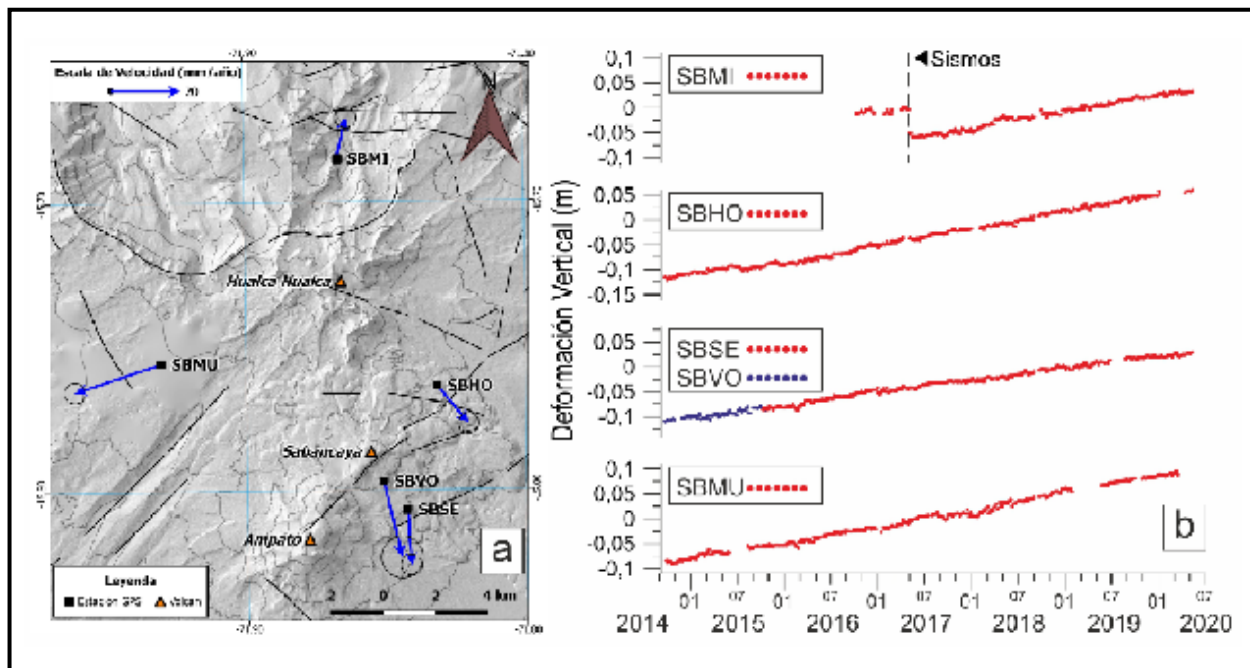


Tabla 1

Resumen de las velocidades de las estaciones GPS y sus respectivos errores calculados hasta mayo de 2020. Los valores están en milímetros por año (mm/año).

Estación (Longitud, Latitud)	SBVO (-71.85, -15.79)	SBMU (-71.93, -15.76)	SBHO (-71.84, -15.76)	SBSE (-71.85, -15.81)	SBMI (-71.87, -15.69)
Componente					
Este	5 ± 2	-25 ± 1	9 ± 1	1 ± 1	3 ± 1
Norte	-22 ± 3	-8 ± 1	-11 ± 1	-16 ± 1	12 ± 1
Vertical	13 ± 8	31 ± 2	35 ± 1	25 ± 1	26 ± 2

La inflación detectada con los datos GPS es consistente con el mapa de velocidades obtenido con SBAS-InSAR.

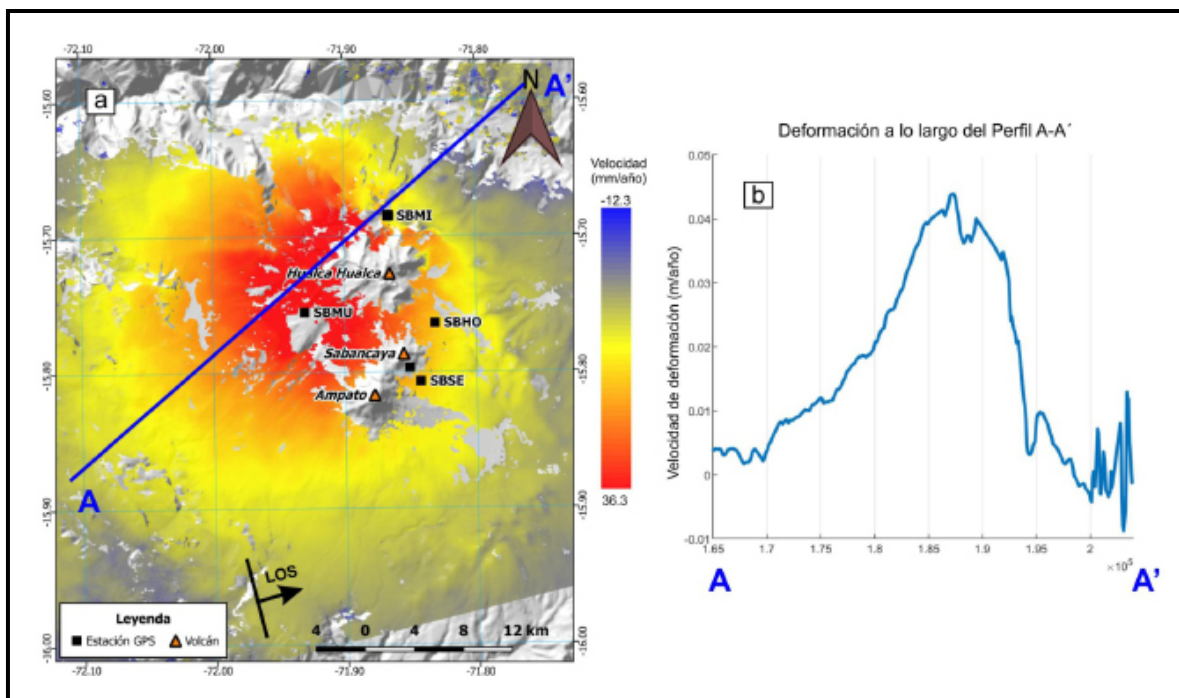
La Figura 3 ilustra el área de deformación existente alrededor del Volcán Sabancaya y centrado cerca en el Volcán Hualca Hualca, con un patrón de deformación circular y de

diámetro mayor a 35 km, similar a los resultados obtenidos por Boixart *et al.* (2020).

El patrón de deformación es consistente con la inflación detectada con los datos GPS, mostrando un valor máximo de ~4 cm/año (Figura 3b).

Figura 3

(a) Mapa general con la matriz de velocidades SBAS-InSAR en Línea de Vista (LOS) del satélite.
(b) Perfil de la velocidad de deformación a lo largo de A-A'.



Modelamiento de la fuente de presión

Para el modelamiento se utilizó el programa dModels (Battaglia *et al.*, 2013), programa que ayuda en la implementación de soluciones analíticas con cavidades presurizadas de geometrías simples que reproduzcan la deformación en superficie.

Tomando en cuenta las geometrías utilizadas por Cruz (2019) y Boixart *et al.* (2020), la Tabla 2 resume los resultados de las inversiones estimadas para los datos GPS e InSAR para

todo el periodo (2014 – 2020) utilizando la geometría de McTigue (1987).

La inversión en cada caso, infiere una fuente de presión profunda por debajo del volcán Hualca Hualca (aproximadamente 12.6 km bajo la superficie) representada por una cavidad de geometría matemáticamente esférica y con un cambio de volumen entre 27 y 34 Mm³/año.

La Figura 4 ilustra la ubicación de la fuente de presión modelada con los datos GPS e InSAR.

Tabla 2

Resumen de los parámetros obtenidos de la inversión de los datos GPS e InSAR.

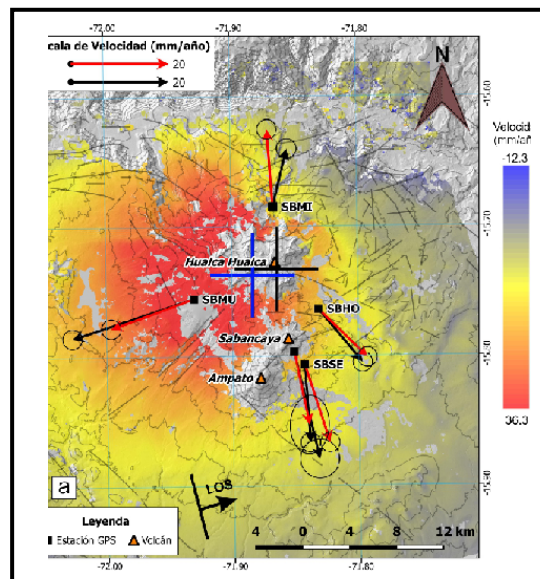
	χ^2_v	Este	Norte	Z (km)	R (km)	P	ΔV (x10 ⁶ m ³ /año)
GPS	14.6	193009	8258506	6.9 ± 1	1.5	0.003	27.11 ± 2
InSAR	1.79	190828	8258033	7.1 ± 1	1.5	0.003	34.10 ± 2

χ^2_v = chi cuadrado (error estadístico), Z=profundidad respecto al nivel medio del mar, R=radio de esfera, P=presión (adimensional), ΔV =Cambio de volumen

Figura 4

(a) Mapa general con la velocidad de deformación alrededor del Volcán Sabancaya y Hualca Hualca. Las cruces (azules y negras) indican la ubicación de las fuentes de presión modeladas con los datos InSAR y GPS respectivamente. Los vectores negros y rojos ilustran la velocidad de cada estación GPS (cuadrados negros) en mm/año registrada y modelada con sus respectivos errores (elipses de color negro).

(b) Ilustra la ubicación de ambos resultados en profundidad.



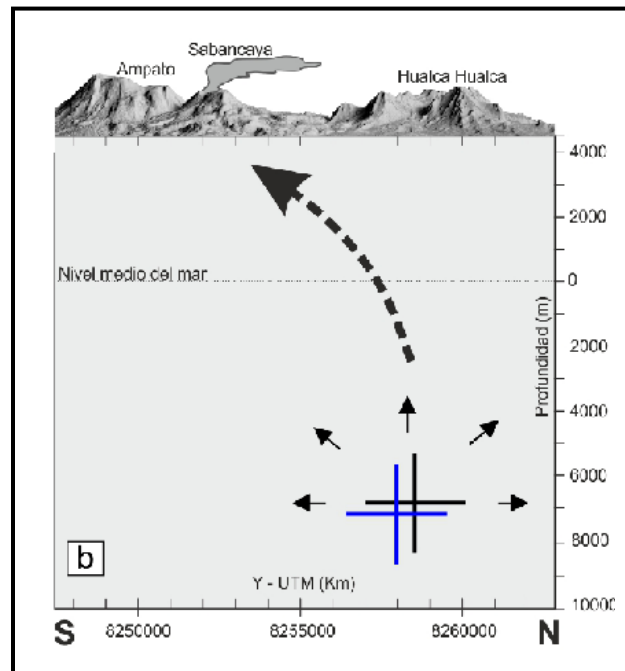
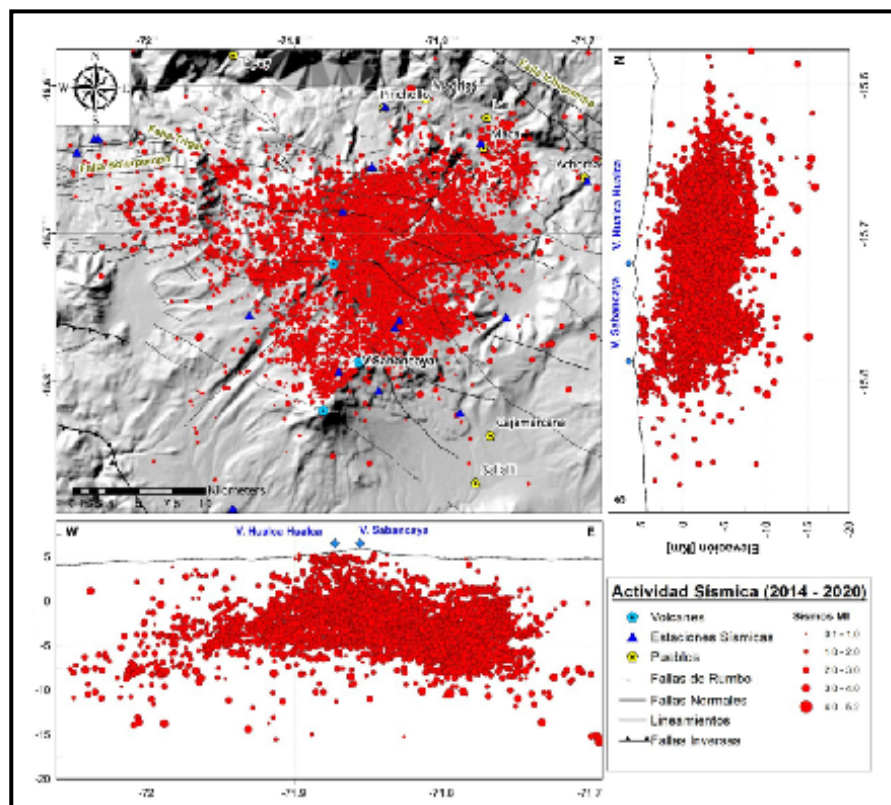


Figura 5

Mapa de localización espacial y perfiles sísmicos de la sísmicidad VT en los volcanes Sabancaya y Hualca Hualca entre los años 2014 y 2019.



Sismicidad volcano-tectónica (VT)

Localización epicentral e hipocentral

Entre julio de 2014 y diciembre de 2019 se registró una importante ocurrencia de sismicidad VT con un total de 104220 sismos, de los cuales se localizaron 6453.

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 M_L y errores menores a 2.6 km. Los perfiles sísmicos muestran una profundidad promedio de ~ 7 km y menores de 20 km (Figura 5).

Cabe resaltar que en ocasiones este tipo de actividad se registró a modo de enjambres sísmicos, ocurriendo en áreas específicas durante tiempos relativamente cortos y no como *mainshock* - *aftershock*.

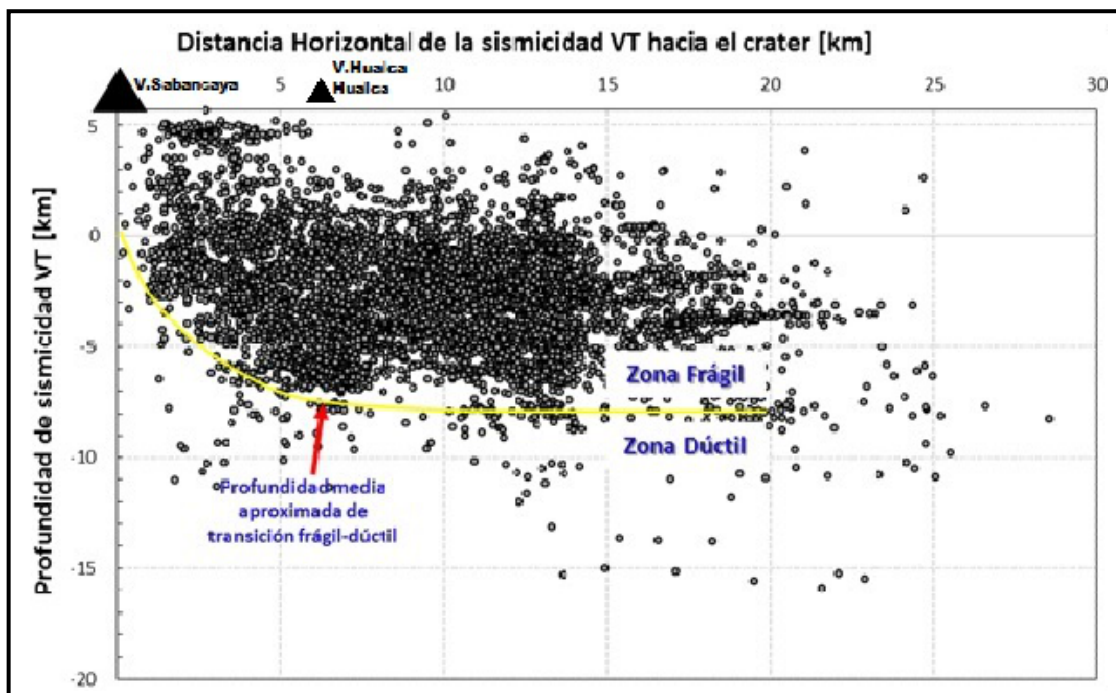
La Figura 6 muestra la distribución de la sismicidad VT respecto al cráter del Volcán Sabancaya, así como la profundidad de tales eventos, mediante el cual se puede inferir la posible distribución en profundidad de la zona de transición entre la corteza frágil - dúctil.

De esta relación se infiere que la sismicidad VT se origina cerca de la base de la corteza frágil (línea amarilla en la Figura 6), la cual se sabe que es delgada debajo de los volcanes, pero descende a aproximadamente 15 o 20 km de profundidad en otros arcos magmáticos (Ito, 1993).

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, calculada a partir de la sismicidad VT registrada entre los años 2014 y 2019.

Figura 6

Diagrama de la distribución de la sismicidad VT registrada entre los años 2014 y 2019 respecto a la distancia horizontal hacia el cráter del Volcán Sabancaya (km) y su profundidad. La línea amarilla representa el límite entre la zona de transición frágil – dúctil de la corteza.



DISCUSIÓN

En el presente estudio, la ubicación estimada de la fuente de presión ubica su centro de deformación 6 km al norte del Volcán Sabancaya, aproximadamente por debajo del Volcán Hualca Hualca, siendo consistente con los resultados publicados por MacQueen *et al.* (2020), Boixart *et al.* (2020) y Pritchard & Simons (2004).

Aunque la mayoría de centros de deformación asociadas a erupciones se ubican dentro de 5 km alrededor de un volcán activo, el 24% de centros de deformación se ubican distantes de este radio (Ebmeier *et al.*, 2018).

Nuestro estudio se suma a otros realizados en diferentes estratovolcanes donde se han presentado fuentes de deformación distantes (Delgado *et al.*, 2017), dando nuevas evidencias del dominio de extensos magmatismos en volcanes pequeños y jóvenes.

Los volcanes con centros de deformación distante han sido interpretados como complejos sistemas de alimentación magmática lateralmente extensos (Cashman *et al.*, 2017) y con características de poder ser fuentes magmáticas de no solo un volcán activo.

MacQueen *et al.* (2020) sugiere un extenso sistema vertical y lateral de estructuras de tipo dique y sill por debajo de los Volcanes Hualca Hualca, Sabancaya y Ampato.

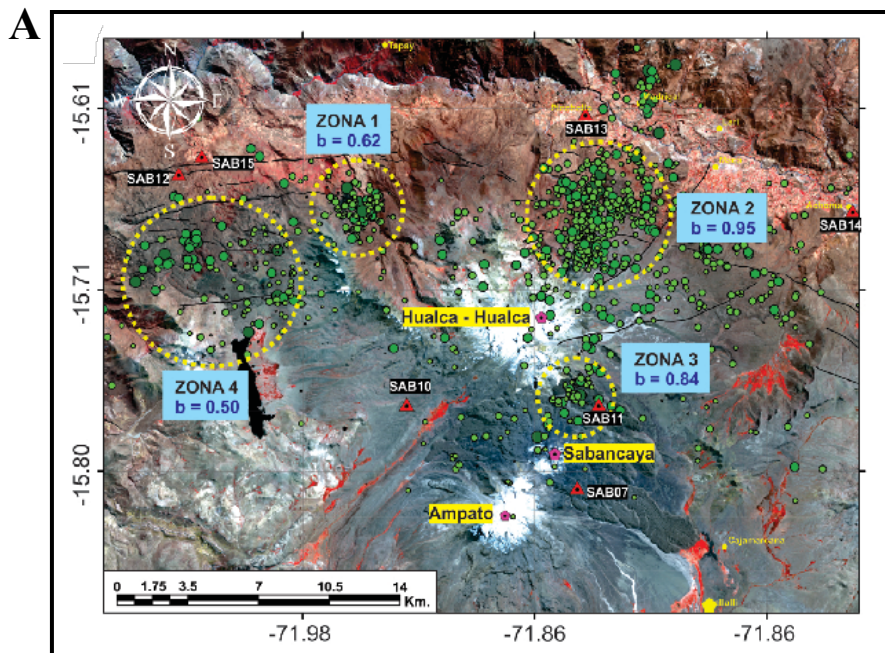
Los resultados del análisis de la sismicidad VT realizado por Ortega *et al.* (2016) a través de la estimación preliminar del parámetro-b para cuatro zonas con intensa sismicidad VT en la zona de estudio (Figura 7a), muestran dos zonas anómalas: la primera ubicada al noreste del Volcán Hualca Hualca (Zona 2, $b=0.95$) y la segunda al noreste del Volcán Sabancaya (Zona 3, $b=0.84$).

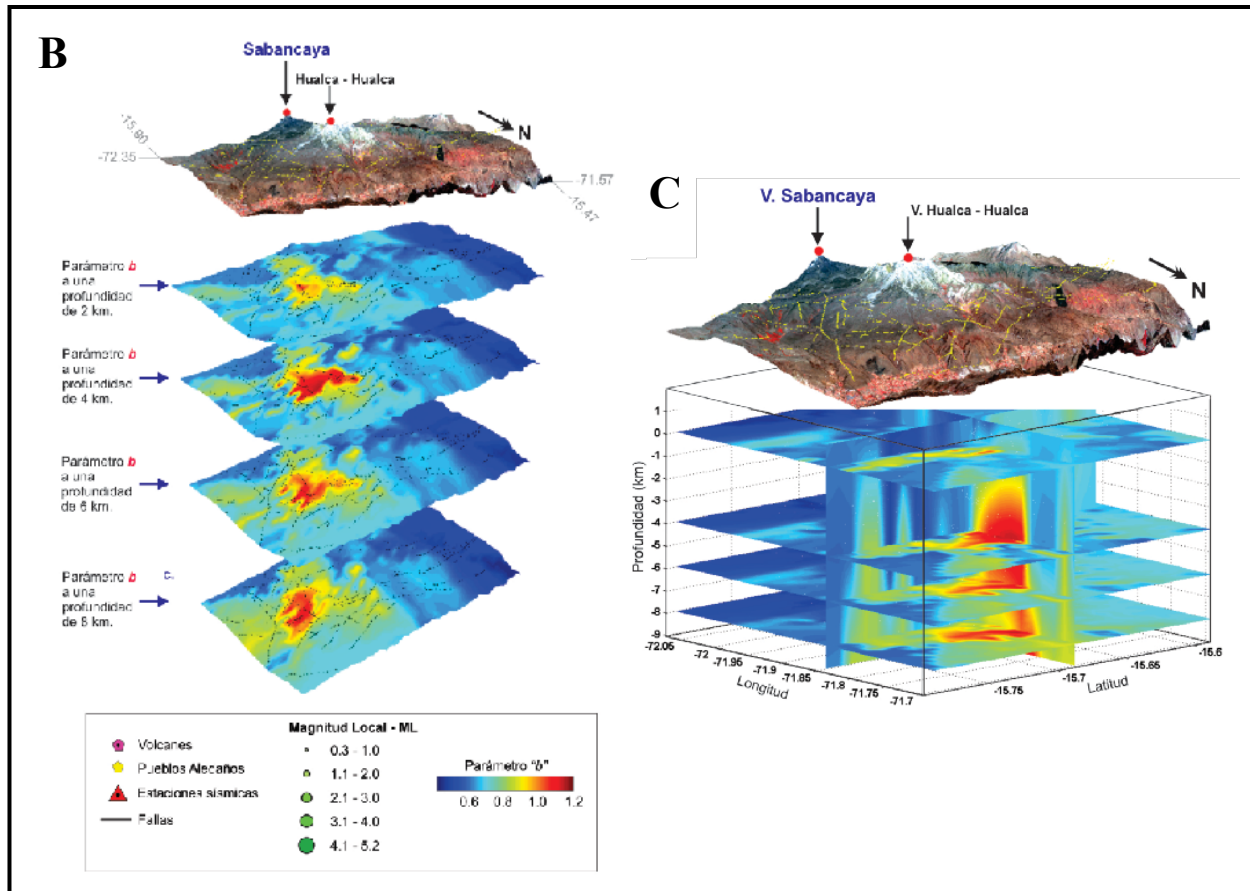
Figura 7

(a) Estimación del parámetro-b para cada una de las zonas (círculos amarillos) donde se registró intensa actividad sísmica VT en 2015.

(b) Variación del parámetro-b respecto a diferentes profundidades (2, 4, 6 y 8 km).

(c) Modelo pseudo-3D del parámetro-b (Ortega *et al.*, 2016).





Los perfiles y mapas seudo-3D del parámetro-*b* (Figura 7b y 7c respectivamente) muestran que la anomalía identificada en la Zona 3, empieza a observarse desde ~1 km de profundidad y en la Zona 2 entre ~3km hasta ~8km, intensificándose entre los 4 y 5km, presentando el mayor valor de *b* ($b=0.95$).

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, las cuales estarían compuestas por zonas de alto fracturamiento como estructuras de tipo *sill* y dique, por donde asumimos que el magma migraría hacia la superficie.

Desde el año 2013 hasta antes del inicio del actual proceso eruptivo del Volcán Sabancaya en noviembre de 2016, se registraron diversos periodos de incremento en la sismicidad VT distal

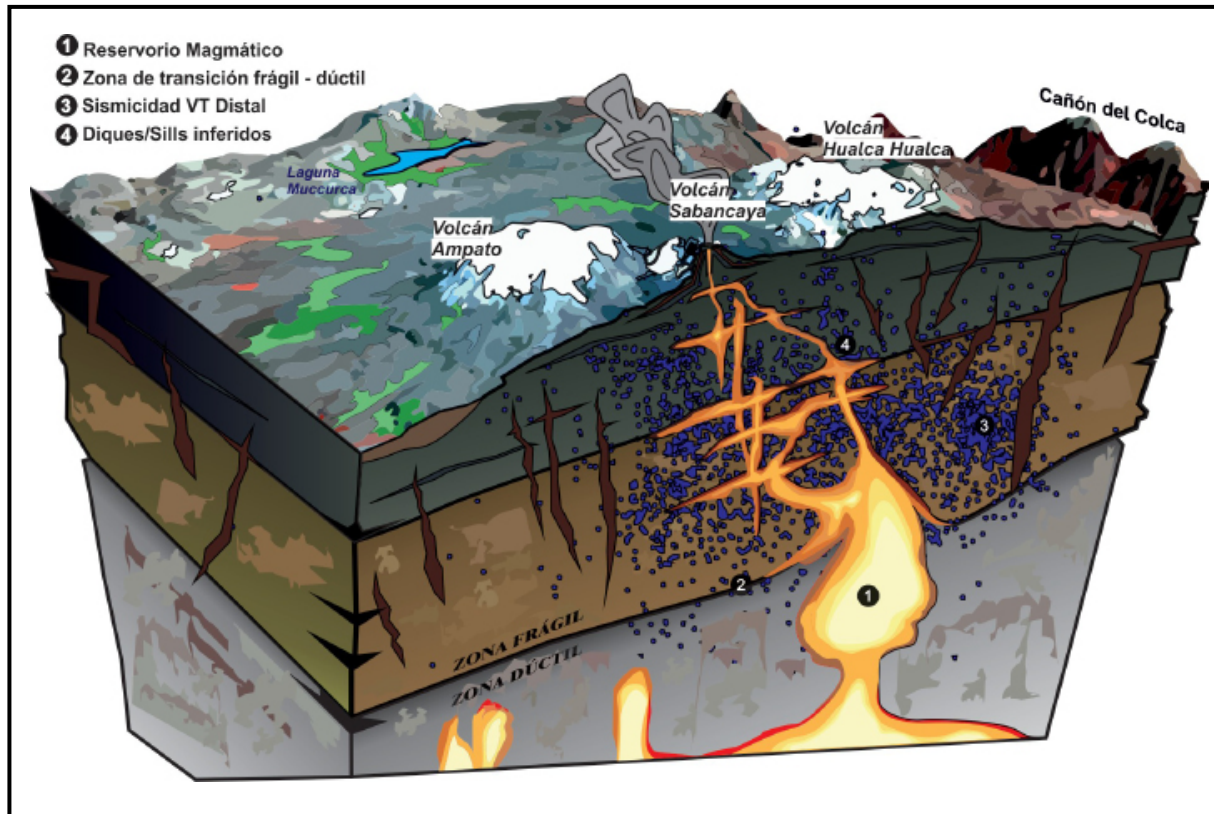
y proximal, la cual estuvo acompañada de un proceso de inflación, que de acuerdo al modelo geológico presentado por White & McCausland (2019), indicarían procesos de intrusión magmática.

Inferimos que la sismicidad VT ocurriría por la sobrepresurización de los acuíferos que se verían cruzados por los sistemas de fallas y lineamientos tectónicamente activos presentes en esta zona (Benavente *et al.*, 2017).

Aplicando el modelo geológico de White & McCausland (2019), se ilustra un esquema con la ubicación de la fuente de presión que genera la deformación superficial, la zona de transición entre la corteza frágil – dúctil, la zona de ocurrencia de la sismicidad VT y las estructuras de tipo *sill* y dique inferidas como mecanismo de transporte del magma hacia la superficie (Figura 8).

Figura 8

Esquema interpretativo y adecuado a la sismicidad VT y el reservorio magmático que causa la deformación en el Volcán Sabancaya y Hualca Hualca. Se ilustra: (1) reservorio magmático, (2) zona de transición frágil-dúctil de la corteza, (3) sismicidad VT y (4) sills y diques inferidos.



CONCLUSIONES

La deformación modelada en este estudio con datos GPS e InSAR entre los años 2014 y 2020, sugiere una fuente de presión ubicada aproximadamente a 12.6 km de profundidad (desde la superficie) a 6km al norte del Volcán Sabancaya, cuyo cambio de volumen produce un área de inflación radialmente simétrica entre 3 y 4.5 cm/año.

Sugerimos que el incremento de presión por esta fuente, la sobrepresurización de los acuíferos y la presencia de los sistemas de fallas tectónicamente activos en la zona, serían una de las causas de la ocurrencia de la sismicidad VT registrada entre 1 y 22km al noreste, norte, noroeste y oeste del Volcán Sabancaya.

La sismicidad VT estima que la zona de transición entre la corteza frágil y dúctil, se estabiliza hasta aproximadamente 7 km por debajo del nivel del mar.

Ello valida los resultados del modelamiento de los datos de deformación con GPS e InSAR.

En base a la evolución espacial en profundidad de la sismicidad VT y las zonas de heterogeneidad más superficiales de parámetro-b identificadas por Ortega *et al.* (2016), inferimos que el magma acumulado en el reservorio magmático bajo el Volcán Hualca Hualca, ascendería por medio de zonas de alto fracturamiento, como estructuras de tipo dique y sill.

Nuestros resultados son consistentes con el modelo geológico propuesto por White & McCausland (2019).

En base al mismo, presentamos un esquema interpretativo ubicando el reservorio magmático involucrado en la erupción del Volcán Sabancaya, la sismicidad VT registrada, el límite entre la corteza frágil y dúctil y las posibles estructuras que permiten el ascenso del magma hacia la superficie.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), quienes a través de su Observatorio Vulcanológico (OVI) y la Dirección de Laboratorios permitieron el uso de la información sísmica, geodésica y satelital analizada en el presente estudio.

Este artículo conforma uno de los productos de la Actividad 2: Monitoreo de volcanes activos en el sur del Perú, de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (POI 2020).

REFERENCIAS

Altamimi, Z., Métivier, L. & Collilieux, X., 2012. ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B7). <https://doi.org/10.1029/2011JB008930>

Antayhua, Y., Masías, P. & Ramos, D., 2013. Monitoreo de los volcanes Ticsani, Sabancaya y Huaynaputin, periodo 2006 – 2012. *Boletín INGEMMET Serie C: Geología Ambiental y Riesgo Geológico*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/295>

Battaglia, M., Cervelli, P. & Murray, J. R., 2013. dMODELS: A MATLAB software package for modeling crustal deformation near active faults and volcanic centers. *Journal of volcanology and geothermal research*. 254, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.12.018>

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., 1mapa. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1223>

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. & Sansosti, E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE TGARS*. 40 (11), 2375–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>

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>

- Delgado, F., Pritchard, M. E., Ebmeier, S., González, P. & Lara, L., 2017. Recent unrest (2002–2015) imaged by space geodesy at the highest risk Chilean volcanoes: Villarrica, Llaima, and Calbuco (Southern Andes). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 344, 270-288. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.020>
- Ebmeier, S.K., Andrews, B.J., Araya, M.C., Arnold, D. W. D, Biggs, J., Cooper, C., Cottrell, E., Furtney, M., Hickey, J., Jay, J., Lloyd, R., Parker, A. L., Pritchard, M. E., Robertson, E., Venzke, E. & Williamson, J. L., 2018. Synthesis of global satellite observations of magmatic and volcanic deformation: implications for volcano monitoring & the lateral extent of magmatic domains. *J Appl. Volcanol.* 7, 2. <https://doi.org/10.1186/s13617-018-0071-3>
- Geiger, L., 1912. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only (translated from Geiger's 1910 German article), *Bull. St. Louis University*, 8:56- 71 p.
- Goldstein, P & Snoke, A., 2005. SAC Availability for the IRIS Community. Incorporated Research Institutions for Seismology Newsletter, 7(UCRL-JRNL-211140).
- Herring, T., King, R. W. & McCluskey, S., 2010. M. Introduction to GAMIT/GLOBK Release 10.4. Massachusetts Institute of Technology Technical Report, Cambridge.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2019. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico. Informe técnico anual: vigilancia del volcán Sabancaya, periodo 2019. Informe técnico N° A6998. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2578>
- Ishimoto, M. & Iida, K., 1939. Observations of earthquakes registered with the microseismograph constructed recently. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 17, pp. 443 – 478
- Ito, K., 1993. Cutoff depth of seismicity and large earthquakes near active volcanoes in Japan. *Tectonophysics*, 217(1), 11-21.
- Kissling, E., Kradolfer, U. & Maurer, H., 1995. VELEST user's guide-short introduction. Institute of Geophysics and Swiss Seismological Service, ETH-Hoenggerberg CH-8093 Zurich, Switzerland
- Lahr, J., 1999. Quick-start manual for running. U. S. GEOLOGICAL SURVEY
- MacQueen, P., Delgado, F., Reath, K., Pritchard, M. E., Bagnardi, M., Milillo, P., Lundgren, P., Macedo, O., Aguilar, V., Ortega, M., Anccasi, 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>
- McTigue, D. F., 1987. Elastic stress and deformation near a finite spherical magma body: resolution of the point source paradox. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B12), 12931-12940. <https://doi.org/10.1029/JB092iB12p12931>
- Ortega, M., Antayhua, Y. & Taipe, E., 2016. Caracterización del parámetro “b” del complejo volcánico Ampato – Sabancaya – Hualca hualca (Periodo 2015). En: 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>

- Pritchard, M. E. & Simons, M., 2004. An InSAR-based survey of volcanic deformation in the central Andes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 5, 2. <https://doi.org/10.1029/2003GC000610>
- Ramos, D., Masías, P., Apaza, F., Lazarte, I., Taipe, E., Miranda, R., Ortega, M., Anccasi, R., Ccallata, B., Calderón, J. & Rivera, M., 2016. Los inicios de la actividad eruptiva 2016 del volcán Sabancaya. Arequipa, INGEMMET. Informe técnico N° A6735. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/994>
- Samaniego, P., Rivera, M., Mariño, J., Guillou, H., Liorzou, C., Zerathe, S., Delgado, R., Valderrama, P. & Scao, V., 2016. The eruptive chronology of the Ampato–Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 323, 110-128. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.04.038>
- Taipe, E.; Miranda, R. & Diaz, J., 2016. Análisis de deformación del volcán Sabancaya con datos GPS, periodo 2015. En: Congreso Peruano de Geología, 18, Lima, PE, 16-19 Octubre 2016, Resúmenes. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 5 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1624>
- White R. & McCausland, W., 2019. A process – based model of pre – eruption seismicity patterns and its use for eruption forecasting at dormant stratovolcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 382, 267 – 297. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.03.004>