

FORMACIÓN DE UN DOMO DE LAVA EN EL VOLCÁN SABANCAYA DURANTE EL AÑO 2019: EVIDENCIAS DE MONITOREO MULTIPARAMÉTRICO

FORMATION OF A LAVA DOME AT SABANCAYA VOLCANO DURING THE YEAR 2019: EVIDENCE OF MULTIPARAMETRIC MONITORING

Edu Taipe¹  Rigoberto Aguilar¹  Yanet Antayhua¹  Mayra Ortega¹ 

Luis Cruz¹  Fredy Choquehuayta¹ 

¹Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

Resumen

El volcán Sabancaya ubicado en el sur del Perú entró en erupción el 19 noviembre de 2016, después de 18 años de inactividad. Esta erupción es de tipo vulcaniana, con IEV=1-2. Una de las características más resaltantes de este proceso es la formación de un domo de lava en el cráter, la cual fue registrada por diferentes parámetros de monitoreo. El proceso se inicia el 5 de marzo con la deformación en una fuente de sobrepresurización superficial, y se propone que esto es debido a la desgasificación y migración de un cuerpo magmático. La desgasificación se registra en superficie desde el 27 de marzo con un incremento de flujo de SO₂. Durante esta etapa, además, se registran dos sismos LP muy energéticos (105 MJ), que confirmarían el incremento de presión por desgasificación y migración de magma. Consecuentemente, el 27 de abril se incrementa la altura de las columnas eruptivas de 1500 a 3000 m sobre el cráter. Seguidamente, se produce la ruptura de estructuras internas por migración del magma, y se registran enjambres de sismos VT y VTD con energías muy altas (hasta 294 MJ en un día); y la migración de los fluidos por estas fracturas se registra mediante el incremento de energía en los sismos LP. Se propone que la extrusión del domo de lava se produce desde el 6 de setiembre, ya que los sismos de tipo LP son más energéticos, por la desgasificación del magma en ascenso y la ocurrencia un nuevo enjambre de sismicidad VT más superficial, lo cual empuja el magma a la superficie. Finalmente, entre el 26 de noviembre y 3 de diciembre se produce un último aporte magmático que culmina con la formación del domo en el cráter del volcán. Las características sísmicas cambian completamente. La cantidad diaria de las explosiones y LP disminuyen mientras que los sismos TRE e HIB aumentan drásticamente. Esto explicaría la existencia de un conducto abierto y un domo permeable. Dado que no hay deformación superficial o eventos sísmicos asociados a movimiento de volúmenes importantes de fluidos, se propone que es el final de este proceso de extrusión.

Palabras clave: *Volcán Sabancaya, Domo de lava, Monitoreo multiparamétrico, Anomalías térmicas.*

Abstract

The Sabancaya Volcano (southern Peru), began a new eruptive sequence in November 2016, after 18 years of dormancy. Its eruptive activity is characterized by constant, moderate, Vulcanian explosive activity (VEI = 1-2). One of the most noteworthy characteristics of this process is the growth of a lava dome in the crater, which was detected by multiparametric volcanic monitoring. The process started on March 5 with detection of deformation probably due to over-pressurization of a shallow source suggesting degassing and magma migration. Degassing is recorded since March 27 with an increase in the flow of SO₂. Additionally, an increase in pressure due to degassing and magma migration are suggested during this stage by high energy (105 MJ) LPs. Consequently, on April 27 the height of volcanic plumes increases from 1500 to 3000 meters above the crater. This is followed by the rupture of internal structures due to magma migration, triggering swarms of VT and VTD earthquakes with very high seismic energies (up to 294 MJ in one day). The migration of fluids through these fractures resulted in an increase in energy in LP earthquakes. Subsequently, we propose that the extrusion of the lava dome started on September 6 as suggested by more energetic LP earthquakes caused by the degassing of ascending magma and the occurrence of a new swarm of shallow VT seismicity triggered as the magma pushed its way to the surface. Finally, between November 26 and December 3 a last pulse of magma contributed with the growth of the dome. The seismic characteristics change completely with the daily number of explosions and LPs decreasing and a dramatic increase in TRE and HIB earthquakes, which suggests the existence of a permeable dome. Since there is no surface deformation or seismic events associated with the movement of large volumes of fluids, we propose that it is the end of this process.

Keywords: *Sabancaya Volcano, Lava dome, Multiparametric monitoring, Thermal anomalies.*



INTRODUCCIÓN

Las erupciones volcánicas involucran en muchos casos la formación de domos de lava. Este tipo de estructuras volcánicas corresponden a extrusiones de magma viscoso, que debido a sus características reológicas se acumula en el cráter o ventos del volcán (Hale, 2008). La morfología de un domo, así como su desarrollo endógeno o exógeno dependen de la tasa de alimentación magmática y de la reología del magma (Heap et al. 2016).

Los domos de lava representan la parte superior del conducto volcánico y por lo tanto su evolución temporal nos puede indicar sobre la evolución futura de una erupción. En efecto, un domo puede crecer de forma pasiva y poco explosiva durante largos períodos de tiempo; pero también pueden ser destruido por actividad explosiva y generar columnas de erupción y flujos piroclásticos por el colapso del mismo (Sparks, 1997; Zorn et al. 2020). Es por tal motivo que es muy importante su estudio y monitoreo.

El volcán Sabancaya, está ubicado en el sur del Perú, a 75 km al NO de la ciudad de Arequipa (figura 1-A), En base a los estudios realizados por Delgado (2012), Rivera et al. (2015) y Samaniego et al (2016) se conoce que el Sabancaya se ha desarrollado durante los últimos 10 mil años. En este periodo ha presentado tres tipos de erupciones: (1) erupciones efusivas que han emplazado flujos de lava de composición andesítica y dacítica, algunas de estas lavas corresponden a erupciones ocurridas hace 6.3 ± 0.31 ka. (2) Erupciones que emplazaron domos de composición andesítica y dacítica, que forman un edificio ubicado a 0.5 km al suroeste del cráter actual. (3) Erupciones explosivas de

baja a moderada magnitud $IEV=1-2$ (Índice de Explosividad Volcánica; Newhall & Self, 1982). Según datos históricos las últimas erupciones de este tipo ocurrieron los años 1750-1784 y 1987-1998 (Rivera et al, 2015).

El 6 de noviembre del 2016, el Sabancaya inició un nuevo proceso eruptivo de tipo vulcaniano, el cual se caracterizó por la emisión de ceniza y fragmentos o bloques balísticos. El material juvenil emitido presenta una composición andesítica a dacítica (Manrique et al., 2018).

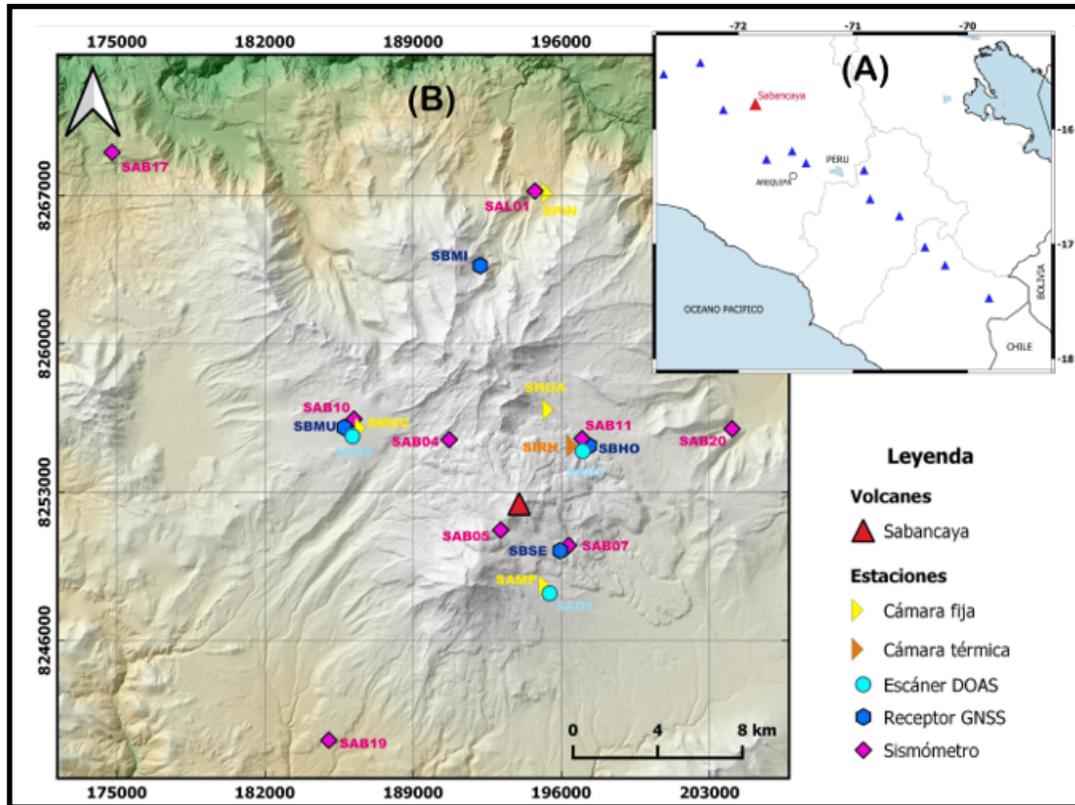
De acuerdo a imágenes satelitales (Planet Scope, LandSat y Sentinel 2) desde junio del 2017 se podía observar, en el fondo del cráter, la presencia de un domo de lava con un área aproximada de 15000 m², el cual se mantuvo con un lento crecimiento durante el 2017 y 2018. Para marzo del 2019, el domo tenía un área aproximada de 20000 m², a partir de esa fecha se pudo observar un rápido crecimiento hasta alcanzar un área máxima de 50000 m² para finales del 2019. Durante este periodo de formación, el monitoreo multidisciplinario mostró patrones de comportamiento asociados con este crecimiento acelerado del domo de lava.

Dada la importancia de este fenómeno, especialmente en términos de peligro volcánico (flujos piroclásticos por colapso de domo), el presente trabajo está orientado a mostrar las características de este proceso, evidenciados mediante diferentes métodos de monitoreo que incluyen sensores remotos, actividad sísmica, deformación volcánica, cámaras de videovigilancia y mediciones del flujo de SO₂.

Figura 1

(A) Ubicación del volcán Sabancaya en el sur del Perú. Los triángulos azules representan los volcanes activos y potencialmente activos del arco peruano

(B) Red de monitoreo volcánico multidisciplinario del volcán Sabancaya



DATOS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

El volcán Sabancaya es monitoreado por una red de estaciones multiparamétricas administradas por el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI). En el presente trabajo se utilizó información proveniente de 12 estaciones (Figura 1-B), las cuales están equipadas con sismómetros; receptores GNSS; escáneres DOAS, y cámaras fijas (ópticas y térmica). El periodo de análisis corresponde a todo el año 2019.

Deformación volcánica

La red geodésica está conformada por 5 receptores GNSS, desplegados alrededor

del volcán Sabancaya cubriendo el edificio volcánico y la región circundante (Figura 1-B). Esta red tiene por objetivo monitorear la deformación en el edificio volcánico y la fuente de deformación volcánica profunda identificada en estudios anteriores (Pritchard & Simons, 2004; Cruz, 2019; Boixart et al. 2020). La información se procesa con el software GAMIT/GLOBK (Herring et al. 2010a; 2010b) con el cual, se obtienen las series temporales de la posición absoluta y la distancia relativa entre pares de estaciones (líneas de base).

Desde que se instaló la red geodésica, en el año 2014, las series temporales muestran un proceso

de inflación con velocidad casi constante de 3.4 ± 3 cm/año, generado por la sobrepresurización en una fuente esférica profunda (12-15 km) ubicada por debajo del volcán Hualca Hualca (Pritchard & Simons 2002; Boixart et al. 2020). En la figura 2-A, se muestra la serie temporal de la componente vertical para el año 2019 en la estación SBMI, se observa la tendencia casi lineal que representa esta inflación constante.

Con la finalidad de identificar patrones de deformación más cercanas al edificio volcánico, se calcularon las series temporales de línea de base para SBSE-SBHO (Figura 2-A). En ésta figura se aprecian varios periodos de inflación y deflación asociados a una fuente de deformación más superficial: entre el 5 y el 18 de marzo y entre el 5 y 10 de abril, se registra en cada caso 4 ± 1 mm de inflación; entre el 9 de mayo y 17 junio, se pudo estimar una inflación de 8 ± 1 mm; entre el 3 y 14 de setiembre se registra otra deformación de 5 ± 1 mm; entre el 30 setiembre y 4 de octubre se presenta una deflación de 3 ± 1 mm; finalmente, entre el 12 y 24 de noviembre se registra una pequeña deflación de 2 ± 1 mm.

Este proceso de deformación fue seguido de un levantamiento de la misma magnitud hasta el 9 de diciembre, fecha a partir de la cual la tendencia de esta línea de base es horizontal.

Monitoreo Sísmico

La red sísmica del Sabancaya está compuesta de 10 sismómetros de banda ancha de operación continua, distribuidos alrededor de las principales fuentes sismogénicas del volcán (Figura 1-B). En este trabajo, usamos esta información para caracterizar la sismicidad asociada a la formación del domo de lava, basado en los sistemas de clasificación de señales sismo-volcánicas de los trabajos de

Minakami (1974), Zobin (2012) y McNutt y Roman (2015).

Durante el año 2019, se identificaron 6 cambios importantes en la actividad sísmica:

- i. El 18 de marzo, se registró un ligero incremento en la energía de los sismos largo periodo (LP), los cuales están asociados a la dinámica de los fluidos magmáticos. Este cambio estuvo acompañado de un incremento importante en la cantidad y energía de las explosiones.
- ii. El 12 de abril, se registra hasta 100 sismos LP, acumulando 105 MJ de energía sísmica ese día, la máxima energía registrada para este tipo de sismos en el Sabancaya; una semana después, el promedio de la energía y tasa de ocurrencia de estos sismos se incrementa (Figura 2-B) junto con la actividad explosiva la cual se hace más frecuente y energética, llegando a un máximo de 55 explosiones por día (Figura 2-C).
- iii. El 21 de mayo se inició un enjambre de sismicidad de tipo volcano-tectónico (VT) y volcano-tectónico distal (VTD). Estos sismos están asociados a fracturamiento de estructuras internas. En este mismo periodo se registró el sismo más energético (294 MJ) del proceso eruptivo (Figura 2-D). Este enjambre se prolongó hasta el 12 de junio.
- iv. El 11 de agosto nuevamente se presenta otro enjambre VT/VTD, que duró hasta el 5 de octubre, con una sismicidad predominantemente de tipo VT (entre el 26 de agosto y 6 de setiembre), la cual se ubicó en las inmediaciones del edificio

volcánico. Posteriormente, la sismicidad VT descendió de un promedio de 150 a 20 eventos por día y se mantuvo así durante el resto del año. Paralelamente en este periodo, se registró un ligero incremento en la ocurrencia de explosiones y la aparición esporádica de sismos de tipo híbrido (HIB), los cuales están asociados a la migración de magma.

- v. El 4 de octubre, luego del enjambre de sismos VT previamente descrito, se registraron sismos de tipo HIB muy energéticos, se incrementó la sismicidad de tipo LP y las explosiones fueron más continuas y energéticas.
- vi. Finalmente, desde el 2 de diciembre se observó que la sismicidad por explosiones y los sismos LP se redujeron tanto en número como en energía (Figuras 2-B y 2-C); mientras que la actividad de tipo HIB aumentó drásticamente (Figura 2-H).

Química de gases

El monitoreo geoquímico consiste en determinar los flujos diarios de SO₂ (Dióxido de Azufre), para ello se cuenta con una red de 3 escáneres DOAS (Figura 1-B). El estudio de este gas permite, en correlación con otras técnicas, caracterizar las condiciones de desgasificación de los cuerpos magmáticos y su relación con la actividad explosiva (Wallace, 2001; Mousallam et al., 2017). Los valores medidos se expresan en unidades de toneladas por día (t/d).

Los resultados para el año 2019 se presentan en la Figura 2-E, en la cual se muestran los flujos de SO₂ medidos (barras celestes) y los promedios diarios (línea azul). Se han identificado periodos

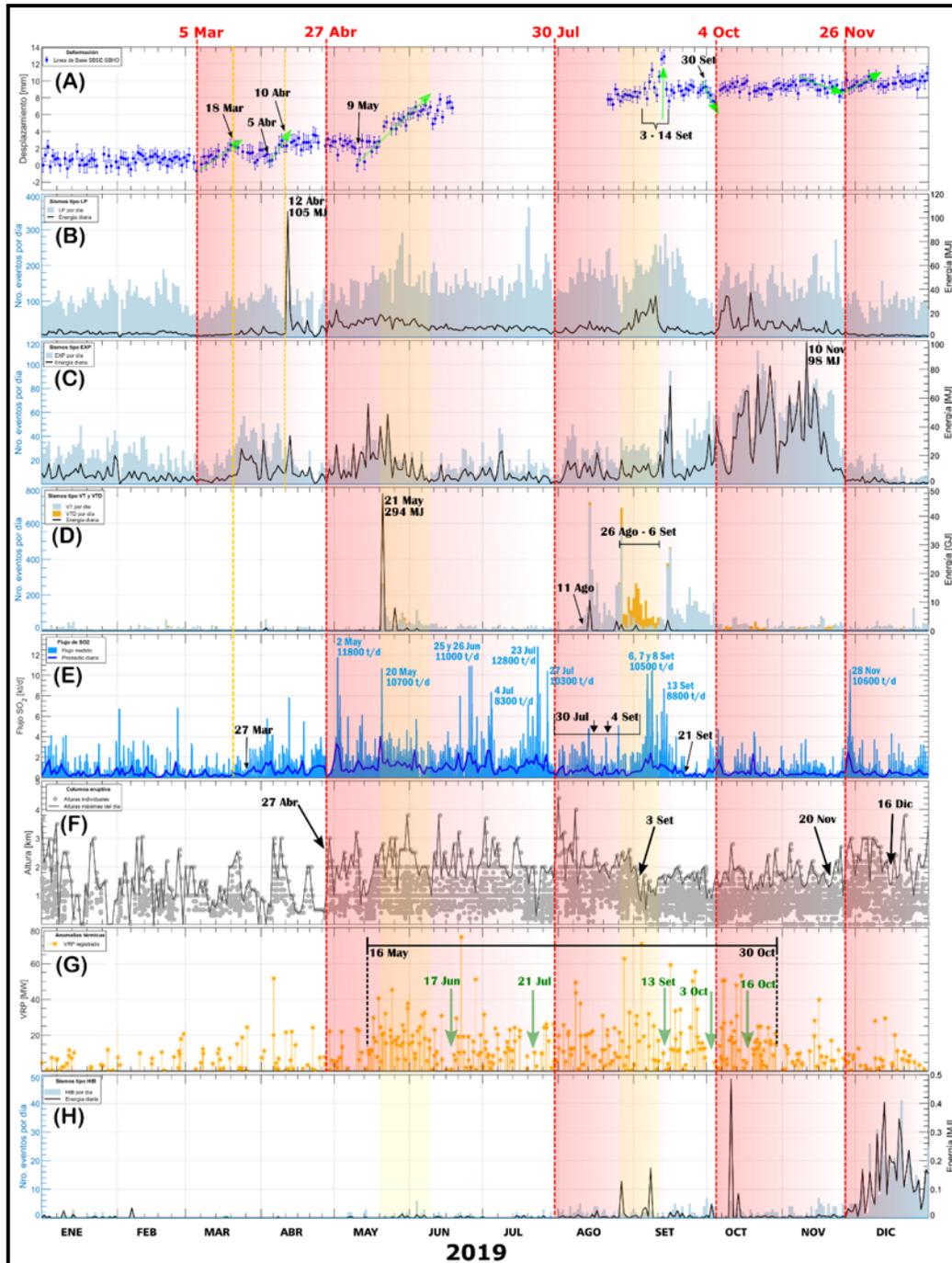
de incremento y descenso del fluo de gases, así tenemos que antes del 27 de marzo los valores del flujo de SO₂ promedio fueron de 500 t/d; luego de esa fecha el fluo de gases se incrementó hasta alcanzar las 1000 t/d. Desde el 30 de abril, los valores promedios fueron de 1500 t/d; el 30 de julio desciende a un promedio de 600 t/d; desde el 4 de setiembre, se registraron pulsos que alcanzan un promedio máximo de 2200 t/d: Después del 21 setiembre, el flujo de gases retornó a un promedio de 500 t/d, el cual se mantiene hasta el final del 2019 con tres pulsos cortos de hasta 2400 t/d (6 de octubre, 19 de octubre y 28 de noviembre). En relación a los flujos máximos medidos, en la Figura 2-E, se han marcado 9 fechas en las cuales el flujo de SO₂ alcanzó valores máximos, siendo el mayor de 12800 t/d, registrado el 23 de julio.

Cámaras Fijas

La red de monitoreo visual del Sabancaya incluye 5 cámaras fijas (Figura 1-B), las cuales están distribuidas a diferentes distancias, cubriendo acimutalmente el cono volcánico, lo que permite caracterizar las columnas eruptivas en términos de altura y color de las emisiones. En la Figura 2-F se muestra la serie temporal de alturas sobre el cráter de las columnas eruptivas durante el día. Identificamos 4 fechas con importantes cambios: (1) el 27 de abril se incrementa la altura de las emisiones, de un promedio de 1500 a 3000 metros; (2) el 3 de setiembre, las emisiones contienen mayor cantidad de ceniza, pero disminuye la altura promedio hasta 1500 metros; (3) el 20 de noviembre se incrementa la altura promedio nuevamente a 3000 metros; (4) el 16 de diciembre, el promedio disminuye a 1500 metros con algunos picos de alturas de hasta 3800 metros.

Figura 2

Correlación de datos multidisciplinarios de monitoreo volcánico: (A) Deformación. (B) Sismicidad LP. (C) Registro sísmico de las explosiones. (D) Sismicidad VT y VTD. (E) Flujo de SO₂. (F) Altura sobre el cráter de las columnas eruptivas. (G) Anomalías térmicas. (H) Sismicidad de tipo HIB. Las líneas verticales rojas, corresponden a la delimitación de las diferentes etapas de actividad. Se señalan, además, mediante flechas en cada parámetro los cambios más importantes y la magnitud de estos.



Sensores Remotos

Se usaron las imágenes del proyecto MIROVA de la Universidad de Torino-Italia (<https://www.mirovaweb.it/>), que proveen información sobre anomalías térmicas aplicables al monitoreo de volcanes (Massimetti et al., 2020). Estas anomalías se expresan como la energía térmica irradiada o VRP (por sus siglas en inglés) y se expresan en unidad de Megavatios (MW).

En la Figura 2-G se muestran los valores de las anomalías térmicas registradas durante el año 2019. Se diferencia un periodo de valores altos entre el 16 de mayo y el 30 de octubre con un promedio de 30 MW, siendo el máximo valor registrado el 14 de junio (70 MW). En este periodo se observaron 5 etapas cortas de disminución de la energía térmica: 17 de junio, el 21 de julio, 13 setiembre, 3 de octubre y el 16 octubre.

Análisis

En esta sección, se analiza la información de monitoreo multidisciplinario (figura 2) y se correlaciona con posibles procesos internos y manifestaciones superficiales que podrían describir un modelo conceptual del proceso de formación del domo de lava en el cráter del volcán (figura 3), se ha considerado 5 etapas:

5 de Marzo - 27 de Abril

Esta etapa se caracterizó por: (1) Presentar dos pulsos de inflación (5-18 de marzo y 5-10 de abril), por un incremento de presión en una fuente intermedia (deformación acumulada de 8 mm), probablemente un *sill* o el conducto, esto debido a la migración de magma desde la cámara profunda, este magma en ascenso y proceso de desgasificación, ejerce presión sobre la roca encajante, empujando el material presente en

el conducto. A su vez, los gases volcánicos ascienden, para luego ser expulsado mediante explosiones leves. (2) Desde el 18 de marzo se registró un incremento de la actividad explosiva y además un ligero incremento en la energía sísmica de los sismos LP. (3) Desde el 27 de marzo se registró también un incremento del flujo de SO₂. (4) El 12 de abril se registraron varios sismos LP muy grandes, con energía sísmica de hasta 105 MJ, luego de este fenómeno, la sismicidad disminuyó rápidamente en cantidad y energía. Estas señales nos indicarían que hay una sobrepresurización por desgasificación de un cuerpo de magma emplazado cerca de la superficie.

27 de Abril – 30 de Julio

Esta etapa presenta las siguientes características: (1) Incremento de la sismicidad asociada a la dinámica de fluidos (LP y EXP) desde el 27 de abril, que también coincide con el incremento de la altura de las columnas eruptivas. (2) El 2 de mayo se registró un importante flujo de SO₂, luego de lo cual, el promedio del flujo diario se incrementó respecto a la etapa anterior. (3) Desde el 9 de mayo se registró otro periodo de deformación por presurización, marcado por 8 mm de inflación. (4) Desde el 16 de mayo la energía térmica irradiada se hace más frecuente y presenta mayor magnitud. (5) Entre el 21 de mayo y el 11 de junio se produce un enjambre de sismos de tipo VT y VTD muy energéticos, cuyas energías corresponden a las más altas registradas en todo el proceso eruptivo. Dado que los sismos VTD son predominantes, esta etapa correspondería a una intrusión y migración importante de magma (McCausland, et al. 2017).

30 de Julio – 4 Octubre

Las características de esta etapa son: (1) Desde el 30 de julio hay un ligero incremento en la actividad sísmica (LP y EXP) y una disminución del flujo de SO₂. (2) Se registra un nuevo enjambre de sismos de tipo VT y VTD entre el 11 de agosto y el 4 de octubre. Estos eventos presentan una ubicación más superficial. (3) Nuevamente se tiene la aparición de sismos de tipo HIB energéticos. Estos parámetros sugieren que el proceso de migración del magma está más próximo a la superficie.

4 Octubre – 26 Noviembre

Las señales que caracterizan esta etapa son: (1) Importante incremento en las explosiones e incremento en la sismicidad LP. (2) Disminución del flujo de SO₂. (3) Cambio importante en las características de las columnas eruptivas, las cuales se tornan más oscuras por el alto contenido de ceniza, se hacen más frecuentes, aunque no superan los 2000 metros de altura sobre el cráter. (4) Una imagen tomada con un dron el 26 de octubre, muestra el domo en el cráter del volcán (Figura 3-D). (5) Desde el 30 de octubre las anomalías térmicas decaen. Esta etapa correspondería al inicio de la extrusión del domo de lava, proceso que debió iniciarse entre el 4 y el 26 de octubre.

Desde el 26 Noviembre

Esta última etapa del año presenta cambios muy marcados: (1) Entre el 26 y 30 de noviembre hay un pulso en el flujo de SO₂. (2) Así mismo, desde el 26 de noviembre hay un incremento en la altura de las emisiones. (3) La cantidad diaria y energía de las explosiones y sismos LP disminuyen drásticamente. (4) Se registra un importante aumento en la tasa de sismicidad de tipo HIB. En esta etapa se propone que el

domo extruido es permeable y el conducto semiabierto, lo que permite que el material magmático sea extruido fácilmente.

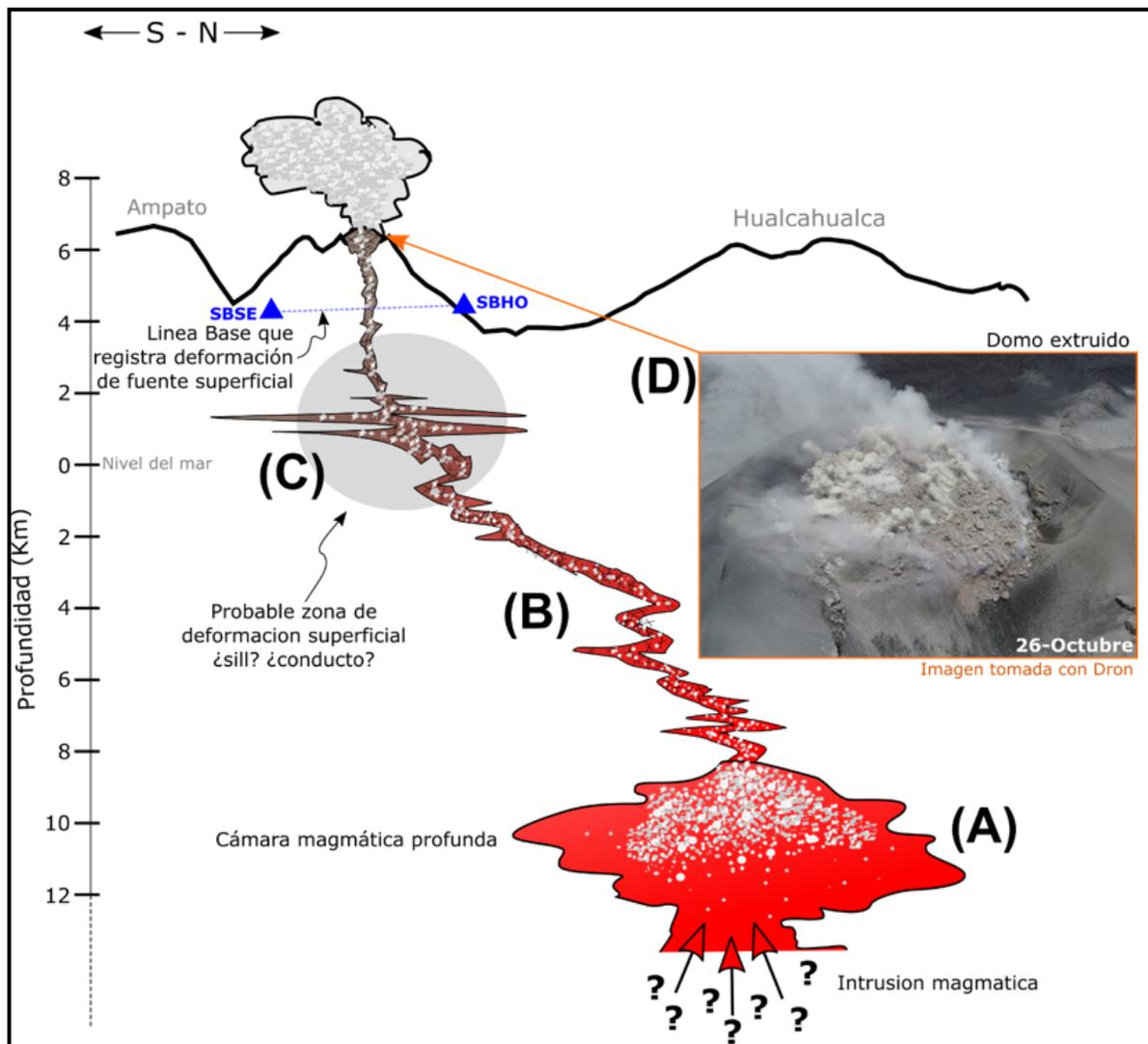
CONCLUSIONES

La dinámica del proceso de formación del domo de lava, podría estar diferenciado en 5 etapas definidas por los parámetros de monitoreo, este proceso se propone que obedece al esquema propuesto en la figura 3. La deformación volcánica de fuente profunda (Figura 3-A) y superficial (Figura 3-C), así como el registro de sismicidad son herramientas muy útiles al momento de detectar patrones relacionados al ascenso de magma y desgasificación. A su vez, los datos de caracterización de las columnas eruptivas, las mediciones de flujos de SO₂ y las anomalías térmicas, permiten corroborar la evolución de formación del domo (Figura 3-D).

Este proceso duró 9 meses y consistió en cinco etapas que consistieron en pulsos de presión interna durante la migración y desgasificación de un cuerpo de magma desde la cámara profunda (Figura 3-A) a la superficie, atravesando los conductos volcánicos, esto generó deformación y sismicidad relacionada a fracturamiento de estructuras y al movimiento de fluidos magmáticos al interior del edificio volcánico (Figura 3-B), la cual culminó con la extrusión del domo de lava (Figura 3-D), posteriormente este domo inició el proceso de destrucción mediante continuas explosiones de moderada magnitud, proceso que continuó durante la primera mitad del 2020

Figura 3

Esquema simplificado del modelo conceptual con el que se describe el proceso de formación del domo de lava en el volcán Sabancaya. El cual inicia con la migración de un cuerpo de magma con importante desgasificación desde la cámara profunda (A), siguiendo como camino un conducto (B), el avance del cuerpo magmático sobre presuriza el sistema y genera deformación superficial (C) y ruptura de las estructuras en el conducto. Finalmente, el cuerpo magmático sale a la superficie formándose un domo de lava en el cráter del volcán (D).

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Boixart, G.; Cruz, L.; Miranda, R.; Euillades, P.; Euillades, L.; & Battaglia, M. (2020). Source Model for Sabancaya Volcano Constrained by DInSAR and GNSS Surface Deformation Observation. *Remote Sens.* 2020, 12, 1852.

Cruz, L. (2019). Análisis de deformación del volcán Sabancaya como herramienta útil en el pronóstico de erupciones periodo 2012 – 2017. Tesis de Ingeniero. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú. 137p.

- Delgado, R. (2012). Estudio geológico, petrográfico y geoquímico del complejo volcánico Ampato-Sabancaya (provincia Caylloma, departamento Arequipa). Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 146 p.
- Hale, A. (2008). Lava Dome Growth and Evolution with an Independently Deformable Talus. *Geophysical Journal International*. 174.
- Heap, M. J.; Russell, J. K; & Kennedy, L. A. (2016). Mechanical behaviour of dacite from Mount St. Helens (USA): A link between porosity and lava dome extrusion mechanism (dome or spine)? *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 328, 159–177.
- Herring, T.; King R. & McClusky, S. (2010a). GPS Analysis at MIT, GAMIT Reference Manual, Release 10.5. (Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA.
- Herring, T.; King, R. McClusky, S. (2010b). Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program, GLOBK Reference Manual, Release 10.5. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA.
- Manrique, N.; Lazarte, I.; Cueva, K.; Rivera, M. & Aguilar, R. (2018). Actividad del volcán Sabancaya (Perú) 2016-2017: Características de las emisiones de ceniza y análisis granulométrico. Resumen para Foro Internacional: Los volcanes y su impacto, Arequipa, Perú. 5p.
- Massimetti, F.; Coppola, D.; Laiolo, M.; Valade, S.; Cigolini, C. & Ripepe, M. (2020). Volcanic Hot-Spot Detection Using SENTINEL-2: A Comparison with MODIS–MIROVA Thermal Data Series. *Remote Sensing*. 12. 820.
- McCausland, W.; White, R.; Indrastuti, N.; Gunawan, H.; Patria, C.; Suparman, Y.; Putra, A.; Triastuty, H. & Hendrasto, M. (2017). Using a process-based model of pre-eruptive seismic patterns to forecast evolving eruptive styles at Sinabung Volcano, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 382, 253–266.
- McNutt, S. & Roman, D., (2015). Volcanic Seismicity. School of Geosciences Faculty and Staff Publications. 1437.
- Minakami, T. (1974). Seismology of volcanoes in Japan. In: L. Civetta, P. Gasparini, G. Luongo & A. Rapolla (eds): *Physical Volcanology*. Elsevier, Amsterdam, pp.1–27.
- Mousallam, Y.; Peters, N.; Masias, P.; Apaza, F.; Barnie, T.; Schipper, C.; Curtis, A.; Tamburello, G.; Aiuppa, A.; Bani P.; Giudice, G.; Pieri, D.; Ashley D. & Oppenheimer, C. (2017). Magmatic gas percolation through the old lava dome of El Misti volcano. *Bulletin of Volcanology*. 79.
- Newhall, C.; & Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87(C2), 1231-1238.

- Pritchard, M. & Simons, M. (2002). A satellite geodetic survey of large-scale deformation of volcanic centres in the central Andes. *Nature* 418, 167–171.
- Pritchard, M. & Simons, M. (2004). An InSAR-based survey of volcanic deformation in the Central Andes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 5.
- Rivera, M.; Mariño, J.; Samaniego, P.; Delgado, R. & Manrique, N. (2015). Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico Ampato - Sabancaya (Arequipa), INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 61, 122 p., 2 mapas.
- Samaniego, P.; Rivera, M.; Mariño, J.; Guillou, H.; Liorzou, C.; Zerathe, S.; Delgado, R. & Valderrama, P. (2016). The eruptive chronology of the Ampato-Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 323, p. 110-28.
- Sparks, R. (1997). Causes and consequences of pressurisation in lava dome eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 150, 177-189.
- Wallace P. (2001). Volcanic SO₂ emissions and the abundance and distribution of exsolved gas in magma bodies. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 108. 85-106.
- Zobin, V. (2012). *Introduction to Volcanic Seismology*. 2nd edition, Elsevier, Amsterdam-New York-Tokyo. 482 p.
- Zorn, E.; Walter, T.; Johnson, J. & Mania, R. (2020). UAS-based tracking of the Santiaguito Lava Dome, Guatemala. *Nature Sci Rep* 10, 8644.