

Mecanismos de emplazamiento y destrucción de los domos de lava kimsa y tawa en el volcán Sabancaya, mediante el monitoreo volcánico multidisciplinario

Jorge Chalco¹, Mayra Ortega¹, Rosa Ancasi¹, Videll Chavez¹, Fredy Apaza¹

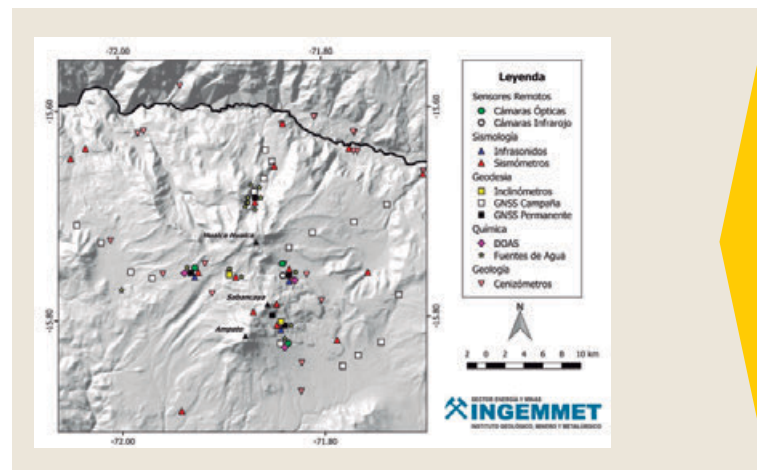
¹ Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, Barrio magisterial 2 B-16 Yanahuara, Arequipa - Perú - jchalco@ingemmet.gob.pe

Palabras clave: Monitoreo multidisciplinario, Domos de lava, Sismicidad distal.

El volcán Sabancaya está localizado a 76 km al NO de la ciudad de Arequipa, en la provincia de Caylloma (15° 46' - 15° 52' S; 71° 49' - 71° 54' O). El volcán Sabancaya es el más joven de los 10 volcanes activos del sur del Perú, se ha formado en los últimos 10 mil años (Bromley et al., 2019). Está conformado principalmente por secuencias de flujos de lava de composición andesítica y dacítica, con limitados depósitos piroclásticos (Mariño, 2012; Rivera et al., 2015; Samaniego et al., 2016).

La cumbre del volcán Sabancaya está a 5,980 msnm y el edificio volcánico cubre un área de 65 a 70 km². Está conformado por 2 estratos-conos, alineados en dirección SO-NE. El más antiguo se halla en el extremo suroeste, en cuya cima se emplaza un domo-colada; mientras que el cono más reciente se halla al extremo noreste. El cráter con actividad histórica y reciente se encuentra en la cima del estrato-cono NE. (INGEMMET, 2016).

En los últimos años el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, mediante el monitoreo multidisciplinario, ha identificado la formación de 5 domos de lava, los cuales han repercutido en la actividad de dicho volcán.



► Fig. 2 - Red de monitoreo multidisciplinario del volcán Sabancaya.



► Fig. 1 - Mapa de ubicación del volcán Sabancaya dentro de la Zona Volcánica Central (CVZ) de los Andes.

En tal sentido, para entender y comprender el mecanismo de formación y destrucción del tercer ("KIMSA") y cuarto ("TAWA") domo de lava, en el presente trabajo de investigación, se pretende realizar un análisis detallado de la sismicidad volcánica en correlación con algunos de los parámetros de monitoreo a fin de establecer patrones claros en la evolución de dichos procesos.

Sismicidad Volcánica

I Periodo: enero 2021 - agosto 2021

En este periodo se registró una importante sismicidad de tipo Volcano Tectónica distal (VTD), este tipo de sismicidad se ha registrado en varias ocasiones a modo

de enjambres sísmicos (Figura 2), se ha contabilizado alrededor de 16 enjambres, durante este periodo de tiempo, el primero se registró el 12 de enero y el último el 23 de julio.

La ocurrencia de estos enjambres, están asociados a la sobrepresurización de acuíferos que cruzan las fallas de la zona generada por la presión causada a raíz de la intrusión de magma (White & McCausland, 2016). Los pulsos de magma intruidos provendrían de la cámara profunda localizada al norte del volcán Sabancaya por debajo del volcán Hualca Hualca (Cruz, 2019).

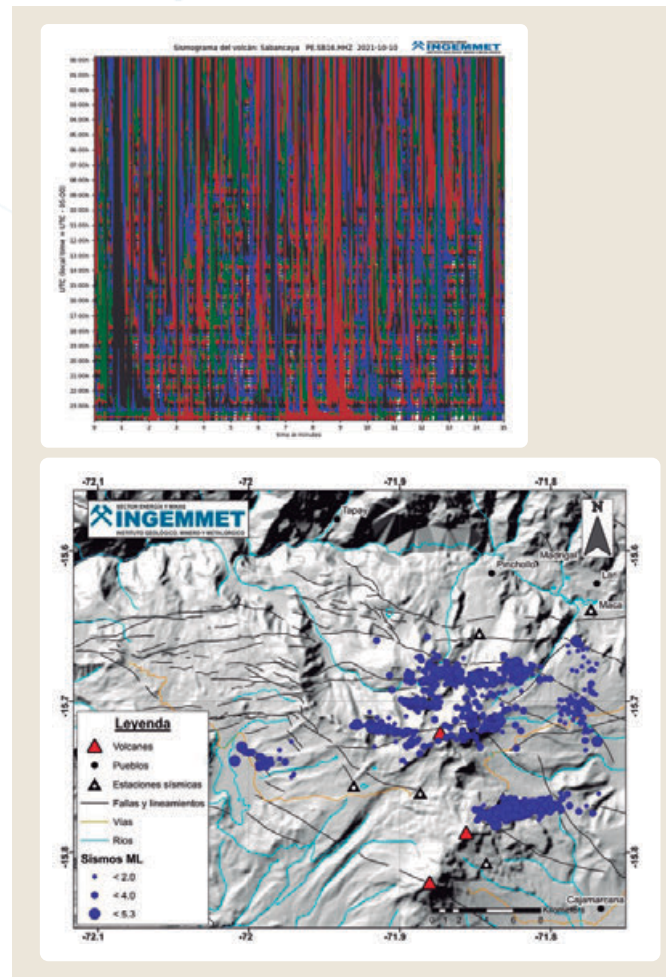
Entre los meses de enero y febrero del 2021 se produjo un incremento del volumen del magma intruido hacia la superficie, siendo el 07 de febrero el máximo con un volumen superior a los 7 millones de metros cúbicos.

El día 18 de abril del 2021 se registró el mayor aporte de magma de este periodo, siendo 132 millones de metros cúbicos el volumen de magma intruido hacia la superficie.

II Periodo: septiembre 2021 - enero 2022

En este periodo, de igual manera, se registró una importante sismicidad de tipo Volcano Tectónica distal (VTD), contabilizando alrededor de 15 enjambres, registrándose el primero el 03 de septiembre y el último el 02 de diciembre del 2022.

Entre septiembre y octubre del 2021, a raíz de estos continuos enjambres, se produjo un incremento del volumen del magma intruido hacia la superficie, estimándose un total de 515 millones de metros cúbicos, indicándose un aporte de magma desde la cámara principal hacia la superficie.



► Fig. 3a Registro de la actividad sísmica a manera de enjambres de eventos VTs registrados en el volcán Sabancaya, en el 2021; 18 de abril (izquierda) y 10 de octubre (derecha).

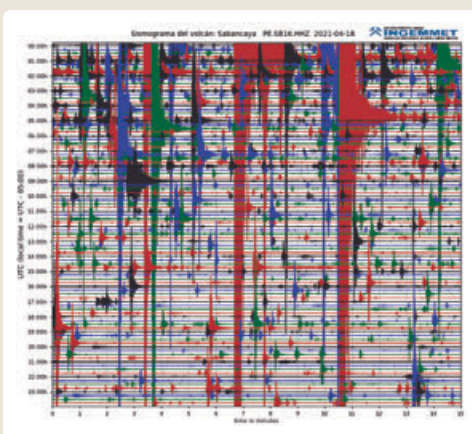
Fig. 3b Mapa de localización de enjambres de sismos VTs registrados en el volcán Sabancaya durante el 2021.

Explosiones

Para el cálculo de la energía sísmica de las explosiones se utilizó la ecuación propuesta por Johnson & Aster (2005):

$$E_{\text{sísmica}} = 2\pi r^2 c \frac{1}{A} \int_{\sigma} S^2 U(t)^2 dt$$

Donde r es la distancia fuente-estación, c es la velocidad de la onda P (3000 m/S), A es la corrección de atenuación, S es la respuesta del sitio sísmico corrección y $U(t)$ es la velocidad de la partícula.



I Periodo: enero 2021 - agosto 2021

Se registró un aumento significativo tanto en número como en energía de las explosiones (EXP) que comenzó en el mes de febrero y continuó hasta la primera semana de mayo.

Durante este periodo se contabilizó un promedio de 50 EXP/día que liberaron una energía diaria de 11.65 MJ. Durante este periodo se alcanzó un pico en la energía liberada de 19.98 MJ el día 25 de febrero y en tasa de ocurrencia el día 26 de abril con un total de 80 explosiones.

A partir de la segunda semana de mayo la energía de las explosiones comenzó a descender, registrándose valores menores a los 10 MJ.

Desde la última semana del mes de junio las explosiones volvieron a aumentar en número y energía, alcanzando picos de 108 en número el 15 de julio y 24.74 MJ de energía el 13 de julio, ambos fueron los valores más altos que se registraron a lo largo del 2021.

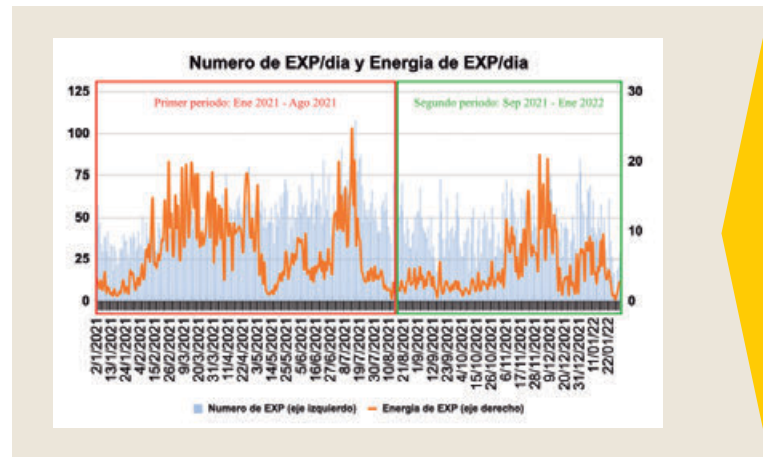
Luego de la tercera semana del mes de julio la actividad explosiva disminuyó nuevamente en número y energía.

II Periodo: septiembre 2021 - enero 2022

Durante el mes de septiembre del 2021 los valores de las explosiones tanto en número como en energía mantuvieron niveles moderados de actividad y no fue hasta noviembre del 2021 que los valores aumentaron significativamente tanto en número como en energía de las explosiones (EXP), comportamiento que continuó hasta parte del mes de diciembre de dicho año.

Durante este periodo se obtuvo un promedio de 52 EXP/día y 8.69 MJ de energía por día, alcanzando picos de 83 en número (07 de diciembre del 2021) y de 20,85 MJ (01 de diciembre del 2021).

Luego del aumento que hubo hasta la primera mitad del mes de diciembre del 2021, los valores descendieron durante la segunda mitad de dicho mes, hasta el mes de enero donde los valores volvieron a ascender durante su primera semana, y posteriormente disminuir drásticamente hasta el fin de este periodo de tiempo.



► Fig. 4 – Gráfica del número y energía de las EXP diarias registradas en el Volcán Sabancaya del primer periodo (enero 2021 a agosto 2021 - marco rojo izquierdo) y del segundo periodo (septiembre 2021 a enero 2022 - marco verde derecho).

Monitoreo Multiparamétrico

ENERGÍA VOLCÁNICA IRRADIADA (VRP, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS)

I Periodo: enero 2021 - agosto 2021

Desde el año 2019 se registraron cambios en las anomalías térmicas durante los periodos de crecimiento y destrucción de domos de lava en el cráter del volcán Sabancaya (Ramos et al. 2019).

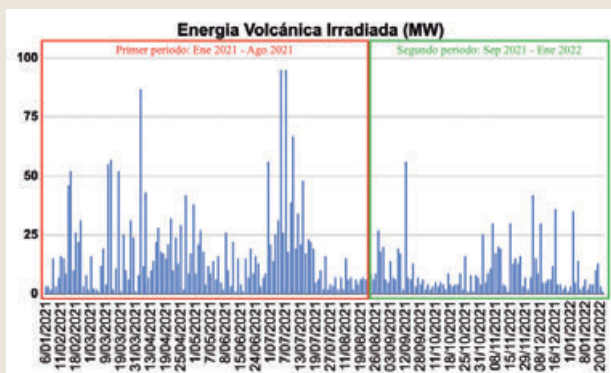
La energía volcánica irradiada (VRP) a lo largo de los meses de febrero hasta la primera semana de mayo, (Fig. 5) mostró una mayor tasa de registro de anomalías térmicas, teniendo el valor de energía (VRP) más alto de 87 MW (02 de abril).

Los días siguientes la energía volcánica irradiada descendió, pero seguían manteniéndose valores relativamente altos. En la primera semana de julio del 2021 volvieron a ascender los valores, incluso superando los vistos anteriormente, llegando a su pico el 5 y 7 de julio con un valor de 96 MW en ambos días. Luego de ese incremento en la energía irradiada por el volcán los datos registrados descendieron drásticamente.

Estos datos son registrados por MIROVA que es un sistema automático de detección de puntos calientes desarrollado para detectar, localizar y medir la radiación de calor procedente de la actividad volcánica (Coppola et al., 2016).

II Periodo: septiembre 2021 - enero 2022

En el mes de septiembre los valores de la energía volcánica irradiada se mantuvieron en niveles bajos a excepción del día 12 de septiembre que se registró un valor de 56 MW. No fue hasta finales de octubre del 2021 que se registró un cambio en la actividad, donde los valores registrados comenzaron a aumentar alcanzando un máximo de 42 MW el 02 de diciembre del 2021. Los valores siguieron siendo altos hasta el mes de enero del 2022 para posteriormente descender.



► Fig. 5 – Gráfica de la Energía Volcánica Irradiada diaria registrada en el Volcán Sabancaya del primer periodo (enero 2021 a agosto 2021 - marco rojo izquierdo) y del segundo periodo (septiembre 2021 a enero 2022 - marco verde derecho), (Fuente: MIROVA).

QUÍMICA DE GASES - EMISIONES DE SO₂

La Red Escaner DOAS está compuesta por 4 escáneres instalados alrededor del cráter del Sabancaya. Estos equipos escanean el cielo buscando las plumas volcánicas que pasan encima de ellas, midiendo el SO₂ (Ramos et al., 2019).

I Periodo: enero 2021 - agosto 2021

En el mes de febrero hubo un cambio en los flujos de dióxido de azufre SO₂, incrementándose los valores registrados normalmente. El 15 de febrero se registró un flujo máximo de 11,786 toneladas, luego en los días siguientes los valores descendieron hasta que el 23 de febrero se volvió a registrar un aumento con un valor de 11,005 toneladas. Este cambio se debió a que el conducto fue menos permeable y acumuló una

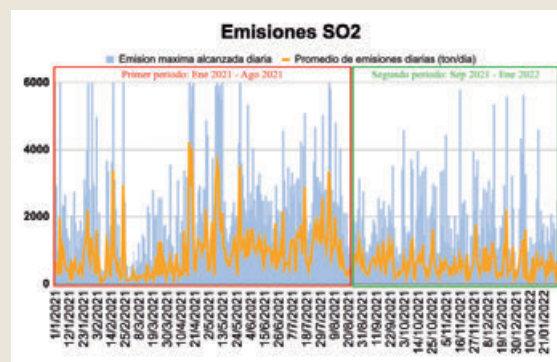
masa de gases en él, hasta que debido a la presión el gas salió de manera abrupta produciendo así los valores altos antes mencionados.

Posterior a este comportamiento, los flujos se mantuvieron bajos sugiriendo un conducto poco permeable. Posteriormente, a mediados del mes de abril se volvieron a elevar los valores, registrándose un flujo importante de 10,328 toneladas el 16 de abril. Luego como se había visto anteriormente los flujos de SO₂ se mantuvieron bajos por unos días para luego incrementar significativamente, este comportamiento se observó hasta el mes de agosto donde el conducto nuevamente se vuelve más permeable permitiendo así el tráfico de gases con mayor facilidad.

II Periodo: septiembre 2021 - enero 2022

Las emisiones de dióxido de azufre se mantuvieron estables durante el mes de septiembre del 2021. En octubre del 2021 se vuelve a producir un cambio en los flujos registrados. Muy similar a las del anterior periodo donde el conducto se hizo menos permeable y los gases se acumulaban habiendo una emisión máxima muy alta debido a la fuga abrupta del gas producto de la presión por la acumulación de estos.

El mayor valor registrado en este periodo de tiempo fue de 5,782 toneladas correspondiente al día 15 de noviembre del 2021. Este comportamiento se mantuvo hasta fines del mes de enero del 2022, donde las emisiones de dióxido de azufre se normalizaron.



► Fig. 6 – Gráfico de emisiones máximas y promedio de emisiones diarias de SO₂ registradas en el volcán Sabancaya del primer periodo (enero 2021 a agosto 2021 - marco rojo izquierdo) y del segundo periodo (septiembre 2021 a enero 2022 - marco verde derecho).

Discusiones

I Periodo: enero 2021 - agosto 2021

Debido a la alta tasa de intrusión de magma que se tuvo en el volcán Sabancaya entre el mes de enero y febrero del 2021, ocurrió un ascenso de este hacia la superficie, el cual al ser de un material muy viscoso (Rivera et al., 2015), se solidifica formando así el tercer domo de lava llamado Kimsa. Posteriormente, desde el mes de febrero hasta mayo del 2021, se registró un cambio con tendencia a incrementar en la actividad explosiva (número y energía), valores moderados de la energía volcánica irradiada (valor máximo registrado: 87 MW), flujos de dióxido de azufre (valor máximo registrado: 11,786 t). Estos datos indicaron un periodo de crecimiento acelerado del domo de lava kimsa.

Desde el mes de mayo hasta junio los valores descendieron y se mantuvieron en un rango moderado, sugerimos que el domo dejó de crecer aceleradamente y permaneció en el cráter todo ese tiempo.

Durante todo el mes de julio los valores volvieron a incrementar en los 3 parámetros estudiados, indicando que el domo pasaba nuevamente por una tasa de crecimiento importante en su cuerpo superando la anterior.

En el mes de agosto los valores descendieron drásticamente sugiriendo un conducto menos obstruido, esto debido a la destrucción del domo de lava Kimsa.

II Periodo: septiembre 2021 - enero 2022

Debido a la alta tasa de intrusión de magma (incluso superando a la que hubo en el anterior periodo) que se

tuvo en el volcán Sabancaya entre el mes de septiembre y octubre, ocurrió un ascenso de este hacia la superficie, el cual al ser de un material muy viscoso se solidifica formando así el cuarto domo de lava llamado Tawa. Posteriormente, desde el mes de noviembre hasta la primera semana de diciembre del 2021, se registró un cambio con tendencia a incrementar en la actividad explosiva (número y energía), valores moderados de la energía volcánica irradiada (valor máximo registrado: 42 MW), flujos de dióxido de azufre (valor máximo registrado: 5,872 t). Estos datos indicaron un periodo de crecimiento importante del domo de lava Tawa.

En la segunda mitad del mes de diciembre del 2021 hasta el mes de enero del 2022 los valores de las explosiones descendieron y se mantuvieron en un rango moderado, infiriendo que el domo dejó de crecer. La energía volcánica irradiada permaneció registrando valores moderados y las emisiones de dióxido de azufre, infiriendo que el domo de lava permaneció todo ese tiempo obstruyendo el conducto por lo que los gases no pudieron circular libremente.

Durante el mes de enero los valores de las explosiones volvieron a incrementar indicando que el domo pasaba nuevamente por una tasa de crecimiento, sin embargo, por sus características probablemente este volumen de magma involucrado no superó el periodo previo.

A fines del mes de enero los valores descendieron drásticamente en los 3 parámetros estudiados, sugiriendo así finalmente la destrucción de este cuarto domo de lava (Tawa).

DISCUSIONES

Se pueden establecer 5 etapas para el ciclo de vida de estos dos domos de lava los cuales tienen grandes similitudes.

- ▶ **Primera etapa:** Presencia de sismicidad distal en forma de enjambre, en ambos casos se presentó semanas previas a la aparición del domo de lava.
- ▶ **Segunda etapa:** Ascenso del material magmático hacia la superficie, debido a la sismicidad distal en forma de enjambre, para posteriormente solidificarse y dar origen al domo de lava.
- ▶ **Tercera etapa:** Presencia del domo de lava obstruyendo el conducto, haciéndolo menos permeable, impidiendo así el libre tráfico de los gases.

- ▶ **Cuarta etapa:** Crecimiento del domo de lava donde las explosiones aumentan en número y energía, así como un aumento en la energía volcánica irradiada.
- ▶ **Quinta etapa:** Destrucción del domo de lava, las explosiones tanto en número y en energía disminuyen, al igual que los registros de energía volcánica irradiada. Debido a su destrucción, el conducto queda libre, haciéndolo así más permeable permitiendo el libre tráfico de los gases.

Agradecimientos

Se agradece a INGEMMET, por darme la oportunidad de llevar a cabo este trabajo y a mis compañeros del observatorio vulcanológico (OVI) por su constante apoyo.

REFERENCIAS

- ▶ Bromley G., Thouret J.C., Schimmelpfennig I., Mariño J., Valdivia D., Rademaker, K., Vivanco S., ASTER Team, Aumaitre G., Bourles D., Keddadouche. K. (2019). In situ cosmogenic ³He and ³⁶Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru. *Bulletin of Volcanology*, 81(11), 64. <https://doi.org/10.1007/s00445-019-1325-6>
- ▶ Coppola, D., Laiolo, M., Cigolini, C., Donne, D. D., & Ripepe, M. (2016). Enhanced volcanic hot-spot detection using MODIS IR data: results from the MIROVA system. *Geological Society, London, Special Publications*, 426(1), 181–205. <https://doi.org/10.1144/SP426.5>
- ▶ Cruz, L. (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.
- ▶ Johnson J.B., Aster R.C. (2005). Relative partitioning of acoustic and seismic energy during Strombolian eruptions. *J Volcanol Geoth Res* 148:334–354. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.05.002>
- ▶ Ramos, D., Masías, P., Apaza, F., Miranda, R., Antayhua, Y., Ortega, M., Ancasí, R., Ccallata, B., Luza, C., Valdivia, D., Cruz, L., Taipe, E. 2019. Informe Técnico Anual: Vigilancia del Volcán Sabancaya, Periodo 2019.
- ▶ INGEMMET. (2016). Informe Técnico No A 6728 - Inspección Geológica del volcán Sabancaya (Distritos Maca y Lluta, Provincia de Caylloma, Región Arequipa).
- ▶ Mariño, J. (2012). Escenarios eruptivos y mapa de peligros del complejo volcánico Ampato - Sabancaya. Tesis Maestría, Universidad de Nice, Francia, 87 p.