

# Análisis de las emisiones de SO<sub>2</sub> durante la formación de domos de lava en el proceso eruptivo del volcán Sabancaya

Periodo 2019 - 2022

Jorge Alcántara<sup>1</sup>, Fredy Apaza<sup>1</sup>, Daniel Ramirez<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico de INGEMMET, Barrio magisterial 2B-16 Yanahuara, Arequipa, Perú (\*proyectosdgar07@ingemmet.gob.pe)

Palabras clave: Desgasificación, Domo de lava, Dióxido de azufre, DOAS, TROPOMI.

## RESUMEN

Desde el inicio del periodo eruptivo del volcán Sabancaya en el 2016, se ha presentado 5 eventos de emplazamiento de domo de lava, los cuales han condicionado las características de las emisiones de productos volcánicos hacia la atmósfera, en especial la desgasificación volcánica que depende de las condiciones permeables del conducto superior del volcán. En cada emplazamiento de domo, el proceso de desgasificación puede ser explosiva o pasiva, varía según los periodos de formación y destrucción de domo.

Debido a eventos de intrusión magmática y emplazamiento de domo de lava, el sistema del conducto volcánico disminuye su permeabilidad, generando desgasificación explosiva en un sistema semiabierto, desgasificación pasiva en un sistema semicerrado de baja permeabilidad y con la destrucción del domo se evidencia un sistema semiabierto con desgasificación continua de SO<sub>2</sub>.

## I. INTRODUCCIÓN

El Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es emitido a la atmósfera por procesos naturales y antrópicos (Theys et al., 2021). En el sur del Perú, las emisiones de SO<sub>2</sub> por procesos naturales se deben a la zona volcánica central de América del Sur, donde los volcanes Ubinas y Sabancaya (Mousallan et al., 2017) son los que tienen mayor aporte de SO<sub>2</sub> hacia la atmósfera.

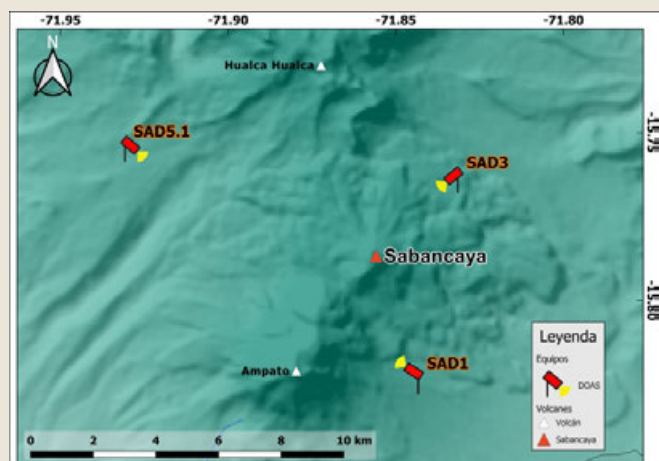
Para el monitoreo de las emisiones de SO<sub>2</sub> se utilizan distintas técnicas para medir la concentración y flujos de SO<sub>2</sub> emitidos a la atmósfera. Uno de ellos es el instrumento de espectroscopia de absorción óptica diferencial ultravioleta (DOAS) que es un sistema

diseñado para medir los flujos de gases volcánicos mediante espectroscopia de absorción UV. Además, durante las últimas décadas se han desarrollado técnicas de detección por instrumentos a bordo de satélites como TROPOMI, que es un instrumento basado en la espectroscopía que permite monitorear las emisiones de SO<sub>2</sub> desde el satélite Sentinel-5p. En el volcán Sabancaya la red de monitoreo de gases volcánicos cuenta con tres instrumentos DOAS (Fig. 1) que están en funcionamiento desde el año 2016, por otro lado, el satélite Sentinel-5p proporciona información desde el año 2018, lo cual nos permite evaluar la desgasificación del presente proceso eruptivo del volcán Sabancaya.

## II. METODOLOGÍA

El uso de instrumentos de espectroscopia de absorción óptica diferencial ultravioleta (DOAS) para la medición de emisiones de gases volcánicos ha sido implementado en 42 volcanes alrededor del mundo mediante el proyecto NOVAC, como indica Galle et al. (2010) este instrumento utiliza la luz solar dispersa en la región UV para derivar la abundancia de SO<sub>2</sub> y posteriormente calcular el flujo de gas utilizando la información de velocidad y dirección del viento.

Se realiza el análisis de los flujos de SO<sub>2</sub> en las series temporales provenientes de la red de monitoreo de gases volcánicos del volcán Sabancaya para identificar el tipo de desgasificación magmática en periodos de formación y destrucción de domos de lava. Identificaremos los tipos de desgasificación ya sea pasiva o explosiva de SO<sub>2</sub>, en relación a la permeabilidad del sistema planteado por Campion et al. (2018).



► Fig. 1 – Red de monitoreo de gases volcánicos del volcán Sabancaya

Además, el Instrumento de monitoreo troposférico (TROPOMI) ha revolucionado las técnicas satelitales para el monitoreo de gases trazas en la atmósfera. Este instrumento identifica el  $\text{SO}_2$  volcánico emitido a la atmósfera mediante espectroscopía de absorción óptica diferencial a una resolución espacial de  $7 \times 3.5 \text{ km}^2$  y una resolución temporal de 1 día (Theys et al., 2021). Las imágenes provistas por el satélite Sentinel-5p proporcionan información parcial de la cantidad de  $\text{SO}_2$  emitido a la atmósfera, se seleccionan ciertos eventos para identificar la cantidad de toneladas de  $\text{SO}_2$  concentrados en la atmósfera.

### III. CARACTERÍSTICAS DE LA ACTIVIDAD ERUPTIVA

El volcán Sabancaya, ubicado a 75 km al NO de la ciudad de Arequipa, inició su proceso eruptivo el 06 de noviembre del 2016, este proceso eruptivo continúa en desarrollo hasta el momento de escribir este resumen. Según el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI), la erupción es de tipo vulcaniana con un IEV 2, caracterizado por explosiones moderadas con emisiones de gases, cenizas y proyectiles balísticos, que forman columnas eruptivas que alcanzan los 5.5 km sobre el cráter en algunas ocasiones.

Bajo el monitoreo multidisciplinario del volcán Sabancaya se evidenciaron distintos eventos de emplazamiento de domos de lava en el interior del

cráter del volcán, los cuales juegan un papel importante en las características de las emisiones volcánicas. Mediante el monitoreo volcánico de distintos parámetros y la correlación de imágenes satelitales y de sobrevuelos de inspección con dron, el OVI pudo seguir la evolución de estos eventos, como los periodos de formación, presencia y destrucción de 5 domos de lava.

#### DOMO I: HUK

En el inicio de las explosiones en noviembre del 2016, en las imágenes Planet Scope se logró identificar el cráter del volcán al SE, sin embargo, se observó la acumulación de material volcánico al NO; en meses posteriores. En febrero del 2017, se aprecia el crecimiento de un domo con un área aproximada de  $5674 \text{ m}^2$  al noreste, evidenciando la migración del conducto volcánico. En septiembre del 2018 la imagen satelital nos muestra las emisiones alrededor del domo que para ese momento cuenta con un área de  $18003 \text{ m}^2$ . Durante el 2019, el satélite Airbus muestra que el domo se encuentra emplazado en dirección noreste a sureste del cráter, en el mes de mayo el domo cuenta con un área mayor de  $21206 \text{ m}^2$  y hasta octubre llega a tener un área mucho mayor de  $51742 \text{ m}^2$ . De noviembre a diciembre del 2019, el domo de lava presenta un crecimiento acelerado llegando a tener un diámetro mayor de 367 m y un diámetro menor de 234 m con un área de  $67000 \text{ m}^2$ , logrando sobrepasar la altura del cráter siendo observado por una de las cámaras de vigilancia del OVI, en este periodo se generan explosiones moderadas. En los meses de diciembre y enero se registró el incremento de la duración de la sismicidad por circulación de fluidos (Tremor) y aumento de los sismos de tipo híbridos, además se presentaron dos eventos de flujos piroclásticos de corto alcance, siendo identificados por señales sísmicas de alta frecuencia de hasta 20 Hz y las imágenes de vigilancia, llegando así a una transición del inicio de la destrucción del primer domo de lava Huk.

En el año 2020, la correlación de parámetros de monitoreo evidencia la destrucción del domo de lava Huk, con la disminución de la energía de las explosiones, disminución de flujos de  $\text{SO}_2$ , mientras que la deformación no presenta cambios importantes hasta el mes de julio.

**DOMO II: ISKAY**

En los meses de julio a noviembre, se registró la formación, crecimiento y destrucción parcial del domo de lava denominado Iskay, iniciando con una inflación acelerada en las proximidades del cráter y posterior a

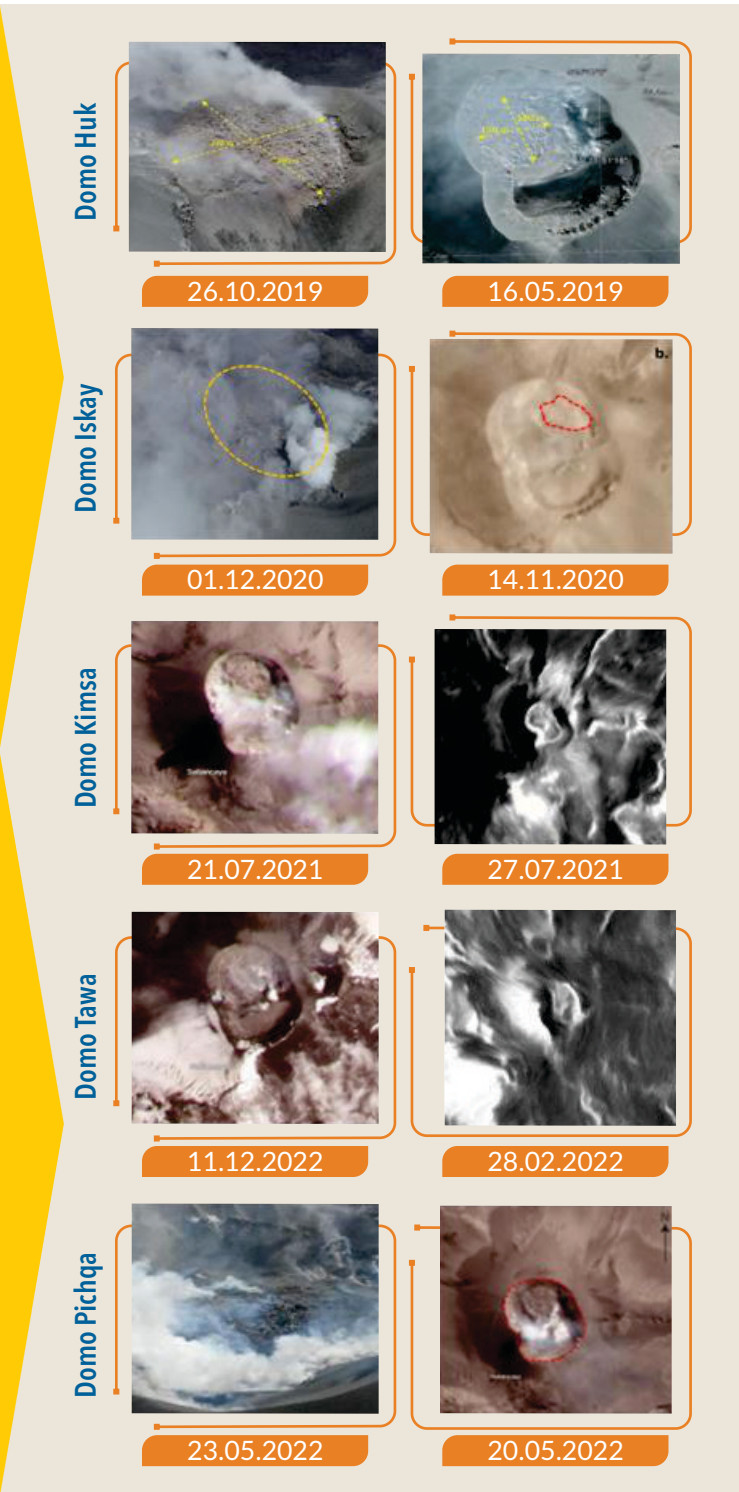
un enjambre sísmico, se comenzó a registrar un incremento en la sismicidad más cercana al volcán como sismos de largo periodo LP, explosiones y eventos acoplados. Por otro lado, la disminución de los flujos de SO<sub>2</sub> infiere la acumulación de gases por debajo de la superficie debido a la baja permeabilidad del nuevo domo. Por último, el descenso de la actividad explosiva y predominio de tremor volcánico, asociados a pequeños eventos tipo flujos piroclásticos y el cambio en la desgasificación volcánica (SO<sub>2</sub>), indican el proceso de destrucción parcial del domo de lava Iskay.

**DOMO III y IV: KIMSAYTAWA**

En el año 2021 se evidenció la formación de dos pequeños domos que condicionan el modo de desgasificación de SO<sub>2</sub>, uno de ellos es Kimsa, el tercer domo en el volcán Sabancaya, es identificado como un domo endógeno, que no se mostraba en superficie; desde fines de abril a mediados de junio se evidenció procesos de intrusión magmática que se evidenciaba con emisiones de SO<sub>2</sub> que iban de grandes a moderadas. Para el mes de julio se registró el incremento en la energía de las explosiones y anomalías térmicas con valores importantes en el cráter del volcán interpretado como el afloramiento del domo a superficie y su posterior destrucción parcial en los meses de julio y agosto. Ya en noviembre se evidencia cambio en los parámetros de monitoreo definiendo así el cuarto domo denominado Tawa, inicia su emplazamiento de manera endógena y su posterior destrucción en el mes de febrero del 2022, con un nivel de desgasificación pequeña a moderada y de la actividad volcánica en general.

**DOMO V: PICHQA**

A mediados de marzo del 2022 se evidencia el incremento de la actividad volcánica con la ocurrencia de un enjambre sísmico asociado a intrusión magmática de más de 30 millones de m<sup>3</sup> posterior a ello, la presencia de anomalías térmicas en el cráter del volcán (>60 MW), aumento en el flujo de So<sub>2</sub> (> 4000 Ton/día), aumento en la altura de la columna eruptiva (>3000 msc) e incremento en la energía de las explosiones (>10 MJ), da pie a la formación y



► Fig. 2 – Imágenes satelitales y de sobrevuelos con dron de los domos de lava del volcán Sabancaya

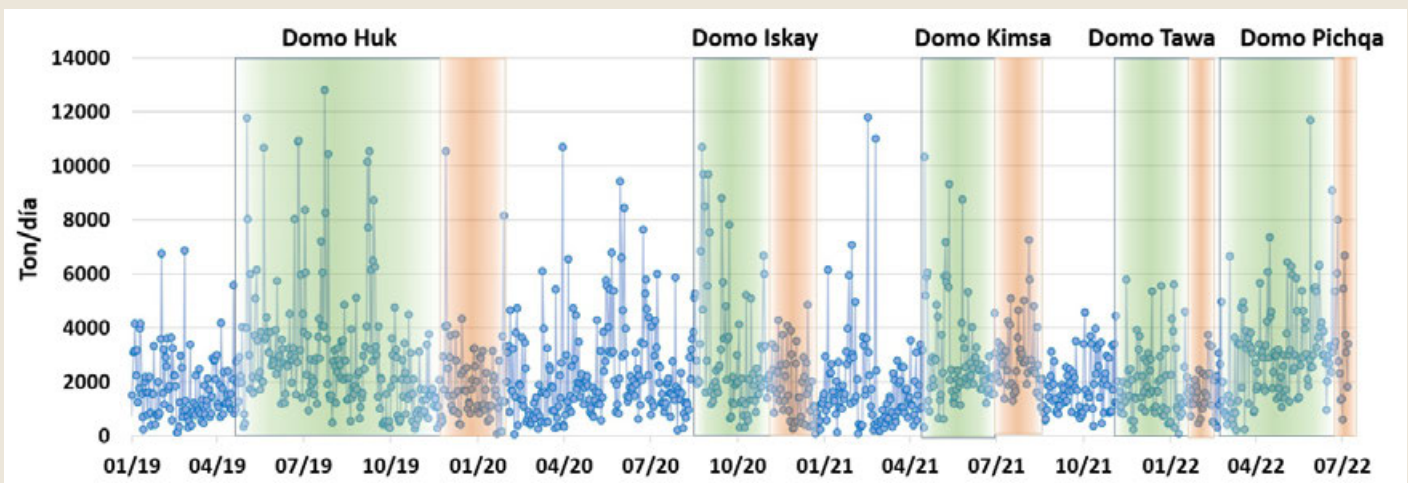
emplazamiento de un pequeño domo de lava denominado "Pichqa".

#### IV. FLUJOS DE SO<sub>2</sub>

La desgasificación volcánica presenta distintas características durante los 5 eventos de emplazamientos de domo en el volcán Sabancaya,

esto se evidencia en las series temporales de flujos de SO<sub>2</sub> donde se registran periodos de calma con procesos de desgasificación pasiva y periodos de aumento en flujo de SO<sub>2</sub> con procesos de desgasificación explosiva.

► Fig. 3 – Serie Temporal de los flujos de SO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera por el volcán Sabancaya - periodo 2019 - 2022.



Durante la formación del domo Huk, se presentan dos periodos claramente identificables en la serie temporal de desgasificación volcánica, en el primer periodo de mayo a octubre donde se observan cuatro procesos de desgasificación explosiva, con flujos de SO<sub>2</sub> de manera intermitente, que incluso superan las 10,000 Ton/día y con un promedio de 1000 Ton/día. En el segundo periodo de octubre a noviembre se evidenció un crecimiento acelerado del domo presentado un sistema parcialmente cerrado, con desgasificación pasiva, registrando emisiones de bajas a moderadas que no superaban las 5,000 Ton/día. Posterior a este proceso, a fines de noviembre se registraron flujos de SO<sub>2</sub> que superan las 10,000 Ton/día, marcando la destrucción parcial del domo Huk y un cambio en el proceso de desgasificación, asumiendo el comportamiento de un sistema semi abierto con desgasificación continua generando explosiones moderadas, esta destrucción fue progresiva hasta el mes de julio del 2020.

El segundo domo denominado Iskay, presentó un proceso similar al primero domo de lava; el incremento y cambio de la desgasificación volcánica para la formación del domo inició a fines de agosto del año 2020, posterior a un evento de intrusión magmática (78.6 millones m<sup>3</sup>) que fue evidenciado por un enjambre sísmico y un sismo sentido principal con magnitud máxima de 5.3; en este primer periodo de formación de domo se evidencia desgasificación explosiva con flujos intermitentes que van de pequeños a moderados, superando las 6,000 Ton/día, esto se mantiene hasta fines de octubre. Posterior a esto la desgasificación es pasiva y continua, con valores que no superan las 5,000 Ton/día, marcando el inicio de la destrucción parcial del segundo domo.

El domo Kimsa fue el tercer domo del volcán Sabancaya; este domo presenta un primer proceso de formación de manera endógena, en los meses de abril a junio del 2021, posterior a un evento de intrusión

magmática (130 millones m<sup>3</sup>). En este proceso se evidenció un periodo de desgasificación explosiva, registrándose flujos grandes de SO<sub>2</sub> que superan las 8,000 Ton/día y un periodo de impermeabilidad del conducto con flujos de SO<sub>2</sub> menores a 2,000 Ton/día. En un segundo proceso de afloramiento del domo de junio a julio, se presenta un sistema semicerrado poco permeable, con flujos de SO<sub>2</sub> que no superan las 4,000 Ton/día. En agosto del 2021 se incrementan las emisiones, presentando un flujo grande de SO<sub>2</sub> (7200 Ton/día) que marca el inicio de la destrucción parcial del domo Kimsa, generando un sistema semiabierto con desgasificación continua que no supera las 5,000 Ton/día en los próximos 5 meses.

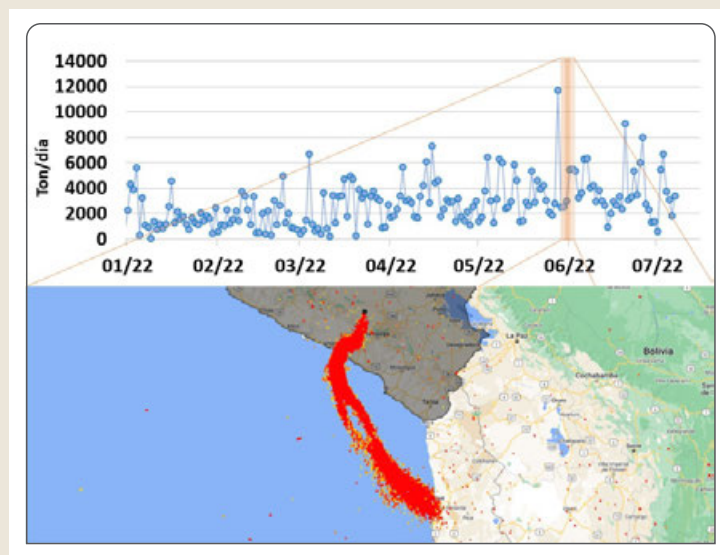
El cuarto domo nombrado Tawa, inicia su formación después de un evento de intrusión magmática en octubre del 2021, en este periodo los valores de flujo de SO<sub>2</sub> disminuyen por la baja permeabilidad del sistema, registrándose desgasificación pasiva con escasos eventos con flujos superiores a los 4,000 Ton/día. El domo Tawa tuvo un corto periodo hasta febrero del 2022 donde los parámetros sísmicos confirman su destrucción.

El domo Pichqa es el quinto domo en el volcán Sabancaya, este se encuentra en desarrollo desde mediados de marzo del 2022, registrándose un enjambre sísmico asociado a intrusión magmática de más de 30 millones de m<sup>3</sup>, lo que se vio reflejado en el incremento de las emisiones de SO<sub>2</sub> con flujos que

han llegado a superar las 10,000 Ton/día. El crecimiento y emplazamiento del domo Pichqa se da de marzo a mayo del 2022, produciendo desgasificación de tipo explosiva con periodos intercalados de acumulación de gases volcánicos (Flujos < 2,000 Ton/día), que genera aumento de presión en el sistema, y periodos de liberación de presión (Flujos > 6,000 Ton/día) que genera emisión de productos a mayor escala. A fines de mayo se registró el flujo más alto de este periodo eruptivo, 12,000 Ton/día de SO<sub>2</sub>, que marcó la destrucción parcial del domo, aumentando ligeramente la cantidad de proyectiles balísticos y el contenido de ceniza en las columnas eruptivas. Durante este último periodo, el conducto volcánico presenta un sistema semiabierto, con presencia del domo en condiciones semipermeables para la desgasificación.

## V. EMISIONES DE SO<sub>2</sub> CAPTADAS EN IMÁGENES TROPOMI

Las imágenes TROPOMI logran captar las emisiones de SO<sub>2</sub> concentradas en la atmósfera, debido a la resolución temporal del satélite sentinel-5P se cuenta con una imagen por día, lo cual limita de cierta manera captar las emisiones en su totalidad, sin embargo, al presentarse emisiones de gran magnitud, en la mayoría de las imágenes queda registrado las emisiones de SO<sub>2</sub> del volcán Sabancaya.



► Fig. 4 - Serie Temporal de los flujos de SO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera (DOAS), la imagen muestra la dispersión de SO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera por el volcán Sabancaya.

Se calcula el total de SO<sub>2</sub> en toneladas para cada imagen del área de estudio, obteniendo valores representativos por día. Como se logra apreciar en la figura 4, las imágenes logran captar las densidades de columna vertical (VCD) de SO<sub>2</sub> abarcando un área de

dispersión que llega a tener 26.98 Km<sup>2</sup> para el día 2 de julio, en el cual se calculó 11,500 toneladas de SO<sub>2</sub>, habiéndose calculado un flujo promedio de 2,300 Ton/día con los instrumentos DOAS.

### CONCLUSIONES

El proceso de formación, presencia y destrucción de domos de lava en el interior del cráter del volcán Sabancaya condiciona las emisiones de SO<sub>2</sub>, esto debido a la variación de permeabilidad del conducto volcánico, presentando un sistema semicerrado que limita y retiene las emisiones de SO<sub>2</sub> en el conducto generando desgasificación pasiva para luego liberar de manera rápida el gas, llegándose a registrar valores elevados de flujo, por otro lado un sistema semiabierto que libera de manera continua los gases volcánicos.

Las emisiones de SO<sub>2</sub> pueden ser identificadas en las imágenes TROPOMI de tal manera que las emisiones sean de gran magnitud como las emisiones del volcán Sabancaya, llegando a ser una importante técnica de monitoreo de la dispersión y cantidad de SO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece de manera especial al área de monitoreo volcánico del Observatorio Volcanológico del INGEMMET y a los colaboradores de este resumen.

### REFERENCIAS

- ▶ Galle, B. M. Johansson, C. Rivera, Y. Zhang, M. Kihlman, C. Kern, T. Lehmann, U. Platt, S. Arellano, S. Hidalgo Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change (NOVAC) – a global network for volcanic gas monitoring: network layout and instrument description. *J. Geophys. Res. – Atmos.*, 115 (D5) (2010), pp. 2156-2202, 10.1029/2009JD011823
- ▶ Campion, R., H. Delgado, D. Legrand, N. Taquet, T. Boulesteix, S. Pedraza y T. Lecocq (2018). Breathing and Coughing: The Extraordinarily High Degassing of Popocatepetl Volcano Investigated With an SO<sub>2</sub> Camera. *Frontiers in Earth Science*, 6, 163, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00163>
- ▶ Theys, N., C. Lerot, M. Van Roozendaal, I. De Smedt, H. Yu (2021). S5P/TROPOMI SO<sub>2</sub> Algorithm Theoretical Document, <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2476257/Sentinel-5PATBD-SO2-TROPOMI>
- ▶ Moussallam, Y., Perters, N., Masias, P. et al. Magmatic gas percolation through the old lava dome of El Misti. *Bull Volcanol* 79, 46. 2017, <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1129-5>