



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ERUPTIVO DEL VOLCÁN SABANCAYA

(Mayo 2022 – Julio 2023)

Informe Técnico N°023-2023/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Setiembre, 2023

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

Informe Técnico

Evaluación del comportamiento eruptivo del volcán Sabancaya (Mayo 2022-julio 2023)

Autores:

Riky Centeno

Katherine Vargas

José Alberto Del Carpio

José Luis Torres

Ivonne Lazarte

Jorge Mamani

David Valdivia

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169 Mayorazgo
Teléfono: 51-1-3172300

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ERUPTIVO DEL
VOLCÁN SABANCAYA**

(Mayo 2022-Julio 2023)

Lima – Perú
Setiembre, 2023

RESUMEN

En el periodo de mayo 2022 a julio 2023, el volcán Sabancaya mantuvo una actividad moderada con la ocurrencia de pequeñas fluctuaciones en la mayoría de los parámetros geofísicos monitoreados por el Instituto Geofísico del Perú. Por ejemplo, la ocurrencia significativa de episodios tremóricos (TRE y TRA) durante los meses de noviembre-diciembre de 2022 y marzo-mayo de 2023, asociados a los procesos de ascenso de magma a la superficie. Por ende, se interpreta que el volcán Sabancaya ha experimentado una intrusión de magma de volumen moderado desde noviembre de 2022. Este fenómeno provoca la disminución de la presión en el interior del volcán con la liberación de gases, vapores de agua y explosiones moderadas con alturas de hasta 4 km y que casi en simultáneo, se produzca el crecimiento de un domo de lava. Este escenario crea una sobrepresión del sistema volcánico, llegando a presentarse un importante enjambre de sismos dVT después del mes de mayo, 2023.

En perspectiva, se plantean dos escenarios: el primero, anticipa que el volcán Sabancaya mantendrá erupciones explosivas moderadas de tipo vulcaniana (IEV 2), acompañadas de columnas de gases y cenizas que podrían superar los 3 km de altura. Segundo (menos probable), se pueda presentar un cambio abrupto en el estilo eruptivo con la ocurrencia de erupciones explosivas con la generación de flujos piroclásticos que podrían recorrer más de 5 km de distancia de la cima, y emisiones masivas de cenizas, que podrían afectar poblaciones aledañas al volcán en un radio de hasta 50 km, además de afectar al tráfico aéreo.

CONTENIDO

RESUMEN

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. RED DE VIGILANCIA MULTIPARÁMETRO**
- 3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ACTUAL**
 - 3.1. Actividad sísmica**
 - 3.1.1. Caracterización de sismos volcánicos**
 - 3.1.2. Análisis de familias sísmicas**
 - 3.2. Actividad superficial y satelital**
 - 3.2.1. Deformación del terreno**
 - 3.2.1.1. Datos GPS/GNSS**
 - 3.2.1.2. Imágenes de Radar (SAR)**
 - 3.2.1.3. Interferometría DinSAR**
 - 3.2.2. Caracterización de emisiones**
 - 3.2.2.1. Altura de columna y dispersión de cenizas**
 - 3.2.2.2. Caída de cenizas**
 - 3.2.2.3. Gases volcánicos**
 - 3.2.3. Radiación térmica satelital**
 - 3.2.4. Inspección aérea del cráter**
- 4. RESULTADOS**
- 5. PRONÓSTICO Y ESCENARIOS FUTUROS**

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

1.- INTRODUCCIÓN

El Sabancaya ($15^{\circ} 49.3' S$, $71^{\circ} 52.7' O$, 5967 m s. n. m.) es uno de los volcanes más activos y jóvenes del sur del Perú, se ubica en el departamento de Arequipa, provincia de Caylloma, a 18 km al sur del valle del Colca. Asimismo, sobre sus alrededores existen una serie de localidades y distritos, tales como Achoma, Cabanaconde, Coporaque, Chivay, Ichupampa, Huambo, Maca, Lluta, Tapay y Yanque (Figura 1); con una población estimada de 10 204 habitantes asentados en un radio de 30 km alrededor del volcán (Del Carpio et al., 2022). Sin embargo, esta cifra puede variar en el tiempo debido a la afluencia de turistas en diferentes épocas del año.

Hoy en día, el volcán Sabancaya mantiene un nuevo y largo proceso eruptivo que se inició el 6 de noviembre de 2016, con la ocurrencia diaria de explosiones vulcanianas, las cuales emiten columnas de cenizas y gases de hasta 5 500 metros de altura sobre la cima del volcán. Por el momento, la erupción es de baja a moderada intensidad, con un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 2. Asimismo, su registro sísmico sugiere algo similar, con un rango de energía sísmica comprendida entre 0.01 a 90 MJ (megajoule), en especial durante el año 2019 (Machacca et al., 2023).

Asimismo, eventualmente presenta episodios de extrusión o crecimiento intermitente de un cuerpo lava (domo) al interior del cráter activo. Dicho domo se instaló en febrero de 2017 y tuvo un crecimiento acelerado en el 2019, que se condice con un notable incremento en número y energía de las explosiones (Coppola et al., 2022). Por último y, no menos importante, es la ocurrencia de enjambres de sismicidad somera y distal asociados a intrusiones magmáticas que interactúan con el sistema hidrotermal (Machacca et al., 2023).

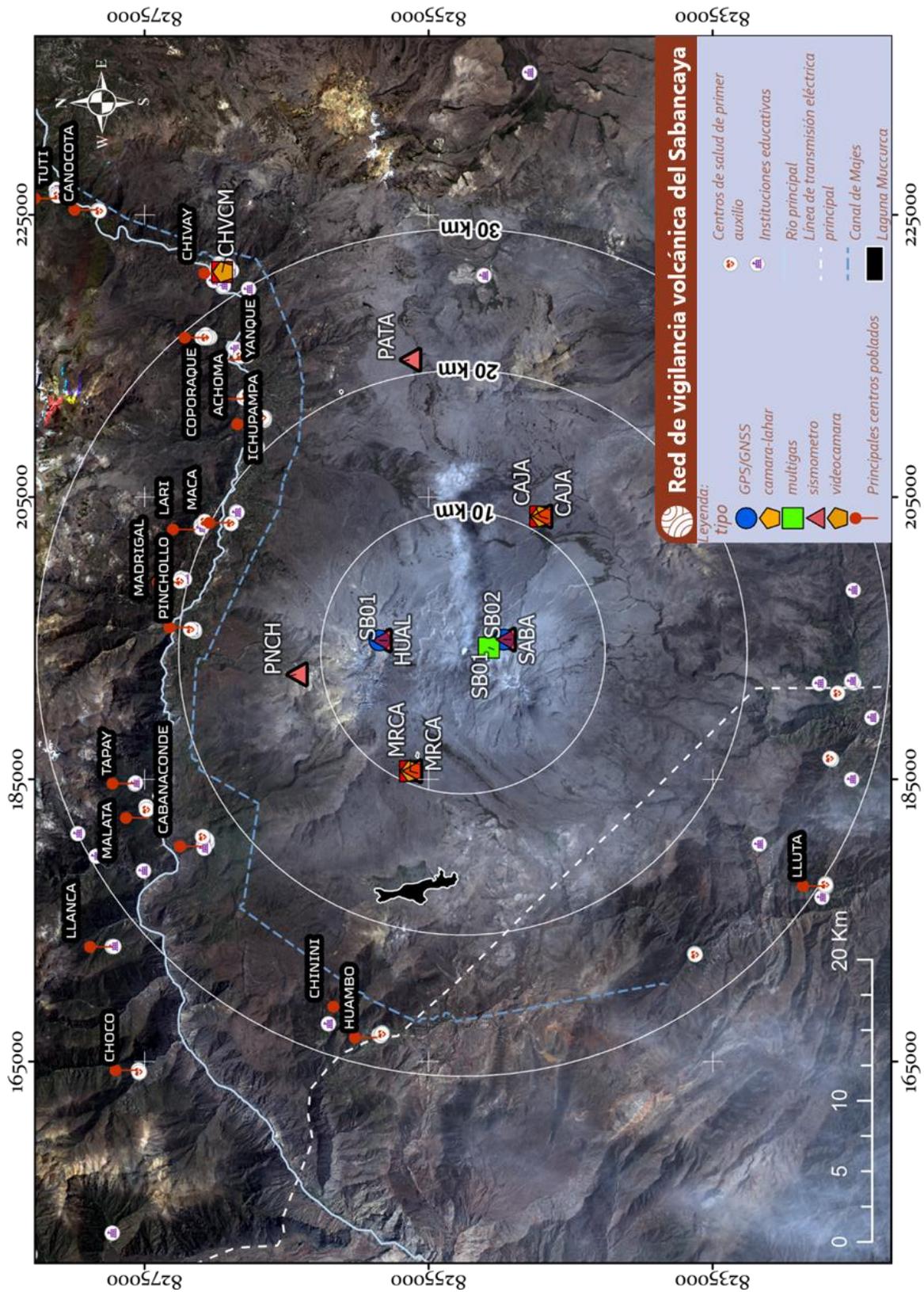


Figura 1.- Mapa de Ubicación de la Red de vigilancia volcánica del Sabancaya y distritos y centros poblados ubicados dentro del radio de 30 km del volcán.

El presente estudio muestra resultados del seguimiento y análisis continuo que realiza el Instituto Geofísico del Perú (IGP) sobre el reciente comportamiento eruptivo del Sabancaya, del periodo del 22 de mayo de 2022 al 31 de julio de 2023, con el objetivo de dar a conocer en detalle los procesos y cambios internos que ocurren al interior del volcán y su relación con su propia dinámica externa. Además, de identificar patrones eruptivos que pudieran considerarse como precursores de eventos explosivos y ser una herramienta efectiva en la evaluación del riesgo durante escenarios críticos de actividad volcánica.

2.- RED DE VIGILANCIA MULTIPARÁMETRO

La red de vigilancia del volcán Sabancaya consta de seis estaciones multiparamétricas, que incluyen 6 sismómetros de banda ancha, 2 receptores GNSS, 3 cámaras de video científicas y 1 sensor multigas (Figura 1). La información que se recopila permite monitorear y analizar la dinámica eruptiva (interna y externa) del Sabancaya en tiempo casi real; y que permite al Instituto Geofísico del Perú (IGP), a través del Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), brindar información oportuna a las autoridades integrantes del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD) y que, a su vez constituyen el sistema de alerta temprana ante erupciones volcánicas a nivel nacional.

Asimismo, se realizan campañas de monitoreo temporal en la zona del cráter o lugares estratégicos aledaños al volcán. Por ejemplo: desde el aire, a través del sobrevuelo de drones y aeronaves tripuladas; como en terreno, mediante la visita a centros fumarólicos y fuentes termales aledañas al volcán. Todo ello, con la finalidad de obtener información sobre cambios morfológicos, flujos de calor, temperatura de fluidos y concentración de gases volcánicos. Así también, se efectúan inspecciones de campo y muestreo de los productos volcánicos, como caída de cenizas y bloques balísticos emitidos durante explosiones volcánicas del Sabancaya. Del mismo modo, se utilizan sistemas de información satelital, para recopilar datos que midan cambios de temperatura y concentración de gas SO_2 , sobre el cráter actual.

3.- ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ACTUAL

A continuación, se muestra un análisis detallado sobre la dinámica interna (sismicidad) y externa (deformación, termometría, emisiones de gas SO₂, y características de la ceniza) observada en el volcán Sabancaya, entre el 22 de mayo de 2022 al 31 julio de 2023.

3.1. Actividad sísmica

3.1.1. Caracterización de sismos volcánicos

La sismicidad predominante observada en el volcán Sabancaya corresponde a eventos sísmicos de tipo Largo Periodo (LP) y de tipo explosión (EXP). Así también, ocurren de vez en cuando episodios tremóricos de 2 tipos: espasmódico (TRE) y armónico (TRA). A diferencia de anteriores, estos últimos son eventos cuya amplitud y duración es sostenida en el tiempo. Sobre su origen, todos los eventos antes mencionados guardan relación directa con el movimiento de fluidos en el interior de los conductos volcánicos (acumulación y ascenso de magma), como al exterior del volcán Sabancaya (formación de domos, emisiones de cenizas y gases volcánicos).

Durante el periodo de análisis, los eventos de tipo LP muestran una tasa de ocurrencia diaria de 50 eventos por día y una energía de 0.1 MJ en promedio (Figura 2). Respecto al periodo anterior, se observa un ligero incremento en número (35 LP/día), pero en energía, se mantiene muy similar (<0.1 MJ) (Figura 2a y b). Mientras que, los eventos de tipo explosión (EXP) mostraron una tasa de ocurrencia promedio de 35 eventos por día y una energía promedio de 0.5 MJ, y que respecto al periodo anterior de actividad (2021-2022) se mantiene muy similar (34 EXP/día y energías < 0.5 MJ en promedio).

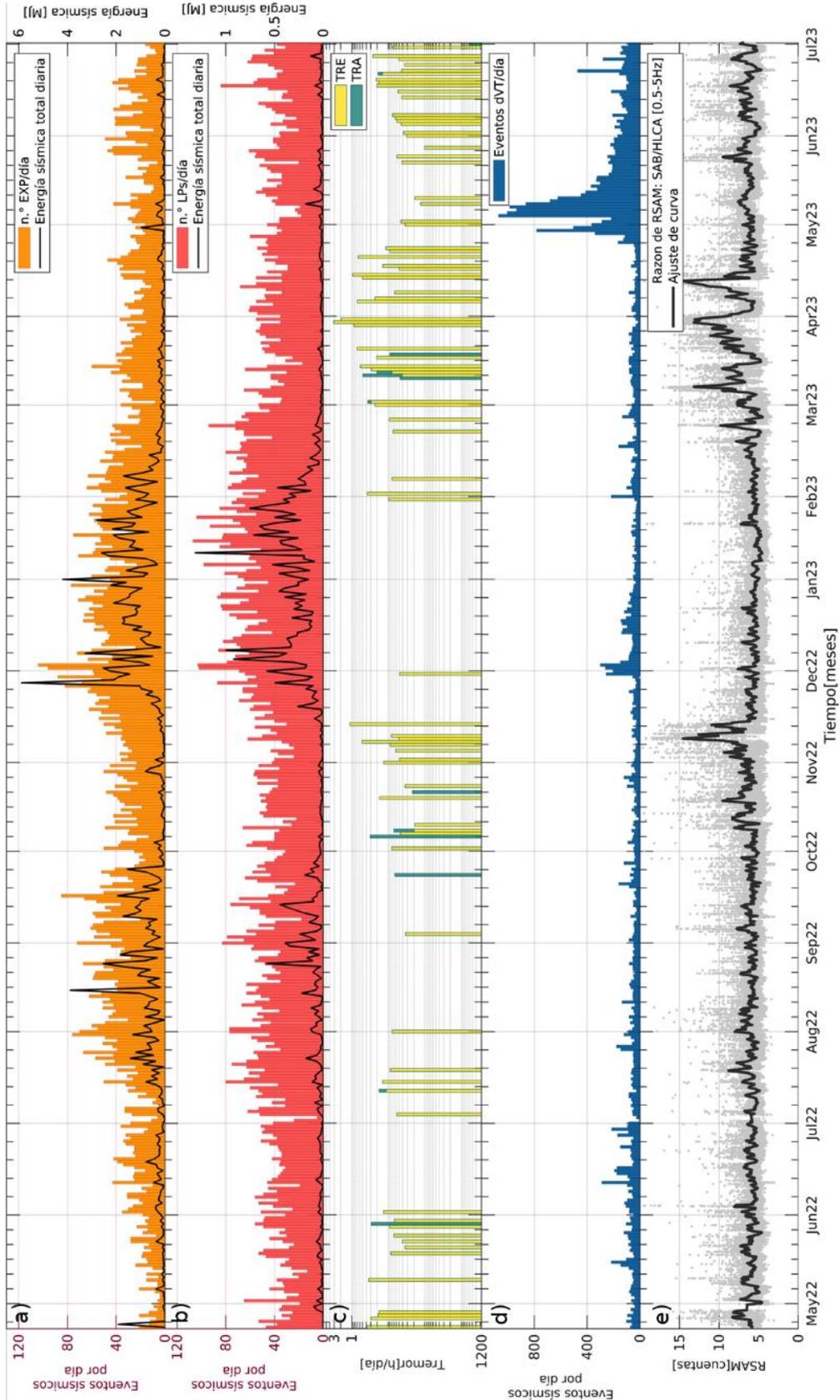


Figura 2.- Distribución temporal y energética de a) explosiones, b) eventos LP, c) duración total diaria de episodios tremóricos (TRE y TRA), d) ocurrencia diaria de eventos dVT y e) la curva promedio de amplitud sísmica (RSAM).

Por su parte, los episodios tremóricos, en especial los espasmódicos (TRE) ocurrieron en algunas ocasiones durante los meses de diciembre de 2022 y abril de 2023; con una duración máxima de hasta 3 horas y 24 minutos, esto el día 28 de abril de 2023, y que está dentro del rango de valores normales (< 12 h de tremor) observados en el presente proceso eruptivo. Asimismo, pero de manera menos frecuente, ocurrieron los tremores armónicos (TRA), en particular durante los meses de junio y noviembre de 2022, así como entre los días 9 y 10 de abril de 2023 (Figura 2c).

Por otro lado, los eventos Volcano-Tectónico distales (dVT) son sismos que ocurren lejos del volcán, a distancias de ~ 3 a 30 km y se localizan sobre fallas regionales activas (principales y secundarias) (Machacca et al., 2023). Durante el tiempo de estudio, ocurrieron dos enjambres notables: el primero, a finales de diciembre de 2022 y enero 2023; y el segundo (más notorio), a finales del mes de mayo de 2023 y que, hasta después del periodo del presente estudio, continuó su proceso. Este último inició el 28 de mayo de 2023, con un sismo de magnitud $M4.5$ ubicado a 18 km al Sur del distrito de Maca, y cinco días después (2 de junio), sucede el evento principal con una $M5.2$ situado a 17 km al Sur-Suroeste del distrito de Ichupampa (Figura 3). Desencadenando un fuerte sacudimiento del suelo en gran parte de la zona de influencia del valle del Colca (Figura 2d)

Por último, se han observado picos o incrementos discretos en la curva de RSAM (medida de la Amplitud Sísmica en Tiempo Real), y que son coherentes con el nivel de actividad tremor. En especial, durante los meses de noviembre y diciembre 2022, como posteriormente, entre la segunda quincena de marzo y la primera quincena de mayo de 2023 (Figura 2e).

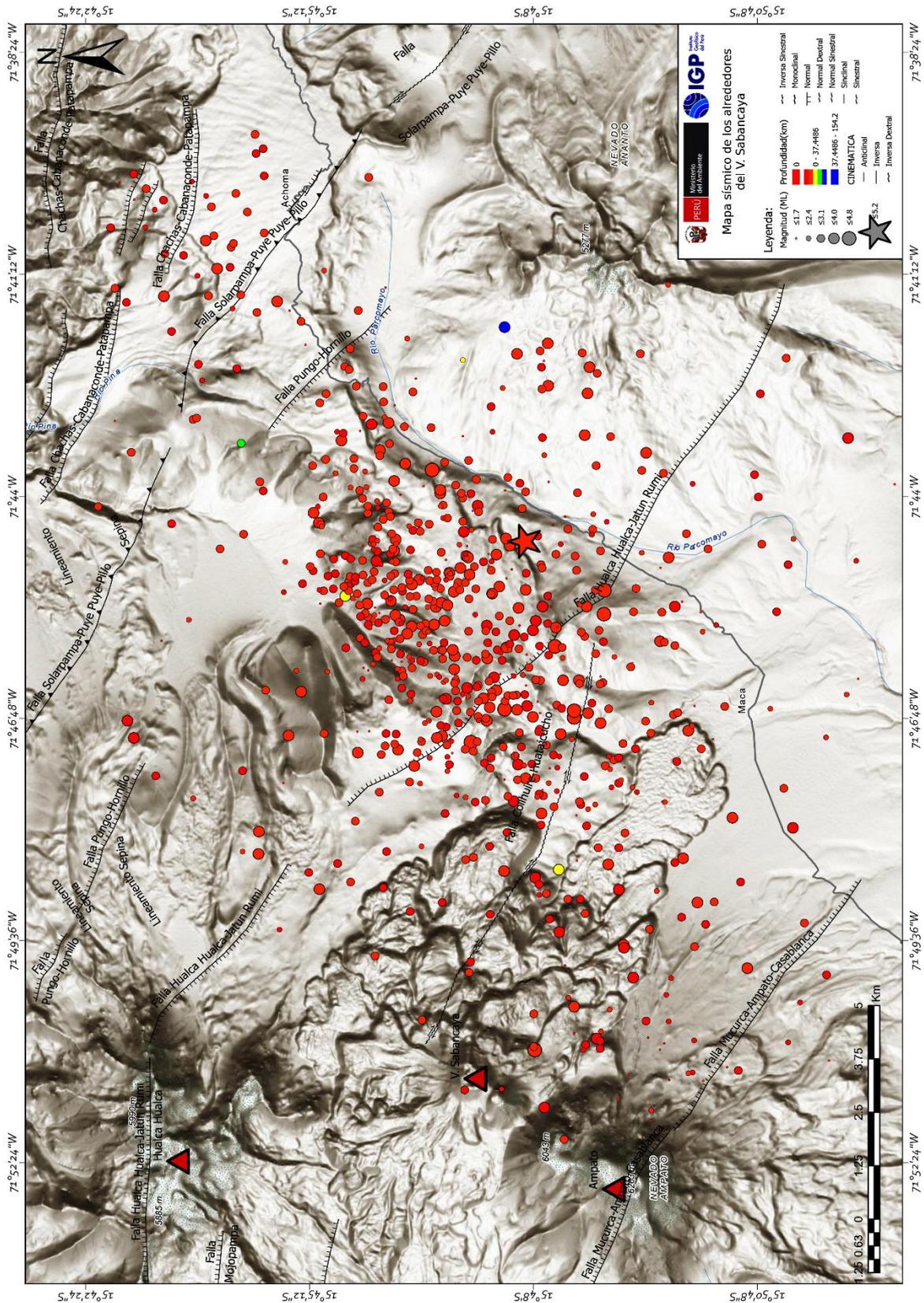


Figura 3.- Distribución espacial de la sismicidad en los alrededores del volcán Sabancaya reportadas por el Centro Sismológico Nacional (CENSIS – IGP), desde enero a junio de 2023.

3.1.2. Análisis de familias sísmicas

El estudio y análisis de familias sísmicas en volcanes puede proporcionar precursores eruptivos y proporcionar información valiosa sobre la dinámica del sistema eruptivo (Rowe et al., 2004; White & McCausland, 2016). Durante el periodo de análisis se han identificado 48 familias sísmicas: 7 de baja frecuencia o "LF" y 41 de alta frecuencia o "HF".

Las siete familias de sismos "LF" reciben este nombre porque su energía se concentra en un rango de bajas frecuencias que oscila entre 1-5 Hz. Cada una tiene entre 101 y 798 eventos, todos de tipo explosión (EXP). La mayoría duró más de un mes, ello debido a su mecanismo fuente no destructivo. Sin embargo, dos se consideran nuevas (S5 y S7) según la frecuencia con la que ocurren en el tiempo. La primera ocurrió a comienzos de octubre de 2022, mientras que la segunda ocurrió a mediados del mes de noviembre de 2023 (Figura 4). Ambas parecen tener relación directa con la extrusión y formación de un nuevo domo de lava visible en el cráter del volcán (p.ej. Frémont y Malone, 1987; Green y Neuberg, 2006; Petersen ,2007; Sanders et al., 2015). Especialmente a finales de marzo y principios de abril de 2023.

Además, se han observado 41 familias de sismos llamados "HF", en este caso su denominación se debe a su concentración de energía en altas frecuencias (>5 Hz). Cada uno de ellos contó con entre 101 y 1071 eventos, todas de tipo dVT. En todo el periodo, se han identificado 11 secuencias notables, y después de la secuencia 11 (S11), a fines de mayo de 2023 hasta después de julio de este año, 11 familias nuevas se han observado (Figura 4). La mayoría de estos sismos tuvieron lugar en los sectores Este y Noreste del volcán, a una distancia máxima de 20 km (Figura 3). Previamente, se mencionó que su origen se debe a la

activación de fallas (o grietas preexistentes) cercanas al complejo volcánico Ampato-Sabancaya y Hualca Hualca.

Por ende, y como también se menciona en el trabajo de Machacca et al. (2023) la principal fuente de energía para ocurrencia de sismos “HF” sería el ascenso de magma en profundidad. Asimismo, el mecanismo de su activación involucraría la transmisión de esfuerzos y presiones de fluidos a través del sistema hidrotermal somero asociado a estructuras tectónicas permeables o fallas (White et al., 2011).

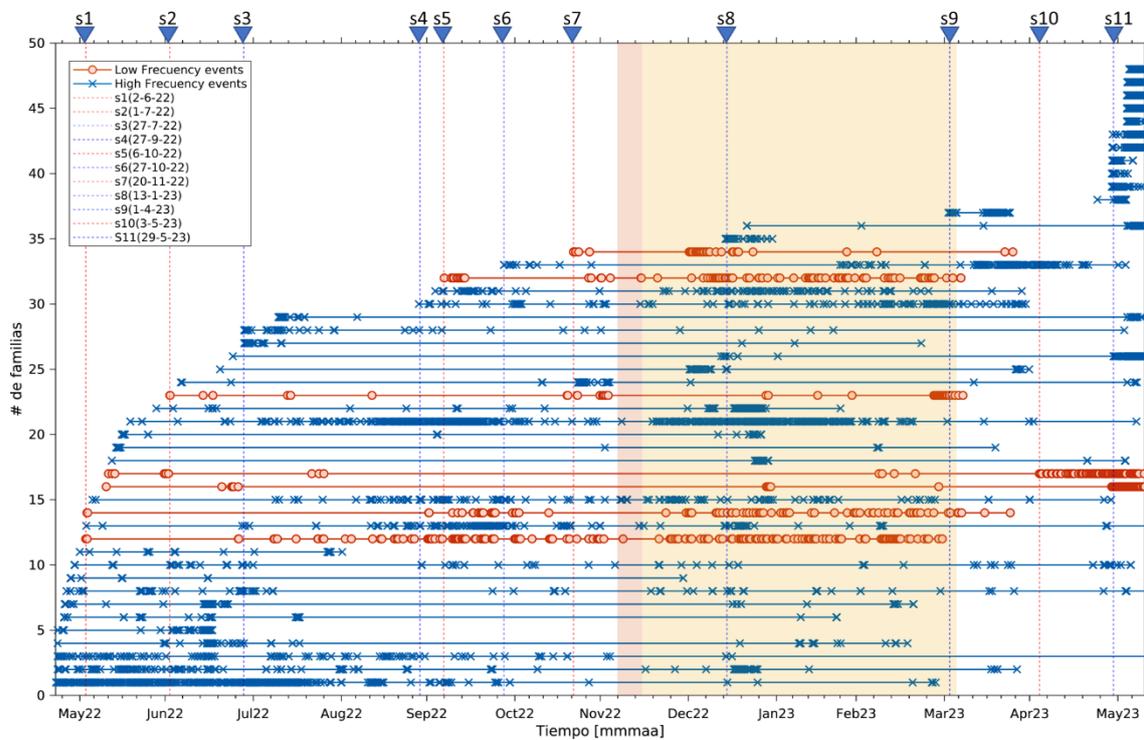


Figura 4.- Familias sísmicas detectadas en el volcán Sabancaya: 48 familias sísmicas de alta(azules) y baja(rojos) frecuencia, identificadas durante los meses de mayo de 2022 y julio de 2023.

3.2. Actividad superficial y satelital

3.2.1. Deformación del terreno

3.2.1.1. Datos GPS/GNSS

El monitoreo de la deformación del suelo que ocurre en inmediaciones del volcán Sabancaya se cuantificó basándose en los

datos GNSS de la estación "SB01", ubicada a 6 km al norte del volcán Sabancaya (Figura 1). Sobre la principal fuente de deformación observada anteriormente por MacQueen et al. (2020) y Boixart et al. (2020).

Entre mayo de 2022 y julio de 2023, se detectó un desplazamiento positivo de 2.51 ± 0.07 cm/año en la componente vertical (Figura 5), lo que sugiere una inflación o levantamiento del sector norte del volcán Sabancaya. Dicho comportamiento es usual en el volcán desde que comenzó la intranquilidad sísmica en el año 2013. El registro de las componentes horizontales (Figura 5) muestra desplazamientos mínimos de 0.44 ± 0.02 cm/año, en dirección este y de 0.12 ± 0.02 cm/año, en dirección norte.

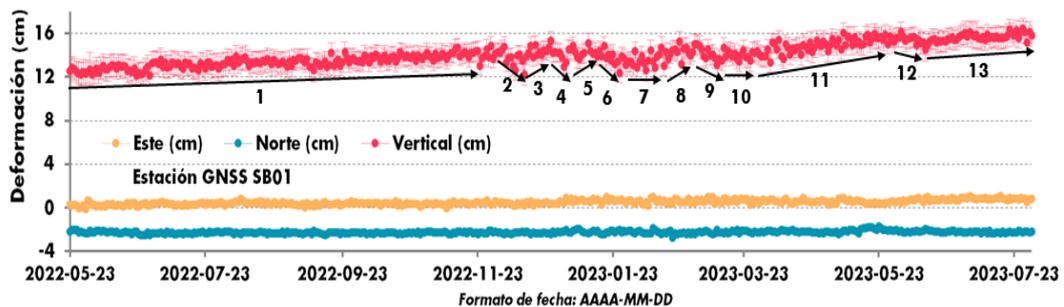


Figura 5.- Serie de tiempo de la estación GNSS SB01 para las componentes Este (puntos amarillos), Norte (puntos verdes) y Vertical (puntos rojos) registradas entre el 23 de mayo de 2022 y el 31 de julio de 2023. Las flechas indican períodos de incremento o disminución de la deformación en la componente vertical.

El análisis sobre la evolución de la deformación evidencia que, durante mayo y mediados de noviembre de 2022, se observa una velocidad de deformación positiva casi constante en la componente vertical (Figura 5, flecha 1). Luego, desde fines de noviembre de 2022 a marzo de 2023, se observan oscilaciones de inflación y deflación en la componente vertical (Figura 5, flechas 2 al 10).

Finalmente, de abril a mayo de 2023, se volvió a registrar una tasa constante de deformación positiva (Figura 5, flecha 11). No

obstante, desde fines de mayo a la quincena de junio de 2023, se observa un desplazamiento negativo (deflación) en la componente vertical (Figura 5, flecha 12). Posterior a la quincena de junio hasta el 31 de julio de 2023, la inflación continúa, pero con una menor velocidad a la registrada antes (Figura 5, flecha 13).

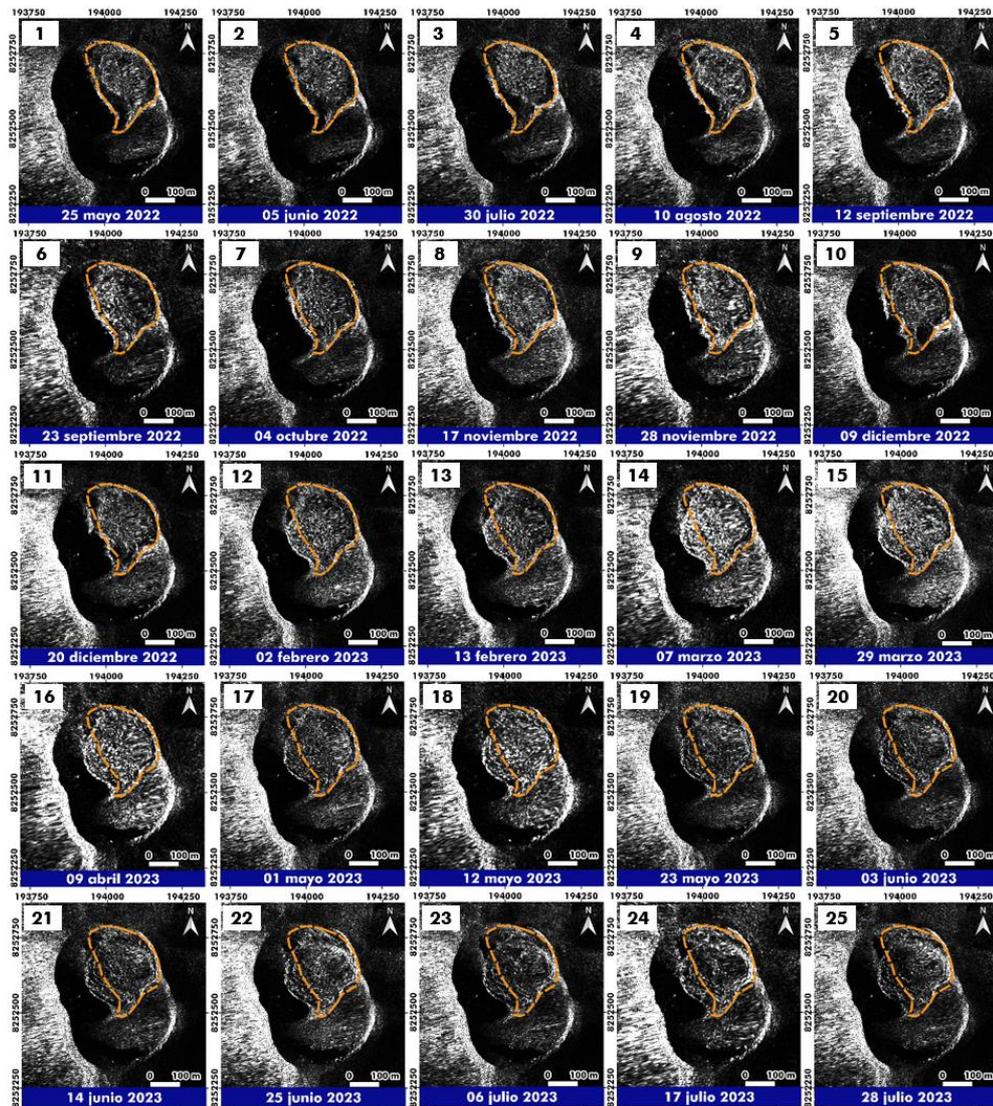
3.2.1.2. Imágenes de radar (SAR)

El análisis de imágenes de radar permite detectar cambios en la morfología del cráter del volcán Sabancaya, debido a que la emisión de pulsos electromagnéticos puede penetrar nubes y columnas eruptivas (Figura 6). Entre mayo y octubre de 2022, se observa una acumulación de un cuerpo de lava o restos de domos de lava (más superficial) que se concentra en el sector noreste del cráter del volcán Sabancaya, ocupando un área aproximada de 42 800 m² (Figura 6, escenas 1-7).

Luego, desde noviembre de 2022 a abril de 2023 se observan cambios importantes en la zona del cráter del Sabancaya, en el que el cuerpo de lava acumulado o restos de domos de lava se ha extendido, hasta ocupar parte del sector noroeste del cráter (Figura 6, escenas 8-16). Posteriormente, durante los siguientes meses (mayo a julio de 2023), el cuerpo de lava o restos de domos de lava extruido ocupa mayor área del cráter del Sabancaya (tonos más claros), alcanzando un área de ~56 100 m² (Figura 6, escenas 17-25).

Finalmente, a partir del perfil de profundidad del cráter del Sabancaya (Figura 7a), se ha estimado una altura de material extruido de 58 m, entre diciembre de 2022 y marzo de 2023. Asimismo, tomando el área máxima antes mencionada se obtuvo un volumen de material extruido de 3.3×10^6 m³.

Dicho material está compuesto por restos de los domos de lava, que se han formado y destruido durante el actual proceso eruptivo; así como el nuevo material que es emitido constantemente.

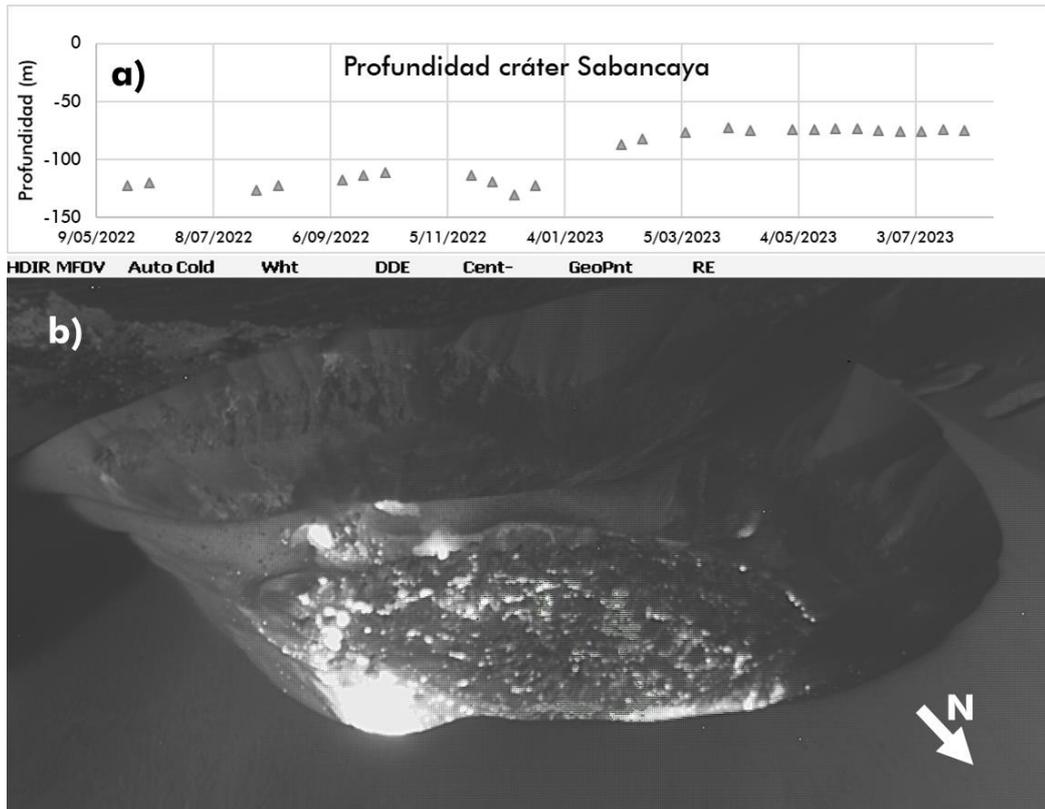


 Borde de material prominente (más superficial) en el cráter del volcán Sabancaya a mayo de 2022

Figura 6.- Secuencia de imágenes de radar TerraSAR-X de mayo de 2022 a julio de 2023. El borde de línea discontinua color naranja, representa el material prominente en el cráter del volcán Sabancaya en mayo de 2022.

A partir de la metodología de Coppola et al. (2022), se ha estimado cambios en profundidad del cráter del volcán Sabancaya, entre mayo de 2022 y julio de 2023, utilizando la silueta de las sombras de las imágenes TerraSAR-X (Figura 7a).

Se observa que, la zona que cubre el cuerpo de lava o domos de lava (zona norte del cráter) gana mayor altura a partir del año 2023, corroborada con imágenes aéreas IR (infrarrojas) adquiridas el 3 de julio de 2023, con el apoyo de la Fuerza Aérea del Perú (Figura 7b).



3.2.1.3. Interferometría (DInSAR)

Otra forma de medir la deformación del volcán es mediante imágenes de radar "DInSAR" (Interferometría diferencial de radar de apertura sintética). Para ello, se analizaron 33 imágenes satelitales de radar adquiridas desde el 29 de mayo de 2022 al día 23 de julio de 2023, en órbita descendente, con la finalidad de construir una serie de tiempo.

El mapa de velocidad de deformación en línea de vista del satélite "LOS" muestra una inflación frecuente, centrada en el sector noreste del volcán Sabancaya (Figura 8a, círculo rojo). La serie de tiempo en el punto del GNSS SB01 (Figura 8b) muestra una velocidad de 2.42 ± 0.17 cm/año, similar a lo observado con los datos GNSS (Figura 5).

Por otro lado, en medio de la zona de inflación, se observa un área con menor velocidad (Punto 2), asociada a la sismicidad registrada a finales de mayo de 2023, entre los distritos de Maca y Achoma. En la Figura 8c se muestra una serie de tiempo, se observa que, durante la ocurrencia del enjambre de sismos, no existe deformación (0 cm/año) (Figura 8c).

3.2.2. Caracterización de las emisiones

3.2.2.1. Altura de las columnas y dispersión de cenizas

Para caracterizar la altura y dispersión las cenizas del volcán Sabancaya se hizo uso de tres cámaras científicas de video vigilancia instaladas en los sectores noreste (Chivay), sureste (Cajamarca) y noroeste (Mucurcca) del volcán (Figura 1). Entre los meses de junio y julio de 2022, se observó una actividad explosiva moderada, las cuales generaron plumas de gas y ceniza que alcanzaron alturas de hasta 4200 m sobre la cima del volcán, especialmente los días 13 de junio y 3 de julio (Figura 9).

Así mismo, durante los meses de agosto a diciembre de 2022, las emisiones presentaron un ligero descenso, con emisiones de gas y ceniza, que en promedio alcanzaron alturas de hasta 2000 m. Sin embargo, el 12 de diciembre de 2022 se registró una explosión cuya altura de columna eruptiva llegó a 4000 m sobre la cima del volcán.

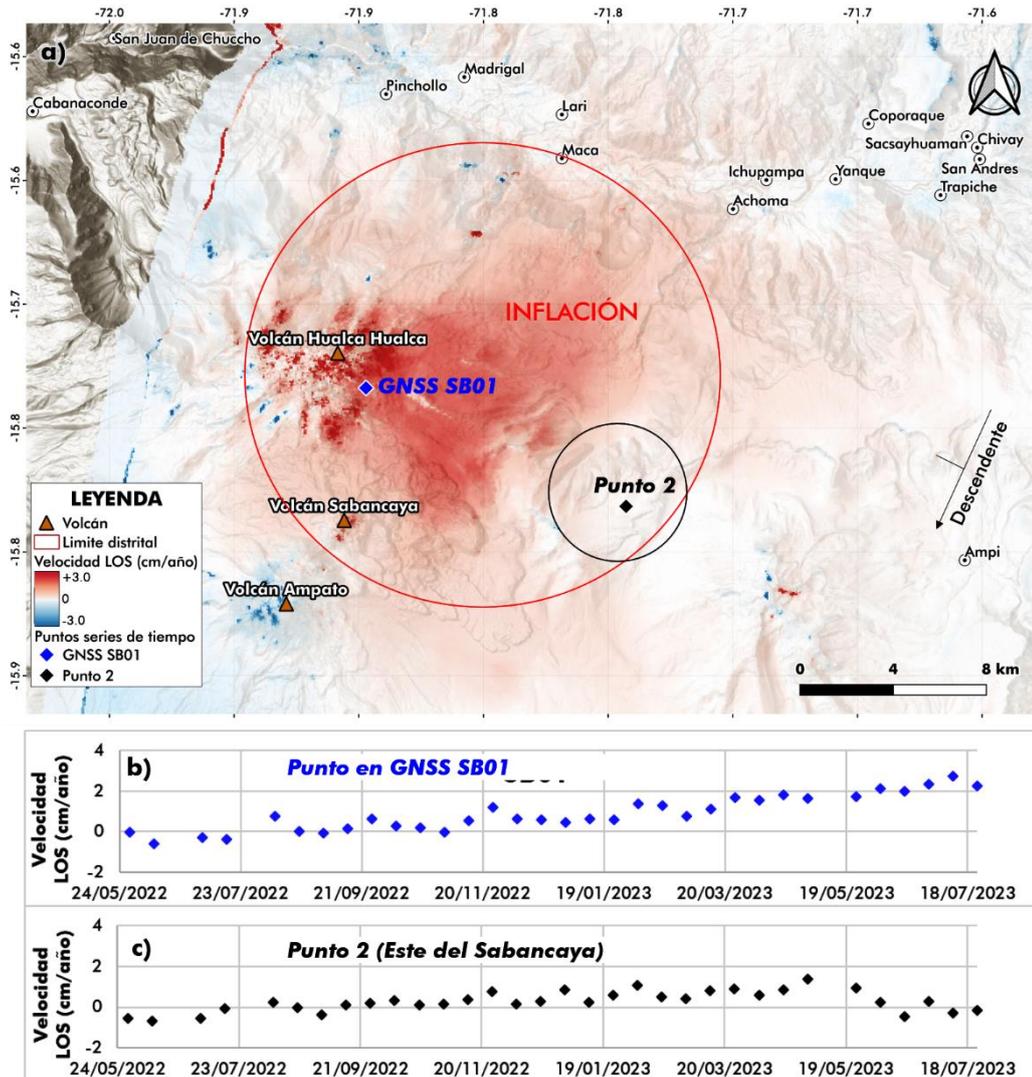


Figura 8.- a) Mapa de velocidad de deformación LOS, obtenido a partir de 33 imágenes de radar, desde el 29 de mayo de 2021 al 23 de julio de 2023 en órbita descendente, así como series temporales en los puntos a) GNSS SB01 y c) punto 2.

La ceniza dispersada por las explosiones producidas en este periodo, siguieron una dirección predominante hacia el sur y sureste del volcán Sabancaya; es decir, en dirección de estancias y zonas de pastoreo.

Finalmente, durante el primer semestre del año 2023, las emisiones de ceniza ocurridas en el volcán Sabancaya fueron de manera sostenida. En este periodo las plumas de gases y cenizas en promedio alcanzaron alturas de 2000 m sobre la cima del volcán.

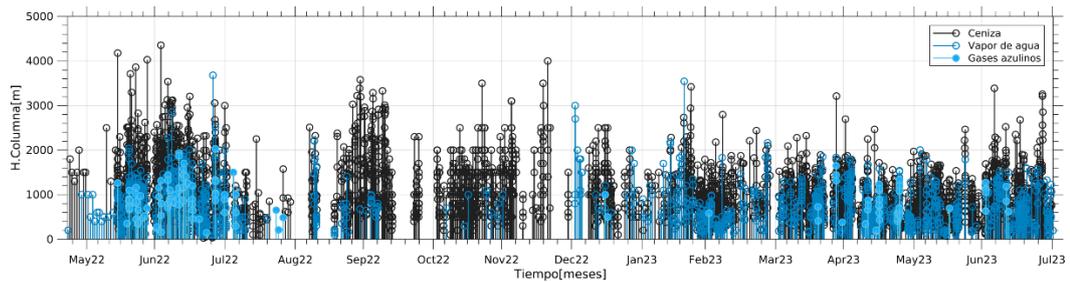


Figura 9.- Altura de columna de ceniza sobre el cráter. Los diferentes colores se refieren a la emisión de vapor de agua (gris claro), cenizas (gris oscuro) y gases azules (azul claro).

3.2.2.2. Caída de cenizas

Entre el 1 y el 3 de junio de 2023, se realizaron mediciones de espesor de cenizas emitidas desde el cráter actual del volcán Sabancaya a distancias de entre 2 a 34 km, hacia los sectores sureste y noreste, así como en los distritos de Chivay y Achoma (Figura 10).

Asimismo, en la Figura 10 se observa que la ceniza alcanzó un espesor de 5 mm a 2 mm, a una distancia de 2 a 10 km del cráter del volcán Sabancaya, mientras que la ceniza tiene un espesor de 2 mm a 1 mm, a una distancia de 10 a 20 km. Los espesores de ceniza son menores a 0.5 mm, a distancias superiores a 20 km. Dichos espesores son clásicos de un estilo eruptivo de tipo vulcaniano.

A continuación, en la Figura 11 se muestra evidencia gráfica de las mediciones de espesores de capas de ceniza del volcán Sabancaya durante la campaña de campo realizada en junio de 2023

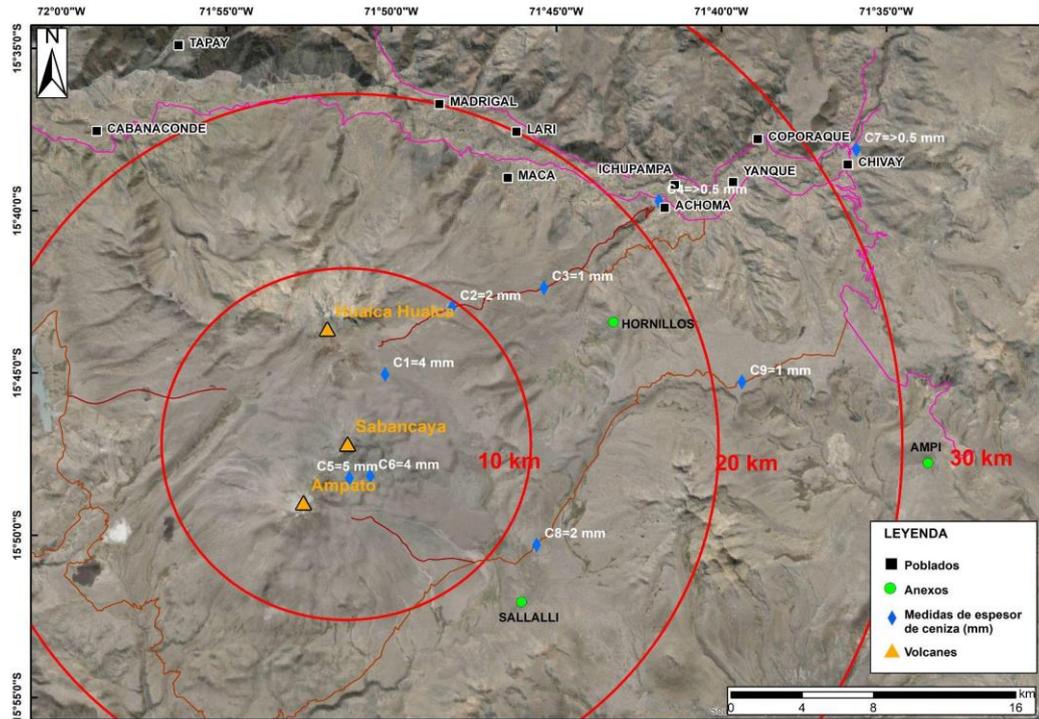


Figura 10.- Mapa de ubicación de puntos de medición de espesores de ceniza (rombos azules) depositados en zonas proximales y distales del volcán Sabancaya. C1 a C9 son puntos de medición.

3.2.2.3. Gases volcánicos

Durante el periodo mayo de 2022 a julio de 2023, se recopilaron datos del flujo de gas dióxido de azufre (SO_2) a partir del sistema "MOUNTS" (Valade et al., 2019). El flujo promedio obtenido para este periodo es de 721 toneladas por día (T/DÍA) de SO_2 , mientras que, durante los meses de junio-julio y octubre-diciembre del año 2022, además de febrero-marzo del 2023 los flujos fueron los más altos y en promedio se registraron 4094 ton/día de SO_2 .

Después de mediados de junio 2023, se observa que el SO_2 muestra un incremento notable de los datos. Probablemente, en los siguientes meses dicho incremento se mantenga con valores similares o por encima de 721 ton/día de SO_2 , lo cual es normal para un volcán con desgasificación moderada a intensa como el Sabancaya.



Figura 11.- Medidas del espesor de ceniza en los sectores sureste y noreste del volcán Sabancaya. a) Espesor de ceniza al noreste del cráter del volcán (punto C3). b) Espesor de ceniza al noreste del cráter del volcán (C1). c) Espesor de ceniza al sureste del cráter del volcán (C5). d) Espesor de ceniza al sureste del cráter del volcán (C6). e) Espesor de ceniza al sureste del cráter del volcán (C8). f) Espesor de ceniza al noreste del cráter del volcán (C9).

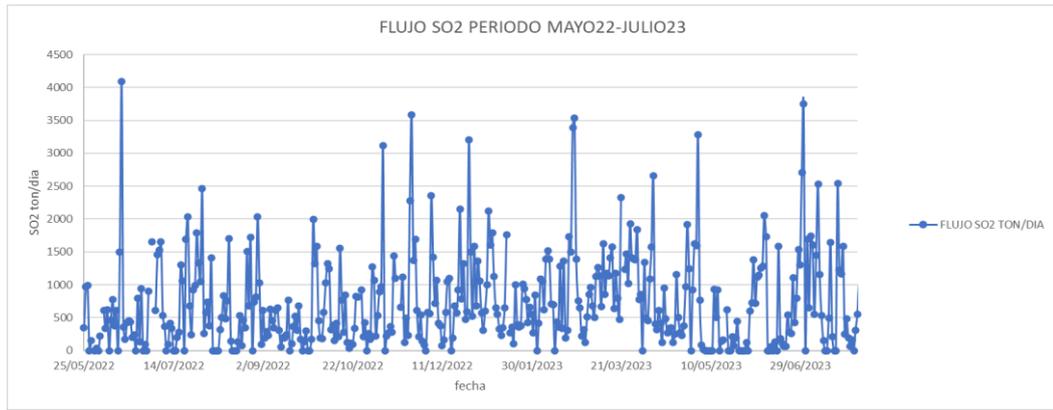


Figura 12.- Flujos de gas dióxido de azufre (SO₂) para el periodo mayo 2022 a julio 2023(Fuente: sistema "MOUNTS").

3.2.3. Radiación térmica satelital

Respecto a la detección de puntos calientes o anomalías térmicas a nivel del cráter del volcán Sabancaya, el sistema satelital MIROVA (Coppola et al., 2020) reportó anomalías térmicas con valores menores de 68 MW (Figura 13), ligadas a la presencia cuerpos de lava incandescente visible en la superficie del cráter del volcán.

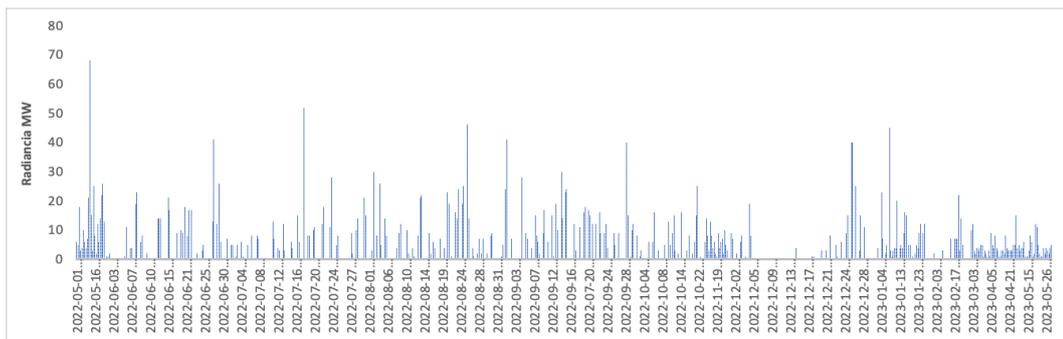


Figura 13.- Serie de tiempo de las anomalías térmicas detectadas por el sistema MIROVA en el volcán Sabancaya durante el periodo mayo de 2022 a julio de 2023.

3.2.4. Inspección aérea del cráter

La Figura 14, muestra una vista aérea del flanco noroeste volcán Sabancaya y una pluma de gases y cenizas de 700 m de altura registrada el día 3 de julio del presente, a las 16:12 HL (hora local). La

dispersión de cenizas tiene una dirección preferente al noreste y que no llegó a superar distancias más de 7 km.

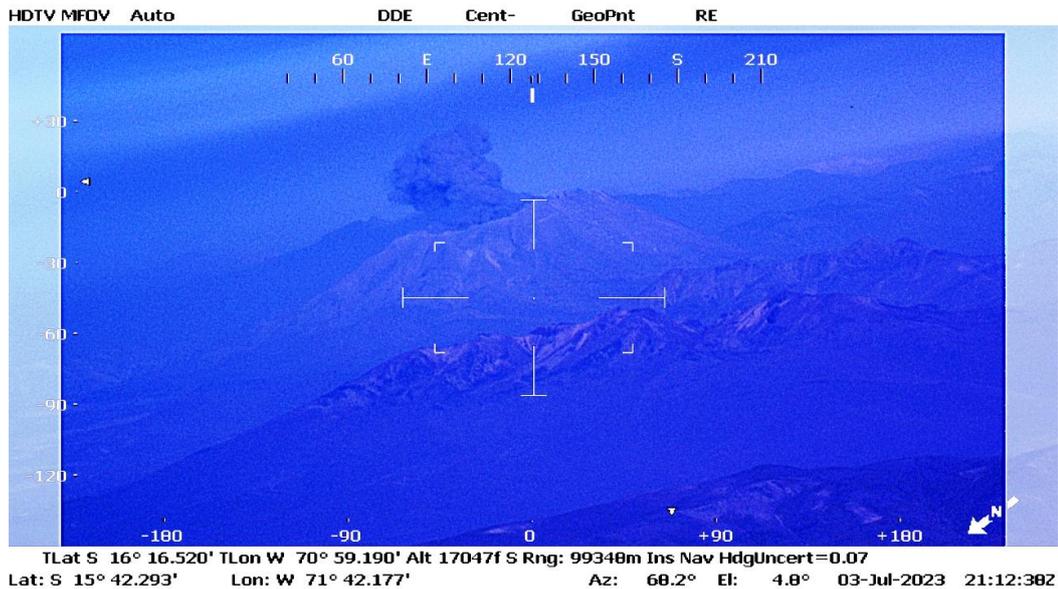


Figura 14.- Fotografía aérea del volcán Sabancaya tomada desde noroeste, sobre la zona del Hualca Hualca.

En la Figura 15, se observan dos anomalías térmicas detectadas en el borde sureste (A1) y noroeste (A2) del cráter del Sabancaya. Según el análisis, ambas anomalías están relacionadas a la presencia de un pequeño cuerpo de lava que alcanzó temperaturas de 865 °C. Así también, es necesario mencionar que la cantidad de ceniza y gas que cubría estos depósitos al momento de la captura de la imagen podría haber menguado los valores de temperatura medidos, que efectivamente pueden ser más altos para cada anomalía (Figura 16).

Por último, se realizaron 7 escaneos para detectar el flujo del gas SO₂ emitido por el volcán Sabancaya, iniciando dicho escaneo desde las 16:03 h hasta las 16:15 h. Los parámetros utilizados para el procesamiento de los datos fueron: 6.7 m/s de velocidad de viento y 3 km de distancia al cráter.

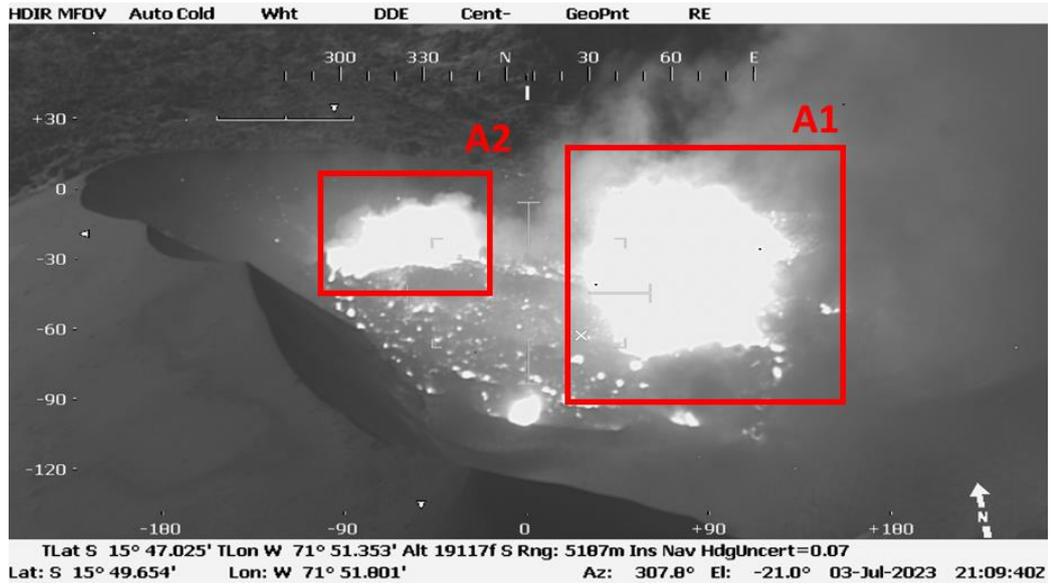


Figura 15.- Anomalías térmicas detectadas en el cráter del volcán Sabancaya, obtenidas a partir del sobrevuelo efectuado el día 3 de julio de 2023.

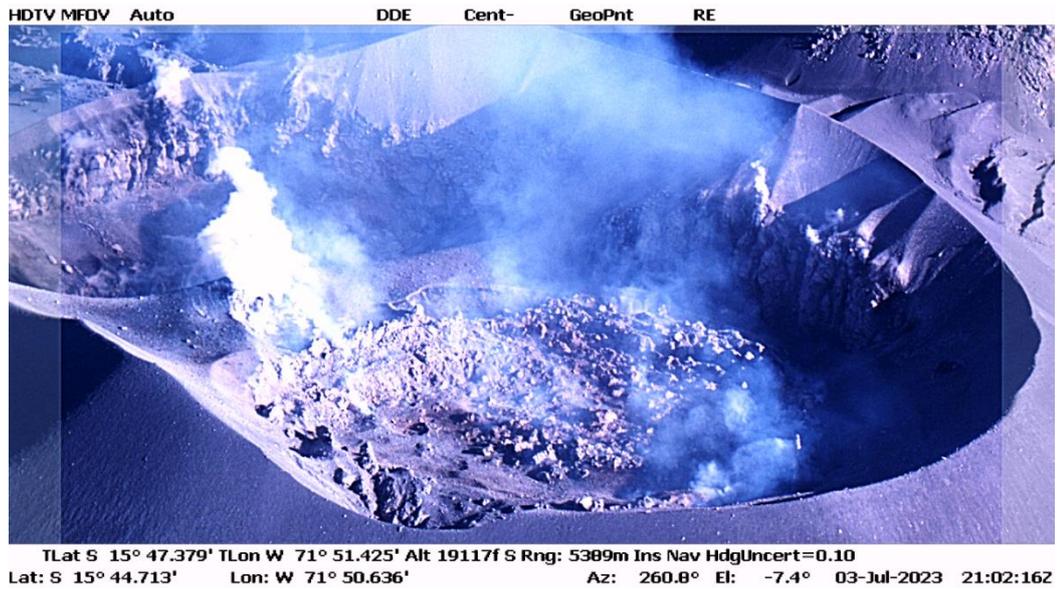


Figura 16.- Imagen aérea de la zona del cráter del volcán Sabancaya donde se distingue el cuerpo de lava (domo) por cuyos extremos se evidencia la emisión de gases. Imagen obtenida el día 3 de julio de 2023.

Los valores obtenidos de los escaneos fueron los siguientes:

- ESCANEO 1: 122.34 T/DÍA (dato valido).
- ESCANEO 2: 51.79 T/DÍA (dato valido).
- ESCANEO 3: 88.85 T/DÍA (dato valido).
- ESCANEO 4: 6.9 T/DÍA (dato valido).
- ESCANEO 5: 481.61 T/DÍA (dato valido).

- ESCANEEO 6: 527.44 T/DÍA (dato valido).
- ESCANEEO 7: 10.24 T/DÍA (dato valido).

El valor máximo obtenido es de 527.44 T/DÍA registrado el 3 de julio a las 16:12 horas, los valores fluctúan debido a que la nave se encontraba en movimiento.

4.- RESULTADOS

De acuerdo al análisis multiparamétrico realizado a la reciente dinámica eruptiva del Sabancaya, entre el 22 de mayo de 2022 y el 31 de julio de 2023, se mantiene una actividad explosiva moderada y variaciones menores en la mayoría de los parámetros monitoreados. Un resumen de ello indica que la sismicidad predominante corresponde a eventos asociados con el movimiento de fluidos en el interior de los conductos volcánicos (LP, EXP, TRE y TRA).

En particular, los sismos de tipo LP presentan un ligero incremento en su tasa promedio respecto al periodo anterior (de 35 a 50 LPs/día), especialmente, después de la segunda semana de diciembre de 2022, hasta finales de marzo de 2023. En el mismo periodo, la energía sísmica llegó a superar el nivel promedio normal (0.1 MJ). Algo similar ocurre con los eventos tipo explosión (EXP), solo que estos están en menor número (35 EXP/día), pero su nivel de energía promedio es mayor (0.5 MJ), en comparación con los eventos LP.

Por su parte, los episodios tremóricos (TRE y TRA) ocurrieron de manera significativa en los meses de noviembre y diciembre de 2022, así como entre los meses de marzo y mayo de 2023. Estos temblores habrían influenciado con los cambios de la actividad volcánica: una intrusión de magma. Un cambio notable de esta última se logra apreciar a comienzos de noviembre de 2022. Dicho cambio, coincide con la presencia de temblor armónico (TRA), y que el volcán Sabancaya se le interpreta como episodios relacionados directamente con el ascenso de magma hacia la superficie (Machacca et al., 2023).

Asimismo, se detectó la presencia de eventos Volcano-Tectónicos distales (dVT); ocurridos a finales del mes de mayo de 2023, cuya distribución espacial y temporal, corresponde a sismos ubicados entre 2 a 20

km de distancia del cráter, cuyas magnitudes alcanzaron un valor máximo de M5.2, formando enjambres sísmicos asociados a 41 familias sísmicas. Por ende, se concluye que la compleja actividad sísmica observada en el volcán Sabancaya y áreas aledañas, tanto somera como distante (~20 km), está relacionada con procesos magmáticos profundos e interacciona con el sistema hidrotermal regional (Machacca et al., 2023).

Por lo tanto, con base en el análisis y evidencias descritas se interpreta que, desde noviembre de 2022, el volcán Sabancaya ha experimentado una intrusión de magma (de intensidad moderada) hacia la superficie. Este hecho se alinea con un aumento en la tendencia de la curva RSAM y la deformación del terreno (Figura 17 b y c). Dicho fenómeno provoca una reducción de la presión conforme el magma llega a la superficie, dando lugar a una gran liberación de gases y vapor de agua disueltos en el magma (conocidos como volátiles), y que condiciona la ocurrencia de explosiones moderadas con formación de columnas de gases y cenizas de hasta 4 km de altura (Figura 17 a y f). Además, se crean las condiciones para que el sistema volcánico incremente su temperatura, lo que promueve la acumulación de lava y la formación de domos en la superficie. Las imágenes de cámaras de video, así como imágenes de radar e infrarrojo térmico (Figura 6 y 17d) sobre la superficie del volcán Sabancaya, confirmaron estos hechos.

Una vez que deja de crecer el domo (en marzo de 2023, Figura 17d), el proceso de liberación de volátiles también alcanza un equilibrio. Esto provoca una sobrepresión en su interior provocando la ocurrencia de actividad tremórica, a partir de abril de 2023 (Figura 2c). Otro hecho que refuerza lo anterior es la aparición de un enjambre notable de sismos dVT después de mayo de 2023 (Figura 2d). Esto demuestra que existe una presión interna que condiciona el fracturamiento de las rocas y que implica un descenso en el número de explosiones porque es más difícil favorecer la desgasificación y, por el contrario, aumenta la presurización del sistema.

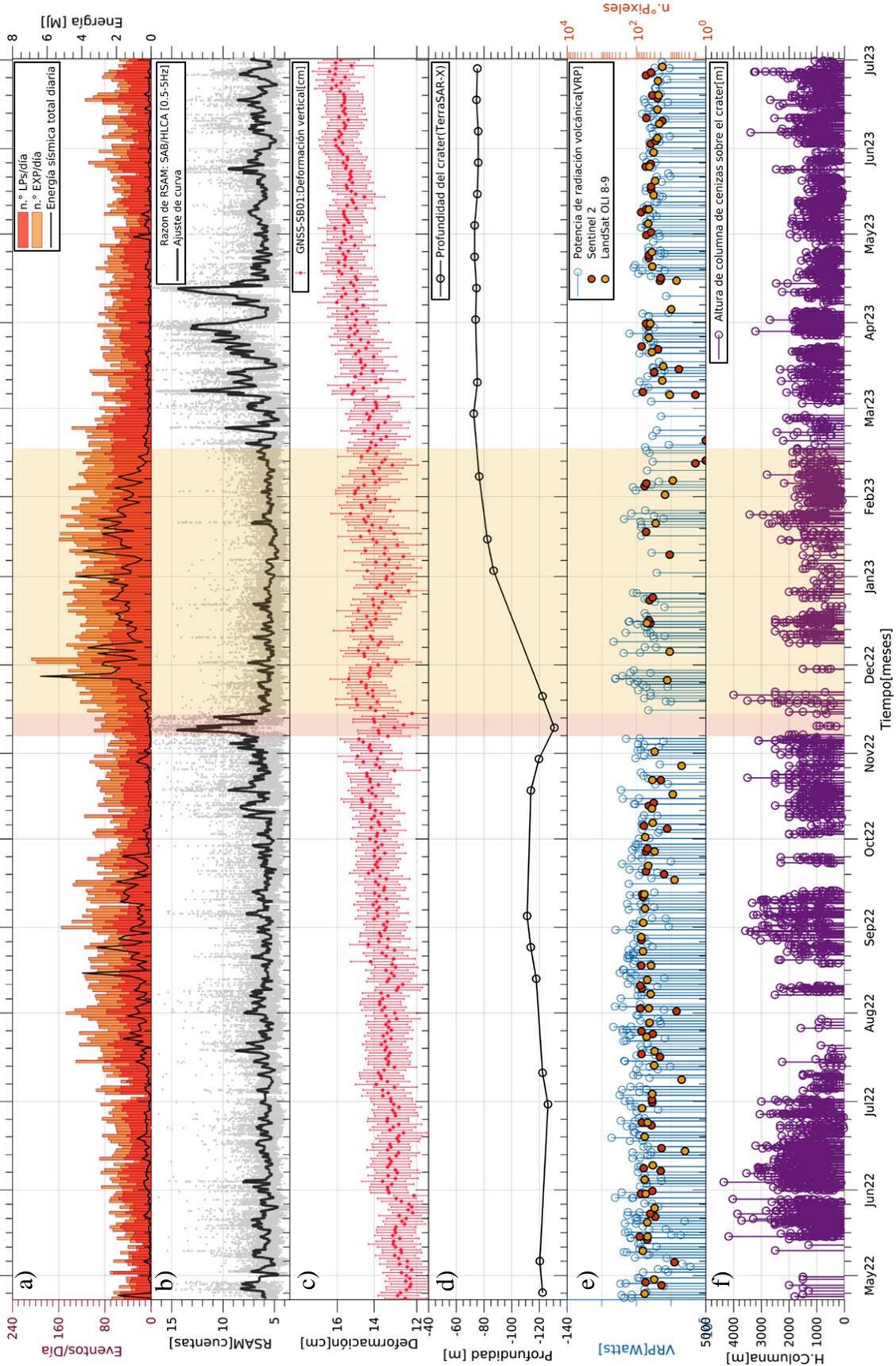


Figura 17.- Correlación entre la sismicidad (A, B y C), deformación cortical (D), altura de las columnas de gases y ceniza (E) anomalías térmicas MIROVA (F). La franja roja indica una intrusión de magma y la franja amarilla, el proceso de extrusión de domo de lava.

5.- PRONÓSTICO Y ESCENARIOS FUTUROS

De acuerdo con el análisis y seguimiento permanente del volcán Sabancaya se trata de una erupción prolongada con una dinámica eruptiva compleja (entre explosiva y efusiva) con el emplazamiento y destrucción de domos de lava. A continuación, se presentan dos posibles escenarios futuros para el volcán Sabancaya. Esto basado en su historial de erupciones, su situación actual y el monitoreo volcánico realizado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP).

Escenario 1: Erupción pequeña (IEV 2)

- La actividad podría continuar con el nivel actual, con el registro de sismicidad de tipo LP, TRE y TRA, con explosiones que generen columnas de gases y cenizas de más de 3 km de altura
- Se espera que continúen presentándose enjambres de sismicidad somera y distal asociados a la interacción entre el sistema magmático y el hidrotermal regional.
- Pueden registrarse nuevos pulsos moderados de intrusión magmática, formación y destrucción de domos de lava, posibles flujos piroclásticos y emisiones significativas de cenizas.
- Se estima que las áreas en riesgo se extiendan a un radio de 15 km del cráter.

Escenario 2: Erupción moderada (IEV > 2)

- No se pueden descartar incrementos abruptos en el estilo eruptivo en el futuro, como ha ocurrido en otros volcanes con domos de lava. La transición de actividad efusiva a explosiva es común y difícil de predecir.
- Podría observarse un aumento drástico en la sismicidad, deformación y emisiones de gases.

- En este escenario, se prevé la ocurrencia de flujos piroclásticos que alcanzarían más de 5 km de la cima del volcán , eyección de bloques balísticos emisiones masivas de cenizas , que podrían afectar un área de hasta 50 km del volcán . Además , podría verse afectado el tráfico aéreo y poblaciones aledañas al volcán.

Es importante señalar que estos escenarios son hipotéticos y están basados en datos y modelos disponibles en el momento del pronóstico. La precisión de los pronósticos puede variar y siempre hay incertidumbre en la actividad volcánica. La finalidad de este tipo de pronósticos es proporcionar información útil para la preparación y respuesta ante posibles eventos volcánicos, así como para evaluar los niveles de riesgo y tomar decisiones adecuadas para la seguridad de las poblaciones cercanas.

CONCLUSIONES

- El análisis de datos de monitoreo multiparamétrico muestra que la dinámica eruptiva del volcán Sabancaya durante el período comprendido entre el 22 de mayo de 2022 y el 31 de julio de 2023 se mantiene una actividad explosiva moderada y variaciones menores en la mayoría de los parámetros monitoreados. El análisis sísmico destaca la ocurrencia en su mayoría de eventos LP, EXP, TRE y TRA; y demuestra que dichos eventos están relacionados con el movimiento de fluidos (gases, magma) en el interior como el exterior del macizo volcánico (emisión de gases y cenizas).
- Se identificaron y caracterizaron eventos Volcano-Tectónicos distales (dVT) los cuales en su mayoría ocurrieron en forma de enjambres sísmicos, conformando un total de 41 familias sísmicas. Espacialmente, estos sismos fueron ubicados preferentemente en los sectores Este y Noreste del volcán, a una distancia máxima de 20 km del cráter y con magnitudes de hasta M5.2. Este tipo de actividad ha ocurrido antes y después que se inició el proceso eruptivo, y los hallazgos no difieren mucho de otros estudios anteriores, donde se refiere que su origen resulta de la interacción entre los procesos magmáticos profundos y el sistema hidrotermal regional.
- Se propuso un modelo que explica la reciente dinámica eruptiva del volcán Sabancaya, a la cual se le asocia con procesos de intrusión de magma y liberación de volátiles (gas y vapor de agua) a la superficie. Los cambios en la sismicidad y la deformación del terreno han demostrado este hecho. Formando columnas eruptivas de hasta 4 km en la superficie, provocando un aumento notable en el número y la energía de las explosiones. Además, este fenómeno ha provocado la acumulación de domos de lava en el cráter del volcán. Después de su estabilización, la liberación de volátiles se equilibra e inmediatamente

provoca una presurización de la corteza externa, lo que provoca eventos sísmicos dVT, así como el temblor.

- A corto plazo, se prevé continúe la actividad explosiva moderada, con la emisión de columnas cenizas y gases que alcanzarían alturas superiores a los 3 km, con un radio de afectación máximo de 15 km del cráter, y que posiblemente se presenten nuevos pulsos moderados de magma, formación y destrucción de domos de lava. En un escenario extremo, se plantea la posibilidad de cambios abruptos en el estilo eruptivo, con aumento súbito en sismicidad, deformación y emisiones de ceniza. Este panorama conlleva la ocurrencia de flujos piroclásticos que alcanzarían más de 5 km desde la cima del volcán, junto con la expulsión de bloques balísticos y emisiones masivas de cenizas, que podrían impactar un área de hasta 50 km del volcán, afectando críticamente el tráfico aéreo y las poblaciones cercanas.

RECOMENDACIONES

- Considerando el nivel de alerta Naranja, se recomienda a las autoridades tomar medidas preventivas para mitigar los efectos de la caída de cenizas y proteger la salud pública.
- Es sumamente peligroso acercarse a una distancia menor de 12 km del cráter del volcán. Cualquier intento de aproximación o ascenso al volcán conlleva un riesgo muy elevado para la vida de las personas.
- En caso de que se tenga contacto con la ceniza, se recomienda cubrir la nariz y la boca con paños húmedos o usar mascarillas. Además, se recomienda mantener cerradas las puertas y ventanas de las viviendas para prevenir la entrada de ceniza.
- Se insta a la comunidad a mantenerse informada constantemente acerca de la actividad volcánica del Sabancaya a través de los boletines emitidos por el IGP. Estos boletines se encuentran disponibles en el siguiente enlace:
<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/productos-boletines>.

BIBLIOGRAFÍA

- Bean, C. J., De Barros, L., Lokmer, I., Métaxian, J.-P., O' Brien, G., & Murphy, S. (2014). Long-period seismicity in the shallow volcanic edifice formed from slow-rupture earthquakes. *Nature Geoscience*, 7(1), 71–75. <https://doi.org/10.1038/ngeo2027>
- 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>
- Centeno, R., Lazarte, I., Vargas, K., Llerena, J. P., Rivera, M., Del Carpio Calienes, J. A., & Tavera, H. (2022). *Evaluación geofísica de la actividad eruptiva actual del volcán Sabancaya y formación de un domo de lava*. <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5227>
- Coppola, D., Valade, S., Masias, P., Laiolo, M., Massimetti, F., Campus, A., Aguilar, R., Ancasí, R., Apaza, F., Ccallata, B., Cigolini, C., Cruz, L. F., Finizola, A., Gonzales, K., Macedo, O., Miranda, R., Ortega, M., Paxi, R., Taipe, E., & Valdivia, D. (2022). Shallow magma convection evidenced by excess degassing and thermal radiation during the dome-forming Sabancaya eruption (2012–2020). *Bulletin of Volcanology*, 84(2). <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01523-1>
- Coppola, Diego, Laiolo, M., Cigolini, C., Massimetti, F., Delle Donne, D., Ripepe, M., Arias, H., Barsotti, S., Parra, C. B., Centeno, R. G., Cevuard, S., Chigna, G., Chun, C., Garaebiti, E., Gonzales, D., Griswold, J., Juarez, J., Lara, L. E., López, C. M., ... William, R. (2020). Thermal remote sensing for global volcano monitoring: Experiences from the MIROVA system. *Frontiers in Earth Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00362>
- Del Carpio Calienes, J. A., Rivera, M., Torres, J., Tavera, H., & Puma, N. (2022). *Evaluación del peligro volcánico en Perú: una herramienta para la gestión del riesgo de desastres*. <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>
- Frémont, M.-J., & Malone, S. D. (1987). High precision relative locations of earthquakes at Mount St. Helens, Washington. *Journal of Geophysical Research*, 92(B10), 10223–10236. <https://doi.org/10.1029/jb092ib10p10223>
- Green, D. N., & Neuberg, J. (2006). Waveform classification of volcanic low-frequency earthquake swarms and its implication at Soufrière Hills Volcano, Montserrat. *Journal of Volcanology and Geothermal*

- Research*, 153(1–2), 51–63.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.08.003>
- Machacca, R., Lesage, P., Tavera, H., Pesicek, J. D., Caudron, C., Torres, J. L., Puma, N., Vargas, K., Lazarte, I., Rivera, M., & Burgisser, A. (2023). The 2013–2020 seismic activity at Sabancaya Volcano (Peru): Long lasting unrest and eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 435(107767), 107767.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107767>
- MacQueen, P., Delgado, F., Reath, K., Pritchard, M. E., Bagnardi, M., Milillo, P., Lundgren, P., Macedo, O., Aguilar, V., Ortega, M., Ancasi, R., Lazarte Zerpa, I. A., & Miranda, R. (2020). Volcano-tectonic interactions at sabancaya volcano, Peru: Eruptions, magmatic inflation, moderate earthquakes, and fault creep. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 125(5).
<https://doi.org/10.1029/2019jb019281>
- Petersen, T. (2007). Swarms of repeating long-period earthquakes at Shishaldin Volcano, Alaska, 2001–2004. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 166(3–4), 177–192.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.07.014>
- Puma, N., Centeno, R., Vargas, K., Lazarte, I., Torres, J. L., Rivera, M., & Del Carpio Calienes, J. A. (2021a). *Evaluación de la actividad eruptiva del volcán Sabancaya a partir de datos geofísicos y observaciones de campo (abril – noviembre, 2021)*.
<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5077>
- Puma, N., Del Carpio Calienes, J. A., Rivera, M., Vargas Alva, K. A., Machacca, R., & Lazarte Zerpa, L. A. (2021b). *Evaluación geofísica del comportamiento dinámico del volcán Sabancaya (diciembre, 2020 – marzo, 2021)*.
<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4938?show=full>
- Rowe, C. A., Thurber, C. H., & White, R. A. (2004). Dome growth behavior at Soufriere Hills Volcano, Montserrat, revealed by relocation of volcanic event swarms, 1995–1996. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 134(3), 199–221.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.01.008>
- Valade, S., Ley, A., Massimetti, F., D’Hondt, O., Laiolo, M., Coppola, D., Loibl, D., Hellwich, O., & Walter, T. R. (2019). Towards global volcano monitoring using multisensor Sentinel missions and artificial intelligence: The MOUNTS monitoring system. *Remote Sensing*, 11(13), 1528. <https://doi.org/10.3390/rs11131528>
- White, R., & McCausland, W. (2016). Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting

eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 309, 139–155. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.10.020>

White, R. S., Drew, J., Martens, H. R., Key, J., Soosalu, H., & Jakobsdóttir, S. S. (2011). Dynamics of dyke intrusion in the mid-crust of Iceland. *Earth and Planetary Science Letters*, 304(3–4), 300–312. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.02.038>

