



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



SEÑALES SÍSMICAS DE TIPO FRACTURA COMO FUENTE DESENCADENANTE DE CRISIS VOLCÁNICAS: CASO DEL SABANCAYA Y PURUPURUNI - CASIRI

Informe Técnico N°043-2024/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima - Perú
Diciembre, 2024

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

Informe Técnico

Señales sísmicas de tipo fractura como fuente desencadenante de crisis volcánicas:
Caso del Sabancaya y Purupuruni-Casiri

Autores

José Del Carpio
Erick Soto
José Torres

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

**SEÑALES SÍSMICAS DE TIPO FRACTURA COMO FUENTE
DESENCADENANTE DE CRISIS VOLCÁNICAS:
CASO DEL SABANCAYA Y PURUPURUNI-CASIRI**

Lima-Perú
Diciembre, 2024

RESUMEN

Se analiza las características de los procesos de ruptura sísmica en estructuras volcánicas con el Sabancaya y Purupuruni-Casiri a fin de identificar patrones de reconocimiento previos a procesos eruptivos y/o reactivación tectónica. Para el caso del volcán Sabancaya, los resultados muestran actividad sísmica de tipo fractura, mínima y de forma aislada, en periodos no eruptivos; mientras que, en periodos pre-eruptivos y eruptivos, se evidencian procesos de deformación cortical, presencia de fumarolas y el incremento de la actividad explosiva, siendo mayor en periodos de crisis volcánicas. Este patrón fue observado durante los procesos eruptivos de los años 2019, 2020, 2021 y 2022.

En el caso de los volcanes Purupuruni y Casiri, entre 2001 y 2017 se registra la ocurrencia de actividad sísmica mínima de tipo fractura, intensificándose en 2020 y 2021, con sismos de hasta M5.0, como el ocurrido el 12 de mayo de 2021. Asimismo, el 5 mayo de 2020 ocurre un enjambre sísmico de tipo fractura, de 40 minutos de duración que agrupo a 170 eventos aproximadamente. Luego se produce una intensa actividad sísmica focalizada a 9 km al sur del Purupuruni y 15 km al oeste del Casiri, indicando una posible relación con la reactivación de la falla Pacollo. La distribución espacial de la sismicidad indica la participación de una componente magmática que condiciona la ruptura de una zona sometida a fluidos de alta presión y con ello, la reactivación de la falla Pacollo. Se espera futuras crisis sísmicas, siendo importante nuestro monitoreo continuo y la evaluación de escenarios potenciales.

CONTENIDO

RESUMEN

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. CONTEXTO VULCANOLÓGICO Y SISMOTECTÓNICO**
 - 2.1. Volcán Sabancaya
 - 2.2. Volcanes Purupuruni y Casiri
- 3. DATOS Y METODOLOGÍA**
 - 3.1. Catálogos sísmicos
 - 3.2. Tipos característicos de señales sísmicas
 - 3.3. Estimación del volumen de magma intruído
 - 3.4. Cálculo de hipocentros
 - 3.5. Deformación volcánica
- 4. RESULTADOS**
 - 4.1. Características de la actividad sísmica
- 5. DISCUSIÓN**
 - 5.1. Actividad sísmica en crisis volcánicas vs periodos de reposo
 - 5.2. Volcan Sabancaya, episodios de mayor explosividad
 - 5.3. Enjambres sísmicos y reactivación de la falla Pacollo

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

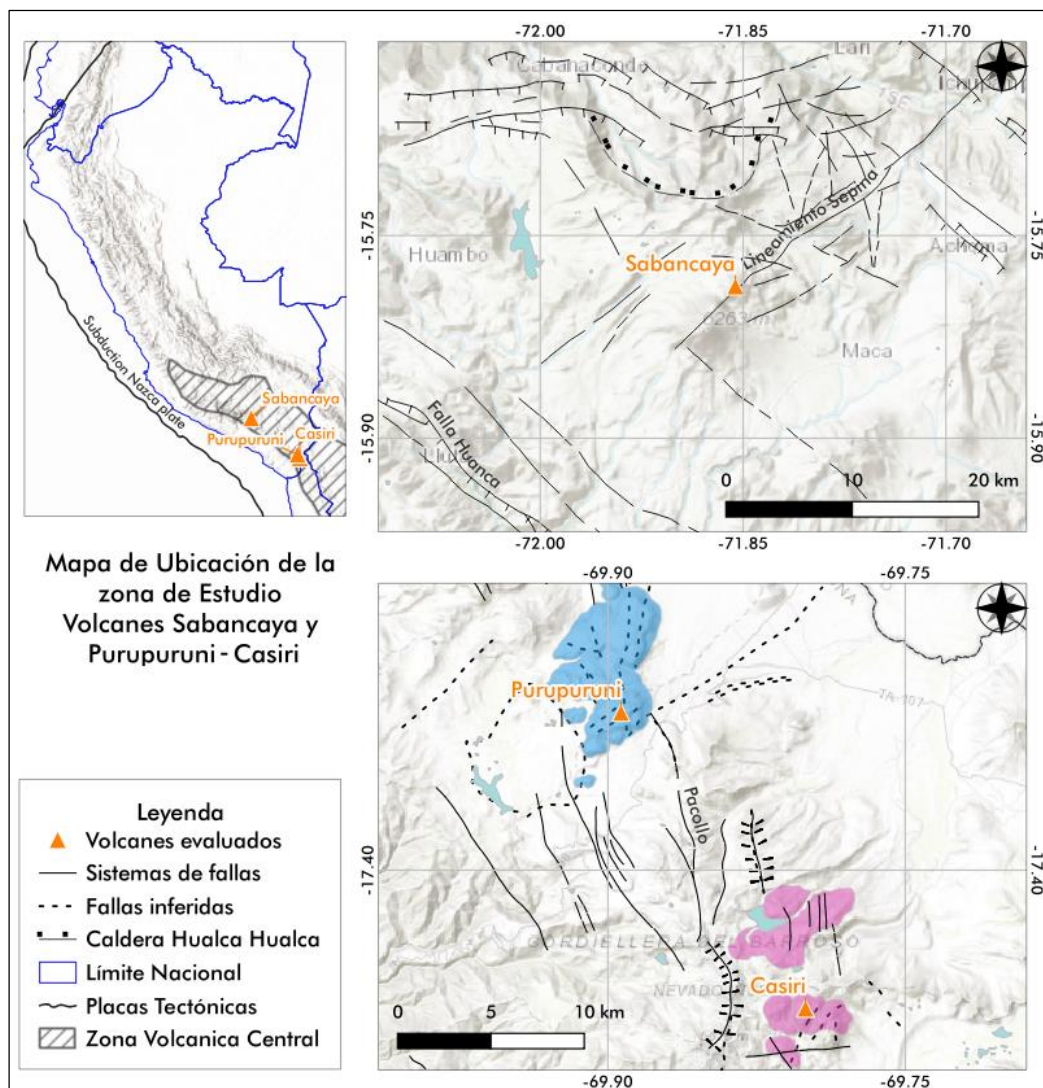
1. INTRODUCCIÓN

El proceso de subducción de la placa de Nazca controla la actividad volcánica en el Perú y en general, el vulcanismo de la Zona Volcánica Central (ZVC) de los Andes (Figura 1). La complejidad para entender este proceso radica en la interacción de los procesos que se desarrollan durante la reactivación volcánica, la erupción y el comportamiento dinámico de los sistemas de fallas regionales, como, por ejemplo, las fallas de Huanca, Ichupampa, Trigal y Solarpampa (Sébrier y Soler, 1991; Mering et al., 1996) en la zona del volcán Sabancaya. Además, a lo largo de la cadena volcánica del sur del Perú existen fallas de dirección andina, especialmente en inmediaciones de los volcanes Ticsani y Huaynaputina (Mariño, 2002) y en la zona de los volcanes Purupuruni y Casiri, con la presencia del sistema de fallas Pacollo (Mendivil, 1965).

En ambientes tan complejos como estos, donde se desarrolla, independientemente o en el mismo espacio temporal, tanto la actividad volcánica y tectónica, se hace difícil para los especialistas determinar la génesis de la actividad sísmica, que en varias ocasiones han presentado eventos con magnitudes de hasta $M6.2$, a profundidades promedio de 15 km bajo la superficie, tal es el caso de los sismos ocurridos en la zona del volcán Sabancaya (Rodríguez & Uribe, 1990; Tavera et al., 2013a; Tavera et al., 2013b; Tavera et al., 2016) y los sismos ocurridos en la zona de los volcanes Purupuruni y Casiri que generaron magnitudes de hasta $M5.0$ (Velarde et al., 2020; Antayhua et al., 2021).

La interacción de la actividad volcánica y la actividad de fallas tectónicas existentes en áreas aledañas a los volcanes sigue siendo un tema poco comprendido; para el caso de Sabancaya (Arequipa), la actividad sísmica detectada en áreas aledañas a dicho volcán durante el periodo 1990 a 2023 probablemente fue debido a los movimientos tectónicos regionales que

desempeñaron un papel importante en la acumulación de tensiones en las fallas y su proximidad a zonas de ruptura (MacQueen et al., 2020). Sin embargo, según Machacca et al. (2023) la actividad tectónica por sí sola no puede explicar el marcado aumento de la sismicidad observada durante el proceso eruptivo del volcán Sabancaya, respecto a la década anterior. Un caso opuesto, se observó en la zona de los volcanes Casiri y Purupuruni (Tacna). Desde el mes de abril 2020, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) reportó la ocurrencia de sismos con magnitudes entre M3.6 a M5.0 que fueron seguidos por centenas de réplicas (Velarde et al., 2020; Antayhua et al., 2021), pero que no desencadenó en un proceso de reactivación o erupción volcánica.



El presente estudio se ha realizado mediante el análisis de catálogos sísmicos de diferentes fuentes nacionales e internacionales (IGP, USGS, CERESIS, SARA, entre otros). La información proveniente del IGP considera la Red Geofísica de Volcanes y la Red Sísmica Nacional; así como la información geodésica y de drones desplazados sobre las estructuras volcánicas (Figura 1). Asimismo, la importancia del presente estudio radica en identificar y caracterizar señales sísmicas de tipo fractura como señales precursoras de erupciones volcánicas y a la circulación de fluidos volcánicos.

2. CONTEXTO VULCANOLÓGICO Y SISMOTECTÓNICO

2.1. Volcán Sabancaya

El volcán Sabancaya, es parte del complejo volcánico Ampato-Sabancaya (CVAS), ubicado al sureste del volcán Hualca Hualca y rodeado de sistemas de fallas activas (Sébrier et al., 1985; Mering et al., 1996; Antayhua et al., 2002) (Figura 2). Los estudios geológicos indican que el volcán Hualca Hualca fue construido durante el Pleistoceno (Thouret et al., 2007), mientras que el CVAS fue construido entre el Pleistoceno tardío y el Holoceno. Dataciones de los productos más recientes del volcán Ampato indican edades de 20 000 a 10 000 años (Samaniego et al., 2016). Por su parte, el Sabancaya se emplazó hace menos de 11 000 años AP y su formación estuvo dominada por la generación de flujos y domos de lava de composición dacítica y andesítica (Gerbe & Thouret, 2004; Samaniego et al., 2016).

En el contexto estructural, existen tres principales sistemas de fallas (Sébrier et al., 1985; Sébrier & Soler, 1991; Antayhua, 2002), Ichupampa y Huanca con orientación NW-SE, un segundo sistema de fallas Trigal y Solarpampa, de orientación E-O, paralelo al valle del Colca y localizado al oeste de la localidad de Cabanaconde. Un tercer sistema es la falla de Sepina que tiene una orientación NE-SW, visible al noreste del Sabancaya (Figura 2).

Historia eruptiva reciente: El volcán Sabancaya en época histórica, es decir, los últimos 500 años, presentó tres procesos eruptivos: el primero reportado por las crónicas españolas en el siglo XVIII que mencionan la ocurrencia de episodios eruptivos en el año de 1752 (Travada & Córdova, 1752) y 1784-1785 (Zamácola & Jáuregui, 1804). La ocurrencia de ambos episodios eruptivos lo asocian a la actividad de un volcán denominado Ambato, refiriéndose al complejo Ampato-Sabancaya (Puma & Torres, 2020). El tercer proceso se inició en noviembre de 1986, caracterizado por

la emisión e incremento de gases blanquecinos; la fase explosiva de la erupción se desarrolló desde mayo de 1990 hasta el año 1998 (Gerbe & Thouret, 2004). Esta etapa generó explosiones volcánicas con emisión de cenizas y fragmentos balísticos de composición andesítica y dacítica, alcanzando un Índice de Explosividad Volcánica de 2-3 (Gerbe & Thouret, 2004). Recientemente, en noviembre de 2016, el Sabancaya inició un nuevo proceso eruptivo, el cual perdura hasta la actualidad (Centeno et al., 2023).

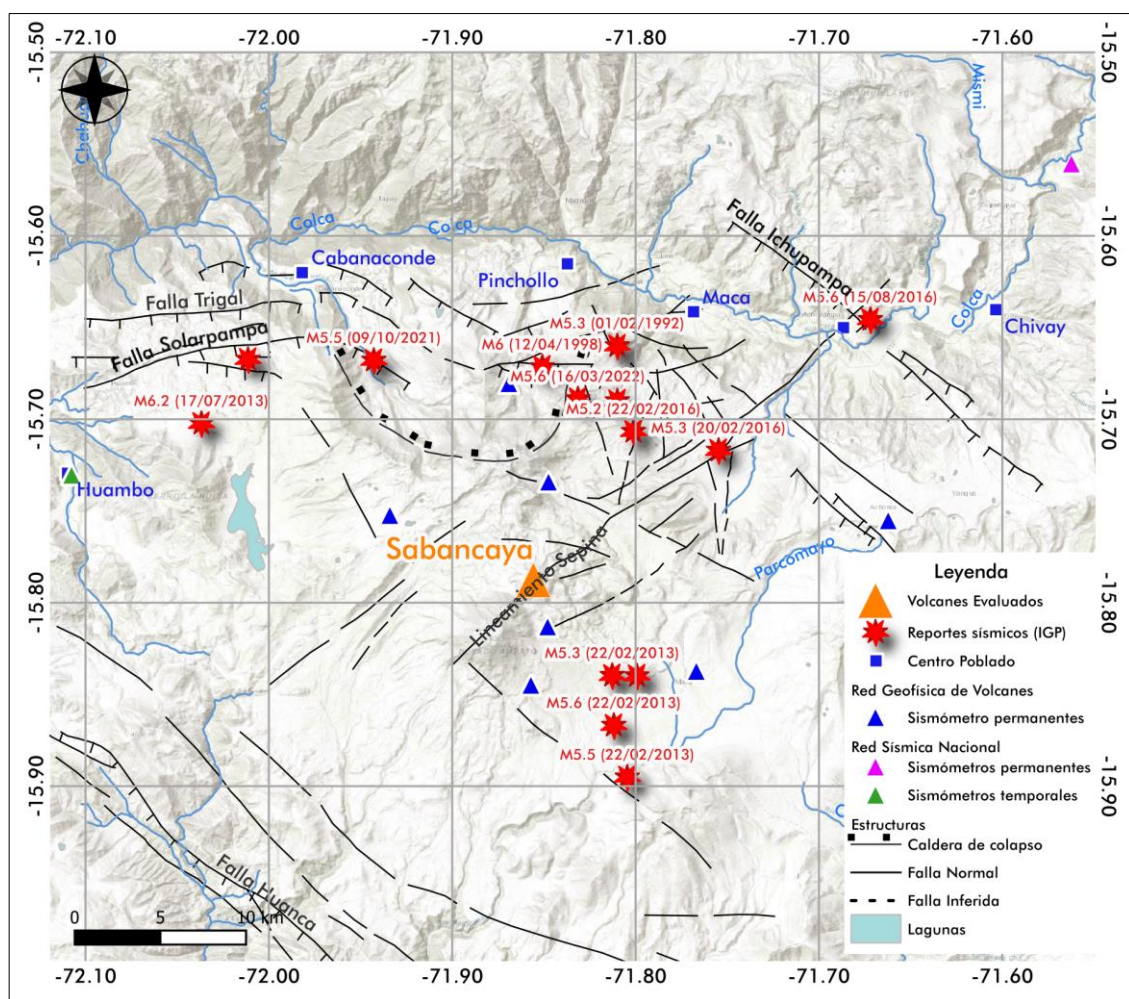


Figura 2.- Contexto sismotectónico ($M_{ag} \geq M5.0$) de la zona del volcán Sabancaya y red de monitoreo volcánico y sísmico operada por el IGP.

Durante la actual erupción, se han observado cambios morfológicos desarrollados en la superficie del cráter, caracterizados por el

emplazamiento y crecimiento de domos de lava, los que se detallan a continuación.

- **Crecimiento de domo de octubre de 2019:** Empleando imágenes satelitales del Laboratorio Planet Inc, para el periodo del 11 al 21 de octubre de 2019, se logra distinguir un crecimiento significativo de un domo de lava emplazado en el volcán Sabancaya, el mismo que desde febrero de 2017 venía presentando un crecimiento lento y constante (Del Carpio et al., 2019). Asimismo, los días 11 y 12 de diciembre de 2019, especialistas del IGP realizaron un sobrevuelo de DRON en el cual identificaron cambios morfológicos en el cráter asociados a dicho domo, el cual presentaba un diámetro de aproximadamente 282 m y un volumen de $4.43 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Cruz et al., 2019).
- **Domo de lava de noviembre de 2020:** Puma et al. (2020) empleando imágenes satelitales del Laboratorio Planet Inc obtenidas el 14 de noviembre de 2020 e intensidades de imágenes de radar analizadas entre febrero y noviembre de 2020, determinó la destrucción del domo emplazado en octubre de 2019 y evidenció la formación de un segundo domo de lava desde el 10 de noviembre de 2020, el mismo que fue corroborado por la imagen Planet. Este domo presentó un área de 11 700 m².
- **Crecimiento de domo de marzo de 2021:** Por medio del análisis de la secuencia de intensidad de imágenes radar, realizado por Puma et al. (2021), el segundo domo de lava formado en noviembre de 2020 presentó su aparente destrucción para el 6 de febrero de 2021; sin embargo, dicha secuencia también evidenciaba el levantamiento de la superficie del cráter hacia el 22 de marzo de 2021. No hubo manifestación de la extrusión de un nuevo domo hasta esa fecha; sin

embargo, para el 14 de septiembre de 2021, se evidencio cambios morfológicos al nivel del cráter asociados con acumulación de lava, es decir, crecimiento de un domo más reciente.

- **Crecimiento de domo de abril de 2022:** De acuerdo a Centeno et al. (2022), a partir de una secuencia de intensidades de imágenes radar se observa, para el 11 de abril de 2022, el crecimiento de un cuerpo de lava sobre el domo reciente, el mismo que incremento su área según el análisis de la imagen publicada el 14 de mayo de 2022. Asimismo, una imagen satelital PlanetScope obtenida para el 20 de mayo de ese mismo año, muestra el domo en crecimiento con un área aproximada de 27 874 m².

Sismicidad en el área del volcán Sabancaya: Mediante un análisis rápido, que abarca sismos con magnitudes $\geq M4.0$, desde la década de los 90's, el IGP ha registrado actividad sísmica importante en inmediaciones del volcán Sabancaya que generaron valores de intensidad de hasta VIII en la escala modificada de Mercalli. Entre 1991 y 1992, ocurrieron los sismos de Maca y Sepina, que alcanzaron magnitudes de M5.4 (Rodríguez & Huamán, 1992), asociados a la deformación superficial desarrollada en el sector de Pampa Sepina y durante el proceso eruptivo del Sabancaya 1990-1998 (Antayhua et al., 2002). También en febrero de 2013 en el área de Sepina se registraron eventos de magnitudes entre M4.5 y M5.2, ubicados a 9 km del cráter del volcán, esto indicaría el inicio de la reactivación del volcán (Tavera et al., 2013a).

Posteriormente, el 17 de julio de 2013, sobre la falla de Solarpampa, proxima a Cabanaconde, se produce un sismo de M5.7 (Tavera et al., 2013b). Sismos de similares características de hasta M4.5 se detectaron sobre la misma area en 1998 y en febrero de 2015, asociando la fuente de generacion a la dinámica propia de la falla Solarpampa (Antayhua et

al., 2022; Tavera, et al. 2015). En agosto de 2016, sobre la falla Ichupampa y previo registro de eventos precursoros, se registra un sismo de M5.3 produciendo intensidades máximas de VI, el origen fue asociada a la reactivación de dicha falla (Tavera et al., 2016). En 2021 ocurre un sismo de M5.5 ubicado sobre la falla Trigal, a 8 km al suroeste de Pinchollo, también precedido por eventos precursoros (Tavera & Centeno, 2021). Finalmente, entre 2022 y 2023, dos sismos importantes fueron registrados en la zona de Maca, presentando magnitudes de M5.5 y M5.2, respectivamente. En ambos casos se registraron eventos precursoros al sismo principal (Tavera et al., 2022; Tavera, 2023).

2.2. Volcanes Purupuruni y Casiri

El volcán Purupuruni es un volcán activo, cuyo último proceso eruptivo data de hace 5.3 ± 1.1 ka (Bromley et al., 2019). Es un complejo volcánico conformado por siete domos de lava de composición dacítica y domos colada que se encuentran situados en el sector NE de una gran depresión rodeada de volcanes extintos del Pleistoceno, asimismo, los domos de lava cubren radios que varían entre 700 y 1000 metros (Vargas et al., 2022).

El volcán Casiri también es un volcán activo de tipo estratovolcán constituido por flujos de lava de composición andesítica y cuya cima presenta una caldera en forma de herradura (Vargas et al., 2022). De acuerdo a dataciones realizadas por Bromley et al. (2019), mediante el método cosmogénico, dos muestras de lava presentan edades de 2.6 ± 0.4 ka y 6.0 ± 0.9 ka.

Ambos volcanes, forman parte de la zona geotermal que comprenden los volcánicos Purupuruni y Paucarani, denominado también como acuífero fisurado que, por su permeabilidad, es más trasmisor que acumulador de recarga (Cruz et al., 2020). Es decir, se ubican dentro de una zona geotermal activa.

Sobre el contexto estructural, en el sector oriental del distrito de Tarata, en inmediaciones de los volcanes Purupuruni y Casiri, se distinguen diferentes trazas de fallas geológicas activas; entre ellas, la falla Pacollo que, de acuerdo a Mendivil (1965) formaría parte del sistema de fallas Incapuquio. La falla Pacollo es de tipo normal, con orientación NNO-SSE y una longitud aproximada de 16 km. En sus alrededores se observa la presencia de otras trazas de fallas paralelas con longitudes menores (Figura 3). Asimismo, entre las estructuras volcánicas Purupuruni y Casiri, se pueden observar la presencia de lineamientos con orientaciones NNO-SSE, N-S y O-E (Cruz et al., 2020; Mendivil, 1965; Bromley et al., 2019), que definen el desarrollo en el pasado de importantes procesos de deformación superficial.

Historia Eruptiva: El volcán Purupuruni es un complejo de domos dacíticos que ha presentado una erupción subpliniana y crecimiento de domo durante el Holoceno, así como erupciones efusivas con emisión de flujos de lava (Bromley et al., 2019). Por su parte, el volcán Casiri es un estratovolcán de composición andesítica que ha presentado una erupción efusiva hace 2600 años, aproximadamente (Bromley et al., 2019). Ha registrado en el pasado erupciones explosivas subplinianas y vulcanianas, así como, crecimiento y destrucción de domos (Siebert et al., 2011; Bromley et al., 2019).

En la actualidad, de generarse la reactivación de cualquiera de estos volcanes con el desarrollo de un proceso eruptivo, estos pueden presentar el emplazamiento de domos de lava y/o la emisión de flujos de lava. También puede presentar erupciones explosivas con la emisión de tefras. En un radio de 30 km de estos volcanes existe una población aproximada de 11 800 habitantes expuestos a una eventual erupción de ambos macizos. Además, ambos volcanes se ubican dentro del Área de Conservación Regional Vilacota – Maure. En tal sentido, una erupción con emisión de ceniza y otros productos contaminaría esta importante área, sus fuentes de agua y recursos hidrobiológicos de la región Tacna. Además, en

sus inmediaciones se ubican 18 centros de salud, 80 instituciones educativas, 5 represas, 2 tambos, 1 subestación eléctrica, proyectos mineros, vías de comunicación, líneas de transmisión eléctrica y sitios arqueológicos, que podrían verse afectados por una erupción de dichos volcanes (Del Carpio et al., 2022).

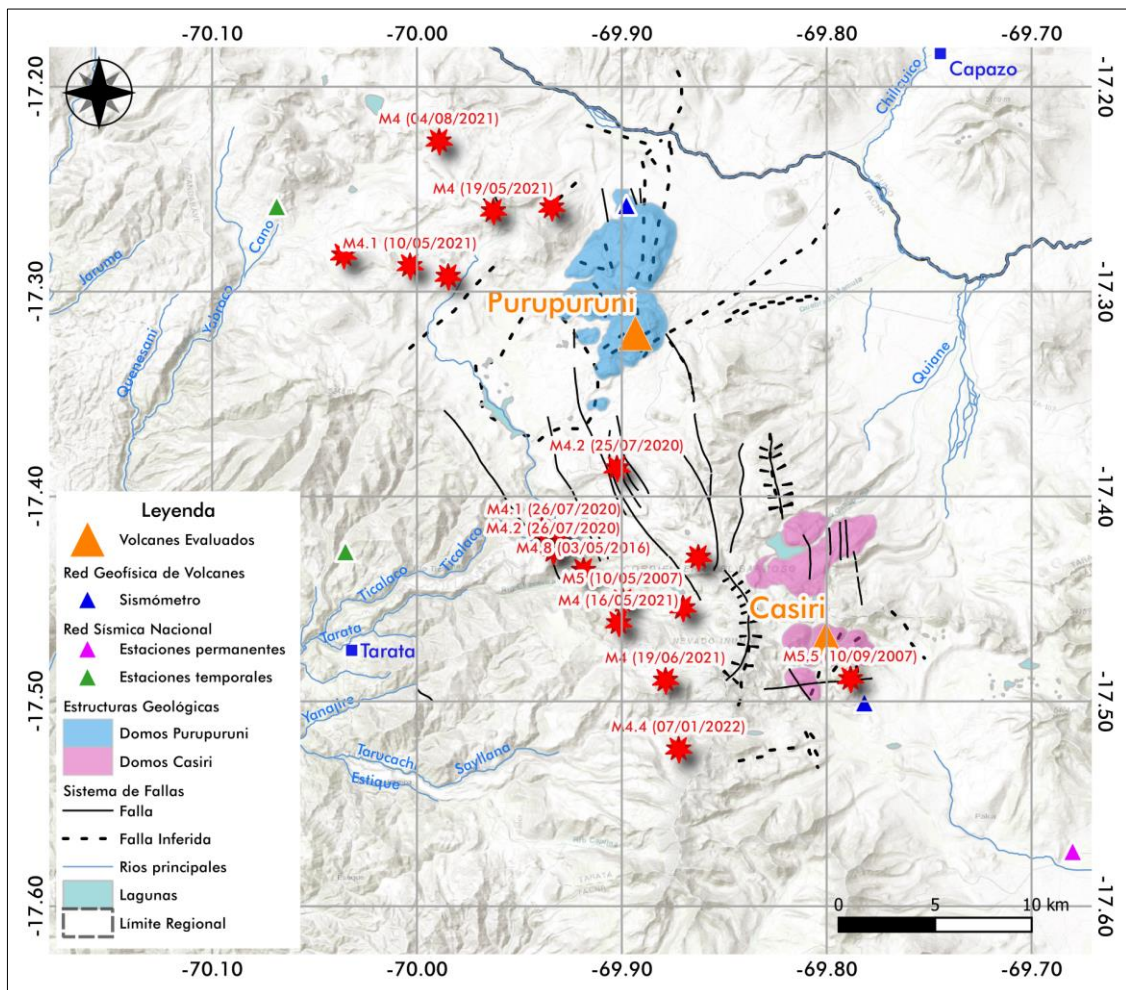


Figura 3.- Mapa de distribución de sismos $\geq M4$ registrados en la zona de los volcanes Purupuruni - Casiri, y ubicación de la red de monitoreo volcánico y sísmico operada por el IGP.

Sismicidad en el área de los volcanes Purupuruni-Casiri: También, mediante un análisis rápido, que abarca sismos con magnitudes $\geq M4.0$ y de acuerdo al catálogo sísmico del IGP, la actividad sísmica en la zona de los volcanes Casiri-Purupuruni data de 2001, aunque la sismicidad de mayor relevancia ocurrida en la zona, ha sido registrada por el IGP desde julio de 2020, generando magnitudes del orden de M4.1, percibidos con

intensidades de III-IV (MM) y distribuidos paralelamente a la falla Pacollo (Velarde et al., 2020) y posteriormente, con la sismicidad generada desde mayo de 2021 con el evento M5.0 y sus subsecuentes replicas (Antayhua et al., 2021). Ver Figura 3.

3. DATOS Y METODOLOGÍA

La Red Geofísica de Volcanes y la Red Sísmica Nacional, administrada por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), proveen de un conjunto de datos sísmicos digitales de antigüedad reciente, en especial de los volcanes objeto del presente estudio. Además de ellos, se ha recabado información sísmica histórica e instrumental, procedente de diferentes catálogos nacionales e internacionales, que posteriormente han sido filtrados por ciertas características explicadas más adelante.

El periodo de estudio para el volcán Sabancaya, comprende de 1968 hasta 2022 y para los volcanes Purupuruni - Casiri desde 2001 hasta 2022, fechas en las que se han producido 2 erupciones volcánicas en Sabancaya y 2 crisis sísmicas en Purupuruni-Casiri.

3.1. Catálogos sísmicos

Los catálogos recabados de distintas fuentes nacionales e internacionales, como son: catálogos sísmicos del Instituto Geofísico del Perú (IGP, 2023), U.S. Geological Survey (USGS, 2023), Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS, 2013), Proyecto de Evaluación del Riesgo para América del Sur (SARA, 2016), además de la documentación extraída de Antayhua et al. (2002) y Ramos & Antayhua (2011) brindan información más detallada del comportamiento sísmico en las zonas de estudio. Por medio de ellos se ha realizado la recopilación de parámetros epicentrales y/o hipocentrales.

Además, se está tomando en cuenta el "Catálogo Sísmico del Perú 1471-1982 Versión Revisada y Actualizada" (Tavera, 2001), en el cual se ha considerado la base de datos sísmicos y de intensidades, así como la información recolectada de diversas publicaciones sobre sismos ocurridos en

Perú, de libre acceso. De acuerdo a Tavera (2001), esta información permitió considerar, para algunos sismos, nuevos valores de magnitud (M_w) y corregir la profundidad de otros eventos. Mientras que para el periodo 1960 a 1985, se ha tomado como base los datos publicados por la U.S. Geological Survey y hasta el año 2000 con información proveniente de Engdahl et al. (1998). Finalmente, entre el año 2000 y 2022 se utiliza los parámetros hipocentrales publicados por el IGP, a través del enlace <https://ultimosismo.igp.gob.pe/descargar-datos-sismicos>.

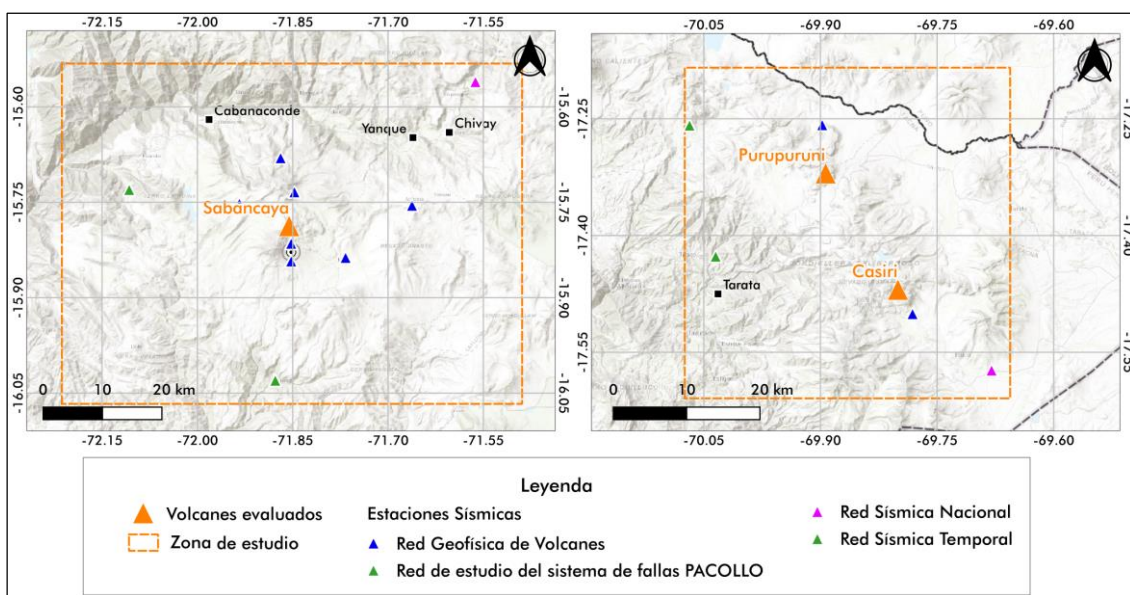


Figura 4.- Áreas de estudio fijadas para la selección de la actividad sísmica de las zonas de los volcanes Sabancaya (izquierda) y Purupuruni- Casiri (derecha).

Los sismos seleccionados para el análisis cumplen con los siguientes criterios:

- Filtrado por localización: se definieron 2 zonas de estudio en los volcanes Sabancaya (zona 1) y Purupuruni - Casiri (zona 2) (Figura 4, polígonos naranjas).
- Filtrado por magnitud para sismos $\geq M3.0$.
- Filtrado por profundidad: solo fueron seleccionados sismos con foco menor a 30 km bajo la superficie.

- Filtrado de eventos repetidos: al unir varios catálogos sísmicos se eliminó aquellos que presentaban parámetros hipocentrales con la misma fecha, hora y similar ubicación.

En cuanto a la información sismo-volcánica para las áreas de estudio, se han empleado los catálogos sísmicos de la Red Geofísica de Volcanes, administrada por el IGP. En el volcán Sabancaya, como estación de referencia se ha tomado a la estación SAB, ubicada a 1.9 km del cráter. Mientras que para los volcanes Purupuruni y Casiri se ha tomado a la estación CASI, ubicada a 23 km y 4 km de ambos centros volcánicos, respectivamente.

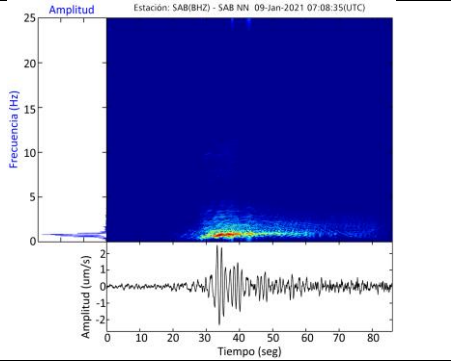
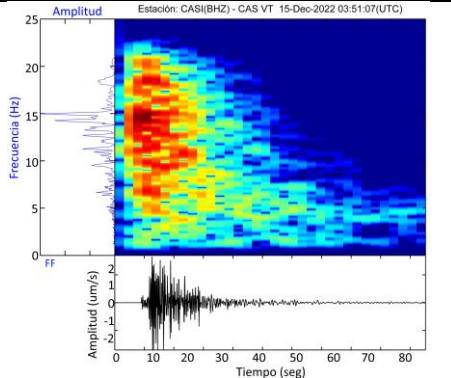
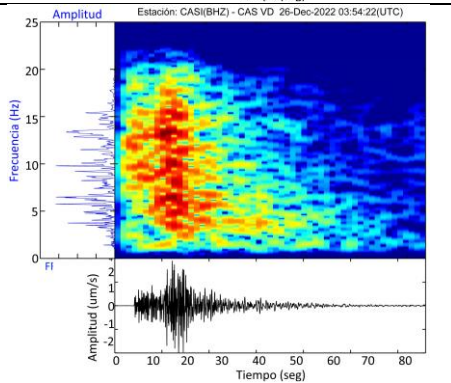
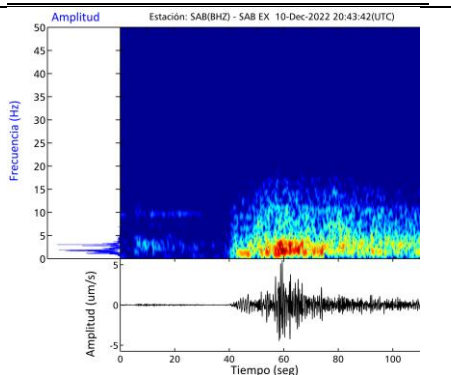
3.2. Tipos característicos de señales sísmicas

La clasificación de señales sísmicas utilizada está basada en los procedimientos descritos por Chouet (1996), Ibañez (1997) e Ibañez & Carmona (2000). Los principales tipos de sismos que se han analizado en el periodo de estudio fueron: Largo Periodo (LP), sismos de fractura, como son: Volcano-Tectónicos (VT) y Volcano-Tectónicos distales (VD) y explosiones. A continuación, En la Tabla 1 se presenta una breve descripción de cada uno de ellos.

3.3. Estimación del volumen de magma intruído

De acuerdo a White & McCausland (2015), el momento sísmico acumulativo (ΣMo) extraído de los sismos de fractura VT y VD, es proporcional al volumen de magma intruído. El volumen de magma intruído se puede estimar de forma sencilla a partir de la Σ Magnitud y ΣMo de la sismicidad de fractura, utilizando magnitudes publicadas por observatorios, a menudo calculadas a partir de la duración de los eventos. Se supone que las magnitudes están dentro de un factor de dos de las magnitudes del momento. Se convierten los valores de los eventos más grandes en momentos sísmicos con:

Tabla 1.- Tipos característicos de señales sísmicas analizadas en el presente estudio para los volcanes Sabancaya, Purupuruni y Casiri.

Tipo de señal sísmica	Forma de onda y características espectrales.
<p>Largo Periodo (LP): Frecuencia generalmente por debajo de 3 Hz y su duración no suele superar los 60 segundos (Centeno & Rivera, 2020). El origen de este tipo de eventos está asociado al movimiento y resonancia de fluidos volcánicos como consecuencia de una presurización al interior de fracturas o cavidades saturadas por fluido.</p>	 <p>Estación: SAB(BHZ) - SAB NN 09-Jan-2021 07:08:35(UTC)</p>
<p>Volcano-Tectónico (VT): Típicamente con una amplia banda espectral de hasta 15 Hz (Lahr et al., 1994). Están relacionados a la fractura de rocas como el resultado de esfuerzos causados, en buena parte, por la presión de fluidos.</p>	 <p>Estación: CASI(BHZ) - CAS VT 15-Dec-2022 03:51:07(UTC)</p>
<p>VT Distal (VD): sismos de fractura que conservan la misma o similar firma y rango de frecuencias que los VT. Están asociados a la activación temporal de sistemas de fallas, por tanto, se localizan entre 2 a 45 km alrededor de un volcán (White & McCausland, 2015).</p>	 <p>Estación: CASI(BHZ) - CAS VD 26-Dec-2022 03:54:22(UTC)</p>
<p>Explosiones: Presenta una componente inicial de bajas frecuencias (VLF) <1 Hz. Señal sísmica de gran energía que presenta inicio emergente.</p>	 <p>Estación: SAB(BHZ) - SAB EX 10-Dec-2022 20:43:42(UTC)</p>

$$\log_{10} \text{Momento} = 16.1 + \left(\frac{3}{2}\right) \text{Magnitud} \dots \dots \dots \text{(Hanks \& Kanamori, 1978)}$$

A continuación, se suma estos momentos para obtener ΣMo y la magnitud acumulativa correspondiente para un único sismo que tenga la energía acumulativa de todos los eventos de fractura del enjambre combinados.

Entonces relacionamos esto con el volumen de magma intruído:

$$\log_{10} V = 0.71 * \log \Sigma \text{Momento} - 5.32$$

Con el cambio de volumen V en metros cúbicos y el momento sísmico en Newton*metros.

3.4. Cálculo de hipocentros

Para el cálculo de los parámetros hipocentrales de los sismos volcánicos identificados y procesados, se hizo uso del algoritmo Hypoellipse (Lahr, 1999, revised 2012) y de una estructura de distribución de velocidades en capas horizontales. Para el Sabancaya, el modelo de velocidad usado (Tabla 2) corresponde al propuesto por Machacca et al. (2023) y para la zona de Purupuruni-Casiri se utiliza un modelo genérico empleado por el IGP en el volcán Yucamane (Tabla 3). Por otro lado, la magnitud de sismos locales fue estimada desde la duración de la señal usando la siguiente fórmula empírica:

$$\text{Magnitud Local (ML)} = -0.87 + 2 * \log \tau + 0.0035\Delta$$

donde:

Magnitud: estimación de la magnitud de Richter.

T: duración de la señal en segundos.

Δ : distancia epicentral en kilómetros.

Esta escala de magnitud fue establecida analizando la relación entre la magnitud Richter, duración de la señal y la distancia epicentral (Lee et al., 1972).

Tabla 2.- Modelo de velocidad del volcán Sabancaya.

Profundidad de la capa (km snm)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Vp/Vs
-5.8	2.87	1.74	1.65
-3.3	4.34	2.83	1.53
-2.3	5.3	3.13	1.69
-1.3	5.49	3.30	1.66
-0.3	5.55	3.34	1.66
0.7	5.66	3.36	1.69
1.7	5.71	3.4	1.68
2.7	5.72	3.44	1.66
4.2	5.72	3.51	1.63
5.7	5.72	3.57	1.60
7.7	5.74	3.58	1.60
9.7	5.79	3.59	1.62
11.7	5.85	3.59	1.63

Tabla 3.- Modelo de velocidad de los volcanes Purupuruni- Casiri.

Profundidad de la capa (km snm)	Vp (km/s)	Vp/Vs
0	5.7	1.77
5	6	1.77
15	6.1	1.77
25	6.6	1.77
35	6.8	1.77
50	7.8	1.77

3.5. Deformación volcánica

Para analizar la deformación cortical de la zona del volcán Sabancaya, asociada a la actividad volcánica, se ha empleado la información procesada por Vargas et al. (2023), de la estación GNSS N2 para el periodo 2019 al 2022, ubicada a 6 km al norte del volcán. Esta técnica permite evaluar la deformación asociada a una fuente principal ubicada entre 12 y 15 km al sur del volcán Hualca Hualca, tal como ha sido propuesto anteriormente por MacQueen et al. (2020) y Boixart et al. (2020).

El análisis de la deformación de los volcanes Purupuruni-Casiri, ha empleado los resultados obtenidos por Vargas et al. (2022), a partir del método DInSAR, el cual produce un mapa espacial de la deformación del terreno al comparar dos imágenes SAR tomadas en diferente tiempo. Específicamente, entre 2020 y 2021 ha identificado 4 zonas de deformación en el entorno de ambos volcanes que estarían relacionadas con la activación de la falla Pacollo y con un lóbulo de deformación positiva que abarca desde el sur del Purupuruni hasta el sur del Casiri, que podría asociarse a un proceso de inflación por ascenso de magma.

4. RESULTADOS

4.1. Características de la actividad sísmica

Volcán Sabancaya: Como se mencionó anteriormente, se filtraron los sismos de los catálogos recopilados para eventos que presentaron magnitudes mayores a M3.0, analizando un total de 2 316 sismos registrados entre 1968 y 2022.

Dichos catálogos analizados dan cuenta, desde 1968, de escasa o nula actividad sísmica (incluso desde 1471) en la zona del complejo volcánico Ampato-Sabancaya (CVAS), volcán Hualca Hualca y de los diversos sistemas de fallas activas presentes, durante periodos de reposo volcánico. Contrario a ello, la actividad sísmica de la zona del volcán Sabancaya se incrementaba durante el inicio de la actividad pre-eruptiva, por ejemplo: 1986-1989 y 2013-2016 (Figuras 5A y 5D). así también, se han evidenciado procesos de deformación cortical (Jay et al., 2015) y notoria presencia de fumarolas de vapor de agua y gases con alturas de hasta 1000 m y el incremento de la temperatura al nivel del cráter (Huamán & Guillande, 1990).

Durante la etapa eruptiva de 1990 los parámetros sísmicos se intensificaron (Rodríguez & Huamán, 1992), presentando además, sismos importantes como son los de Maca (M5.4) y Sepina (M5.0), ocurridos el 23 de julio de 1993 y 1 de febrero de 1992, respectivamente (Antayhua et al., 2002). Ver Figura 5B. Así también, se identificaron anomalías de deformación volcánica con tasas de 1 a 1.5 cm/año (Pritchard & Simons, 2002).

Por otro lado, la sismicidad registrada entre 2001 y 2002, aunque dispersa, muestra a ciertos eventos que tienden a aproximarse a la zona del volcán Hualca Hualca o zona de deformación (Pritchard & Simons, 2002) (Figura

5C). Asimismo, entre 2003 y 2012, la sismicidad registrada es mínima y presenta magnitudes por debajo de M3.0, a excepción del sismo del 12 de agosto de 2011 de magnitud M5.1, localizado a 32 km al oeste del Sabancaya, sobre la falla de Huanca.

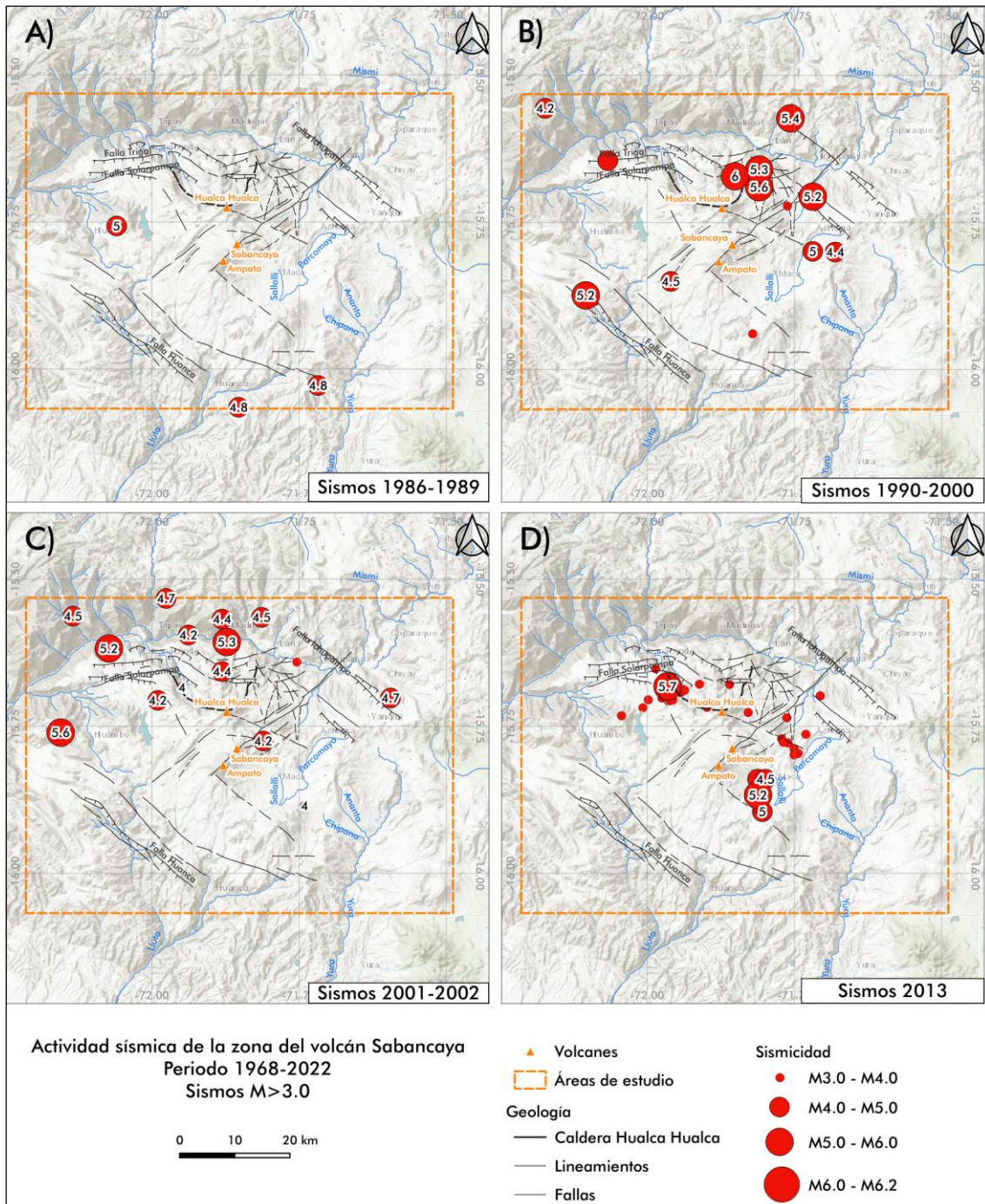


Figura 5.- Sismicidad analizada en el área del volcán Sabancaya para el periodo 1986 – 2013.

En la actual erupción, iniciada en noviembre de 2016, nuevamente se registró el incremento de parámetros sísmicos y de deformación volcánica, la sismicidad ha presentado varios focos (Figuras 6A, 6B, 6C y 6D) sobre y alrededor de la fuente de deformación superficial, ubicada bajo el volcán Hualca Hualca (Boixart et al., 2020) y sobre los principales sistemas de fallas, como son Trigal, Solarpampa, Sepina e Ichupampa.

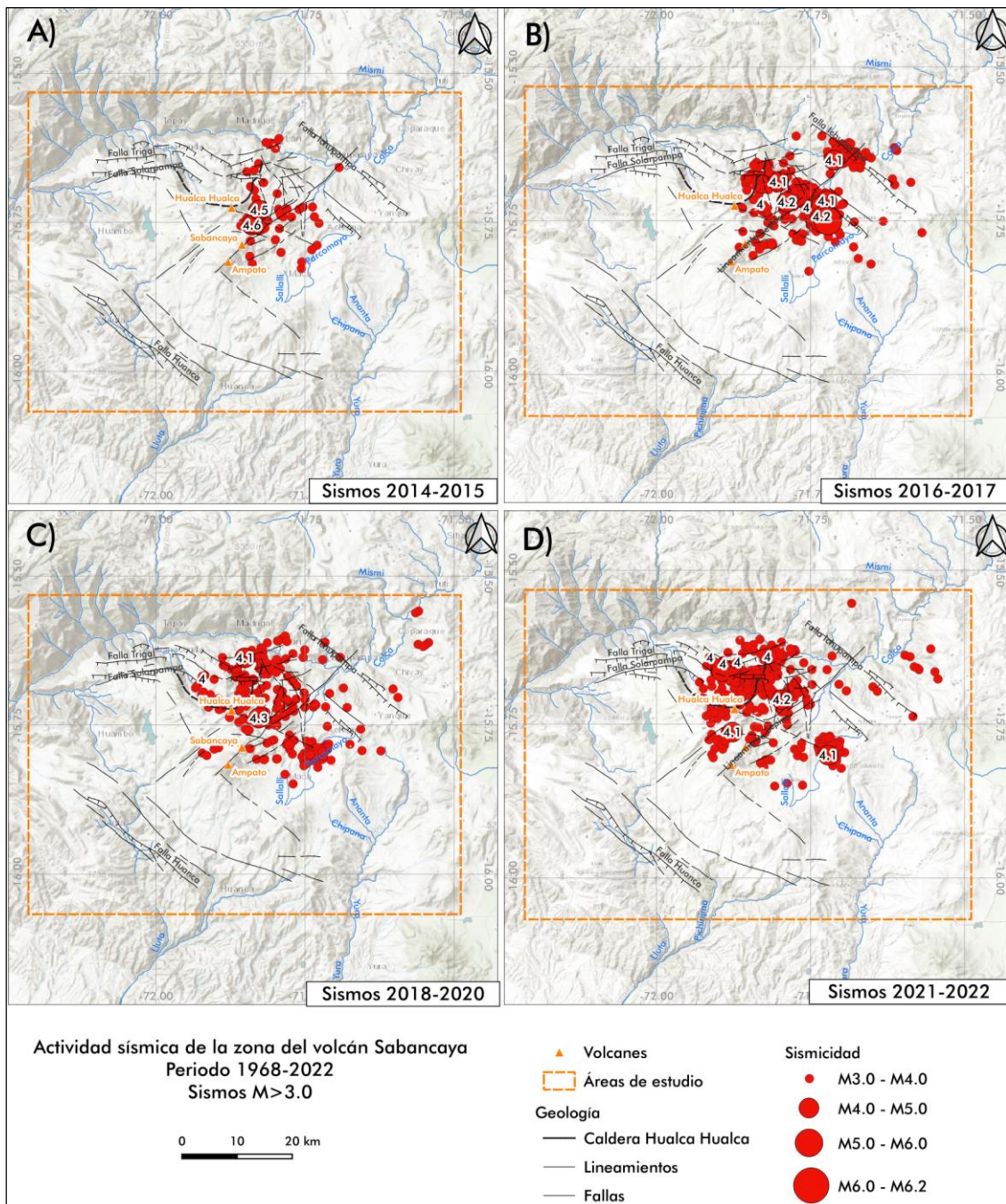


Figura 6.- Sismicidad analizada en el área del volcán Sabancaya para el periodo 2014 – 2022.

De acuerdo a la magnitud y número de sismos registrados por la Red Sísmica Nacional y Red Geofísica de Volcanes del IGP, los periodos de mayor actividad sísmica y eruptiva se presentaron entre 1991 y 1992 y en 2016 (Figuras 5B y 6B), para ambos procesos eruptivos, respectivamente. Para el último de ellos, la información se corrobora con el incremento de 0.05 Mm^3 en la curva relacionado con el volumen de magma intruido ocurrida entre febrero de 2013 y la primera quincena de agosto de 2016, y con un volumen superior a 6 Mm^3 a partir de la segunda quincena de agosto de 2016, meses antes del inicio de la erupción del volcán Sabancaya (Figura 7A).

En relación a la actividad explosiva, mediante el análisis de señales sísmicas, entre octubre y diciembre de 1991 y agosto y septiembre de 1992 se registró un promedio máximo de 300 y 350 explosiones por mes, respectivamente (Rodríguez & Uribe, 1994), siendo este periodo el de mayor actividad durante aquel proceso eruptivo. No hay registro o informes que señalen cambios morfológicos en el cráter relacionados con domos de lava en aquel periodo.

Para la erupción actual, los periodos de mayor explosividad, con máximos de hasta 113 eventos por día y picos de energía sísmica de hasta 463 MJ (8 de noviembre de 2019), han ocurrido entre (i) diciembre de 2016 y noviembre de 2017, (ii) octubre y noviembre de 2019, (iii) septiembre y noviembre de 2020, (iv) febrero y julio de 2021 y (v) octubre y diciembre de 2021; asociados a los periodos de mayor explosividad se observó procesos de formación y crecimiento de domos de lava emplazados entre 2019 y 2022, se considera a los de 2019 y 2020 más importantes por el área ($11\,700 \text{ m}^2$) y volumen de material acumulado, de hasta $4.43 \times 10^6 \text{ m}^3$. Pevio a la formación o crecimientos de dichos domos se ha observado el incremento de la actividad sísmica, relacionada con cambios de la pendiente en la curva estimada del volumen intruido, para los periodos que comprende abril a

agosto de 2019, agosto de 2020 y septiembre y octubre de 2021 (Figura 7B). No se observan variaciones para el año 2022.

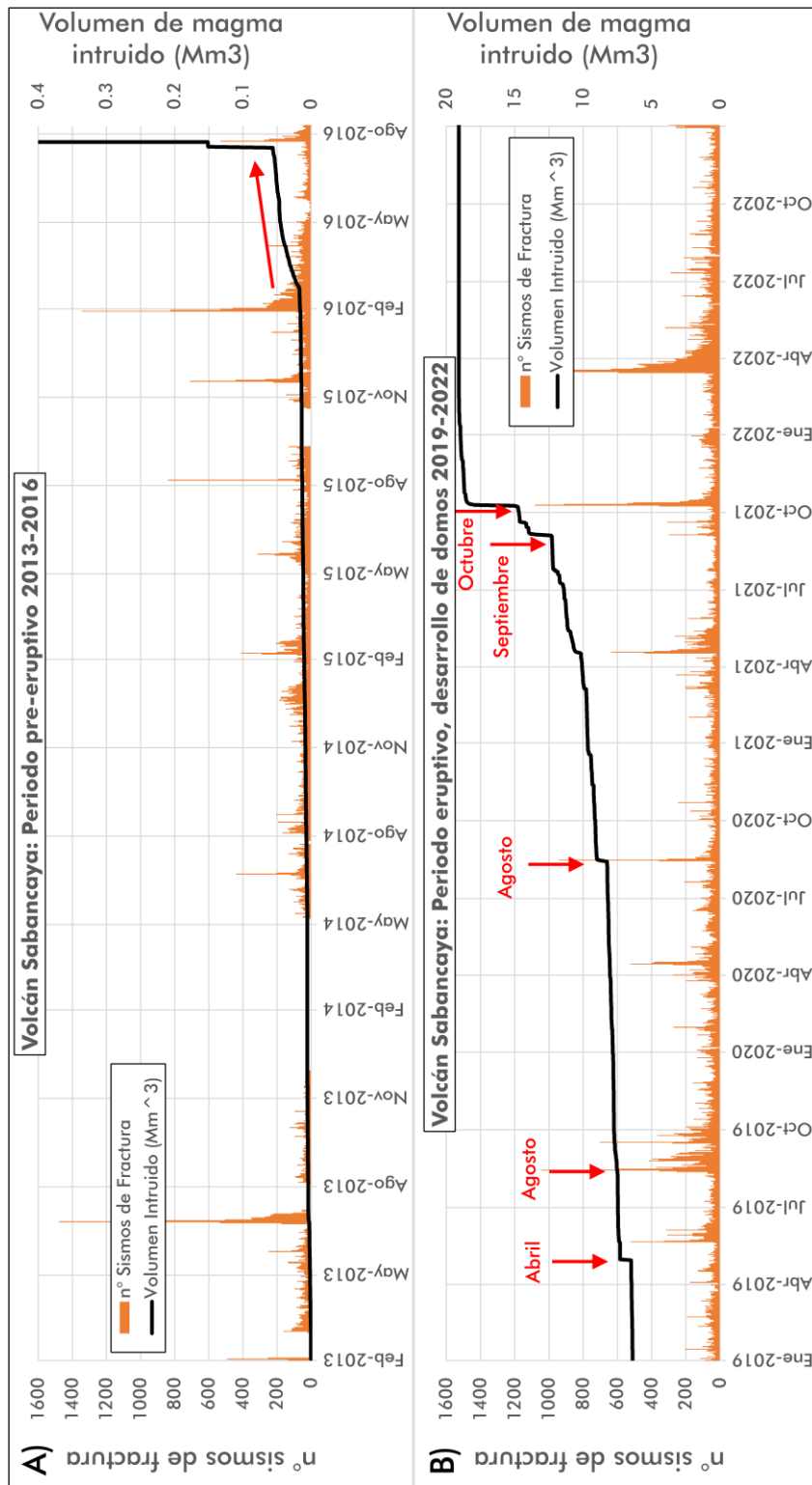


Figura 7.- Cálculo del volumen intruido en el volcán Sabancaya para: (A) periodo pre-eruptivo 2013-2016 y (B) periodo eruptivo 2019-2022 y desarrollo de domos de lava.

Asimismo, los focos sísmicos desarrollados antes de ocurrir dichas variaciones en el Sabancaya fueron localizados en los sectores norte y este del cráter, a 12.4 km y 12.9 km, respectivamente. De acuerdo al análisis se han identificado 4 zonas (Figura 8), son las siguientes:

Zona 1.- Aunque dispersa entre abril y julio de 2019, se observan 2 focos importantes, el primero registrado entre abril y mayo, ubicado a 6 km al NO del Sabancaya y una magnitud máxima de M4.3, y el segundo enjambre importante ocurrió en agosto de ese mismo año, ubicada a 13 km al este del Sabancaya; ambos enjambres se correlacionan con cambios de pendiente del volumen de magma intruido (Figura 7B). Presentó magnitudes de hasta M3.8 (Figura 8, círculos rojos).

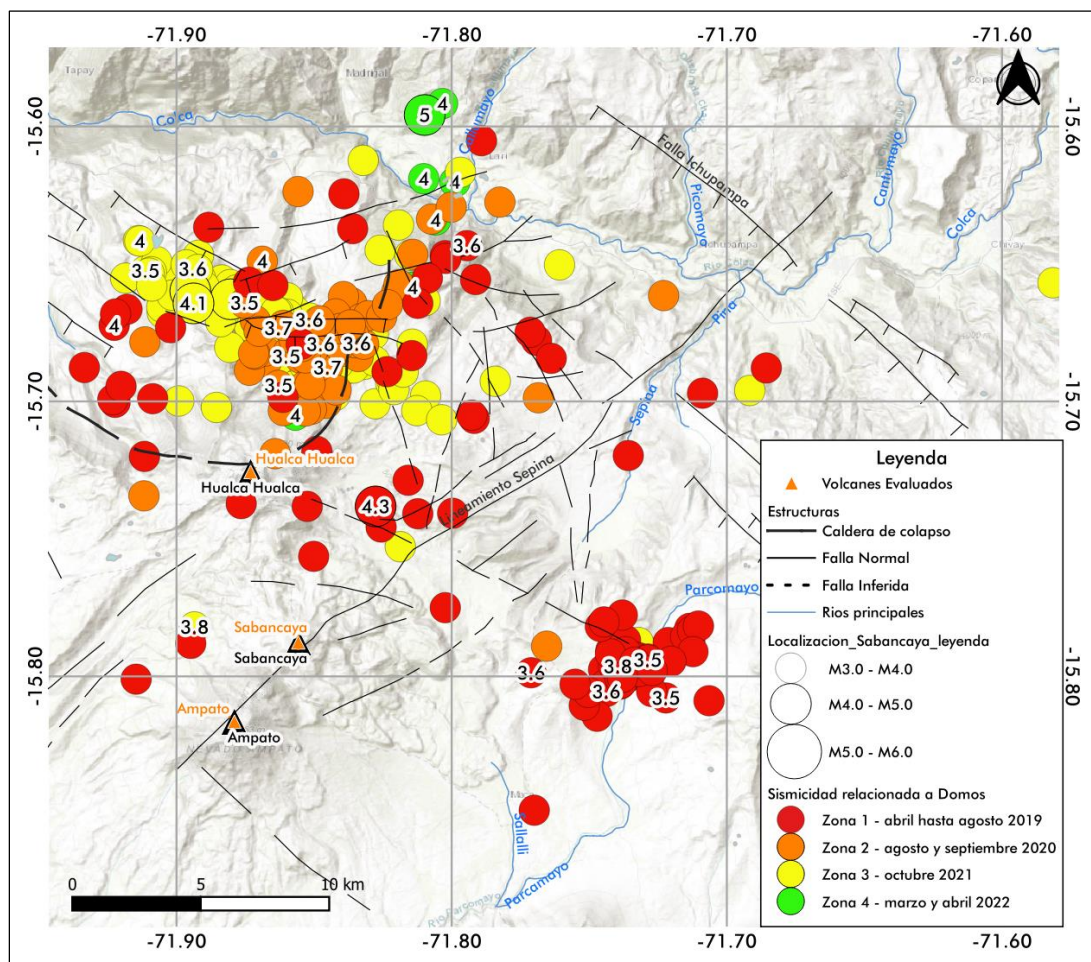


Figura 8.- Focos sísmicos registrados en los sectores norte y este del volcán Sabancaya en el periodo 2019 al 2022, relacionados con intrusiones de magma y posterior formación o crecimiento de domos de lava.

Zona 2.- Presenta una concentración de sismos a 12 km al norte del Sabancaya, sobre el sector este de colapso de caldera de Hualca Hualca (Figura 8, círculos naranjas). Se desarrollo en agosto de 2020, también asociado a cambios de pendiente del volumen de magma intruido (Figura 7B), y presenta magnitudes de hasta M3.9.

Zona 3.- Comprende un enjambre de sismos registrados en octubre de 2021, cuyo centro sísmico, evento de M4.6, se ubica a 15 al NO del cráter del Sabancaya. Este foco se extiende sobre el centro del colapso de caldera del Hualca Hualca en dirección NW-SE, aparentemente sobre el tramo este de la falla Trigal, nuevamente asociado a un cambio de pendiente del volumen de magma intruido (Figuras 7B y 8, círculos amarillos).

Zona 4.- Ubicado a 19 km al norte del volcán Sabancaya, bajo el centro poblado de Madrigal (Figura 8, círculos verdes). Se desarrollo en marzo de 2020, registrando un sismo principal de M5.0 el 16 de marzo del mismo año. No se observan cambios de pendiente del volumen de magma intruido durante el registro de este enjambre.

Volcanes Purupuruni y Casiri: En la zona de los volcanes Purupuruni y Casiri, la primera actividad sísmica de tipo fractura (VD), aunque escasa, se ha registrado entre los años 2001 y 2017, resalta la ocurrencia de un sismo de magnitud M5.5, registrado por el CENSIS el 10 de septiembre de 2007, no existen mayores reportes que indiquen la generación de replicas importantes o el desarrollo de enjambres sísmicos (Figura 9A). La actividad de mayor intensidad se registró entre 2020 y 2021, con sismos que alcanzaron magnitudes de hasta M5.0 (Figura 9B y 9C). Entre mayo y julio de 2020 los hipocentros se distribuyeron paralelos a la falla Pacollo, migrando en dirección NO-SE (Velarde et al., 2020). En 2021, la actividad sísmica migro hacia el sector norte de la falla Pacollo, sobre tramos no conocidos de dicha falla (Antayhua et al., 2021) (Figura 9C). En 2022 se observa que las señales sísmicas de tipo fractura disminuyeron a razón de

11 sismos por día (95% menos que en 2021). En general, entre el 2001 y 2022 fueron seleccionados 90 eventos sísmicos que presentaron magnitudes mayores a M3.0 (Figura 9).

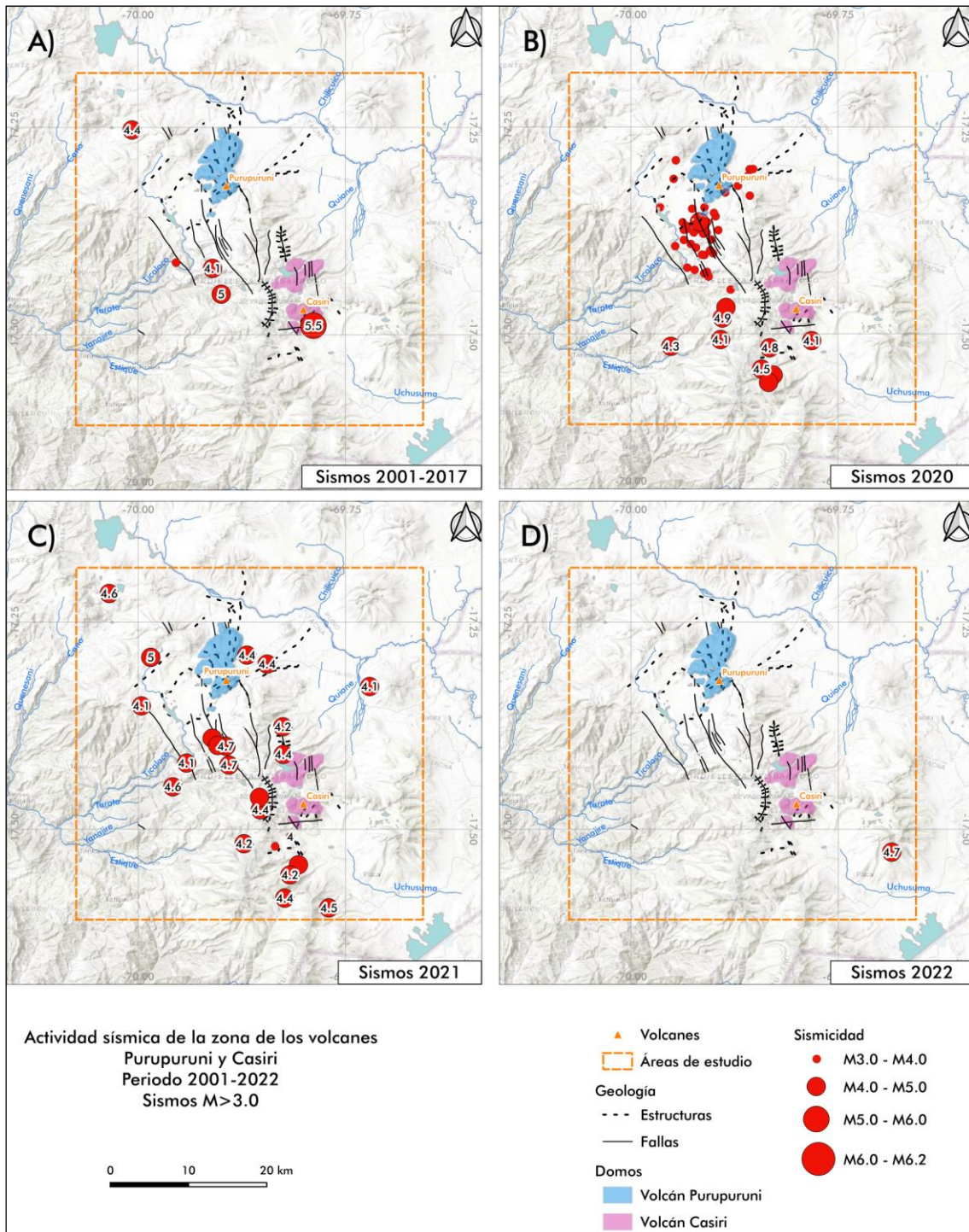


Figura 9.- Sismicidad analizada en el área de los volcanes Purupuruni y Casiri para el periodo 2001 – 2022.

Por otra parte, luego del análisis de las señales sísmicas registradas entre 2019 y 2022, de la estación CASI, resalta la ocurrencia, el día 5 del mayo de 2020 a las 15:49 UTC (Figura 10), de un enjambre sísmico muy puntual, conformado por aproximadamente 170 eventos de tipo fractura (VD) y con una duración total de 40 minutos; características que lo convierten en el enjambre más corto registrado por dicha estación. Los enjambres son generalmente asociados a la intrusión de magma (Gillard et al., 1996; Aoki et al., 1999; Toda et al., 2002; Wright et al., 2006), típicamente se desarrollan en ambientes volcanicos (Bartley et al., 2012; Benoit & McNutt, 1996; Farrell et al., 2010; Rubin et al., 1998; Ágústsdóttir et al., 2016) y pueden o no resultar en una erupción volcánica (Glazner & McNutt, 2021).

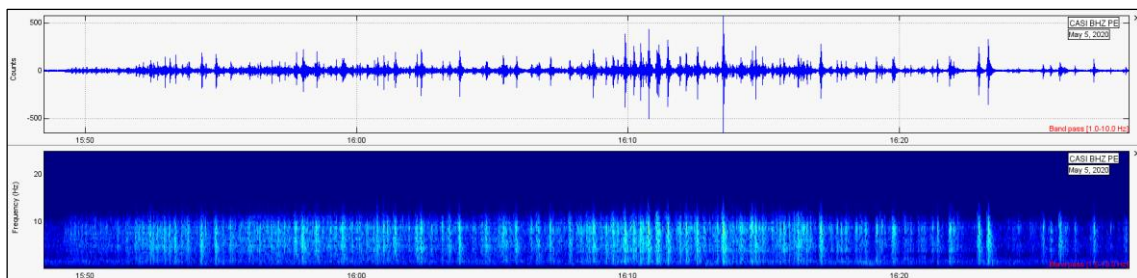


Figura 10.- Registro sísmico del enjambre ocurrido el 5 de mayo de 2020.

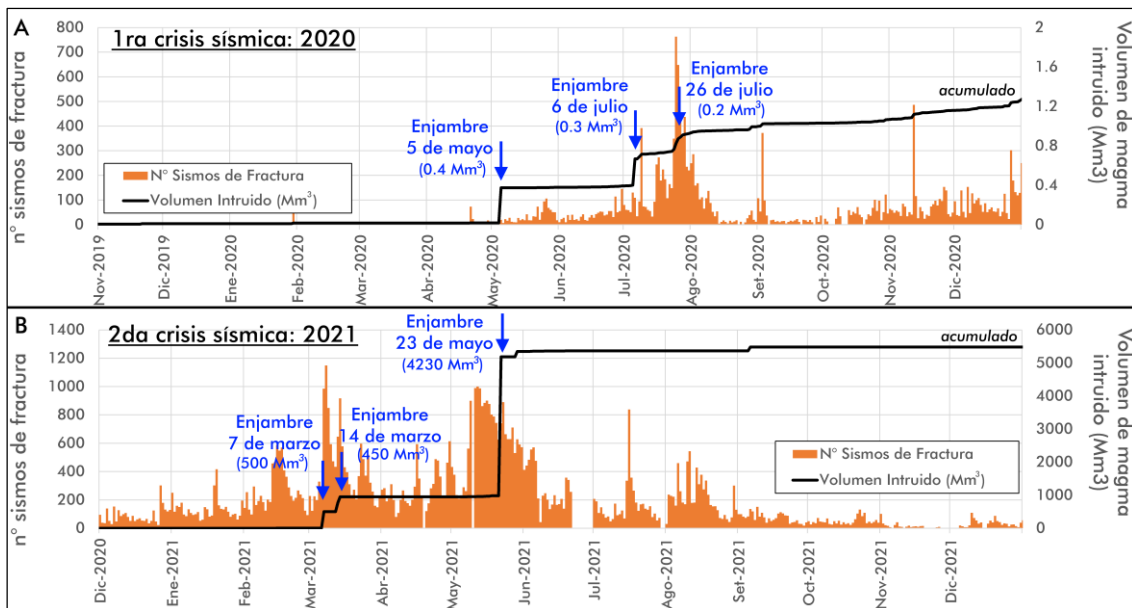


Figura 11.- Cálculo del volumen intruido en los volcanes Purupuruni y Casiri para: (A) periodo noviembre 2019-diciembre 2020, primera crisis sísmica y (B) periodo diciembre 2020-diciembre 2021, segunda crisis sísmica.

El enjambre de mayo de 2020 marca el inicio del incremento del número de sismos registrados entre junio y agosto de ese mismo año y que comprende la primera crisis sísmica (2020) descrita por Antayhua et al. (2021), otros enjambres iniciaron el 6 y 26 de julio de 2020; asimismo, la curva de volumen de magma intruido asciende desde un valor de 0.02 Mm^3 a 0.4 Mm^3 luego del enjambre descrito (Figura 11A). De acuerdo a Vargas et al. (2022), desde mayo de 2020 se observa mayores velocidades de deformación, coherentes con un desplazamiento vertical de 8.5 cm, esta deformación registrada en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri es positiva y relacionada a un levantamiento, esta podría ser consecuencia del ascenso de magma hacia la superficie que desestabiliza a las fallas activas.

En el caso de la segunda crisis sísmica, inicia con un sismo principal y subsecuentes replicas, tipo mainshock-aftershock, el día 7 de marzo de 2021 y un segundo enjambre el 14 de marzo del mismo año, que significó una variación en el cálculo del volumen intruido acumulado de 2.5 Mm^3 a 950 Mm^3 . Un tercer enjambre se registra desde el 22 de mayo de 2021, la intrusión calculada asciende a 4230 Mm^3 y un incremento acumulado de hasta 5186 Mm^3 (Figura 11B). El patrón de deformación observado en abril y mayo de 2021 estaría asociado al hundimiento de la superficie en los domos norte de Purupuruni y a 10 km al sur del mismo centro volcánico (Vargas et al., 2022).

En general, el análisis de los interferogramas (2019-2021), correlacionadas con las crisis sísmicas de 2020 y 2021 del presente estudio, muestran un patrón de deformación positiva en forma de elipse, que abarca desde el sur del volcán Purupuruni hasta el sur del volcán Casiri, según Vargas et al. (2022), podría asociarse a un posible proceso de inflación por ascenso de magma.

5. DISCUSIÓN

5.1. Actividad sísmica en crisis volcánicas vs periodos de reposo

Volcán Sabancaya: Para el volcán Sabancaya, la actividad sísmica producto de la reactivación temporal de fallas se ha desarrollado dentro de periodos pre-eruptivos (1986-1990 y 2013-2016) y eruptivos, como los procesos de 1990-1998 y 2016-actualidad. Durante dichos episodios, se observa un mayor registro sísmico para eventos con magnitudes superiores a $M3.5$ cuando se desarrollan crisis eruptivas, con excepción de la sismicidad registrada entre 2001 y 2002. Sin embargo, de acuerdo a Antayhua & Tavera (2003), en julio de 2002 habría continuado la actividad explosiva del volcán Sabancaya, en esa misma línea, el Global Volcanism Program (2004) refiere que existieron emisiones de ceniza en julio de 2003. Aunque fuentes indican como final de la última erupción en 1998 (Gerbe & Thouret, 2004). La siguiente figura da cuenta de que la actividad sísmica con eventos $> M3.5$ ha ocurrido en los periodos pre-eruptivos y eruptivos del volcán Sabancaya (Figura 12, líneas gris y naranja) y, probablemente, la actividad explosiva que implicaría emisiones de ceniza, habría continuado hasta julio de 2003 (Figura 12, línea amarilla). Por tanto, no existen registros importantes de sismicidad anómala en ausencia de crisis volcánica, es decir, en periodos de reposo.

Volcanes Purupuruni y Casiri: En los volcanes Purupuruni-Casiri, anterior a 2017 no existen sismos que indiquen un comportamiento de tipo enjambre o inusual en la zona de estudio, como los ocurridos entre 2020 y 2021, con la consecuente reactivación de la falla Pacollo y otras paralelas.

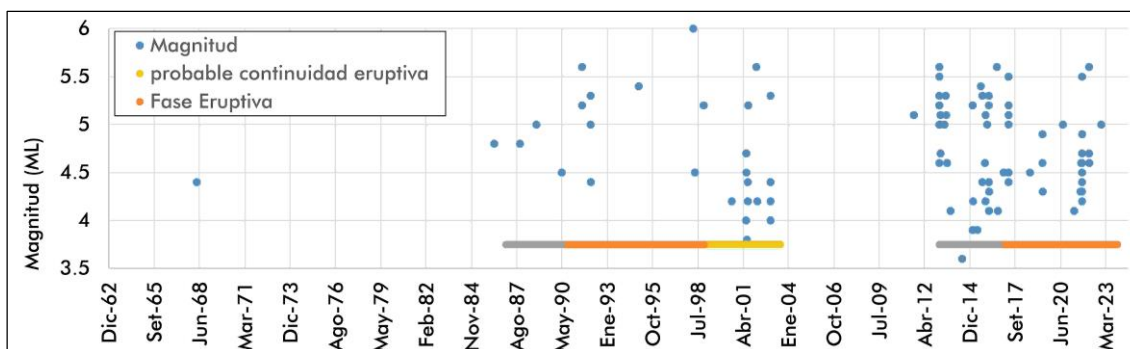


Figura 12.- Sismos con Magnitud \geq M3.5 ocurrida en inmediaciones del volcán Sabancaya en periodos pre-eruptivos (línea gris), eruptivos (línea naranja) y de probable continuidad de la erupción de 1990-1998 hasta 2003 (línea amarilla).

5.2. Volcán Sabancaya, episodios de mayor explosividad

El Sabancaya a lo largo del actual proceso eruptivo ha generado periodos de intensa actividad explosiva que fueron precedidos por importantes enjambres sísmicos (tipo VD y VT) con magnitudes mayores a M3.5, localizados en un radio de hasta 22 km del cráter del Sabancaya (Figura 8), posiblemente relacionados a la actividad tectónica (Falla Trigal, Solarpampa, lineamiento Sepina, etc.) y volcánica (CVAS) presente en la zona del valle del Colca. Las zonas referidas en la Figura 13, están relacionadas al desarrollo de distintos focos sísmicos durante el periodo comprendido entre 2019 y 2022 y localizados en la Figura 8. Luego del registro de las señales de tipo fractura (VD y VT), se identificaron señales sísmicas de tipo Largo Periodo (LP), así como, variaciones en la velocidad de la deformación cortical de la superficie alrededor del volcán (Figura 13), previo y durante el desarrollo de los enjambres.

El análisis de los datos geofísicos: sísmicos, de deformación volcánica, así como, imágenes de cámaras de monitoreo y satelitales, han determinado, para los periodos 2019, 2020, 2021 y 2022, un patrón que comprende: (A) el registro de alta sismicidad de tipo fractura VD+VT con magnitud \geq M3.5, observados previo o paralelamente con (B) disminución de la velocidad de deformación (\sim 1.6 cm/año, Vargas et al., 2023), (C) posterior incremento de la energía de señales sísmicas asociadas al movimiento de fluidos (LP) y, en

consecuencia, (D) incremento de la actividad explosiva con cambios morfológicos del cráter asociados a la extrusión de un domo de lava o el crecimiento del mismo (Figura 13).

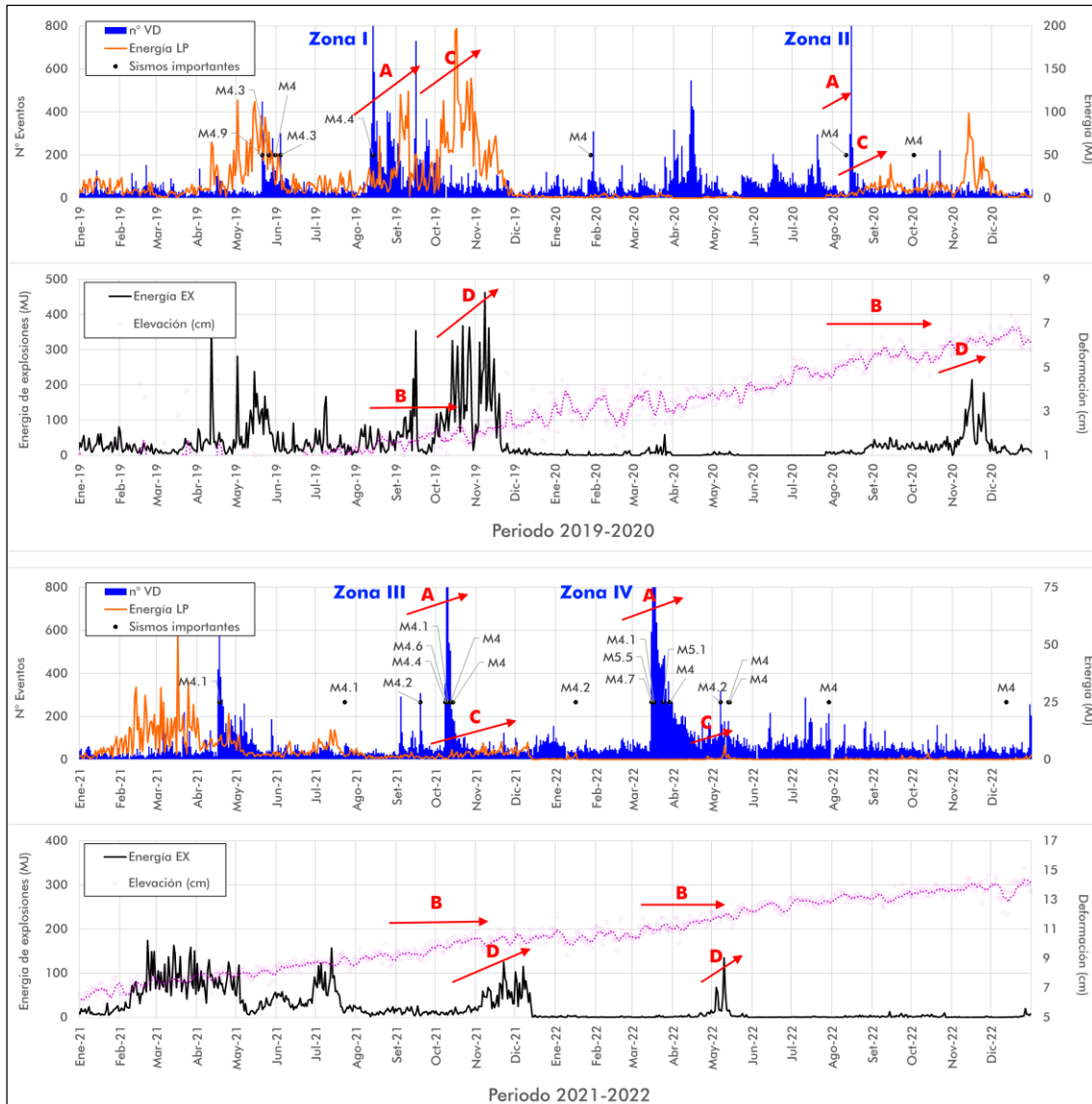


Figura 13.-Patrón de señales geofísicas que presentan cambios antes del desarrollo de una mayor actividad explosiva con crecimiento de domos de lava, periodos 2019, 2020, 2021 y 2022. Las zonas I, II, III y IV guardan relación con la ubicación de los focos sísmicos descritos en la Figura 8.

5.3. Enjambres sísmicos y reactivación de la falla Pacollo

La actividad en la zona de estudio 2, ha sido representada por el registro de enjambres sísmicos detectados entre los años 2020 y 2021, tal como lo describen Velarde et al. (2020) y Antayhua et al. (2021). La sismicidad

observada se ha distribuido en un área de aproximadamente 525 000 km², migrando en dirección NW-SE para el 2020 y Norte para el 2021. Asimismo, el enjambre sísmico mostrado en la Figura 10 es típico de actividad volcánica, además, Vargas et al. (2022) evidencian, a partir de interferogramas con imágenes obtenidas entre mayo de 2019 a mayo de 2021, una deformación positiva en forma de elipse que abarca desde el sur del volcán Purupuruni hasta el sur del Casiri, dicho levantamiento, indican, podría asociarse a un proceso de inflación por ascenso de magma. Asimismo, el modelo conceptual de la zona geotermal Casiri-Kallapuma, propuesto por Cruz et al. (2020), sitúan una fuente de calor ubicada a partir de los 4.5 km de profundidad que estaría asociada al aparato volcánico Casiri-Paucarani, también asociada a lineamientos N-S y fallas sub paralelas como la falla Pacollo.

La actividad sísmica, desarrollada a través de enjambres y procesos de deformación superficial positiva para la zona de los volcanes Purupuruni-Casiri no es único en el mundo; procesos con características similares se ha desarrollado en los últimos siglos en la caldera de Yellowstone (Estados Unidos); de acuerdo a Shelly et al. (2013), el enjambre de la meseta Madison de 2010 se habría desencadenado por la ruptura de una zona de fluidos a alta presión confinada en un sistema de fallas de la corteza, lo que provocó la liberación de la tensión acumulada. Asimismo, cita a Hainzl (2004) para indicar que la modelización numérica sugiere que la fuerte propagación espacial de los hipocentros (sismicidad en enjambre y varios focos sísmicos y/o migración de la sismicidad) es indicativa de un desencadenamiento de fluidos en lugar de un desencadenamiento de tensiones.

Por tanto, es muy posible que en el futuro las crisis sísmicas ocurridas entre 2020 y 2021 en los volcanes Purupuruni y Casiri vuelva a repetirse y aunque no involucre necesariamente el desarrollo de una erupción volcánica, una red de monitoreo más fortalecida podría darnos mayores datos que permitan evaluar mejor todos los escenarios posibles.

CONCLUSIONES

- Un total de 2199 sismos, registrados entre 1968 y 2022, fueron analizados para la evaluación de la sismicidad desarrollado en las dos zonas de estudio. En base de ello, en el volcán Sabancaya se observó que la actividad sísmica se incrementada exponencialmente durante el desarrollo de fases pre-eruptivas (1986-1989 y 2013-2013) y eruptivas (1990-1998 y 2016-actualidad). Asimismo, en el caso de los volcanes Purupuruni y Casiri (periodo 2020 y 2021) con el desarrollo de enjambres y procesos de deformación superficial, sin erupción.

- Las observaciones geofísicas realizadas en el volcán Sabancaya han determinado, para los periodos 2019, 2020, 2021 y 2022, un patrón que pronosticaría periodos de intensa actividad explosiva en base al desarrollo del siguiente proceso: (A) el registro de alta sismicidad de tipo fractura con magnitud $\geq M3.5$, observados previo o paralelamente con (B) disminución de la velocidad de deformación, (C) posterior incremento de la energía de señales sísmicas asociadas al movimiento de fluidos (LP) y, en consecuencia, (D) incremento de la actividad explosiva con cambios morfológicos del cráter asociados a la extrusión de un domo de lava o el crecimiento del mismo.

- Para el caso de las crisis sísmicas ocurridas en la zona de los volcanes Purupuruni y Casiri, la conjugación de la actividad sísmica de tipo enjambre y el desarrollo de procesos de deformación positiva en forma de elipse, indicarían la participación de una componente magmática como factor que condiciona la ruptura de una zona de fluidos de alta presión con la consecuente reactivación de los sistemas de fallas presentes en el área.

BIBLIOGRAFÍA

- Ágústsdóttir, T., Woods, J., Greenfield, T., Green, R., White, R., Winder, R., . . . et al. (2016). Strike-slip faulting during the 2014 Bárðarbunga-Holuhraun dike intrusion, central Iceland. *Geophysical Research Letters*, 43, 1495-1503.
- Antayhua, Y., & Tavera, H. (2003). *Volcanes y sismicidad en la región del volcán Sabancaya (Arequipa)*. Monografía, Instituto Geofísico del Perú, Centro Nacional de Datos Geofísicos.
- Antayhua, Y., Tavera, H., Bernal, I., Palza, H., & Aguilar, V. (2002). Localización hipocentral y características de la fuente de los sismos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (1998). Región del volcán Sabancaya. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 93, 63-72.
- Antayhua, Y., Velarde, L., Vargas, K., Tavera, H., & Villegas, J. (2021). *Actividad sísmica en el entorno de la falla Pacollo y volcanes Purupuruni - Casiri (2020 – 2021)*. Distrito de Tarata – Región Tacna. Instituto Geofísico del Perú, Lima. Retrieved from <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4944>
- Aoki, Y., Segall, P., Cervelli, P., & Shimada, S. (1999). Imaging magma transport during the 1997 seismic swarm of the Izu Peninsula, Japan. *Science*, 286, 927-930.
- Bartley, J., Glazner, A., & Mahan, K. (2012). Formation of pluton roofs, floors, and walls by crack opening at Split mountain, Sierra Nevada, California. *Geosphere*, 8(5), 1086-1103.
- Benoit, J., & McNutt, S. (1996). Global volcanic earthquake swarm database and preliminary analysis of volcanic earthquake swarm duration. *Annali di Geofisica*, 39(2), 221-229.
- 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 sensing*, 1-11. doi:10.3390/rs12111852
- Brill, K., Waite, G., & Chigna, G. (2018). Foundations for Forecasting: Defining Baseline Seismicity at Fuego Volcano, Guatemala. *Frontiers in Earth Science*, 6, 1-18.
- Bromley, G., Thouret, J., Schimmelpfennig, I., Mariño, J., Valdivia, D., Rademaker, K., & ASTER-Team. (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*, 64.
- Centeno, R., & Rivera, M. (2020). *Reconocimiento automático de señales sísmicas de origen volcánico para la alerta*. Informe Vulcanológico IGP/CENVUL-MIS/IV 2020-0001, Instituto Geofísico del Perú, Lima.

- Centeno, R., Lazarte, I., Vargas, K., Llerena, J., Rivera, M., Del Carpio, J., & Tavera, H. (2022). *Evaluación geofísica de la actividad eruptiva actual del volcán Sabancaya y formación de un domo de lava (Caylloma - Arequipa)*. Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- Centeno, R., Vargas, K., Del Carpio, J., Torres, J., Lazarte, I., Mamani, J., & Valdivia, D. (2023). *Evaluación del comportamiento eruptivo del volcán Sabancaya (Mayo 2022-julio 2023)*. Informe Técnico N°023-2023/IGP CTS, Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- CERESIS. (01 de Abril de 2013). *Centro Regional de Sismología para América del Sur*. Obtenido de Catálogo de Hipocentros: <https://www.ceresis.org/catalogo.php?id=58>
- Chouet, B. (1996). New methods and future trends in seismological volcano monitoring. En R. T. Scarpa, *Monitoring and mitigation of volcanohazards* (págs. 23-97). Springer-Verlag.
- Cruz, J., Vargas, K., & Rivera, M. (2019). *Identificación de cambios morfológicos en el cráter del volcán Sabancaya mediante sobrevuelo de drones*. Informe técnico, Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- Cruz, V., Flores, R., & Velarde, Y. (2020). *Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de la zona geotermal Casiri - Kallapuma, región Tacna*. Boletín serie B: Geología Económica, INGEMMET, Lima.
- Del Carpio, J., Rivera, M., Puma, N., Cruz, J., Vargas, K., Lazarte, I., . . . Concha, J. (2019). *Evaluación geofísica del comportamiento dinámico actual del volcán Sabancaya, periodo enero-octubre de 2019*. Informe técnico, Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- Del Carpio, J., Rivera, M., Torres, J., Tavera, H., & Puma, N. (2022). *Evaluación del Peligro Volcánico en Perú: una herramienta para la gestión del riesgo de desastres*. Informe Técnico N°029-2022/IGP, Instituto Geofísico del Perú, Ciencias de la Tierra Sólida, Lima. Obtenido de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>
- Engdahl, R., Van Der Hilst, B., & Buland, R. (1998). Global Teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 722-743.
- Farrell, J., Smith, R., Taira, T., Chang, W., & Puskas, C. (2010). Dynamics and rapid migration of the energetic 2008-2009 Yellowstone Lake earthquake swarm. *Geophysical Research Letters*, 37(19).
- Gerbe, M., & Thouret, J. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of tephra erupted during the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 541-561.
- Gillard, D., Rubin, A., & Okubo, P. (1996). Highly concentrated seismicity caused by deformation of Kilauea's deep magma system. *Nature*, 384, 343-346.

- Glazner, A., & McNutt, S. (2021). Relationship Between Dike Injection and b-Value for Volcanic earthquake swarms. *Journal Geophysical Research: Solid Earth*, 126.
- Global Volcanism Program. (2004). *Report on Sabancaya (Peru)*. Reporte, Bulletin of the Global Volcanism Network, 29:1. doi:<https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN200401-354006>
- Hainzl, S. (2004). Seismicity patterns of earthquake swarms due to fluid intrusion and stress triggering. *Geophysical Journal International*, 159, 1090-1096.
- Hanks, T., & Kanamori, H. (1978). Moment Magnitude Scale No. 12 Transactions — American Geophysical Union. *American Geophysical Union*, 59, 1128.
- Hotovec-Ellis, A., & Jeffries, C. (20 de abril de 2016). Near Real-time Detection, Clustering, and Analysis of Repeating Earthquakes: Application to Mount St. Helens and Redoubt Volcanoes – Invited. *Seismological Society of America Annual Meeting*. Reno, Nevada.
- Huamán, M. (1995). *Métodos y aplicaciones de las imágenes de satélite en cartografía geológica: el caso del seguimiento y evolución de la amenaza volcánica del Sabancaya (región del Colca, Arequipa, Perú)*. Tesis pre-grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa.
- Huamán, R., & Guillande, R. (1990). Estudio del peligro volcánico utilizando métodos de teledetección: el volcán nevado Sabancaya (Arequipa, Perú). *Symposium Intern. Géodynamique Andine*, 387-389.
- Ibañez, J. (1997). *Apuntes de Sismología Volcánica*. Universidad de Granada, Instituto Andaluz de Geofísica.
- Ibañez, J., & Carmona, E. (2000). *Sismicidad volcánica*. Universidad de Granada, Instituto Andaluz de Geofísica.
- IGP. (22 de Marzo de 2023). *Centro Sismológico Nacional*. Obtenido de CENSIS: <https://ultimosismo.igp.gob.pe/descargar-datos-sismicos>
- Jay, J., Delgado, F., Torres, J., Pritchard, M., Macedo, O., & Aguilar, V. (2015). Deformation and seismicity near Sabancaya volcano, southern Peru, from 2002 to 2015. *Geophysical Research Letters*, 42.
- Johnson, J., & Aster, R. (2005). Relative partitioning of acoustic and seismic energy during Strombolian eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148, 334-354.
- Khan, M. S., Curilem, M., Huenupan, F., F., K. M., & Becerra Yoma, N. (2019). A Signal Processing Perspective of Monitoring Active Volcanoes [Applications Corner]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 36(6), 125-163.
- Lahr, J. (1999, revised 2012,). *HYPOELLIPSE: a computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first-motion pattern*. U.S. Geological Survey Open-File Report 99-23, U.S. Geological Survey .

- Lahr, J., Chouet, B., Stephens, C., Power, J., & Page, R. (1994). Earthquake classification, location and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system of the 1989-1990 eruptions at Redoubt volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 62, 137-151.
- Machacca, R., Lesage, P., Tavera, H., Pesicek, J., Caudron, C., Torres, J., . . . 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).
- MacQueen, P., Delgado, F., Reath, K., Matthew, E., Pritchard, M., Bagnardi, M., . . . Miranda, R. (2020). Volcano-Tectonic Interactions at Sabancaya Volcano, Peru: Eruptions, Magmatic Inflation, Moderate Earthquakes, and Fault Creep. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1-61. doi:10.1029/2019JB019281
- Mariño, J. (2002). *Estudio geológico vulcanológico y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú)*. Tesis pre-grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Mendivil, S. (1965). *Geología de los cuadrángulos de Maure y Antajave (Hojas 35-x, 35-y)*. Boletín 10, Comisión Carta Geológica Nacional.
- Mering, C., Huamán, R., Chorowicz, B., & Guillande, R. (1996). New data on the geodynamics of southern Perú from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images: Tecton. *Tectonophysics*, 259(1-3), 153-169.
- Pritchard, M., & Simons, M. (2002). A satellite geodetic survey of large-scale deformation of volcanic centres in the central Andes. *Nature*, 418, 167-171.
- Puma, N., Del Carpio, J., Rivera, M., Vargas, K., Machacca, R., & Lazarte, I. (2021). *Evaluación geofísica del comportamiento dinámico del volcán Sabancaya - Arequipa (Diciembre, 2020 - Marzo, 2021)*. Informe Técnico N°005-2021/IGP, Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- Puma, N., & Torres, J. (2020). *Evaluación y análisis de la actividad sísmica en el volcán Sabancaya, periodo 1990-2019*. Informe Vulcanológico, Instituto Geofísico del Perú.
- Puma, N., Rivera, M., Tavera, H., Centeno, R., Machacca, R., Vargas, K., . . . Del Carpio, J. (2020). *Evaluación geofísica del comportamiento dinámico del volcán Sabancaya (febrero – noviembre de 2020)*. Lima: Instituto Geofísico del Perú, informe técnico 005-2020/IGP.
- Ramos, D., & Antayhua, Y. (2011). *Sismicidad de la región del volcán Sabancaya, Arequipa (periodo 2009-2010)*. Lima. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1724>
- Rodríguez, A., & Huamán, D. (1992). *Actividad de los Volcanes Ubinas y Sabancaya*. Informe interno, Instituto Geofísico del Perú.

- Rodríguez, A., & Uribe, M. (1990). *Participación del IGP en relación con la reactivación del volcán Sabancaya*. Informe Interno, Instituto Geofísico del Perú, Arequipa.
- Rodríguez, A., & Uribe, M. (1994). *Participación del Instituto Geofísico del Perú en relación con la reactivación del volcán Sabancaya, provincia de Caylloma, región Arequipa*. Informe interno, Instituto Geofísico del Perú, Arequipa.
- Rubin, A., Gillard, D., & Got, J. (1998). A reinterpretation of seismicity associated with the January 1983 dike intrusion at Kilauea Volcano, Hawaii. *Journal of Geophysical Research*, 103(5), 10003.
- Samaniego, P., Rivera, M., Mariño, J., Guillou, H., Liorzou, C., Zerathe, S., . . . Scao, V. (2016). The eruptive chronology of the Ampato–Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 323, 110-128.
- SARA. (15 de 11 de 2016). *Proyecto de Evaluación del Riesgo para América del Sur*. Obtenido de <http://sara.openquake.org>
- Sébrier, M., & Soler, P. (1991). Tectonics and Magmatism in the Peruvian Andes from Late Oligocene Time to Present. *Geological Society of America Special paper*, 265, 259-278.
- Sébrier, M., Mercier, J., Megard, F., & Laubacher, G. (1985). Quaternary normal and reverse faulting and the State of Stress in the Central Andes of South Peru. *Tectonics*, 4, 739-780.
- Shelly, D., Hill, D., Massin, F., Farrel, J., Smith, R., & Taira, T. (2013). A fluid-driven earthquake swarm on the margin of the Yellowstone caldera. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 1-15.
- Siebert, L., Simkim, T., & Kimberly, P. (2011). *Volcanoes of the world: Third Edition*. Los Angeles, California: University of California Press.
- Tavera, H. (2001). *Catálogo sísmico del Perú 1471 - 1982*. Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- Tavera, H. (2023). *El sismo de Maca del 2 de junio, 2023 (M5.2): Precursores y réplicas (Provincia de Caylloma – Región Arequipa)*. Informe Técnico N°011-2023/IGP-CTS, Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- Tavera, H., & Centeno, E. (2021). *Sismo de Cabanaconde – Pinchollo del 8 de octubre 2021 (M5.5) – Región Arequipa*. Informe Técnico N°026-2021/IGP-CTS, Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- Tavera, H., Centeno, E., & Mamani, C. (2022). *El sismo de Maca del 16 de marzo, 2022 (M5.5) – Aspectos Sismológicos (Provincia de Caylloma – Región Arequipa)*. Informe Técnico N°010-2022/IGP-CTS, Instituto Geofísico del Perú, Lima.

- Tavera, H., Guardia, P., Condori, C., Fernandez, E., & Arredondo, L. (2013a). *Sismos de la región del volcán Sabancaya del 22 y 23 de febrero del 2013. informe inédito*. Informe Técnico N° 01-2013, Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- Tavera, H., Guzmán, J., Velarde, L., & Cuya, A. (2016). *Sismo de Ichupampa del 14 de agosto del 2016 (5.3ML), informe inédito*. Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- Tavera, H., Martínez, J., Fernández, E., Arredondo, L., Flores, C., & Millones, J. (2013b). *Sismo de Huambo-Cabanaconde (Arequipa) del 17 de julio, 2013 (5,7ML), informe inédito*. Informe Técnico N° 02-2013, Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- Tavera, H., Millones, J., Fernández, E., & Guardia, P. (2015). *Sismo de Cabanaconde (Arequipa) del 28 de febrero de 2015 (4.5ML), Aspectos Sismológicos*. Informe Técnico N° 01-2015, Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- Thouret, J., Wörner, G., Gunnell, Y., Singer, B., Zhang, X., & Souriot, T. (2007). Geochronologic and stratigraphic constraints on canyon incision and Miocene uplift of the Central Andes in Peru. *Earth and Planetary Science Letters*, 263, 151-166.
- Toda, S., Stein, R., & Sagiya, T. (2002). Izu island earthquake swarm that stressing rate governs seismicity. *Nature*, 419, 58-61.
- Travada & Córdova, V. (1752). El suelo de Arequipa convertido en cielo (Historia general de Arequipa). En *Primer Festival del libro Arequipeño* (Vol. edición 1958). 15Arequipa.
- USGS. (01 de Abril de 2023). *Search Earthquake Catalog*. Obtenido de https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/#%7B%22currentfeatureid%22%3Anull%2C%22mapposition%22%3A%5B%5B20.34463%2C-123.13477%5D%2C%5B52.88239%2C-66.88477%5D%5D%2C%22autoUpdate%22%3A%5B%22autoUpdate%22%5D%2C%22feed%22%3A%22undefined_undefined%22%2C%22
- Vargas, A., Villegas, J., Centeno, R., & Cruz, J. (2023). *Deformación en el entorno del volcán Sabancaya y caracterización de la fuente a partir del modelado con datos GNSS y DInSAR del periodo 2014-2021*. Informe Técnico N°016-2023/IGP, Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- Vargas, K., Villegas, J., Rivera, M., & Tavera, H. (2022). *Deformación superficial y secuencia sísmica en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri (Región Tacna)*. Informe Técnico N°026-2022/IGP, Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- Velarde, L., Tavera, H., Vargas, K., & Villegas, J. (2020). *Análisis de la Crisis Sísmica ocurrida en julio de 2020 en el distrito de Tarata (region - Tacna)*. Instituto Geofísico del Perú, Lima. Obtenido de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4832>
- White, R., & McCausland, W. (2015). Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. *Journal of Volcanology*

and Geothermal Research, 309, 139–155.
doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.10.020

Wright, T., Ebinger, C., Biggs, J., Ayele, A., Yirgu, G., Keir, D., & Stork, A. (2006). Magma maintained rift segmentation at continental rupture in the 2005 Afar dyking episode. *Nature*, 442, 291-294.

Zamácola, & Jaúregui. (1804). *Apuntes Para la Historia de Arequipa, Año de 1804*. 96.

